

# UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



Profesor Patrocinante:  
**Dr. Alejandro Rojas.**

Informe de Memoria de Título  
para optar al título de:  
**Ingeniero Civil Electrónico**

## Construcción y caracterización de actuador tipo compuerta vertical para canal de prueba

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN  
Facultad de Ingeniería  
Departamento de Ingeniería Eléctrica

Profesor Patrocinante:  
Dr. Alejandro Rojas.

# Construcción y caracterización de actuador tipo compuerta vertical para canal de prueba

Cristóbal Daniel Capponi Becker

Informe de Memoria de Título  
para optar al Título de

Ingeniero Civil Electrónico

Agosto 2012

## Resumen

En este documento se presenta el diseño y la implementación de un actuador tipo compuerta vertical para un micro canal de prueba, el cual será instalado en el Laboratorio de Control de Procesos de la Universidad de Concepción. Este proceso debe ser accionado a través de la utilización de un actuador neumático acoplado a un posicionador, el cual debe ser controlado mediante el uso de un controlador lógico programable. Equipo que proporciona las señales necesarias para poder controlar dicha compuerta y trasladarse por todo su rango de recorrido.

Esta implementación conlleva un análisis de la caracterización de dicha compuerta, la que permitirá a través de simulaciones, poder conocer su comportamiento como sus limitaciones, de tal manera de poder realizar una construcción de la compuerta para cada uno de los módulos del canal y que dicho sistema pueda ser utilizado por los futuros alumnos como profesores del departamento y así poder probar diferentes técnicas de control.

Otro aspecto de gran importancia en el área de control de procesos es la linealidad que poseen los diferentes equipos. En este trabajo se puede apreciar el comportamiento que tiene un sistema descalibrado (no lineal), contrastado con un sistema bien calibrado (lineal), lo que pretende mostrar la enorme diferencia que existe entre ambos y lo esencial que es lograr trabajar bajo esta característica.

Una de las grandes ventajas que se logra, a través de este trabajo, mediante la calibración del posicionador, es optimizar la linealidad del equipo en un 66.7%, pasando de 3 zonas de linealidad a solamente 1, lo que también lleva a mejorar la sensibilidad del sistema en un 25%.

Esta es la primera etapa del proyecto FONDECYT 11100080 , la cual seguirá su curso hasta ver completamente automatizado y controlado de manera remota tanto el canal como sus compuertas.



A los alumnos del Laboratorio de Control Automático del Departamento.



## Agradecimientos

Agradezco a mi familia completa, a mis padres Marianela y Fernando, a mis hermanos Camila y Pablo, a mi polola Paz Estefanía, a mis abuelos Nonno y Nonna, a mi querida Nenita, a mis tatas Beto y Lela, a mis amigos, por su constante apoyo en los momentos mas difíciles y que hicieron de esta etapa más humana y compartida, en especial a Gustavo por el trabajo realizado, al Profesor Alejandro por la confianza depositada, a Martin y a Señor Lillo y Don Pato por el trabajo, esfuerzo y tiempo invertido. A todas las personas que entregaron un grano de arena en la creación de este documento.

Dedico este escrito en especial a la familia de mi madre, debido al complicado año que nos ha tocado vivir en lo emocional, al ver la partida de nuestros seres queridos.



# Tabla de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
1.2. TRABAJOS PREVIOS.....	2
1.2.1 <i>Discusión</i> .....	4
1.3. HIPÓTESIS DE TRABAJO.....	5
1.4. OBJETIVOS.....	5
1.4.1 <i>Objetivo General</i> .....	5
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i> .....	5
1.5. ALCANCES Y LIMITACIONES.....	6
1.6. TEMARIO Y METODOLOGÍA.....	6
<b>CAPÍTULO 2. TEORÍA.....</b>	<b>8</b>
2.1. DEDUCCIÓN DE ECUACIONES DE SAINT-VENANT.....	8
2.2. FUERZA HIDROSTÁTICA QUE ACTÚA SOBRE LA COMPUERTA.....	9
2.2.1 <i>Compuerta tipo Guillotina</i> .....	12
2.3. ACTUADOR NEUMÁTICO BAUMANN.....	14
2.4. PROCEDIMIENTO PARA EL CÁLCULO DEL GRADO DE INCLINACIÓN DEL FIERRO CON LA GANANCIA RESPECTIVA.....	16
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO.....</b>	<b>18</b>
3.1. DISEÑO DEL CANAL DE PRUEBA.....	18
3.2. DISEÑO DEL BRAZO/FIERRO.....	18
3.3. DISEÑO DE LA COMPUERTA.....	19
3.4. DISEÑO DEL GABINETE PARA PLC.....	21
3.5. DISEÑO DEL GABINETE PARA EL CABLEADO DEL PLC.....	23
3.6. CABLEADO DEL PLC CON SUS MÓDULOS.....	25
<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS.....</b>	<b>30</b>
4.1. PUESTA EN MARCHA.....	30
4.2. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA SIN CALIBRACIÓN.....	33
4.2.1 <i>Linealidad</i> .....	33
4.2.2 <i>Repetibilidad</i> .....	35
4.2.3 <i>Histéresis</i> .....	36
4.3. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DINÁMICA SIN CALIBRACIÓN.....	37
4.4. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN ESTÁTICA CON CALIBRACIÓN.....	41
4.4.1 <i>Linealidad</i> .....	41
4.4.2 <i>Repetibilidad</i> .....	42
4.4.3 <i>Histéresis</i> .....	44
4.5. ANÁLISIS DE LA CARACTERIZACIÓN DINÁMICA CON CALIBRACIÓN.....	45
4.5.1 <i>Respuesta del sistema desde el reposo con membrana contraída</i> .....	45
4.5.2 <i>Respuesta del sistema en reposo con membrana dilatada</i> .....	51
4.6. ANÁLISIS DE LA RESPUESTA EN FRECUENCIA.....	54
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES.....</b>	<b>58</b>
5.1. SUMARIO.....	58
5.2. CONCLUSIONES.....	60
5.3. TRABAJO FUTURO.....	62
<b>ANEXO A. LEYES IMPORTANTES.....</b>	<b>65</b>
A.1. TÉCNICAS DE IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS.....	65
A.2. DIFERENTES MÉTODOS DE PROGRAMACIÓN DEL PLC.....	66

# Lista de Tablas

<b>TABLA 2.1</b> Parámetros para el diseño del canal.....	11
<b>TABLA 2.2</b> Valores del largo del brazo/ferro.....	17
<b>TABLA 3.1</b> Listado de componentes utilizados en el gabinete.....	23
<b>TABLA 3.2</b> Listado de componentes para cableado del PLC en el gabinete.....	24
<b>TABLA 3.3</b> Lista de módulos instalados en el chasis 1756A7/B.....	26
<b>TABLA 3.4</b> Terminales y sus canales respectivos para el módulo análogo de entrada.....	27
<b>TABLA 3.5</b> Terminales y sus canales respectivos para el módulo análogo de salida.....	28
<b>TABLA 4.1</b> Zonas de linealidad del posicionador.....	34
<b>TABLA 4.2</b> Zonas de linealidad del posicionador.....	42



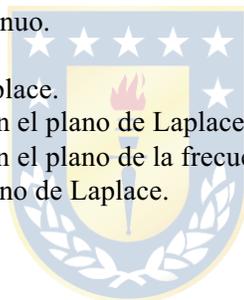
# Lista de Figuras

Fig. 2.1 Canal vista frontal.....	11
Fig. 2.2 Sección transversal [5 ].....	12
Fig. 2.3 Vista lateral del actuador neumático Baumann [6].....	15
Fig. 2.4 Representación triangular del movimiento del brazo/fierro.....	16
Fig. 3.1 Simulación de canal de prueba.....	18
Fig. 3.2 Grado de libertad del brazo/fierro.....	19
Fig. 3.3 Compuerta Guillotina.....	20
Fig. 3.4 Acoplamiento del brazo con la compuerta..	21
Fig. 3.5 Acoplamiento final del sistema. ....	21
Fig. 3.6 Diseño y distribución de piezas del gabinete.....	22
Fig. 3.7 Chassis Allen Bradley 1756A7/B [10].....	26
Fig. 3.8 Chassis Allen Bradley 1756A7/B con sus módulos.....	26
Fig. 3.9 Terminales de conexión del módulo análogo de entrada [15].....	27
Fig. 3.10 Terminales de conexión del módulo análogo salida [16].....	28
Fig. 3.11 PLC cableado y alimentado.....	29
Fig. 4.1 Diseño final de sistema acoplado.....	30
Fig. 4.2 Linealidad del posicionador sin calibración.....	33
Fig. 4.3 Repetibilidad del posicionador sin calibración.....	35
Fig. 4.4 Histéresis del posicionador sin calibración.....	36
Fig. 4.5 Secuencia de frames de la respuesta dinámica.....	38
Fig. 4.6 Respuesta en el tiempo de cada zona.....	38
Fig. 4.7 Curva de linealidad del posicionador con calibración.....	41
Fig. 4.8 Curva de repetibilidad del posicionador con calibración.....	43
Fig. 4.9 Curva de histéresis del posicionador con calibración.....	44
Fig. 4.10 Respuesta en el tiempo ante escalón del 80%.....	45
Fig. 4.11 Respuesta en el tiempo utilizando la F. de T. encontrada, ante escalón del 80%.....	49
Fig. 4.12 Respuesta en el tiempo contrastada con la respuesta experimental, ante escalón del 80%.....	50
Fig. 4.13 Respuesta en el tiempo ante escalón del 60%, sin partir del reposo.....	51
Fig. 4.14 Respuesta en el tiempo contrastada con la respuesta experimental, ante escalón del 20 al 80%.....	53
Fig. 4.15 Diagrama de Bode de la F. de T. obtenida en (27).....	56
Fig. 4.16 Diagrama de Bode de la F. de T. obtenida en (34).....	57
Fig. A.1 Método de la tangente [13].....	65
Fig. A.2 Algoritmo de programación en texto estructurado.....	67
Fig. A.3 Algoritmo de programación en formato ladder.....	68

# Nomenclatura

## Escalares

$k$	: ganancia del sistema.
$\log\{\}$	: logaritmo en base 10.
$g$	: aceleración de gravedad.
$A$	: área hidráulica.
$R$	: radio hidráulico.
$n$	: coeficiente de fricción de Manning.
$P$	: perímetro mojado.
$S_f$	: pendiente de fricción.
$S_0$	: pendiente de fondo del canal.
$u(t)$	: entrada escalón en el tiempo.
$u(s)$	: entrada escalón en el plano de Laplace.
$\ e\ $	: norma del elemento $e$ .
$\delta$	: banda de establecimiento.
$\omega_c$	: frecuencia de cruce.
$t_s$	: tiempo de asentamiento.
$f(t)$	: función en el tiempo continuo.
$F_R$	: fuerza resultante.
$f(s)$	: función en el plano de Laplace.
$G(s)$	: función de transferencia en el plano de Laplace.
$G(\omega)$	: función de transferencia en el plano de la frecuencia.
$Y(s)$	: función de salida en el plano de Laplace.
$t_s$	: tiempo de subida.



## Abreviaciones

### Mayúsculas

EDO	: ecuación diferencial ordinaria.
ATR	: air to retract.
S.V.	: Saint-Venant.
L.A.	: lazo abierto.
L.C.	: lazo cerrado.
L.D.	: lazo directo.
F. de T.	: función de transferencia.
P.L.C.	: controlador lógico programable.
B.W.	: ancho de banda.
E.S.	: entrada/salida.
S.P.	: set-point.
S.S.	: estado estacionario.
SISO	: sistema de una entrada y una salida.

P.I.D.	: controlador proporcional integral derivativo.
S.P.	: sobrepaso.
M.G.	: margen de ganancia.
M.F.	: margen de fase.
T.L.	: transformada de Laplace.
CPU	: unidad de control de procesos.
HD	: alta definición.
D. de B.	: diagrama de Bode.



# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1. Introducción General

La ingeniería hoy en día puede ser aplicable para mejorar la vida de las personas, de los hogares, de la sociedad en la que se vive, maximizando la utilización de recursos mediante el uso inteligente de la tecnología, aprovechando la tierra para cultivar, el agua para todo tipo de usos y el sol para captar la energía que se obtiene de él, y así poder crecer de manera civilizada, para darle un respiro al planeta, ya que la vida comenzó aproximadamente hace 4000 millones de años, y nosotros, los hombres, solo existimos hace 200.000 años, y desafortunadamente, hoy en día todo se acelera.

Los primeros signos de riego se remontan a 6000 a. c. en Egipto y Mesopotamia, cuyos pobladores utilizaban el Río Nilo, Tigris o Éufrates y sus afluentes respectivos para proveer de agua a sus cultivos, usando las inundaciones que ocurrían desde Julio a Diciembre, las cuales eran desviadas durante 60 días, para luego drenarla hacia el río en el momento preciso del ciclo del cultivo. Es por esto que se pueden desarrollar ideas para implementar el prototipo más avanzado en redireccionamiento de aguas para una gran represa, como también mejorar la calidad de vida de una pequeña comunidad, aprovechando los recursos naturales con los que ellos cuentan. Es así como surge esta inquietud y propuesta a la vez, como poder ser parte de la construcción y la automatización de un canal de regadío, para así usar este recurso, el agua, de la manera más confiable posible, ahorrando tiempo y de forma eficiente. Es por esto que realizar este proyecto y ser parte de su implementación es desafiante, como también interesante, aun sabiendo que no finalizará delante de nuestros ojos, se siente un orgullo enorme poder aportar en su diseño, y así, ser un aporte para las futuras generaciones, las cuales podrán utilizarlo en el Laboratorio de Control Automático del Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad.

## 1.2. Trabajos Previos

- ♣ Varawoot Vudhivanich ; Wich Sriwongsa ; , "Development of a Canal Automation Model: A Laboratory Experiment." , Kasetsart J., National Science, vol.45, pp.353-365, Mar.-apr. 2011.

En la Universidad de Kasersart, Tailandia, se desarrolló la automatización de un canal de regadío a escala, el cual consistió en la implementación de 4 compuertas robóticas, las cuales se ubican contra la corriente y una compuerta al inicio para controlar el flujo de entrada. En cada uno de los tramos (4) se buscó controlar el flujo y nivel mediante el accionamiento de cada una de las compuertas para dividir cada una de las secciones respectivas. Cada una de las compuertas robóticas trabaja en 3 modos, el primero (modo 0) es "telemetry" o mediciones a distancia, el segundo (modo 1) es "automatic", y el ultimo modo (modo 2) es "remote control". El control de nivel en cada uno de los tramos se comportó de manera óptima para la mayoría de los casos, pero los máximos errores promedio que se obtuvo de las 4 secciones alcanzaron valores de 6.6, 9.4, 20.5 y 29.2% respectivamente, lo que para la primera sección es aceptable, para la última es un valor muy elevado. La experiencia demostró que las robo compuertas tipo guillotina removían el efecto de turbulencia causado por el flujo de entrada, estabilizando el sistema por un período entre 2 y 8 minutos. Este proyecto también demostró que se pueden utilizar este tipo de compuertas para controlar el flujo en un canal de regadío.

- ♣ Aguilar, J.V.; Langarita, P.; Linares, L.; Rodellar, J.; , "Automatic Control of Flows and Levels in an Irrigation Canal," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.45, no.6, pp.2198-2208, Nov.-dec. 2009

La modernización de los canales se está convirtiendo en la estrategia más utilizada para mejorar la eficiencia y la flexibilidad operacional del agua. Existen pequeñas desviaciones en los valores que se necesitan para mantener un flujo constante dentro de un canal, valores que a la larga pueden significar un desperdicio de agua, que para algunas zonas extremadamente áridas, como los desiertos, pueden ser muy significativos y hacer la diferencia. Los sistemas de control automático están siendo considerados como la alternativa más viable para incrementar el desempeño de las operaciones manuales tradicionales. En este documento se describe la implementación de dos

sistemas de control en el canal de Lodosa, uno de los canales que transporta agua hacia España. El sistema que se utiliza es un básico control PI (Proporcional Integrativo) y un control adaptativo predictivo (ADEX), respectivamente, que son unas de las metodologías más usadas en procesos de control en las diferentes industrias en estos días.

Los métodos PI y ADEX controlan las variables y sus correspondientes acciones de control, las cuales son las aperturas de las compuertas. En el caso del control PI, la apertura de las compuertas se desarrolló con una pequeña diferencia en su magnitud, comparado con el ADEX, debido a la acción del controlador expuesto a grandes ganancias del sistema. Para el caso ADEX, el control de las compuertas está dentro de los rangos satisfactorios. Uno de los principales problemas fue mantener un acotado movimiento en las compuertas, debido al tiempo de respuesta y al retardo que presentaba el sistema.

- ♣ Cantoni, M.; Weyer, E.; Yuping Li; Su Ki Ooi; Mareels, I.; Ryan, M.; , "Control of Large-Scale Irrigation Networks," Proceedings of the IEEE , vol.95, no.1, pp.75-91, Jan. 2007

Los canales de irrigación de agua que se usan hoy en día son de una tremenda ayuda para el desarrollo sustentable de la agricultura. Una de las grandes maneras de poder utilizar este recurso de la mejor forma es mediante un modelo realimentado, usando sensores, actuadores, procesamiento de datos y recursos de comunicación, para así tener una mayor eficiencia al momento del riego.

Esta investigación nos traslada a Australia, donde existen más de 7000km de canales de irrigación, los cuales no utilizan bombas para inyectar agua, sino solamente la fuerza de gravedad para transportarla. La pérdida que existe en los canales en el país de Oceanía es grande, del orden del 25%, ya que muchas veces el agua se desborda y ni siquiera se utiliza. Es por esto que la distribución y la eficiencia van de la mano, ya que realizando bien estas labores, se pueden asegurar niveles por debajo del crítico, y así no caer en una sobre carga de agua.

Existen modernas redes de irrigación, las cuales mediante la implementación de la correcta infraestructura, como sensores de nivel y actuadores, vinculados a través de la supervisión de control y adquisición de datos a través las redes de comunicación (SCADA), pueden utilizarse de la siguiente manera, en cada una de las compuertas:

- Medición del nivel antes de la compuerta (upstream), o después de la compuerta (downstream) .
- Electromecánicamente fijar la posición de la compuerta.

- Procesar la información local y transmitirla a la central para tomar las acciones de control pertinentes.

Con esta implementación se puede hablar de sistemas realimentados, y de sistemas predictivos de comportamiento.

Debido al gran número de actuadores y sensores, en las redes de irrigación a gran escala, las fallas están propensas a ocurrir, en ciertas ocasiones. Es por esto que es importante utilizar mecanismos que detecten a los sensores que presenten errores, para así, puedan ser reemplazados y minimizar las consecuencias de esa falla.

- ♣ "Fluid id Mechanics", Robert W. Fox, Alan T. McDonald and Philip J. Richard, Nelson-Thornes, 2003.

Los fluidos estáticos son sustancias que se deforman constantemente, si se le aplica cualquier presión o barrera. La presión generada en un fluido estático es un fenómeno muy interesante en muchas situaciones prácticas, ya que usando los principios de la hidrostática, podemos determinar las fuerzas ejercidas en objetos sumergidos en fluidos, como también desarrollar instrumentos para medir estos comportamientos y así deducir las propiedades de los océanos y la atmósfera.

Usando este libro se puede calcular la cantidad precisa de fuerza ejercida en cada una de las compuertas a diseñar, lo que para efectos de implementación, es de tremenda ayuda debido a que se quiere construir un modelo estable, de respuesta rápida, que resista el stress del agua.

### 1.2.1 Discusión

En los documentos citados anteriormente se pudo obtener un modelo a escala del comportamiento de un canal con robo-compuertas controlado remotamente, con sus posibles aplicaciones, así como también la forma de calcular las fuerzas que se ejercen sobre las compuertas. En la revisión realizada también se pudo obtener las ecuaciones de "momentum" y "continuidad" de Saint-Venant, las cuales nos indican el comportamiento que tendrá el fluido antes y después de las compuertas, con su respectiva turbulencia generada por estas.

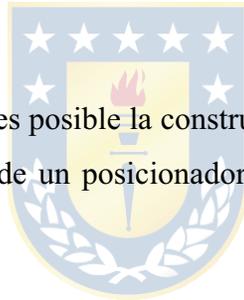
Para efectos de implementación de este trabajo, las literaturas son de vital importancia, debido a que hablan acerca de las desventajas y limitaciones que puede tener cada uno de los

métodos, como las ventajas que pueden entregar, al momento de aplicar un control de flujo de entrada o un control de nivel, como también la resistencia de los embates del agua sobre las compuertas a diseñar. En este trabajo, para efectos de cálculo, se pretende plasmar el método de poner en el peor de los escenarios posibles al canal, mediante las ecuaciones de Manning, las cuales nos entregan el caudal máximo posible y la velocidad del agua en un canal tipo, sin tener en cuenta la división proporcionada por las compuertas, la que hace a cada uno de los tramos comportarse de manera diferente.

También se plantea en este documento el diseño, cableado, conexión, construcción y programación de un PLC (Programmable Logic Controller), mediante el cual, se podrá manejar el actuador del posicionador, el cual tiene la difícil tarea de mover la compuerta del canal de regadío, la cual servirá para realizar diferentes pruebas, como lograr controlar nivel del canal, medir el caudal del agua o obtener el flujo de descarga de este.

### **1.3. Hipótesis de Trabajo**

Este trabajo pretende mostrar si es posible la construcción de un actuador, para compuerta de micro canal estándar, mediante el uso de un posicionador neumático. El cual debe ser controlado mediante un PLC.



### **1.4. Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo General**

Construcción y caracterización del actuador, tipo compuerta vertical, para un canal de prueba.

#### **1.4.2 Objetivos Específicos**

- Entender la problemática involucrada en el análisis hidrostático de una compuerta.
- Proponer soluciones de diseño para la construcción del actuador.
- Lograr movimiento del actuador neumático Baumann.
- Obtener la ganancia necesaria para poder abrir/cerrar la compuerta.
- Construcción de PLC.
- Implementar en hardware la solución de diseño mas promisoría para el canal de prueba a

considerar.

- Documentar a través de un manual detallado el uso y comportamiento de la compuerta tipo guillotina.

## 1.5. Alcances y Limitaciones

- Se utilizará el actuador de vástago deslizante Baumann disponible, en el Laboratorio de Control del DIE de la UdeC.
- Diseño, construcción, cableado del PLC.
- Rutina de programación de PLC para apertura y cierre de compuerta.
- Construcción y conexión de componentes de compuerta propuesta.
- Proponer estrategia para censar las acciones del posicionador, una vez montado el sistema, para proceder con la caracterización del actuador.

## 1.6. Temario y Metodología



Para intentar comprobar la hipótesis planteada anteriormente, debemos ser riguroso a la hora de elegir los pasos a seguir, y así, lograr las distintas etapas que necesita este trabajo para su completo funcionamiento. En el capítulo 2 se muestra la teoría que se requiere para resolver las primeras inquietudes planteadas, esto hace mención al comportamiento que tendrá el agua en el canal, ya que a través de las ecuaciones de Saint-Venant se puede obtener una idea de la distribución de fuerzas, como de las condiciones que presenta el agua. También se debe trabajar con la ecuación de Manning, la cual nos entrega la información necesaria a la hora de construir nuestros equipos, elegir su material, su espesor y su tamaño, y también a la hora de diseñar el canal, el brazo mecánico y las compuertas. Para el movimiento de las compuertas se dispone de un actuador neumático Baumann, el cual tiene acoplado un posicionador Fisher DVC6010, el cual efectúa el movimiento, utilizando el protocolo Hart de comunicación, el cual posee un vástago que tiene un recorrido de  $\frac{3}{4}$  de pulgada, lo que plantea una desafiante experiencia a la hora de tener que lograr una ganancia de gran magnitud para alcanzar dicha apertura y cierre de la compuerta. Para mover esta estructura plana se debe diseñar un brazo mecánico, el cual será el encargado de lograr tal ganancia. También se debe realizar el diseño de la estructura que sostiene al actuador, la cual debe ser variable para

diferentes alturas, ya que cada una de las compuertas necesitará dimensiones diferentes. Todos los movimientos que se generen serán accionados a través de un PLC, el cual debe ser construido y puesto en marcha para lograr cada uno de los objetivos planteados. Otro aspecto que se debe llevar a cabo es la construcción de un canal de prueba, a escala, con la misma medida que el original pero de menor longitud, el cual permitirá probar la hipótesis planteada anteriormente y con esto conseguir la construcción y caracterización del actuador.



## Capítulo 2. Teoría

---

### 2.1. Deducción de ecuaciones de Saint-Venant.

El comportamiento y la distribución del agua en condiciones permanentes en un canal de regadío (modelo hidrológico) se muestra de diferentes maneras, y para determinar su conducta se utilizan diversas técnicas, tales como ecuaciones de energía, de continuidad y de momentum (EDOs). El modelo que se presentará a continuación es un breve resumen de lo investigado por: [3] Ven Te Chow, David R. Maidment y Larry W. Mays, de su libro "Hidrología Aplicada". Estas expresiones matemáticas se pueden agrupar en el modelo de Saint-Venant, el cual considera los principales efectos hidráulicos de transporte que se presentan en este tipo de sistemas a través de los principios de conservación de masa y de la conservación de la cantidad de movimiento, todo esto bajo ciertas hipótesis simplificadoras.

- *El flujo es unidimensional e incompresible, esto es, a una densidad constante. El tirante hidráulico y la velocidad del flujo varían sólo en la dirección del eje longitudinal del canal. La velocidad es uniforme y la superficie libre es horizontal a través de cualquier sección perpendicular al eje.*

- *Las líneas de flujo no tienen curvatura pronunciada, esto significa que el flujo varía gradualmente a lo largo el canal, de forma que las aceleraciones verticales puedan considerarse despreciables. Esto implica que la distribución de presiones sea hidrostática.*

- *El fondo del canal es fijo y de pendiente pequeña, de modo que la profundidad del flujo y el tirante son aproximadamente idénticos, de tal suerte que los efectos de socavación y deposición son despreciables.*

- *Los coeficientes de resistencia para flujo uniforme permanente turbulento son aplicables de forma que relaciones como la ecuaciones de Manning pueden utilizarse para describir los efectos de resistencia.*

Considerando las hipótesis descritas anteriormente y aplicando los principios de conservación de la cantidad de movimiento y de masa, a un volumen de control elemental de

longitud " $dx$ " en un tramo elemental de un canal tipo, se presentan las ecuaciones de Saint-Venant en (1) y (2) respectivamente.

La "*Ecuación de Continuidad*" para un flujo no permanente de densidad variable a través de un volumen de control se muestra como:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

Para la "*Ecuación de Momentum*" nos trasladamos a la segunda ley de Newton. En esta ecuación se establece que la suma de las fuerzas aplicadas es igual a la tasa de cambio del "*momentum*" almacenado dentro del volumen de control, más el flujo de salida neto de "*momentum*" a través de la superficie de control. De acuerdo al teorema de Transporte de Reynolds dicha expresión matemática queda expresada como:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \left( \frac{\partial(Q^2/A)}{\partial x} \right) + gA \left( \frac{\partial y}{\partial x} - S_0 + S_f \right) = q \cdot V \quad (2)$$

En donde:

$A(x, t)$  es el área hidráulica [ $m^2$ ].

$Q(x, t)$  el gasto [ $m^3/s$ ] que circula por  $A$ .

$V(x, t)$  la velocidad media [ $m/s$ ] en la dirección del flujo.

$q(x)$  descarga lateral [ $m^2/s$ ] ( $q > 0$  : flujo entrante y  $q < 0$  : flujo saliente).

$y(x, t)$  tirante hidráulico [ $m$ ].

$S_f(x, t)$  pendiente de fricción.

$S_0$  pendiente del fondo del canal.

$g$  aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ].

## 2.2. Fuerza Hidrostática que actúa sobre la compuerta

Para poder diseñar el tipo de compuerta a utilizar en el canal de prueba se deben analizar las distintas posibilidades que existen, una de ellas es la funcionabilidad, simpleza y resistencia de esta, para así asegurar que la compuerta respectiva no colapse con el empuje del agua. Tras una serie de conversaciones con estudiantes y académicos, incluyendo el laboratorio de Hidráulica de Ingeniería Civil de la Universidad, se optó por 2 tipos de compuertas, una de forma plana, con movimiento de

guillotina, y la otra de forma arqueada, de movimiento circular, para así tener 2 distintos tipos de comportamiento del agua, al momento de apertura o cierre, para el canal de prueba. La compuerta plana será diseñada, construida y caracterizada completamente en esta investigación, con lo que se podrán obtener conclusiones acerca de su dinámica y conducta, para así disponer de la información necesaria a la hora de tomar decisiones con respecto a que compuerta construir el canal en el laboratorio.

Con la ecuación de Manning se pueden obtener los parámetros característicos de la dinámica del fluido a través del canal. Con estos parámetros, se puede saber con qué velocidad fluye y cuales son las especificaciones de los equipos que se deben comprar. La representación matemática de Manning está definida por:

$$V = \frac{R^{2/3} S_f^{1/2}}{n} \quad (3)$$

en donde

Q = Caudal que circula por A [ $m^3/s$ ]

R = Radio hidráulico [m]

A = Área hidráulica [ $m^2$ ]

n = coeficiente de fricción de Manning [ $s/m^{1/3}$ ]

P = perímetro mojado [m]

$S_f$  = Pendiente de fricción

Como sabemos que  $V = \frac{Q}{A}$ , entonces la ecuación queda de la siguiente manera:

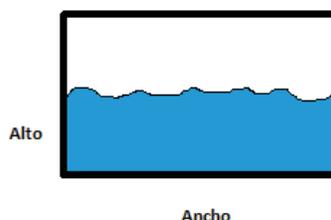
$$Q = \frac{R^{2/3} S_f^{1/2} A}{n} \quad (4)$$

Como se conoce, caudal es la cantidad de metros cúbicos que fluyen por un área por segundo. El radio hidráulico en la ecuación de Manning (4), se define como el área mojada dividido por el perímetro mojado. El área mojada corresponde al área transversal del canal que permanecerá bajo agua. Consideramos que estará en profundidad la mitad del canal, por lo que el área mojada corresponde a  $0,023[m^2]$ . El perímetro mojado por lo tanto será  $4 \cdot 0,15 = 0,6[m]$ .

$$R = \frac{\text{Área mojada}}{\text{Perímetro mojado}} = \frac{0,023}{0,6} = 0,0388 [m]$$

El factor de rigurosidad está dado por una constante que define una superficie que no presenta un roce significativo que impida el flujo de agua con libertad. Este es de  $0,01 \left[ \frac{s}{m^{1/3}} \right]$ .

La pendiente de fricción indica cuanto es la inclinación que tiene el canal de regadío. En este caso, se consideró que el canal tendría como máximo un desnivel de  $2^\circ$ . Utilizando las reglas trigonométricas, tenemos que con un canal de 4 metros de largo la constante  $S_f$  está dada por 0,035.



**Fig. 2.1 Canal vista frontal.**

Por las características del canal que se utilizan, entonces los parámetros que están en contenidos en (4) quedan representados de la siguiente manera:

**TABLA 2.1 Parámetros para el diseño del canal.**

Parámetro	Valor
$R$	0,038 [m]
$A$	0,023 [m <sup>2</sup> ]
$n$	0,010 $\left[ \frac{s}{m^{1/3}} \right]$
$S_f$	0,035
$Q$	0,047 [m <sup>3</sup> /s]
$V$	2,093 [m/s]

En la TABLA 2.1 se muestran los distintos parámetros que se deben tener en cuenta a la hora del diseño del canal, ya que existen parámetros impuestos por el fabricante, como también los resultados que arroja (4), ya que se debe poner especial cuidado en 2 de ellos, el caudal ( $Q$ ) y la velocidad ( $V$ ), esto es:

- El caudal que circulará, el cual es de  $0,047 \left[ \frac{m^3}{s} \right]$ , nos entrega una información relevante, ya que atravesarán 47 litros de agua por el canal, lo que genera bastante

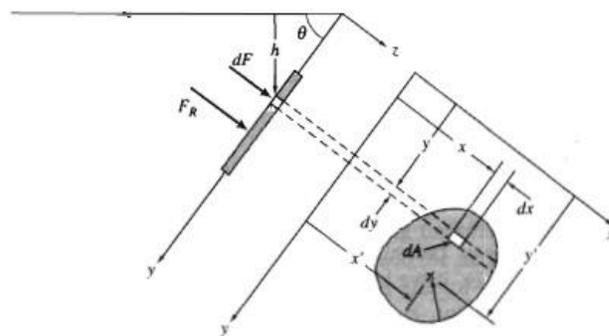
presión a las paredes de este.

- La velocidad por otro lado, es de  $2.093 \text{ [m/s]}$ , la cual nos indica, que con esos  $2^\circ$  de inclinación, el canal se vaciará en 3 segundos aproximadamente, ya que el agua recorrerá los 6 metros del canal en ese tiempo, por ende se debe tener especial cuidado al momento de elegir la bomba, que será la encargada de alimentar constantemente el canal. Cabe mencionar que este caso es ideal, esto es, los 6 metros del canal están divididos en 4 secciones o módulos, por compuertas, las cuales se manejan de forma independiente cada una, por ende esta velocidad impuesta por el agua es para el peor de los casos, en el cual todas las compuertas se encuentran abiertas y no se oponen al paso del fluido.

Para determinar la fuerza que ejerce el fluido sobre la compuerta se revisaron diversos editoriales de mecánica de fluidos, para así tener una idea aproximada a la realidad de cuanta presión se aplica sobre una cierta dimensión, lo que nos entrega la fuerza.

### 2.2.1 Compuerta tipo Guillotina

Una superficie plana sumergida en un fluido, para la cual se quiere determinar el resultado de la fuerza hidrostática que actúa sobre ella, se muestra en la **Fig. 2.2** Así como se quiere obtener la magnitud de la fuerza resultante,  $F_R$ , también se desean obtener los puntos de localización en los ejes  $[X \text{ e } Y]$  donde actúan las fuerzas respectivamente.



**Fig. 2.2 Sección transversal [5 ].**

Como no hay oscilaciones en el fluido, la fuerza hidrostática en cualquier elemento de la superficie actúa normal a la superficie. En el elemento  $dA = dx dy$ , la fuerza ejercida por la presión esta dada por:

$$dF = p dA \quad (5)$$

La fuerza resultante  $[F_R]$  actuando sobre toda la superficie se encuentra sumando las fuerzas infinitesimales en toda el área. Usualmente cuando se suman fuerzas se debe hacer vectorialmente, sin embargo, en este caso todas las fuerzas infinitesimales son perpendiculares al plano, por ende la magnitud de la fuerza resultante está representada por:

$$F_R = \int_A p dA \quad (6)$$

A continuación se mostrará el razonamiento matemático para la estimación de los cálculos mencionados anteriormente. Vale la pena mencionar que se esta calculando la fuerza que actúa en el peor de los casos, esto es, si estuviese el canal lleno hasta el tope con agua. Por ende el desarrollo es el siguiente:

$$A = 0,045[\text{m}^2]$$

$$\text{Peso específico}_{\text{H}_2\text{O}} = p = \rho \cdot g = 9800[\text{N}/\text{m}^3]$$



$$F_R = \int_A p dA = \rho g \int_0^{0,15} \int_0^{0,3} y dy dx = \rho g [0,15] \cdot \left[\frac{0,3^2}{2}\right] = 66,15[\text{N}]$$

Para obtener la localidad se tiene que lo siguiente:

-En  $x'$ , ver **Fig. 2.2**

$$x'F_R = \int_A x \cdot p dA = \rho g \int_0^{0,3} \int_0^{0,15} xy \cdot dx dy = \rho g \left[\frac{0,3^2}{2}\right] \cdot \left[\frac{0,15^2}{2}\right] = 0,075[\text{m}] \quad (7)$$

- En  $y'$ , ver **Fig. 2.2**

$$y'F_R = \int_A y \cdot p dA = \rho g \int_0^{0,3} \int_0^{0,15} y^2 \cdot dx dy = \rho g [0,15] \int_0^{0,3} y^2 dy = \rho g [0,15] \left[\frac{0,3^3}{3}\right] = 0,2[\text{m}] \quad (8)$$

Con estos valores encontrados anteriormente se puede inferir que la fuerza que debe resistir la compuerta es de 66,15[N]. Basándose en la siguiente conversión, la cual indica que  $1[\text{Kg-fuerza}]=9,80665[\text{N}]$  se puede determinar que se ejerce sobre la compuerta un peso de 6,75[Kg] aproximadamente, lo que puede ayudar a determinar el material a utilizar para la construcción de la compuerta, el cual debe soportar dicha fuerza o peso.

Para efectos de localidad, se tiene esta medición de arriba hacia abajo en el eje Y, lo que entrega una información de 0,2[m] o 20[cms], a 10[cms] del suelo. Para su horizontalidad se tiene que la mayor fuerza ejercida sobre la compuerta se ubicara justo en la mitad de su eje X, a 7,5[cms].

### 2.3. Actuator neumático Baumann.

Para lograr el movimiento de la compuerta se requiere de un equipo que ejerza una fuerza hacia arriba/abajo. En este caso se trabaja con un actuador neumático, el cual tiene las características necesarias para mover un elemento de un gran peso, lo que para este caso permite lograr dicho desplazamiento. Se acciona mediante un circuito cerrado de 4 a 20 [mA] y una conexión de aire comprimido. El recorrido del vástago de este aparato es pequeño, en relación a la cantidad de centímetros que se quiere levantar la compuerta. La máxima longitud que logra el vástago es de 2,1[cms]. El actuador neumático posee la singular característica de trabajar en modo ATR (Air to Retract), el cual, mediante el uso del aire comprimido se contrae para realizar movimiento, esto indica que en su posición inicial, en reposo, se encuentra completamente extendido/abierto. También cuenta con una realimentación física, la cual se debe fijar al vástago para poseer la información de su recorrido. Esta pieza es fundamental a la hora de tener precisión y lograr la mayor sensibilidad posible.

Para el caso del aire, se le impone una presión que fluctúa entre 90 y 110[psi], la que es entregada por el sistema de aire comprimido de la Universidad. El actuador teóricamente debe entregar una respuesta rápida hacia una entrada, un set-point. Internamente este contiene un regulador de presión, el cual se encarga de normalizar la presión de entrada, esto es al conectar un circuito de aire comprimido mayor al que puede soportar, este atenúa la presión, para que este pueda trabajar en la zona de confort del equipo, la que no puede sobrepasar los 35[psi], por lo que el atenuador de presión logra fijar en 22[psi] su presión de entrada. La fuerza total que realiza el actuador puede ser representada en la **Fig. 2.3**.

El área del actuador viene dada por un cilindro

$$A_{actuador} = 2\pi r(h + r) = 2\pi \cdot 13(9.5 + 13) = 0,183783[m^2] \quad (9)$$

En el manual del actuador neumático Baumann, se presenta una tabla la presión que ejerce el vástago de dicho equipo, la cual tiene un rango entre 10 y 15[psi], esto es:

$$10[\text{psi}] = 68947,57 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

$$15[\text{psi}] = 103421,35 \left[ \frac{N}{m^2} \right]$$

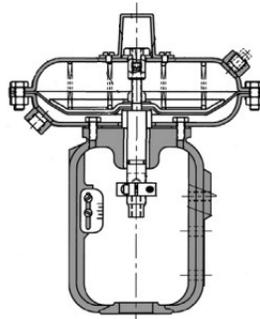
Con esta información, se puede calcular la fuerza máxima y mínima que ejerce el actuador, de la siguiente manera:

$$F_{10} = 68947,57 \left[ \frac{N}{m^2} \right] \cdot 0,1827[m^2] = 12,665[kN] \quad (10)$$

$$F_{15} = 103421,35 \left[ \frac{N}{m^2} \right] \cdot 0,1827[m^2] = 19,006[kN] \quad (11)$$

Si se quiere realizar una comparación del actuador con algún equipo hidráulico, esto es para obtener una referencia, se puede contrastar con una gata de un automóvil, la cual resiste 2 toneladas. Con respecto al actuador Baumann, este debe resistir 1,292 toneladas, debido a la conversión vista anteriormente esto es para su mínima fuerza, ya que para la máxima es de casi 2 toneladas.

En la siguiente figura se puede apreciar una vista lateral del actuador neumático, en la que se observa la membrana de caucho, en el primer segmento, su vástago deslizante, perpendicularmente alineado con la membrana, el cual sube y baja a través de su estructura de fierro que lo protege. Se debe manufacturar una extensión del vástago, para que este puede salir de la estructura, en forma de guía y se pueda conectar con el brazo mecánico.



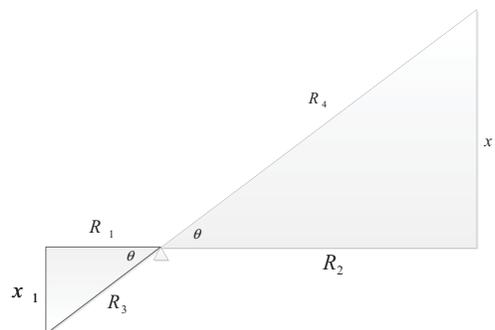
**Fig. 2.3 Vista lateral del actuador neumático Baumann [6].**

## 2.4. Procedimiento para el cálculo del grado de inclinación del fierro con la ganancia respectiva.

Para poder lograr el movimiento completo de la compuerta, se necesita obtener una ganancia significativa, con respecto al recorrido que realiza el actuador, debido a que el vástago solamente se mueve 2,1 [cms] verticalmente. Por ende, si se pretende levantar la compuerta 30 [cms], se debe obtener una ganancia de 15. Para obtener dicha ganancia, se pretende diseñar un brazo/fierro mecánico, el cual realice el movimiento horizontal/vertical para abrir la compuerta.

Bajo el uso de simple geometría se puede diseñar el brazo mecánico y así obtener las dimensiones que debe tener este.

Para efectos de diseño,  $x_1$  es el vástago del posicionador,  $x_2$  es el movimiento de la compuerta guillotina, el cual se pretende lograr.  $R_3$  y  $R_4$  representan el largo del brazo, en la posición de máxima apertura, separados por un pivote, el cual se fija a la estructura de reposo del actuador.  $R_1$  y  $R_2$  simbolizan el largo del brazo, en la posición de apertura a un 50%, para la cual, el brazo reposa horizontalmente, generando un ángulo rectángulo, el cual nos permite obtener las medidas respectivas de todo el sistema.



**Fig. 2.4 Representación triangular del movimiento del brazo/fierro.**

Para lograr que la compuerta tenga 30[cms] de apertura, se utilizará geometría reflectiva, siendo el horizonte el eje de simetría ( $R_1$  y  $R_2$ ). Es por esto que el valor que se elige para  $x_2$  es de 15[cms]. Por otro lado, se sabe que el vástago baja 2,10[cms], por ende  $x_1$  mide 1,05[cms]. Eligiendo arbitrariamente  $\theta = 14^\circ$  y usando Pitágoras, se pueden obtener las medidas restantes, lo que nos entrega el largo del brazo para su posición de máxima y mínima longitud. En resumen, se

tienen lo siguiente valores:

**TABLA 2.2 Valores del largo del brazo/ferro.**

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
$x_1$	1,05 [cms]
$x_2$	15,0 [cms]
$R_1$	4,21 [cms]
$R_2$	60,2 [cms]
$R_3$	4,34 [cms]
$R_4$	62,0 [cms]
$\theta$	14,0 °

Con estos valores, se tiene que el largo del ferro/brazo, en su posición de máxima longitud es de 66,34[cms], para el caso de mínima prolongación se tienen 64,37[cms]. Por que se habla de 2 longitudes, esto es por el movimiento circular que logra el brazo, al tener un pivote fijo, por lo que se necesita diseñar y manufacturar un ferro con un cierto grado de libertad, para lograr ambas distancias.



## Capítulo 3. Diseño

---

### 3.1. Diseño del canal de prueba

Un canal de regadío es un sistema de transporte de agua, que para poder ser modelado, este debe ser dividido en diferentes zonas, las cuales son divididas por una compuerta de entrada, y una de salida. El comportamiento del fluido que tiene el canal puede ser modelado con las ecuaciones diferenciales de Saint-Venant, las cuales se ven representadas en la ecuación de *momentum* y *continuidad* mencionadas en el capítulo 2.

El canal que se quiere construir en el Laboratorio de Control consta de 4 secciones divididas por 4 compuertas, las que pueden tomar la forma circular o plana, dependiendo de que tipo se quiera implementar en esa sección, o dependiendo del efecto de turbulencia que se quiera generar con el flujo de entrada. Posee un largo de 6 [mts], un ancho de 15[cms] y un alto de 30 [cms]. Contará con una bomba de agua que impondrá un flujo y se utilizara un sistema de cañerías, para así lograr la recirculación del agua. Tendrá un estanque en la salida para acumular el agua que recorre el canal, y en la entrada de agua una rejilla de protección.



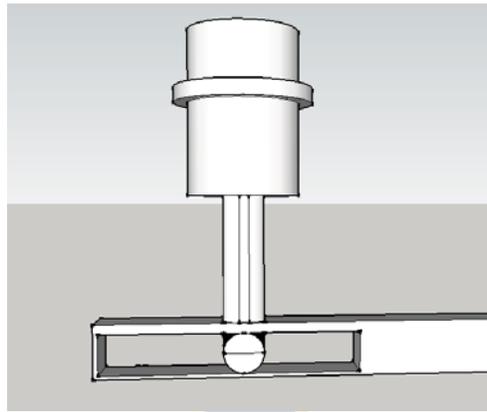
Fig. 3.1 Simulación de canal de prueba.

### 3.2. Diseño del brazo/ferro

Con los valores obtenidos anteriormente en el capítulo 2, se puede tener una idea clara de cuan largo debe ser el ferro/brazo para obtener la ganancia necesaria al momento de levantar la compuerta. Para este caso, se piensa en 2 tipos de ferro, uno de forma cuadrada, que tiende a no deformarse, posee mayor resistencia, pero es más difícil de lograr realizar una perforación para

ubicar una ranura y tiene mayor roce. La otra opción es utilizar un fierro de forma circular, el cual puede ser sólido por dentro, posee la característica de ser mas maniobrable y tiene un menor roce, pero a la vez, tiene menos resistencia, por lo que de elegir esta opción, se tendría que reforzar con algún otro material, para asegurar su funcionamiento, aguante, energía y fortaleza.

Una vez aclarado el largo, se debe proceder a diseñar un sistema que permita un cierto grado de libertad, en el acoplamiento del fierro con el vástago, como con la compuerta. Para el caso de la conexión del fierro con el vástago, se sabe que  $R_1$  y  $R_3$  tienen distintas medidas, esto es debido a que el movimiento que realiza el brazo tiene carácter circular, ya que posee un pivote fijo. Para solucionar esta diferencia de longitud, se pensó en tener una especie de rodamiento, que se mueva a través del brazo, esto es, una ranura en el fierro, que permita el deslizamiento que realizará el vástago, que se muestra en la siguiente figura.



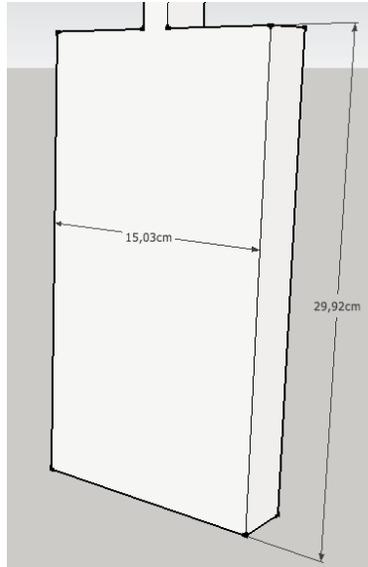
**Fig. 3.2 Grado de libertad del brazo/fierro.**

En la **Fig. 3.2** se aprecia el grado de libertad que debe tener el fierro para que el vástago pueda deslizarse en esa ranura. Se estima que con 2[cm] de longitud de este orificio se cumple el objetivo, pero se perforarán 4[cm], para así tener un margen de error correspondiente a la hora de fabricar cada una de estas partes.

### **3.3. Diseño de la compuerta**

Para esta etapa, se debe tener en consideración la fuerza que ejerce el fluido en las compuertas, por ende el material a utilizar debe resistir los embates del líquido, con lo que la mejor manera de asegurar esta resistencia, es con un material duro como el fierro. Existen otros tipos de materiales utilizados en estos tipos de canales, los que han sido usado en otros laboratorios o Universidades, entre los que se encuentran el policarbonato, technil, acero inoxidable, entre otros.

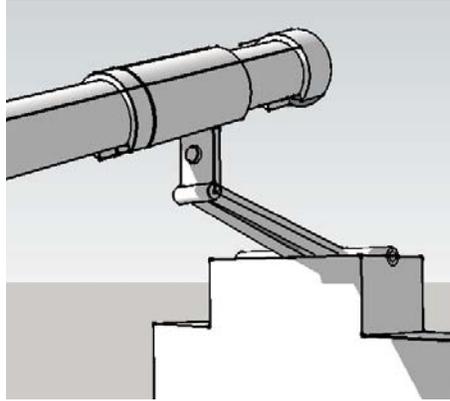
Para este caso, se piensa en el fierro como mejor opción, debido a su resistencia, durabilidad, maleabilidad y también el precio, ya que una vez hecha la compuerta, si se debiese realizar alguna modificación en el diseño, no es complejo conseguirlo y disponer de este.



**Fig. 3.3 Compuerta Guillotina.**

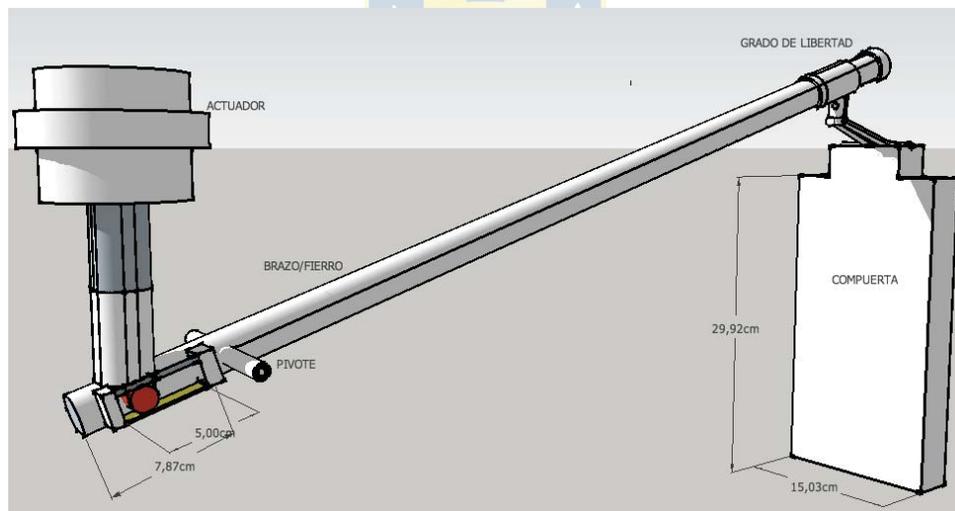
La compuerta tendrá unas medidas de 30x15[cms], esto es debido a que posee las mismas dimensiones que del canal, en lo ancho y lo alto. Con respecto al movimiento que la compuerta ejerce hacia arriba y abajo, se quiere imponer que el desplazamiento de este sistema sea constante, que no importe si el canal esta medio lleno o vacío. Por ende se tiende a pensar que requerirá de un sustento o apoyo, y para esto se pensó en habilitar una guía, la cual funcionará de la misma forma que lo hacen los rieles de las ventanas, los cuales se encargan de guiar al objeto para que este no se vea afectado a la hora de realizar su movimiento. Todo esto es para lograr un desplazamiento uniforme a la hora de tener que caracterizar el sistema. Para el acoplamiento de la compuerta con el brazo, se piensa en un sistema que tenga un grado de libertad, tal como el que se intenta producir en la conexión del actuador con el brazo, ya que para ambos movimiento se debe tener en cuenta que realizan movimientos circulares, esto es debido a que ambos se encuentran distanciados por un pivote. Al tener un punto fijo en una parte del fierro, sus extremos siempre se desplazarán de manera circular, tal como los parabrisas de un auto, pero en menor rango. Al pensar en un grado de libertad, se habla de una perforación en el brazo, estilo ranura, para que un rodamiento acoplado al vástago, se deslice a través de ella, tal como en la Fig. 3.2 , pero también se tiene en cuenta, que el movimiento que existe en este lugar del brazo es mayor, y debe ser capaz de resistir el peso de la

compuerta, entonces un rodamiento puede ser insuficiente, por lo que la mejor opción que se puede llevar a cabo es un fierro redondo a través de otro, de mayor diámetro, el cual se deslice a través del mas pequeño. La idea es lograr un mecanismo que resista los movimientos a realizar de la mejor manera, y que perdure con el tiempo.



**Fig. 3.4 Acoplamiento del brazo con la compuerta.**

Finalmente, al juntar todos los diseños en una pieza, se puede tener una idea mas tangible de como se puede ver el acoplamiento de las diferentes etapas, y su funcionamiento, lo que da a entender de una manera mas real la situación del modelo a fabricar.



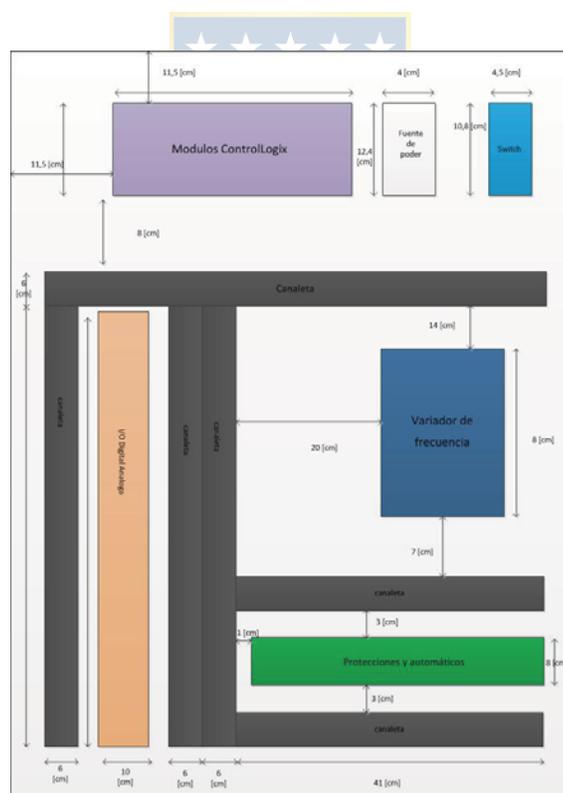
**Fig. 3.5 Acoplamiento final del sistema.**

### 3.4. Diseño del gabinete para PLC

Una vez logrado todo el acoplamiento del actuador con el brazo/fierro y la compuerta tipo guillotina, este sistema se encontrará en reposo y sin movimiento alguno. Para poder sacar el sistema

del reposo es necesario utilizar un controlador lógico programable (PLC), el cual tiene como objetivo controlar el movimiento de la compuerta, a través de una señal de corriente que se le entrega al posicionador, para que este actúe y genere movimiento en el vástago, el cual ubicará la compuerta en el set-point indicado en el computador.

El PLC es una de las piezas fundamentales del proyecto, ya que es el encargado de compilar, almacenar, generar pulsos y movimiento para así, poder controlar una planta. Para este caso será el cerebro del canal, el encargado de medir y realizar las acciones para así, poder lograr arrancar a nuestro sistema del reposo. Para el diseño del gabinete se pensó en respetar las especificaciones que propone el fabricante, ya sea del PLC, como también del variador de frecuencia, el cual será necesario para mover la bomba que alimentará de agua el canal. Estas están relacionadas con el espaciado que existe entre los distintos módulos que componen este armario y el grosor de cada uno de los cables utilizados en las instalaciones. En el siguiente diagrama se muestra el "display" del gabinete y su respectiva tabla con los elementos que este posee.



**Fig. 3.6** Diseño y distribución de piezas del gabinete.

**TABLA 3.1 Listado de componentes utilizados en el gabinete.**

<b>Elementos</b>	<b>Característica</b>
Gabinete	1800x800x300[cm]
PLC	Control Logix 1756
Canaleta Ranurada	60x80x2000[cm]
Riel Din	2[m]
Variador de Frecuencia	Power Flex 40
Switch 8 slots	1783US08T
Fuente de Poder Externa	1606XLS120/E

En esta etapa, solamente se menciona la distribución que tendrá cada uno de los módulos que conforman el PLC, ya que para efectos de cableado, se necesitan diferentes elementos, que se mencionarán oportunamente más adelante. El gabinete que se eligió es del tamaño necesario para ubicar los módulos con sus espaciados respectivos, determinados por los fabricantes, los cuales permiten un funcionamiento adecuado y ante cualquier falla, proteger a los equipos respectivos. Las canaletas ranuradas son por las cuales se distribuirá de manera ordenada todo el cableado del gabinete. Las protecciones y automáticos no están mencionados en la **TABLA 3.1**, debido a que se detallarán oportunamente mas adelante, en este capítulo.

### **3.5. Diseño del gabinete para el cableado del PLC**

En esta sección se especifica que se necesita para poder adjuntar el gabinete, con el PLC, incluyendo el cableado como también sus módulos a utilizar. El PLC que se utilizará es el Control Logix 1756, el cual posee su fuente de poder, módulo de comunicación Ethernet, los módulos análogos de 8 entradas y 8 salidas, un procesador y el chasis de 7 slots. También se añadió un Switch para poder conectar, configurar y programar, en línea, el variador de frecuencia y el PLC.

A continuación se muestra la lista de materiales utilizados para armar y cablear completamente el gabinete.

**TABLA 3.2 Listado de componentes para cableado del PLC en el gabinete.**

<b>Elementos</b>	<b>Característica</b>
Cable 1 x 0.75mm <sup>2</sup> 18 [awg]	100[m]x4
Cable12 [awg]	200[m]x2
Automático trifásico	20[A]
Automático trifásico	10[A]
Guarda motor trifásico de	4 a 8 [A]
Automático 2Px10A	10/15[kA]
Automático 1Px6A	10/6[kA]
Automático 1Px2A	10/6[kA]
Repartidor 4 polos	25 [A]
Repartidor tierra	-----
Borne 2 pisos	2,5 [mm <sup>2</sup> ]
Borne 2 pisos porta fusible	2,5 [mm <sup>2</sup> ]
Borne 3 pisos	2,5 [mm <sup>2</sup> ]
Bornes conexión tierra	-----
Tapa final 2 pisos	-----
Tapa final porta fusible	-----
Tapa final 3 pisos	-----
Tapa final	-----
Porta fusible extraíble	5x20 [mm]
Tope de fijación	10 [mm]
Puntilla amarilla	12 [awg]
Placa intermedia	1,1[mm]
Puente adyacente	2,5 [mm <sup>2</sup> ]
Amarras plásticas	100x2
Etiquetas marcar bornes	-----
RV-K 0,6/1KV 5G2	5 [mm <sup>2</sup> ]
Marcas termo contraíbles	-----
Cinta Aislante súper 33	-----
Puntillas starfix	x3 (negra, roja, celeste)
1756TBCH	36 pines



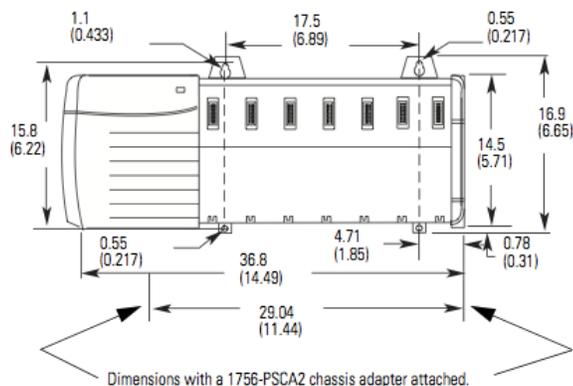
Una vez que se tienen logran juntar todos los elementos anteriores de la **TABLA 3.2**, se tiene todo lo que se necesita para lograr el acoplamiento del PLC con el gabinete. Se visitaron 3 casas comerciales de Concepción para poder adquirir cada uno de estos ítems, previo a una cotización en

cada una de estas, para lograr así los precios mas económicos del mercado.

### 3.6. Cableado del PLC con sus módulos

La siguiente etapa que se debe llevar a cabo para el accionamiento del posicionador es el cableado completo del PLC, esto es, la alimentación a la red, las conexiones de todos los módulos, con sus entradas y salidas respectivas, y finalmente las protecciones.

Lo primero que se necesita para comenzar a cablear el PLC es empezar a marcar las dimensiones que especifica el fabricante en la placa del gabinete, de tal forma de trazar cada una de las líneas y lugares donde ubicaremos cada uno de los diferentes módulos, basándose en la **Fig. 3.6**, cosa de tener todo perfectamente medido antes de empezar a perforar. Luego de agujerear cada uno de los lugares donde se ubicarán los distintos módulos, se procede a atornillar las piezas. El chasis es el primero que se aperna, al cual se le añade su fuente de poder respectiva. Después se cortan y se agregan las canaletas, que son las que guiarán todo el cableado, para que su presentación sea ordenada, o en caso de falla o mantención, se sepa que conexas pueda estar malogrado. En la siguiente etapa se especifican las 2 áreas del gabinete, estas son, "*control*" para el PLC, y "*fuerza*" para el variador de frecuencia, las cuales se mantienen separadas, para así evitar interferencia de cualquier ruido que pueda existir en el cableado del variador. Después de esto se procede a instalar en la placa el PowerFlex 40 (variador de frecuencia), los automáticos, el repartidor, el guarda motor y las borneras. Para la parte eléctrica del PLC existe un automático general trifásico, 380[V], el cual alimenta todo el gabinete. También se tiene un automático bifásico de 220[V], el cual se encarga de alimentar 2 automáticos monofásicos, los cuales a su vez, alimentan el PLC con 220[V] y la fuente independiente (de 24[Vdc]) con 220[V], que es la que alimenta a las borneras, las cuales envían y reciben todas las señales del PLC y las válvulas a manipular. Con esto, todo el gabinete esta energizado y ya se puede empezar a trabajar en la conexión de los módulos del PLC. Para comenzar con el cableo de los módulos, estos se enchufan al chasis, tal como un catridge de Nintendo, en las ranuras que dispone el PLC para aquello. A continuación se muestra el chasis del PLC, con sus medidas (en cms), y los 7 slots donde se conectan los módulos.



**Fig. 3.7 Chassis Allen Bradley 1756A7/B [10].**

El orden de cada uno de los módulos que se acoplarán al PLC tiene la siguiente dinámica:

**TABLA 3.3 Lista de módulos instalados en el chasis 1756A7/B.**

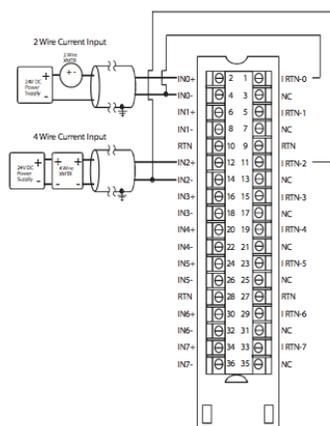
Módulos	Slot
Ethernet 1756EN2T/C	0
Control Logix 1756L61/B	1
Protección 1756N2/B	2
Entrada Digital 1756IB32	3
Salida Digital 1756OB32	4
Entrada Análoga 1756IF8H	5
Salida Análoga 1756OF8H	6

Luego de posicionar los módulos en cada uno de los slots respectivos se procedió a representar dicha configuración en el software *Architecture Builder*, para tener una idea gráfica de como queda reflejado.



**Fig. 3.8 Chassis Allen Bradley 1756A7/B con sus módulos.**

Luego de fijar los módulos en el chasis, se procede a cablear la entrada y salida análoga (1756IF8H -1756OF8H ) a las borneras. Estos módulos tienen la particularidad de tener comunicación HART, la cual nos entrega detallada información y nos permite configurar variables que facilitan la entrega y recepción de datos con mayor exactitud. También se debe mencionar que este tipo de conexión está activa solamente cuando se conectan, en corriente, las "entradas" y "salidas" de los módulos. A continuación se mostrarán las parejas de los terminales en cada uno de los canales seteados para el módulo análogo de entrada (1756IF8H):



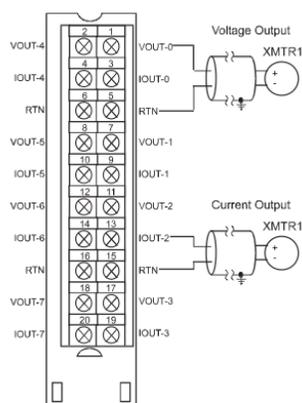
**Fig. 3.9 Terminales de conexión del módulo análogo de entrada [15].**

**TABLA 3.4 Terminales y sus canales respectivos para el módulo análogo de entrada.**

Terminales	Canal
IN0+ (2) - IN0-(4)	Local:5:0.Ch0Data
IN1+ (6) - IN1-(8)	Local:5:0.Ch1Data
IN2+ (12) - IN2-(14)	Local:5:0.Ch2Data
IN3+ (16) - IN3-(18)	Local:5:0.Ch3Data
IN4+ (20) - IN4-(22)	Local:5:0.Ch4Data
IN5+ (24) - IN5-(26)	Local:5:0.Ch5Data
IN6+ (30) - IN6-(32)	Local:5:0.Ch6Data
IN7+ (34) - IN7-(36)	Local:5:0.Ch7Data

Una vez conectadas las parejas de cables del módulo análogo de entrada sobre las borneras respectivas, se debe realizar lo mismo para el módulo análogo de salida, para el cual también existe un tipo de conexión, dependiendo de la configuración que se le quiera dar, y para este caso se necesita salida en corriente, por lo que cada uno de los pines queda agrupado tal como lo representa su data-sheet para este tipo de conexión.

Para el modulo analógico de salida (1756OF8H) se tiene la siguiente configuración:



**Fig. 3.10** Terminales de conexión del módulo analógico salida [16].

**TABLA 3.5** Terminales y sus canales respectivos para el módulo analógico de salida.

Terminales	Canal
IOUT-0 (3) - RTN(5)	Local:6:0.Ch0Data
IOUT-1 (9) - RTN(5)	Local:6:0.Ch1Data
IOUT-2 (13) - RTN(15)	Local:6:0.Ch2Data
IOUT-3 (19) - RTN(15)	Local:6:0.Ch3Data
IOUT-4 (4) - RTN(6)	Local:6:0.Ch4Data
IOUT-5 (10) - RTN(6)	Local:6:0.Ch5Data
IOUT-6 (14) - RTN(16)	Local:6:0.Ch6Data
IOUT-7 (20) - IN7-(16)	Local:6:0.Ch7Data

Luego de haber realizado cada una de las conexiones que se detallaron anteriormente, el PLC se encuentra listo para ser puesto en funcionamiento. La siguiente etapa que se necesita para manipular el actuador es la conexión del PLC al PC y su respectiva configuración, ya que este tipo de equipos requieren una especial estructuración a la hora de procesar datos, de censar señales o realizar acciones.



**Fig. 3.11 PLC cableado y alimentado.**

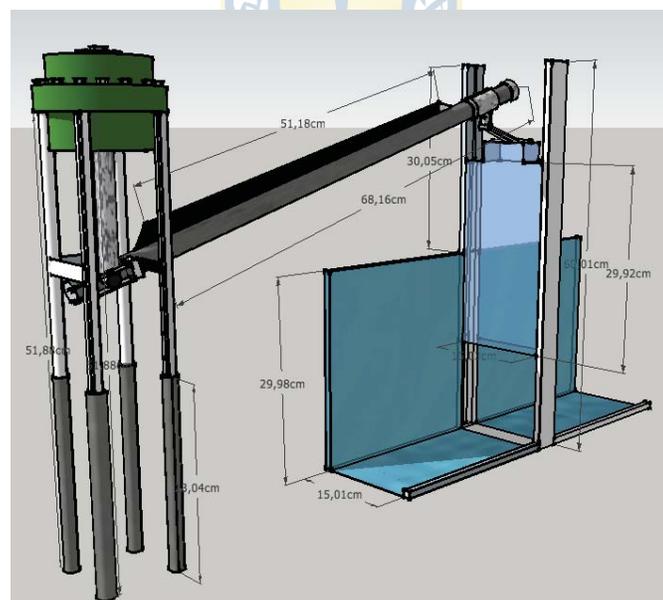
En la **Fig. 3.9** se aprecia el PLC cableado con sus módulos análogos, listo para ser utilizado, solamente falta la configuración de su IP, ya que este equipo puede ser utilizado en este momento con IP variable, previamente conectado con el computador de escritorio, pero al ser apagado pierde la dirección que se le impuso, por ende debe ser configurado y se debe asignar una IP fija, lo que se detalla completamente en el anexo, debido a que es un procedimiento largo y engorroso. Antes de poner en marcha todo el sistema, se deben instalar los softwares respectivos para la manipulación, que recomienda el fabricante, debido a que se requiere de su funcionamiento, para la futura programación de las acciones que debe realizar el actuador. Estos programas son *Rs Logix*, *Rs linx* y *Bootp/DHCP*. Una vez realizada la instalación se procede a conectar los equipos en red, mediante el uso de un cable RJ-45 (cruzado), que conecte el PC y el PLC. Una vez conectados ambos equipos en red se puede comenzar a generar acciones con el PLC mediante el PC de escritorio.

## Capítulo 4. Resultados

### 4.1. Puesta en marcha

En las puestas en marcha de plantas, industrias, equipos o pequeños laboratorios se presentan innumerables situaciones en las cuales las cosas no resultan como se planea y se requiere modificar el diseño, las ganancias, o el mismo algoritmo de control. Para este capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación/implementación, los cuales entregan información relevante y necesaria a la hora de querer realizar el prototipo final del canal de prueba, así como también de los diferentes procedimientos que se deben realizar para obtener dichos datos. También se demuestra que no es lo mismo trabajar con equipos que vienen de fábrica, sin previa calibración, a usar instrumentos con sus debidos procesos de sintonización, los cuales entregan respuestas completamente diferentes.

A continuación se muestra el modelo final del actuador neumático, junto con su brazo mecánico, acoplado al canal de prueba.



**Fig. 4.1** Diseño final de sistema acoplado.

Como se aprecia en el diseño final, hubo muchos cambios que debieron realizarse una vez que se fue probando el sistema acoplado. Esto es debido a los imprevistos que se fueron presentado

a la hora de ir avanzando en la etapas. Las diferencias o actualizaciones que existen en la comparación al bosquejo inicial, de la **Fig. 3.5**, se presentan a continuación:

- La altura de las extremidades inferiores de fierro ha sido modificadas, ahora sus piernas son regulables, para poder tener 2 alturas diferentes, esto es para poder probar los 2 tipos de compuerta con la misma estructura.
- El reforzamiento del pivote es de gran importancia a la hora de buscar precisión, debido a que en el antiguo diseño este solamente se encontraba fijado hacia las extremidades inferiores, ahora posee una platina en forma de L, la cual impide prácticamente todo el juego que tenía antes la pieza.
- Se cambio el rodamiento del acoplamiento entre el vástago y el brazo, por otro rodamiento, hecho a medida, para nuevamente evitar el juego de las piezas y futuras imprecisiones en la respuesta.
- Se fortaleció el brazo/fierro con una aleta de tipo tiburón, la cual fue unida con soldadura de bronce, que protege al fierro de las elevadas temperaturas. Un fierro de forma redonda se tuerce con mas facilidad, por lo que al añadir esta pieza, asegura su rigidez y durabilidad, con lo que se garantiza un comportamiento resistente y adecuado para la fuerza que realice.
- También se modificó el acoplamiento del fierro con la compuerta. Aunque el grado de libertad se concretó, la pieza de unión de ambos tenía un juego, el cual ejercía una fuerza indebida y la compuerta se trababa, con lo que al ajustar esa pieza, ambas estructuras cambiaron su comportamiento de forma significativa.

Cuando se habla acerca de las modificaciones que fueron realizadas en el diseño, se debe tener en cuenta que el gran objetivo es lograr la ganancia adecuada para poder abrir/cerrar la compuerta. En un principio se pensaba en tener la mayor ganancia posible, utilizando el reducido movimiento del vástago, pero al armar el sistema completo ya se pueden obtener resultados concretos y se pueden empezar a realizar las pruebas respectivas para obtener las distintas curvas que nos ayudaran a caracterizar de la mejor manera nuestro sistema acoplado.

Una vez puesto en funcionamiento el sistema completamente adaptado, se ha podido manipular de distintas maneras, probando su apertura máxima y mínima, su respuesta ante distintos set-point, la velocidad de estos movimientos y muchas otras, pero lo que realmente se busca es

determinar los parámetros del modelo que mejor se ajustan a la situación real. Para esto se debe hacer uso de técnicas de identificación de sistemas, las cuales utilizan una curva de reacción, que es la respuesta del sistema en el tiempo, cuando se somete a una entrada de tipo escalón.

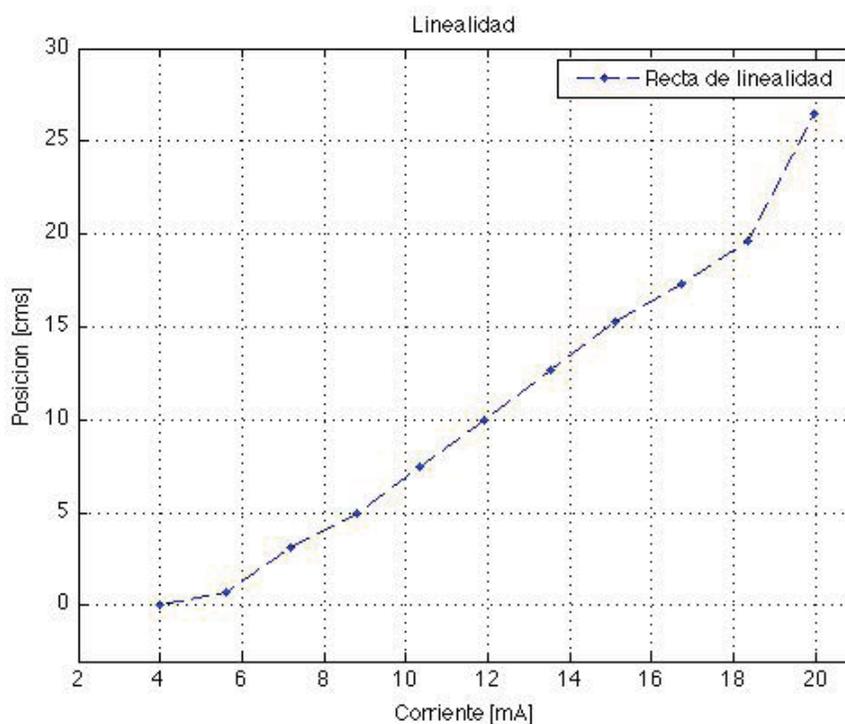
Para obtener la respuesta del sistema en el tiempo, se deben realizar distintas pruebas, las cuales nos entregan datos fundamentales a la hora de aplicar un novedoso sistema para obtener dicha respuesta. Se debe tener en cuenta que la forma de realizar todas las mediciones que se presentan a continuación, es utilizando una escuadra junto con una regla, evaluando los datos con el ojo humano. La razón por la cual se usó dicho método corriente, no es debido a la exactitud y precisión, ya que esta sujeto a un pequeño error de percepción, sino que el rango que este puede entregar, ya que un sensor infrarrojo, disponible al alcance de un alumno de pre-grado, solamente puede captar datos desde 10[cms] en adelante, esto es previamente programando un micro-controlador para usar este dispositivo. La otra opción que sé pensó fue utilizar un sensor ultrasónico, pero este aparato también tenía errores de mediciones en rangos pequeños, ya que censa hasta 2[cms]. La opción de utilizar un sensor laser era la mas adecuada, si se quieren realizar mediciones precisas y no caer en errores de resolución del ojo humano, pero este está fuera del alcance del curso y no se pensó con anterioridad.



## 4.2. Análisis de la caracterización estática sin calibración

### 4.2.1 Linealidad

Se sabe que generalmente los equipos no son lineales, y casi nada en la naturaleza tiene esta característica, sin embargo, los sistemas puede ser linealizados. Esta prueba consiste en ver que tan lineal es la respuesta del posicionador utilizando el actuador, pudiendo tener un comportamiento rectilíneo de una zona, o lineal por zonas respectivamente. Al poder determinar la cantidad de zonas con las que se trabaja, se facilita de enorme manera el trabajo con el posicionador, debido a que cada zona posee una pendiente distinta y por ende una función de transferencia diferente, para lo cual, el operador que desee controlar el canal pueda realizar dichos cambios en los parámetros de sintonización y obtener la respuesta mas ajustada para el sistema.



**Fig. 4.2 Linealidad del posicionador sin calibración.**

Para la realización de esta prueba se ejecutó una medición de posición vs corriente, en escalones de 10 en 10%, conociendo que las señales que se envían a través del PLC, están en el rango de 4 a 20[mA]. La prueba realizada entrega relevante información refiriéndose a la no linealidad del equipo, la cual puede subdividirse en distintas zonas de linealidad, para este caso se

encuentran 3 zonas.

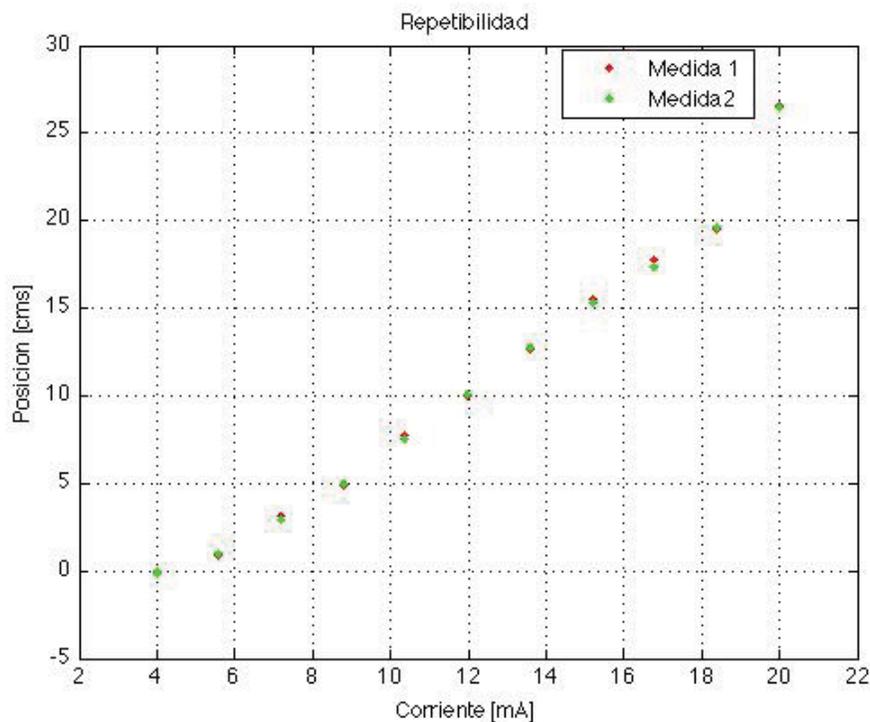
**TABLA 4.1 Zonas de linealidad del posicionador.**

<b>Zonas</b>	<b>Rango[%]</b>
Zona 1	0 a 10
Zona 2	10 a 90
Zona 3	90 a 100

Se puede apreciar que la primera zona, cuando parte del reposo, recorre 0.7[cms], lo que es relativamente pequeño, pero para este caso no logra ser determinante debido a que se trabaja con un sistema ATR, el cual indica que este movimiento se realiza en la máxima apertura de la compuerta, ya que la guillotina, al estar en reposo, en su posición inicial, se encuentra completamente abierta, lo que para efectos de control, puede ser despreciable y se puede eliminar esta zona. En la segunda zona se puede apreciar un amplio recorrido de 18.9[cms], el cual posee la mayor cantidad de set-points y la linealidad mas prolongada. Esta es la zona que tiene mejor sensibilidad, por lo que al realizar un control de nivel, es la región que tiene el mejor comportamiento para aquello. Para la tercera zona ocurre un desplazamiento de 6.9[cms], esto indica que no posee sensibilidad en esta zona, ya que se habla de un escalón del 10%, que para la primera zona era menor a 1[cm]. Para efectos de control, esta ultima zona es de vital importancia, debido a que es la que cierra por completo el paso del agua, por lo que debe tener un comportamiento extremadamente fino a la hora de utilizar una estrategia de control. Todas estas diferencias que existen en entre los distintos sectores de linealidad, son atribuibles a la falta de calibración del equipo, debido a que un posicionador necesita saber en su CPU el modelo del actuador que esta utilizando, así como también que tipo de realimentación física posee. Para efectos de calibración, en un principio se encontraba fuera del alcance de un alumno de pre-grado, debido a que tenía que ser proveída por la empresa a la cual se le compraron los equipos, cosa que nunca ocurrió, por lo que se optó por otra solución que será revelada mas adelante en este informe.

## 4.2.2 Repetibilidad

Una vez finalizada la prueba de linealidad, corresponde realizar la siguiente medición, que es la *repetibilidad*, la cual consiste en reproducir las señales de salida del instrumento a medir repetidamente valores idénticos de la variable en las mismas condiciones de servicio y en el mismo sentido de variación, recorriendo todo el campo. Esta prueba permite observar que tan preciso es el equipo, ya que al repetir un mismo set-point 2 veces, se debería obtener igual resultado, cosa que en la practica no siempre sucede.



**Fig. 4.3 Repetibilidad del posicionador sin calibración.**

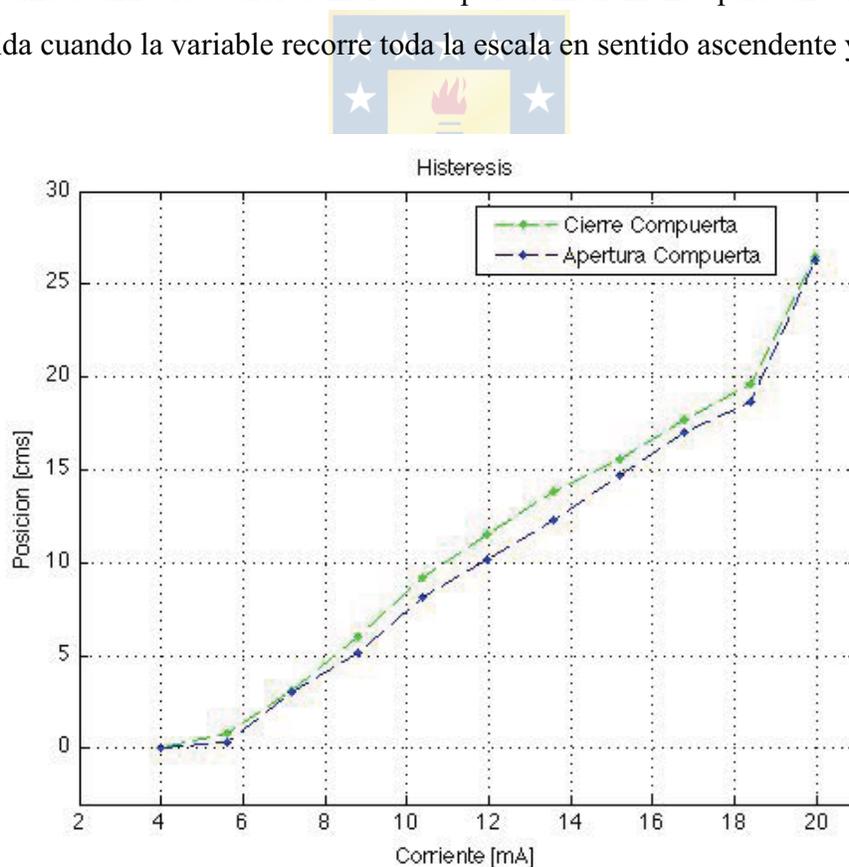
Para esta medición, el procedimiento que se utilizó fue realizar 2 muestras para cada uno de los set-points, de 10 en 10%, al igual que en el caso de la linealidad, pero volviendo siempre al punto inicial, para que el accionamiento del actuador, mediante el posicionador, partiera del reposo en ambos casos. Con esto, se logra poner a prueba la exactitud que posee el equipo al accionar el mismo valor 2 veces. Se aprecia en la **Fig. 4.3** que las muestras obtenidas son muy similares, casi idénticas, solamente difieren por un par de milímetros, que está dentro del margen de error de estos sistemas neumáticos que trabajan con presiones de aire muy elevadas. También se debe hacer mención a los errores de resolución que existen en la visión y a la interpretación, que es de 0.2[mm].

Aquí al igual que en la gráfica de linealidad, se distinguen las 3 zonas, las cuales poseen pendientes diferentes y el mismo comportamiento. La distancia mas amplia que ocurre entre 2 pruebas iguales sucede cuando la apertura de la compuerta se encuentra al 80%, con 0.4[cms] de diferencia entre cada prueba.

Otra cosa que se debe mencionar es que careciendo de la calibración necesaria, este equipo responde de la mejor manera a las pruebas de repetibilidad, pero queda planteada la interrogante, de ¿Cómo reaccionará el posicionador a una fina calibración? La inquietud queda planteada, para poder revisar su comportamiento nuevamente mas adelante.

### 4.2.3 Histéresis

La siguiente prueba que se realizó comprende a la histéresis, la cual trata acerca de la diferencia que existe entre los valores indicados por el instrumento para un valor cualquiera del campo de medida cuando la variable recorre toda la escala en sentido ascendente y descendente.



**Fig. 4.4 Histéresis del posicionador sin calibración.**

Para esta medición se debe tener en cuenta la forma de como se obtuvieron los datos. Se comienza en orden ascendente, desde el reposo, aumentando de 10% en 10%, recorriendo todo el rango hasta completar el 100%, luego en orden decreciente se procede de la misma manera, hasta llegar al 0%. Lo que se busca obtener es una respuesta con forma elíptica, parecido a una babosa.

En la **Fig. 4.4** se aprecia que la máxima diferencia entre la apertura y cierre es de 1.5[cms] y ocurre cuando la apertura está al 40%, y el cierre a su 60%. Esta disparidad existe debido a que al brazo de la estructura carece de un contrapeso, elemento que puede equiparar y ayudar al esfuerzo que realiza el sistema cuando este se esta cargando/descargando. Al añadir este tipo de solución, se mejora el comportamiento y disminuye la brecha entre ambas curvas, pero no la elimina. A pesar de no ser indispensable, este tipo de mecanismos es necesario, aun así, no se pensó en agregarlo al diseño, debido a que se quiso incluir en su etapa final, y fue en este momento cuando se vio truncada su aparición, debido a que el lugar donde tenía que ir conectado quedaba excesivamente corto y se necesitaba de muchísimo contrapeso, cosa que podía poner en riesgo el funcionamiento del equipo completo.

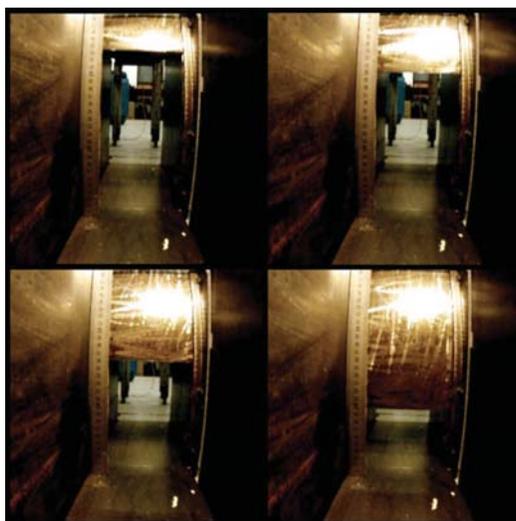


### 4.3. Análisis de la caracterización dinámica sin calibración

En este procedimiento se requiere obtener una respuesta del sistema en el tiempo, la cual tiene muchas dificultades de ser conseguida si no se dispone de un instrumento de medición para esto, como un limit switch. el cual es un tipo de interruptor que se utiliza para dejar pasar una señal o detenerla, dependiendo de su uso. Después de pensar y discutir una gran cantidad de ideas, con estudiantes, instrumentistas y académicos, se logró llegar a un método práctico e innovador para realizar dicha medición, el cual consiste en utilizar una cámara de alta definición, de 60[fps], la cual se encarga de captar las imágenes frame a frame, de donde esta ubicada la compuerta, a medida que transcurre dicho movimiento en el tiempo. Luego de esto, se requiere procesar y analizar cada uno de los frames para poder construir, de manera análoga, punto por punto la respuesta del sistema en el tiempo.

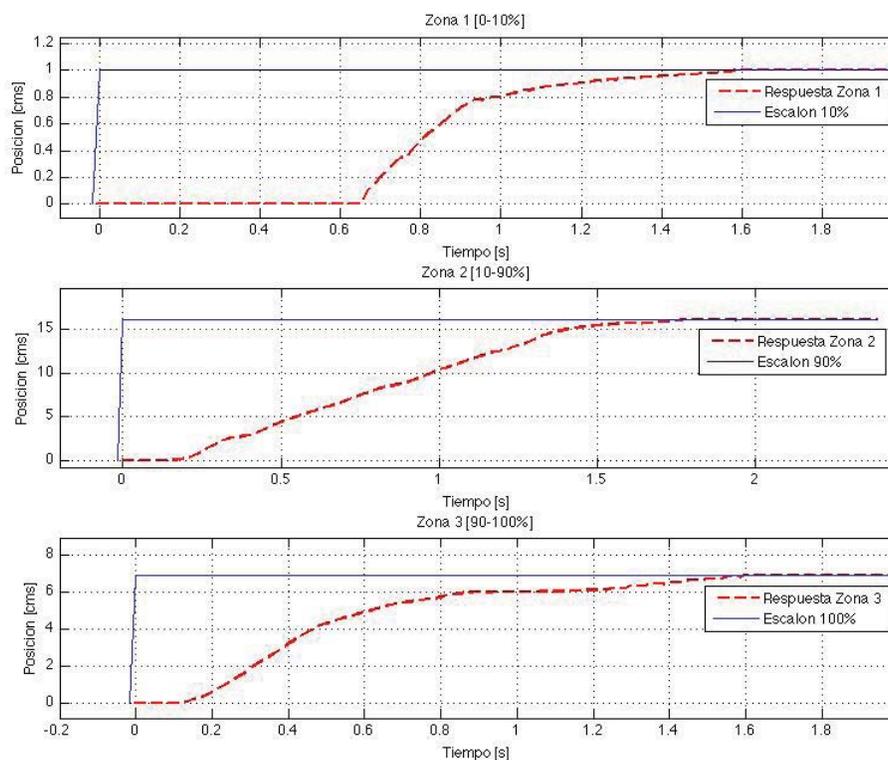
La cámara que se utilizó se llama *GOPRO HD HERO*, la cual posee un sensor C-MOS de  $\frac{1}{2.5}$  y el tamaño de sus pixeles es de 2.2[ $\mu$ m]. Este aparato puede grabar en 720p con un lente semiangular de 127°, lo que permite la cercanía a la compuerta. Cada uno de los frames obtenidos representa 0.04162[s]. En la **Fig. 4.5** se puede observar secuencia de imágenes de como se visualiza

cada uno de los frames, cuando ocurren las mediciones.



**Fig. 4.5** Secuencia de frames de la respuesta dinámica.

Para el caso de la respuesta en el tiempo, ante una entrada escalón, se obtuvieron 3 curvas, las cuales representan cada una de las zonas de linealidad del posicionador, las cuales tienen distinto comportamiento, desplazamiento y retardo.



**Fig. 4.6** Respuesta en el tiempo de cada zona.

Finalmente se puede ver representada la respuesta en el tiempo para cada una de las zonas de linealidad.

En la **Fig. 4.6**, para la primera zona de trabajo, definida en la **Tabla 4.1**, se utiliza un set-point del 10%, desde el reposo. Se aprecia una respuesta con un comportamiento de un sistema de primer orden, la cual posee un retardo de gran magnitud, de 0.65[s], atribuido al esfuerzo que realiza el posicionador para salir del reposo, y también, debido al aire comprimido que se encuentra alimentando al equipo, que al instante de partir desde reposo, no está circulando por la membrana neumática, por ende, al momento que ocurre el accionamiento, este pulmón de aire recién comienza a trabajar.

El tiempo que transcurre para alcanzar el set-point deseado y estabilizarse es de 1.583[s]. Sin embargo, esto solo es atribuible gráficamente, debido a que matemáticamente, el estado estacionario se alcanza sólo en un tiempo infinito.

Al continuar con el movimiento que se realiza a través de la curva de linealidad, se logra posicionar en la segunda zona de linealidad del equipo. En esta región se realiza un recorrido de 16.2[cm] utilizando un set point de un 80%, desde el 10 al 90%. Se aprecia un retardo más reducido que en la primera zona, de 0.1667[s], esto es debido a que la membrana ya cuenta con aire comprimido en su interior, por lo que puede responder de manera rápida y comenzar a realizar el movimiento. La respuesta se asemeja nuevamente a un sistema de primer orden, pero debido a su largo recorrido, el tiempo que transcurre hasta llegar al set-point deseado, es de 1.95[s]. En esta zona se realiza el 80% del desplazamiento total del recorrido de la compuerta, lo que la lleva a ser la región de mayor sensibilidad.

Para la tercera zona de trabajo, que va desde el 90 al 100% de apertura, con un recorrido de 6.9[cm], se utilizó un set point del 10%. Se observa nuevamente un comportamiento de un sistema de primer orden. Posee un retardo de 0.133[s] y tiende a alcanzar el set-point de manera rápida, pero 0.9[cm] antes de llegar a su estabilización sufre de una caída y le cuesta otros 0.5[s] equilibrarse y lograr cumplir el punto de ajuste impuesto. Se sospecha que debido a la falta de calibración del equipo, este no sabe realmente donde se encuentra o cuanto le falta para lograr llegar al tiempo de establecimiento.

A lo largo de estos meses de diseño, implementación, acoplamiento y programación se presentaron diferentes desafíos, los cuales fueron abordados y resueltos de la mejor forma posible, a través de pequeños y largos plazos, llegando finalmente a lograr las esperadas mediciones, obteniendo las curvas y los modelos de las compuertas con sus respectivas caracterizaciones, los cuales tendrán un rol fundamental en la elección del armado y la distribución final del canal. Sin embargo, durante el desarrollo del proyecto, existía una inquietud acerca del comportamiento que tendría el posicionador si se ejecutase la calibración respectiva de este instrumento. A priori dicho procedimiento estaba fuera del alcance del curso y del trabajo que se debía realizar, mas aún, este era un servicio que debía desarrollar una empresa externa, ya que los equipos que se habían comprado necesitaban de una calibración adecuada. La calibración no fue suministrada por el proveedor, afectando directamente el funcionamiento y los resultados del actuador neumático y su posicionador. Aun así, teniendo en cuenta estos antecedentes, después de leer, preguntar, averiguar, buscar, contrastar y asesorarse técnicamente, se tomó la decisión de realizar dicha calibración por cuenta propia, la cual exigía extremo cuidado, ya que se pone en riesgo real al mismo equipo, pudiendo, en el peor de los casos, quedar como pisapapeles.

Para la realización de este método, se utilizó el software *Field-Care*, de la empresa *Endress-Hausen*. Dicho programa necesita de un controlador genérico para el proceso de reconocimiento del posicionador, el cual no incluía el producto, por lo que se debió contactar al fabricante en USA, el cual facilitó los archivos (.DMT). Archivos que contienen "polinomios" específicos para desarrollar dicho procedimiento.

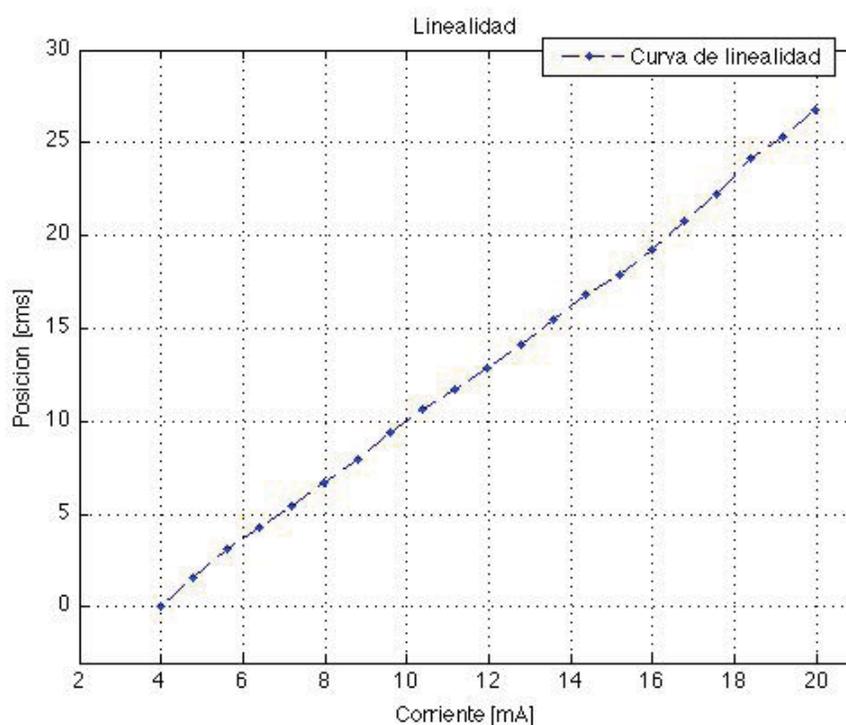
Luego de sintonizar el posicionador, este cambió radicalmente su comportamiento, por lo que fue absolutamente necesario volver a realizar el proceso de caracterización, ya que para este caso, las respuestas estáticas y dinámicas son completamente diferentes a lo obtenido anteriormente.

## 4.4. Análisis de la caracterización estática con calibración

### 4.4.1 Linealidad

Una vez ocurrido el proceso de calibración del posicionador, la primera prueba que se realiza es la linealidad, la cual permite desplazarse por todo el rango de movimiento de la compuerta, pudiendo observar si posee una respuesta con mayor dinámica, si el comportamiento tiene mejoras, si existe mayor sensibilidad, menor retardo, mayor linealidad, etc.

Al realizar este procedimiento, se aprecian distintas mejoras, las cuales se presentan en la Fig. 4.7.



**Fig. 4.7** Curva de linealidad del posicionador con calibración.

El primer cambio que se realizó en la medición es la cantidad de muestras obtenidas, ya que anteriormente sólo se captaban 11 datos, ahora se obtienen 22, los cuales se aprecian en la curva de linealidad del posicionador calibrado, en la Fig. 4.7. La mayor sensibilidad que entrega la calibración permite disminuir el rango entre cada uno de los datos conseguidos. En este caso se muestreó con escalones de 5 en 5%, lo que retribuye en una linealización completa del equipo,

comprendido solamente en una zona, mejorando las 3 zonas que existían anteriormente. Se observa también intervalos similares en cada uno de los set-points, de 1.3 a 1.5[cms], sin importar si esta comenzando, de 5 a 10%, o terminando el movimiento, de 80 a 85%. Esto no se lograba anteriormente debido a que era muy distinto el comportamiento al inicio del recorrido, como al final de este.

**TABLA 4.2 Zonas de linealidad del posicionador.**

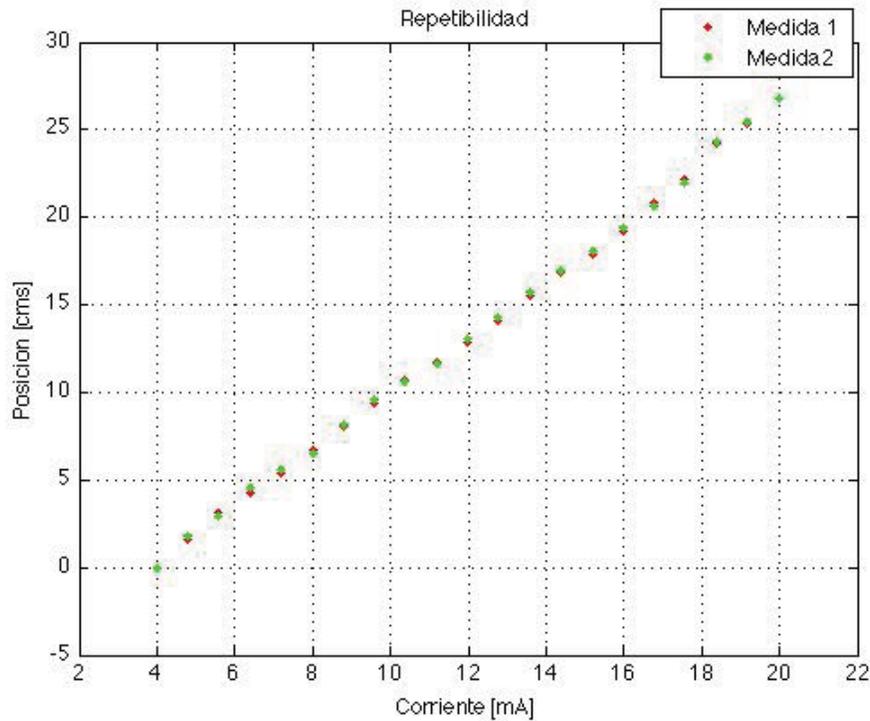
<b>Zonas</b>	<b>Rango[%]</b>
Zona 1	0 a 100

Para la **Tabla 4.2** se observa que ahora existe una única zona en todo el rango de linealidad que posee el posicionador. Esta mejora es indispensable a la hora de realizar el control de nivel del canal, mediante el uso de las compuertas, debido a que si el instrumento fuese lineal por zonas, como lo era anteriormente a la calibración, se deberían elegir distintas funciones de transferencia para cada una de las zonas en las cuales se este trabajando.



#### **4.4.2 Repetibilidad**

La segunda prueba que se realizó con respecto a la caracterización estática fue la repetibilidad. Al igual que en la **Fig. 4.7**, se duplicó el número de muestras obtenidas, con respecto de la **Fig. 4.3**, ya que este tipo de calibración permite mayor sensibilidad. Para este caso se tomaron 2 medidas por set-point, y así poder contrastar ambos resultados.



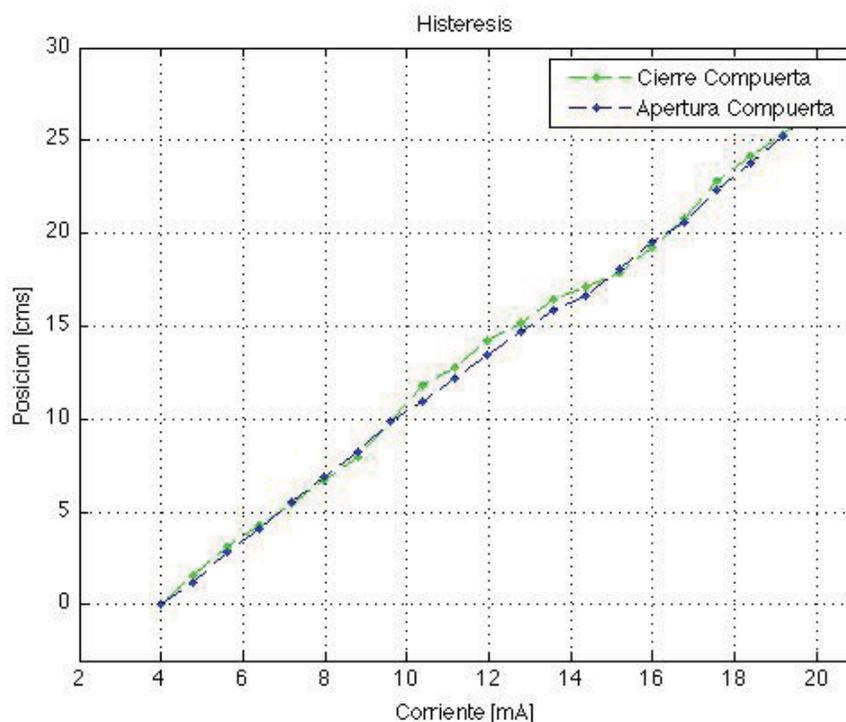
**Fig. 4.8 Curva de repetibilidad del posicionador con calibración.**

Para este procedimiento se utilizaron escalones de 5 en 5%, volviendo al reposo en cada una de las mediciones, tal como se aprecia en la **Fig. 4.8**. Al contrastar con la **Fig. 4.3**, se observa una disminución en el rango de diferencia entre cada uno de los datos obtenidos. La distancia más amplia que ocurre entre 2 puntos iguales, sucede cuando la apertura de la compuerta se encuentra al 15%, con 0.3[cms] de diferencia. Este mínimo error que existe entre cada una de las muestras obtenidas para los set-points, está dentro del margen de error de estos sistemas neumáticos que trabajan con altas presiones de aire. También se debe hacer mención a los errores de resolución que existen en la visión y a la interpretación, que son de 0.2[mm].

Esta prueba, después de la calibración, resultó muy similar a la anterior, en cuanto a las diferencias que existen en cada una de las mediciones, por lo que la precisión del posicionador no se ve afectada con este procedimiento de ajuste.

### 4.4.3 Histéresis

Para la prueba de histéresis, al igual que para las otras pruebas de caracterización estática, se duplicó también el número de muestras. Los resultados arrojados se presentan en la **Fig. 4.9**.



**Fig. 4.9** Curva de histéresis del posicionador con calibración.

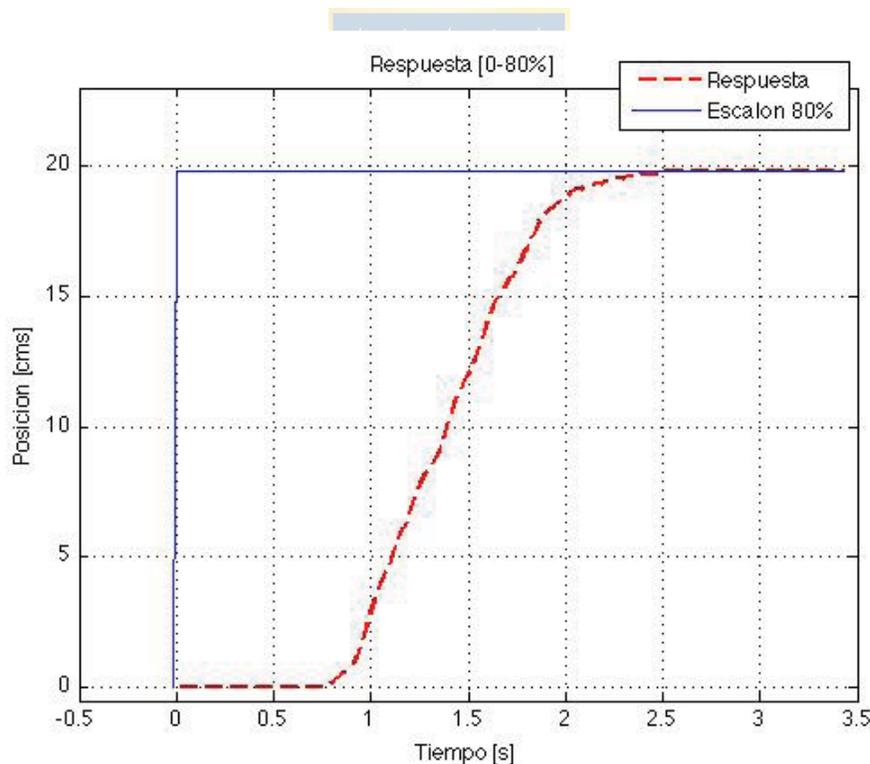
Utilizando el mismo procedimiento del orden ascendente y descendente, de 5 en 5% en este caso, se aprecia en la **Fig. 4.9**, una notable mejora en el comportamiento de la curva de apertura, como la de cierre de la compuerta. Se demuestra su linealidad y la eliminación de las zonas. También se corrobora que la babosa sigue existiendo, y se concentra en el centro de las mediciones, entre el 35 y 70%. La máxima diferencia entre la apertura y cierre es de 0.8[cms] y ocurre cuando la apertura está al 40%, y el cierre al 60%, al igual que en la **Fig. 4.4**. Esto indica que disminuyó en 0.7[cms], o dicho de otra forma, mejoró su precisión en 0.7[cms], contrastando estos resultados con la histéresis sin calibración. Con respecto al contrapeso, se argumenta que sigue siendo indispensable el acoplamiento de este aparato. Ya que si bien se acortó la brecha entre cada uno de los procedimientos, no se eliminó completamente.

## 4.5. Análisis de la caracterización dinámica con calibración

### 4.5.1 Respuesta del sistema desde el reposo con membrana contraída.

En los análisis de caracterizaciones estáticas y dinámicas mostrados anteriormente, se puede apreciar la notable diferencia al utilizar equipos que poseen su calibración respectiva. Mediante diferentes métodos, se logró construir curvas de linealidad, histéresis y repetibilidad, así como las respuestas para cada una de las zonas del posicionador. Junto con todos los datos obtenidos en estos análisis, se puede comenzar a obtener respuesta en el tiempo, ante una entrada escalón, del modelo sintonizado.

Utilizando el mismo método del barrido de frames, visto anteriormente en la sección 4.3, se procede a representar la respuesta en el tiempo del sistema, tal como:



**Fig. 4.10** Respuesta en el tiempo ante escalón del 80%.

En la **Fig. 4.10** se observa la respuesta en el tiempo del sistema, ante una entrada escalón del 80%. Esta se comporta como un sistema de primer orden con retardo. Retardo atribuible al esfuerzo

que realiza el sistema para salir del reposo. Otro aspecto que puede explicar este prolongado retardo habla acerca del aire comprimido que necesita el actuador neumático, ya que la membrana, para permitir su expansión y accionar un movimiento, necesita de un estímulo, lo que no ocurre hasta que se le impone una determinada entrada.

Al analizar la respuesta transitoria del sistema de primer orden se pueden definir algunas de sus características, las cuales son el tiempo de subida,  $t_s$ , (tiempo que tarda la respuesta del sistema en subir del 10 al 90%). También se puede encontrar el tiempo de establecimiento,  $t_r$ , (tiempo que tarda el sistema para que su respuesta este contenida en una banda del  $\pm 2\%$ ).

$$t_s = t_{s\ 90\%} - t_{s\ 10\%} = 1.867[s] - 0.966[s] = 0.901[s] \quad (12)$$

Para el tiempo de establecimiento se tiene lo siguiente:

$$t_{r\ 2\%} = 2.233[s] - 0.7667[s] = 1.47[s] \quad (13)$$

También se conoce que  $t_{r\ 2\%} \approx 4\tau$ , lo que puede comprobarse a medida que avance este capítulo.

A continuación se mostrará de manera analítica el procedimiento que se debe desarrollar para poder encontrar la función de transferencia del sistema.



Al tener un comportamiento de sistema de primer orden, se asume a su función de transferencia, en el plano de Laplace, tal como:

$$G(s) = \frac{\kappa \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(\tau s + 1)} \quad (14)$$

Utilizando una entrada escalón, se tiene:

$$U(s) = \frac{a}{s} \quad (15)$$

Por lo que su salida queda representada por:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s) = \frac{\kappa \cdot e^{-\theta \cdot s}}{(\tau s + 1)} \cdot \frac{a}{s} = \kappa \cdot a \left[ \frac{1}{s} - \frac{\tau}{\tau s + 1} \right] e^{-\theta \cdot s} \quad (16)$$

Al pasar al plano del tiempo se obtiene:

$$Y(t) = \mathcal{L}^{-1}\{Y(s)\} = \kappa \cdot a \left[ 1 - e^{-\frac{(\theta-t)}{\tau}} \right] u(t - \theta) \quad (17)$$

Con lo que finalmente se tiene la salida en función del tiempo como:

$$Y(t) = \begin{cases} 0 & , si t < 0 \\ \kappa \cdot a \left( 1 - e^{-\frac{(\theta-t)}{\tau}} \right) & , si t \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

En la práctica se presenta el problema de determinar el modelo matemático de un sistema ante una entrada escalón. En el caso de un sistema de primer orden, utilizando métodos de identificación de parámetros, se deben obtener el  $\theta$  y  $\tau$ , usando diferentes procedimientos, tales como *Ziegler y Nichols*, que utiliza la tangente a la curva experimental en el punto de máxima pendiente para la determinación de estos parámetros. Por otra parte se tiene el método de *Muller*, el cual utiliza la tangente a la curva experimental en el punto de máxima pendiente, sólo para calcular el  $\theta$ , ya que para la obtención del  $\tau$ , sugiere que la respuesta del modelo coincida con la curva experimental en el punto correspondiente a estas dos expresiones:

$$- t = \theta + \tau \quad (19)$$

$$- y(t) = 0.632 K \cdot a \quad (20)$$

Por último se tiene otro método de identificación de parámetros, el de *Sundaresan y Krishnaswamy*, el cual es más exacto que los procedimientos anteriormente mencionados, el cual calcula el  $\theta$  y  $\tau$  en base a un criterio de minimización del área entre la curva experimental y la del modelo. Para obtener la función de transferencia a partir de la respuesta dinámica mediante este método se procede de la siguiente manera:

Obtención del  $\theta$  y  $\tau$ :

Volviendo a lo expresado anteriormente en (14), y usando estas expresiones se tiene que:

$$f_1 = 1 - \frac{Y_1}{Ka} = 0.647 \quad (21)$$

$$f_2 = 1 - \frac{Y_2}{Ka} = 0.147 \quad (22)$$

$$\theta = \frac{t_2 \cdot \ln f_1 - t_1 \cdot \ln f_2}{\ln \left( \frac{f_1}{f_2} \right)} \quad (23)$$

$$\tau = \frac{t_2 - t_1}{\ln\left(\frac{f_1}{f_2}\right)} \quad (24)$$

En donde:

$a$  = Magnitud del escalón utilizado = 80

$K$  = Lugar de estabilización de la respuesta en el eje Y = 19.8/  $a$

$Y_1$  = Posición 1 perteneciente a la respuesta = 6.989[cms]

$Y_2$  = Posición 2 perteneciente a la respuesta = 16.889[cms]

$t_1$  = Tiempo 1 perteneciente a la respuesta y a la coordenada cartesiana de  $Y_1 = 1.217$ [s]

$t_2$  = Tiempo 2 perteneciente a la respuesta y a la coordenada cartesiana de  $Y_2 = 1.817$ [s]

Reemplazando en (23) y (24) se obtiene lo siguiente:

$$\theta = \frac{1.817 \cdot \ln(0.647) - 1.217 \cdot \ln(0.147)}{\ln\left(\frac{0.647}{0.147}\right)} = 1.040[\text{s}] \quad (25)$$

$$\tau = \frac{1.817 - 1.217}{\ln\left(\frac{0.647}{0.147}\right)} = 0.4049[\text{s}] \quad (26)$$



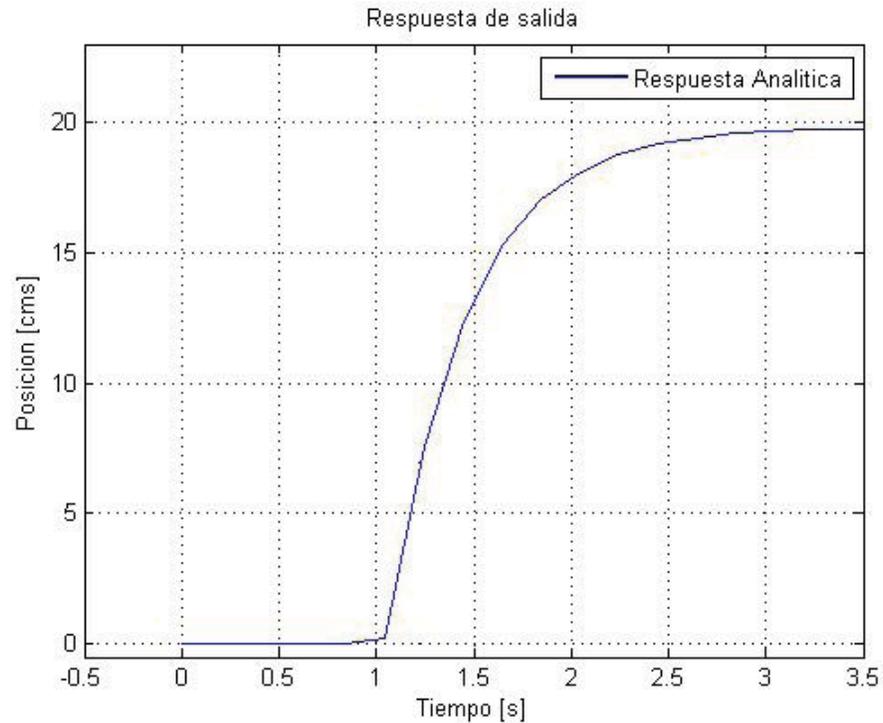
Reemplazando estos valores en la función de transferencia de un sistema de primer orden de (14), se tiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{19.8 \cdot e^{-1.0407 \cdot s}}{(0.4049s + 1)} \quad (27)$$

Por lo tanto, la salida del sistema en el tiempo, ante una entrada escalón, vista en (18), queda representada de la siguiente manera:

$$Y(t) = \begin{cases} 0 & , si t < 0 \\ 19.8 \left( 1 - e^{-\frac{(1.0407-t)}{0.4049}} \right) & , si t \geq 0 \end{cases} \quad (28)$$

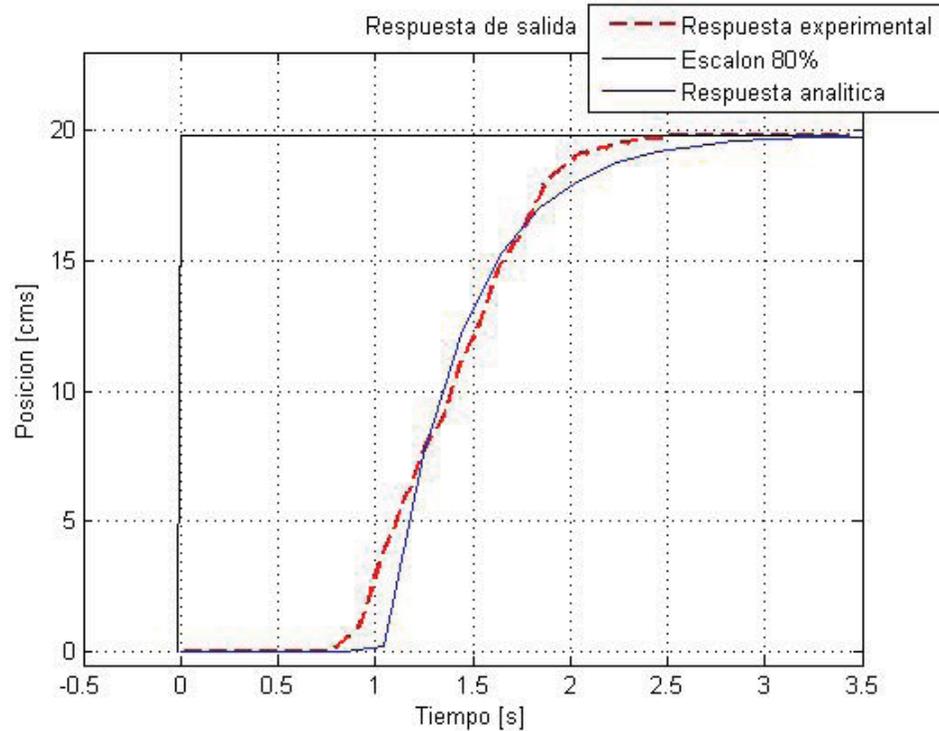
Para corroborar el análisis y los resultados efectuados anteriormente se procede a simular la respuesta del sistema, ante una entrada escalón, utilizando la función de transferencia encontrada recientemente.



**Fig. 4.11** Respuesta en el tiempo utilizando la F. de T. encontrada, ante escalón del 80%.

Al utilizar la función de transferencia obtenida en la salida del sistema, presenta un perfecto comportamiento de sistema de primer orden, con un retardo muy similar al encontrado en la respuesta experimental de la **Fig. 4.10**. Esto permite inferir que se ha encontrado la función de transferencia correspondiente al sistema utilizado.

La respuesta del sistema en el tiempo, contrastada con la respuesta experimental. Ambas ante una entrada escalón al 80% se observan en la **Fig. 4.11** a continuación.



**Fig. 4.12 Respuesta en el tiempo contrastada con la respuesta experimental, ante escalón del 80%.**

Se observa en la **Fig. 4.12** que el sistema de primer orden queda representado a través de la respuesta experimental y la analítica. El retardo que existe en ambas respuestas está directamente relacionado con la alimentación de aire del posicionador. Se aprecia que el ajuste que logra la respuesta analítica tiene directa relación a la identificación de parámetros que se utilizó basándose en la curva experimental. El comportamiento de ambas curvas es prácticamente idéntico, teniendo en cuenta los errores de medición y de resolución, para captar dichos datos. Se comprueba que el sistema tiene un comportamiento de primer orden con retardo.

Para el tiempo de establecimiento encontrado anteriormente para la curva experimental, se plantea la ecuación (29) que se debe corroborar, con respecto al  $\tau$  obtenido para la respuesta analítica, la cual describe lo siguiente:

$$t_{r\ 2\%} \approx 4\tau \quad (29)$$

$$4\tau = 4 \cdot 0.4049 = 1.61[s]$$

$$t_{r\ 2\%} = 1.48[s]$$

Esto permite inferir que son similares, y que para este caso, la igualdad se cumple, debido al

margen de error que se debe tener en consideración con respecto a las muestras obtenidas de forma experimental.

#### 4.5.2 Respuesta del sistema en reposo con membrana dilatada.

Los retardos están presentes en todo tipo de sistemas. En alguno de los casos, cuando son muy pequeños, se pueden asumir como nulos, pero en la ingeniería moderna, los sistemas eléctricos y neumáticos tienen esta componente presente, como ocurre en este sistema acoplado. Basándose en la Fig. 4.6 se plantea la inquietud de cuanto disminuye el retardo en el sistema, cuando este no parte del reposo, esto es, alimentando el actuador neumático con aire comprimido. A continuación se pretende clarificar esta idea analíticamente, no solo de manera gráfica, como ocurrió en la sección 4.3. Para este caso se excita el sistema con un escalón del 20 al 80%, teniendo la membrana ya dispuesta a responder de la manera más dinámica posible, encontrada hasta este momento en este documento.

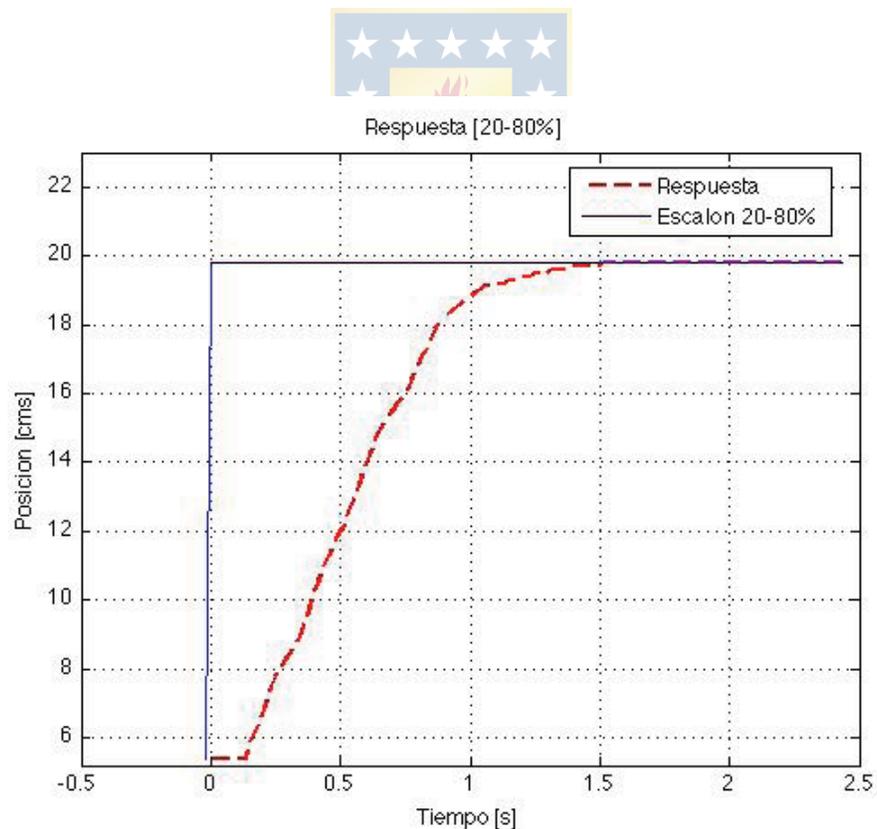


Fig. 4.13 Respuesta en el tiempo ante escalón del 60%, sin partir del reposo.

Al analizar la respuesta transitoria del sistema de primer orden, de la Fig. 4.13, se obtiene el

tiempo de subida y de establecimiento,  $t_s$  y  $t_r$  visto en (12) y (13) respectivamente.

$$t_s = 0.916[s] - 0.210[s] = 0.706[s] \quad (30)$$

Para (13) se tiene lo siguiente:

$$t_{r\ 2\%} = 1.267[s] - 0.133[s] = 1.134[s] \quad (31)$$

Para la obtención del  $\theta$  y  $\tau$  se procede a utilizar (23) y (24) de la misma forma:

Usando (21) y (22) esto es:

$a$  = Magnitud del escalón utilizado = 60

$K$  = Lugar de estabilización de la respuesta en el eje Y = 14.4/  $a$

$Y_1$  = Posición 1 perteneciente a la respuesta = 5.08[ $\text{cms}$ ]

$Y_2$  = Posición 2 perteneciente a la respuesta = 12.28[ $\text{cms}$ ]

$t_1$  = Tiempo 1 perteneciente a la respuesta y a la coordenada cartesiana de  $Y_1 = 0.416[s]$

$t_2$  = Tiempo 2 perteneciente a la respuesta y a la coordenada cartesiana de  $Y_2 = 0.850[s]$

Reemplazando en (23) y (24), se obtiene lo siguiente:

$$\theta = \frac{0.850 \cdot \ln(0.647) - 0.416 \cdot \ln(0.147)}{\ln\left(\frac{0.647}{0.147}\right)} = 0.2885[s] \quad (32)$$

$$\tau = \frac{0.850 - 0.416}{\ln\left(\frac{0.647}{0.147}\right)} = 0.2929[s] \quad (33)$$

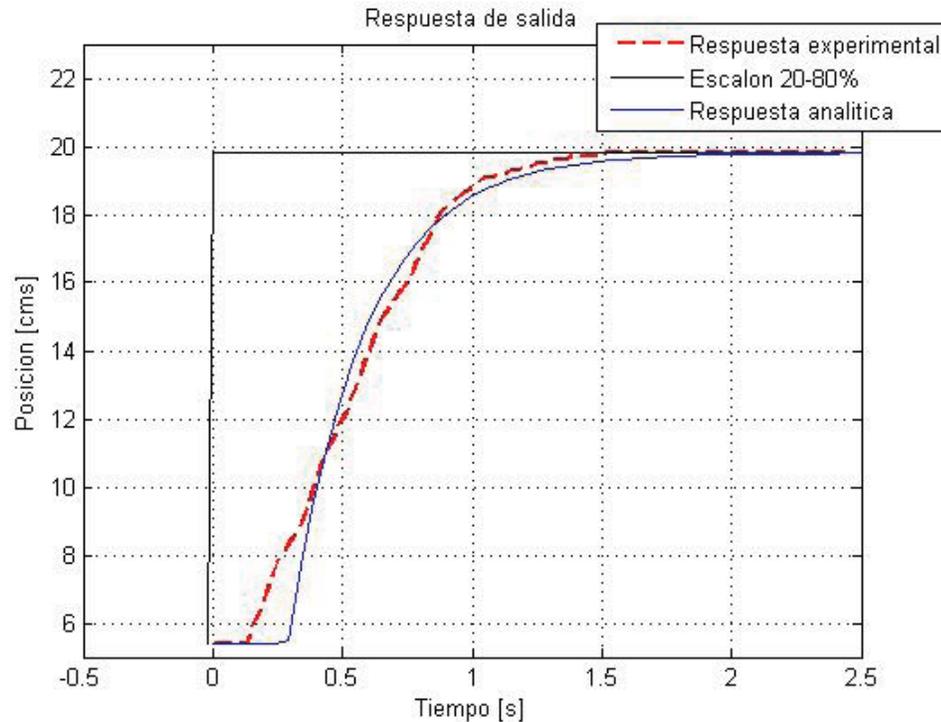
Reemplazando estos valores en la función de transferencia de un sistema de primer orden, vista en (14), se tiene lo siguiente:

$$G(s) = \frac{14.4 \cdot e^{-0.288 \cdot s}}{(0.292s + 1)} \quad (34)$$

Por lo tanto, la salida del sistema en el tiempo, ante una entrada escalón, del 20 al 80%, usando (18), queda representada de la siguiente manera:

$$Y(t) = \begin{cases} 0 & , si\ t < 0 \\ 14.4 \left(1 - e^{-\frac{(0.288-t)}{0.292}}\right) & , si\ t \geq 0 \end{cases} \quad (35)$$

La respuesta del sistema en el tiempo, contrastada con la respuesta experimental. Ambas ante una entrada escalón del 20 al 80% se representa en la **Fig. 4.14**.



**Fig. 4.14** Respuesta en el tiempo contrastada con la respuesta experimental, ante escalón del 20 al 80%.

Se observa en la **Fig. 4.14** que el sistema de primer orden queda representado a través de la respuesta experimental y analítica. El retardo que existe en ambas respuestas difiere en un pequeño rango, probablemente debido al método de obtención de este dato, el cual utiliza el análisis de los frames. Esto tiende a inducir un error en la medición y resolución ocular. El retardo también está directamente relacionado con la alimentación de aire del posicionador.

Se aprecia que el ajuste que logra la respuesta analítica tiene directa relación a la identificación de parámetros, los cuales fueron captados de la curva experimental.

El ajuste que logran ambas curvas es satisfactorio. Se comprueba que el sistema tiene un comportamiento de primer orden con retardo.

Al contrastar la **Fig. 4.14** con la **Fig. 4.12**, se aprecia que se atenúa el retardo en un 77.27% en relación a ambas curvas analíticas, esto es debido a la alimentación de aire comprimido que recibe el posicionador, ya que la membrana al estar expandida completamente, responde de manera instantánea. Todo esto es comparando el caso del actuador neumático desde el reposo, con su

membrana totalmente contraída.

Para el tiempo de establecimiento encontrado anteriormente para la curva experimental, se debe utilizar la ecuación (29), para ser contrastado el  $\tau$  encontrado analíticamente, esto es:

$$4\tau = 4 \cdot 0.2929 = 1.16[s]$$

$$t_{r\ 2\%} = 1.13[s]$$

La información entregada del  $t_{r\ 2\%} \approx 4\tau$  da cuenta que la igualdad se cumple, debido al margen de error que se debe tener en consideración con respecto a las muestras obtenidas de forma experimental.

#### 4.6. Análisis de la respuesta en frecuencia

La respuesta en frecuencia se entiende como la respuesta en estado estacionario de un sistema, ante una entrada sinusoidal. En esta se varía la frecuencia de la señal de entrada dentro de un rango, para estudiar la salida del sistema. Un resultado del análisis de la respuesta en frecuencia puede entregar la función de transferencia de un sistema.

Para este caso se realiza el estudio del diagrama de bode, aplicado a cada una de las funciones de transferencia encontradas anteriormente en (27) y (34). Esta gráfica entrega el modulo y la fase, en dB y grados respectivamente.

Este análisis debe corroborar lo planteado anteriormente, esto es, tener una respuesta que se comporte como un sistema de primer orden.

Utilizando (27) y (34) se tiene lo siguiente:

$$G_{r+}(s) = \frac{19.8 \cdot e^{-1.0407 \cdot s}}{(0.4049s+1)} \quad G_{r-}(s) = \frac{14.4 \cdot e^{-0.288 \cdot s}}{(0.292s+1)}$$

Se entiende que el retardo solamente altera la fase, esto es:

$$e^{-T_d s}$$

Sustituyendo  $s$  por  $j\omega$

$$e^{-T_d j\omega} = \cos(\omega T_d) - j\sin(\omega T_d) \tag{36}$$

Por lo que su módulo se define como:

$$|e^{-T_d j\omega}| = |\cos(\omega T_d) - j\sin(\omega T_d)| = 1 \quad (37)$$

Se obtiene un módulo unitario y una fase dada por:

$$\arg\{\cos(\omega T_d) - j\sin(\omega T_d)\} = \tan^{-1}\left\{-\frac{\sin(\omega T_d)}{\cos(\omega T_d)}\right\} = \omega T_d \quad (38)$$

Esto indica que el retardo solo modifica la fase. Para la F. de T. se tiene lo siguiente:

$$G(s) = 19.8 \frac{1}{(0.4049s+1)} \rightarrow G(\omega) = 19.8 \frac{1}{0.4049(j\omega + \frac{1}{0.4049})}$$

Para un caso general de primer orden se tiene:

$$G(\omega) = \frac{1}{(j\omega+p)} \quad (39)$$

Por lo que su módulo se define como:

$$|G(\omega)| = \left| \frac{1}{(j\omega+p)} \right| = \frac{1}{(\sqrt{\omega^2+p^2})} \quad (40)$$



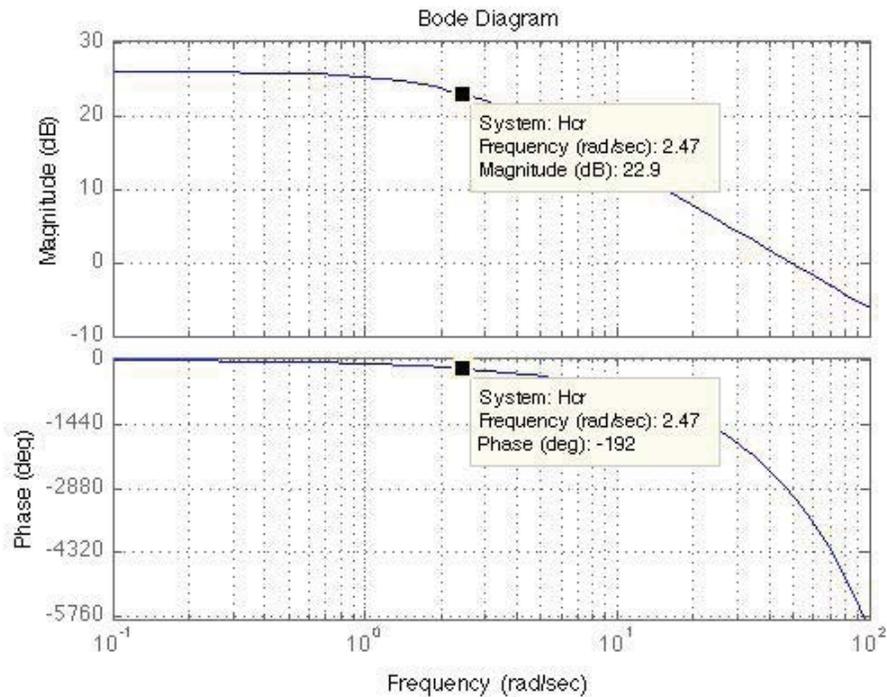
Su fase esta dada por:

$$\arg\{G(\omega)\} = -\tan^{-1}\left\{\frac{\omega}{p}\right\} \quad (41)$$

Por lo que el módulo el Diagrama de Bode queda determinado por:

$$20\log|G(\omega)| = 20\log\frac{k}{(\sqrt{\omega^2+p^2})} = -20\log(\sqrt{\omega^2+p^2}) = -10\log(\omega^2+p^2) \quad (42)$$

A continuación se presenta el Diagrama de Bode de la F. de T. obtenida en (27)



**Fig. 4.15 Diagrama de Bode de la F. de T. obtenida en (27).**

Se observa en la **Fig. 4.15** que el sistema se comporta como un sistema de primer orden. El retardo en el sistema solo altera la fase del D. de B., al igual que se muestra anteriormente en (38). En la gráfica de ángulo de fase se nota que a bajas frecuencias la fase es de  $0^\circ$ , mientras que a altas frecuencias se observa un valor muy elevado de  $-5760^\circ$ , esto es atribuible a la gran magnitud del retardo que tiene el sistema. La magnitud a bajas frecuencias se obtiene de (42), esto es:

$$20\log|G(\omega)| = 20\log\frac{k}{(\sqrt{\omega^2+p^2})} = 20\log\frac{19.8}{(\sqrt{0.1^2+\frac{1}{0.4049}^2})} = 25.6 \quad (43)$$

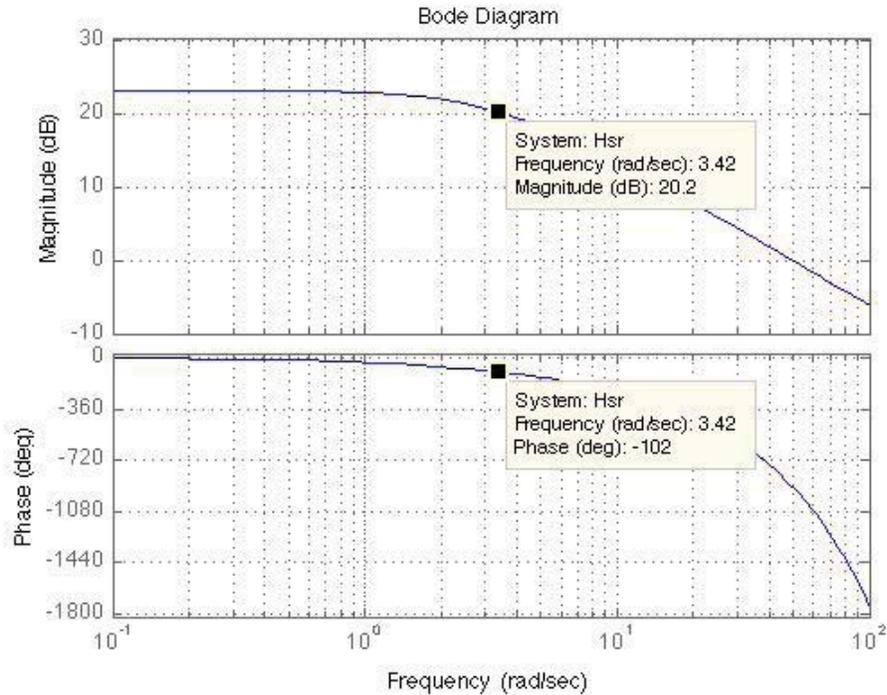
El margen de ganancia (la cantidad de ganancia que se le añade al sistema en lazo directo, antes de tener un sistema inestable)

$$M.G. = 1.0208$$

La frecuencia de cruce, la cual ocurre a los  $3dB$  de la atenuación de la magnitud corresponde

$$a: \omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0.4049} = 2.46 \left[ \text{rad}/\text{seg} \right] \quad (44)$$

Para la F. de T. obtenida en (34) se tiene el siguiente D. de B.



**Fig. 4.16 Diagrama de Bode de la F. de T. obtenida en (34).**

Se observa en la **Fig. 4.16** al igual que en la **Fig. 4.15** que el sistema se comporta como un sistema de primer orden. En la grafica de ángulo de fase se nota que a bajas frecuencias la fase esta  $3.5^\circ$  por debajo del 0, mientras que a altas frecuencias se observa un valor de gran magnitud, pero menor que en **Fig. 4.15**, de  $-1800^\circ$ , esto es atribuible al que el retardo en el sistema ha disminuido. La magnitud a bajas frecuencias se obtiene de (42), esto es:

$$20\log|G(\omega)| = 20\log\frac{k}{(\sqrt{\omega^2+p^2})} = 20\log\frac{14.4}{(\sqrt{0.1^2+\frac{1}{0.292^2}})} = 22.9 \quad (45)$$

El margen de ganancia ocurre en (la cantidad de ganancia que se le añade al sistema en lazo directo, antes de tener un sistema inestable) :

$$M.G. = 1.0027$$

La frecuencia de cruce, la cual ocurre a los  $3dB$  de la atenuación de la magnitud corresponde a:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{0.292} = 3.42 \left[ \text{rad/seg} \right] \quad (46)$$

## Capítulo 5. Conclusiones

---

### 5.1. Sumario

La automatización de las compuertas de un canal contiene diferentes aristas, las cuales mediante el correcto diseño, uso de los equipos a disposición y la bibliografía adecuada, se pueden lograr resultados que comprueban las hipótesis planteadas al inicio del trabajo.

La pregunta hecha en un principio planteaba "si es posible la construcción de un actuador, para compuerta de micro canal estándar, mediante el uso de una válvula neumática. La cual debe ser controlada mediante un PLC". Para tener argumentos de como comenzar a probar dicha frase impuesta al inicio de este proyecto de implementación, se parte por explicar cada una de las etapas realizadas, de manera de poder contar esta historia sin profundizar en el detalle de cálculos, solamente utilizando los métodos y conceptos adecuados.

Al disponer del equipo que realizará el accionamiento del sistema, el actuador neumático Baumann, acoplado al posicionador Fisher DVC6010, se comienzan a forjar a grandes rasgos, las ideas de como poder generar el movimiento y amplificar la ganancia del vástago, debiendo obtener una ganancia de 15. Esto genera las primeras limitaciones, debido al mínimo recorrido que posee el vástago deslizante. Luego de tener un diseño solido de como equilibrar y sostener este actuador, se proyectó la idea de acoplar un brazo mecánico a esta estructura, el cual se debe encargarse de generar el movimiento de las compuertas, el cual es desarrollado utilizando geometría reflectiva. Posteriormente, luego de poner en marcha la construcción de este armazón, se procede a estudiar las fuerzas que actúan en el sistema, el empuje que ejerce el fluido en las robo-compuertas, los materiales para la construcción de estas, por lo que se utiliza el modelo de Manning y las ecuaciones hidrostáticas de fuerza. También la fabricación/cableado del controlador lógico programable, el cual es utilizado para generar las señales eléctricas que dan movimiento al sistema. Este proceso conlleva una gran cantidad de tiempo, debido a que se trabaja en conjunto de un instrumentista, el cual se encarga de realizar un trabajo optimo, pero este necesita de un listado de ítems específicos que deben proveer las casas comerciales, las cuales por lo general no tienen todo el stock disponible o no presentan tales recursos de personal para procesar las ordenes de compra, por lo que se debe hacer

un puerta a puerta para lograr contar con las piezas necesarias e indispensables en el ensamblado y cableado del PLC.

La siguiente etapa que se debe realizar es el desarrollo de una serie de algoritmos, los cuales son los encargados de manipular y controlar estas señales, para así entregar el set point indicado para cada uno de los casos. Este proceso no tiene mayores complicaciones debido al que el software utilizado se maneja de forma optima, por lo que solo resta acoplar y comunicar todo el sistema para probarlo.

En este tramo del proyecto ocurre una gran sorpresa o decepción, ya que se logra el acoplamiento del actuador neumático con la estructura del brazo y con su soporte respectivo, al PLC, accionando hacia arriba y abajo el vástago, pero se descubre que el posicionador necesita de una calibración especial para poder recorrer todo el rango de movimiento que este posee, ya que sin este ajuste, el posicionador no tiene sensibilidad alguna y solo realiza desplazamientos entre 0 y 100%. Mediante un ajuste del algoritmo propuesto, se puede recorrer el rango, con algo de sensibilidad, pero de manera no lineal.

Debido al impase sufrido en la linealidad del equipo, se contacta al fabricante de este para su pronta solución, lo que deja esta etapa en "stand by", por lo que en paralelo, se decide comenzar con la etapa de construcción de las compuertas y de un segmento del canal, para poder realizar la caracterización del actuador. Las compuertas manufacturadas tienen 2 diseños, uno circular, y otro de guillotina, el cual es elegido para ser estudiado en este trabajo. Su material de construcción es el fierro, lo que asegura la resistencia a los embates del agua que debe soportar este componente. Este aparato debe mantenerse fijo a nivel horizontal, para que su movimiento vertical se comporte de manera optima y estable, por lo que se añade un riel por ambos lados, tal como las canaletas de las ventanas, con el objetivo de guiar la compuerta. Al finalizar la construcción del micro canal a escala, se debe proceder con el acoplamiento de este con el sistema mecánico, lo que genera una serie de limitaciones en cuanto al stress que sufre el material, lo que lleva a realizar una modificación al diseño del acoplamiento del brazo con la compuerta. Se opta por un grado de libertad mas extendido, lo que para este caso, genera un movimiento perfecto y acorde al esperado, por lo que la unión de todo el sistema es un hecho y su comportamiento es optimo.

Posteriormente, luego de aplicar todas las mejoras al diseño inicial, se deben realizar las mediciones que permiten la caracterización del actuador, las cuales se separan en 2 etapas, caracterización estática y dinámica. Estas pruebas ofrecen una enorme cantidad de información, la cual genera una disconformidad en cuanto al provecho que se obtiene del posicionador, ya que esta

pieza es una de las partes fundamentales de este trabajo, la cual no se esta comportando como tal, debido a que se pierde una infinidad de datos y su comportamiento no es el esperado. Dicho esto se decide contactar a la empresa nuevamente para la calibración pendiente, los cuales hacen caso omiso a los constantes llamados, por lo que se debe realizar dicho procedimiento por cuenta propia.

Este método de calibración utiliza una serie de polinomios, los cuales se encargan de sintonizar los parámetros para su comportamiento ideal. A sorpresa del alumno, la prueba resulta un éxito y el equipo responde de la manera que se tenía previsto, con una sensibilidad asombrosa y una linealidad de una zona, por lo que las pruebas de caracterización estática y dinámica deben realizarse nuevamente, lo que conlleva a nuevos datos y procesamientos de imágenes, los que dan paso para obtener la respuesta de primer orden y función de transferencia respectiva, utilizando el método de *Sundaresan & Krishnaswamy*, el cual encuentra los valores de (23) y (24) utilizando el criterio de minimización del área entre la curva experimental y la del modelo.

## 5.2. Conclusiones



Las conclusiones encontradas en este trabajo entregan información indispensable a la hora de realizar tanto la construcción como la automatización del micro canal de prueba. Estos resultados encontrados se pueden dar a conocer de la siguiente manera:

- Los resultados obtenidos demuestran que si es posible la construcción de un actuador, para compuerta de micro canal estándar, mediante el uso de una actuador neumática. La cual debe ser controlada mediante un PLC.
- Al utilizar el tipo de compuertas estilo guillotina para la separación de cada uno de los módulos, se remueven el efecto de turbulencia causado por el flujo de entrada hacia el micro canal.
- Es posible obtener una ganancia de 14 utilizando un sistema mecánico de palanca y un actuador neumático, con un vástago deslizante de 2.1[cms].
- A imponer una mayor presión de aire en la entrada del posicionador (22[psi]), mas rápida es la dinámica de la respuesta. Conociendo que los actuadores neumáticos tiene una respuesta relativamente lenta, ya que al probar con 11[psi] su comportamiento dinámico se redujo considerablemente. Se debe tener en cuenta de no sobrepasar el máximo de 35[psi].

- Al efectuar el mejoramiento del fierro/brazo, acoplando una aleta de tiburón, permite un reforzamiento indispensable para la precisión del actuador, debido a que un fierro redondo tiende a arquearse y debilitarse con el paso del tiempo.
- Se debe disponer de grados de libertad en ambos extremos del brazo mecánico, si se utiliza una compuerta tipo guillotina, debido a que al existir un pivote, el fierro realiza en ambos extremos movimientos circulares.
- Los posicionadores, actuadores neumáticos o los equipos en general, necesitan de un método de calibración específica para el tipo de uso que este requiera, debido a que este proceso de calibración realizado a los equipos mejora su rendimiento considerablemente.
- Mediante el uso de la calibración, se optimizó la linealidad del equipo en un 66.7%, pasando de 3 zonas a 1. También permitió mejorar la sensibilidad del equipo en un 25%.
- Mediante el uso de la calibración, se optimizó la diferencia en la curva de histéresis en un 53.3%.
- Al salir del reposo, utilizando una inyección de aire comprimido, el retardo disminuye un 83.03% para las respuestas experimentales. Para las respuestas analíticas se obtuvo una mejora en el retardo de un 76.36%.
- El método para la identificación de parámetros tales como el  $\theta$  y  $\tau$ , vistos en (23) y (24) respectivamente, de *Sundaresan & Krishnaswamy*, permite la construcción de una respuesta analítica, en base a un criterio de minimización del área entre la curva experimental y la del modelo.
- De los diagramas de Bode se puede inferir que para una sistema de primer orden la pendiente de la magnitud a bajas frecuencias es 0. La magnitud a bajas frecuencias queda determinada por (42).

### 5.3. Trabajo Futuro

Para este trabajo se realizaron muchas actividades de diseño, simulación, implementación, puesta en marcha y calibración, las cuales entregaron las herramientas necesarias para poder completar la primera etapa de este proyecto. Para efectos de un trabajo futuro, siempre quedan cosas que se pueden ir completando o desarrollando nuevas ideas para la optimización del proceso y el comportamiento de la compuerta o los algoritmos de barrido hechos para las pruebas. La primera mejora que debe tener este sistema es lograr acoplar un contrapeso en el fierro/brazo, para mejorar la curva de histéresis, ya que si se quiere una mayor precisión, este ítem es indispensable. Otro trabajo que se puede implementar es lograr censar, de manera digital, la altura a la cual se encuentra la compuerta, utilizando un sensor laser, controlado mediante un micro-controlador, el cual estaría trabajando en tiempo real y sería de una gran ayuda para el usuario. Otra actividad que se debe realizar antes que termine nuestra actividad es la calibración de los 3 posicionadores restantes, ya que la calibración solamente fue realizada para uno de los equipos, por lo que se debe implementar en cada uno de ellos.

Al ser un proyecto extenso, y al estar en la primera etapa, el futuro que tiene por delante este trabajo de implementación es de vital importancia para su desarrollo. Las etapas que continúan en este proyecto son las enumeradas a continuación:

- Utilizar los sensores de nivel para medir la altura del fluido.
- Lograr conexión inalámbrica entre los sensores de nivel y el PC.
- Poder instalar el canal en el laboratorio de control y lograr el acoplamiento con las compuertas.
- Instalar y activar la bomba junto al variador de frecuencia, para la recirculación del agua.
- Lograr el accionamiento de las compuertas de manera inalámbrica.
- Controlar flujo y nivel a través del PC, mediante el PLC.

## Bibliografía

- [1] Varawoot Vudhivanich ; Wich Sriwongsa ; , "Development of a Canal Automation Model: A Laboratory Experiment." , Kasetsart J., National Science, vol.45, pp.353-365, Mar.-apr. 2011.
- [2] Aguilar, J.V.; Langarita, P.; Linares, L.; Rodellar, J.; , "Automatic Control of Flows and Levels in an Irrigation Canal," Industry Applications, IEEE Transactions on, vol.45, no.6, pp.2198-2208, Nov.-dec. 2009  
doi: 10.1109/TIA.2009.2031941  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5247058&isnumber=5337752>
- [3] "Hidrología Aplicada", Ven Te Chow, David R. Maidment and Larry W. Mays, McGraw-Hill, 1994.
- [4] "Mecánica de Fluidos", Merle C. Potter and David C. Wiggert, Ciencias e Ingenierías, 2005.
- [5] "Fluid id Mechanics", Robert W. Fox, Alan T. McDonald and Philip J. Richard, Nelson-Thornes, 2003.
- [6] " FIELDVUE DVC6000 Digital Valve Controllers", Fisher, 2011.
- [7] "Open Channel Flow", F.M. Henderson, 1996.
- [8] Cantoni, M.; Weyer, E.; Yuping Li; Su Ki Ooi; Mareels, I.; Ryan, M.; , "Control of Large-Scale Irrigation Networks," Proceedings of the IEEE , vol.95, no.1, pp.75-91, Jan. 2007  
doi: 10.1109/JPROC.2006.887289  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4118455&isnumber=4118453>
- [9] "EtherNet/IP Network Configuration", Allen-Bradley, 2011.
- [10] "Installation Instrucons Control Logix Chassis, series B", Allen-Bradley, 2010.
- [11] Radwan, F.A.; Martin, T.W.; , "Real-time monitoring and controlling of an Allen-Bradley SLC 500 through the Internet," Industrial Technology, 2003 IEEE International Conference on , vol.1, no., pp. 387- 392 Vol.1, 10-12 Dec. 2003.  
doi: 10.1109/ICIT.2003.1290341  
URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1290341&isnumber=28745>

- [12] Página personal del Prof. José R. Espinoza C., <http://www2.udec.cl/jose.espinoza/>
- [13] "Métodos de identificación de sistemas", Laboratorio de Control, 2004.
- [14] "Baumann Pneumatic Actuators", Fisher, 2011.
- [15] "1756-IF8H ControlLogix Analog Input Module with HART Protocol", Allen-Bradley,2010.
- [16] "1756-OF8H ControlLogix Analog Output Module with HART Protocol", Allen-Bradley,2010.



## Anexo A. Leyes Importantes

### A.1. Técnicas de identificación de sistemas

Para determinar los parámetros de un modelo que mejor se ajustan a la situación real se debe hacer uso de técnicas de identificación de sistemas, de las cuales existen otras, aparte de *Sundaresan* y *Krishnaswamy*. Uno de ellos es el método de la tangente de *Ziegler* y *Nichols*. Este procedimiento requiere trazar una recta tangente a la curva de reacción del proceso en su punto de inflexión o de máxima pendiente. Esto se aprecie en la **Fig. A1**.

Para obtener el modelo de primer orden con  $\theta$ , se debe identificar su ganancia  $\kappa$ , la constante de tiempo  $\tau$  y el  $\theta$  aparente del sistema.

Se tiene la ganancia como la variación que existe en la salida, dividido por la variación que existe en la entrada, esto es:

$$\kappa = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (\text{A.1})$$

El tiempo que transcurre al aplicar la entrada escalón y el punto en que la tangente corta el eje del tiempo es el  $\theta$  aparente del sistema. El tiempo que transcurre en este instante y el tiempo en que la tangente corta el valor de la salida  $y_u$  es la constante de tiempo.

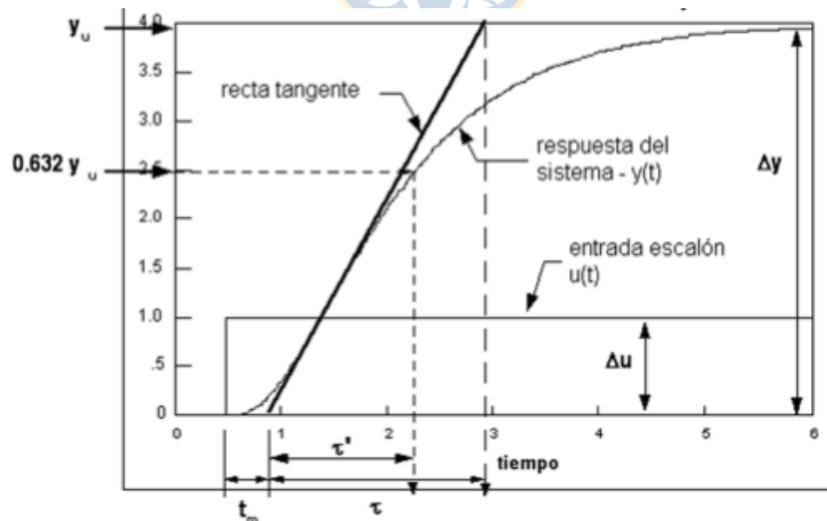


Fig. A.1 Método de la tangente [13].

El segundo método que se puede utilizar para este tipo de identificación de sistemas se llama método de la tangente modificado de *Miller*. Este procedimiento difiere del método de *Ziegler* y

*Nichols*, y al igual que este necesita que se proyecte una recta tangente al punto de inflexión de la respuesta. La ganancia y el  $\theta$  en este método se calculan de la misma forma que en el método de *Ziegler y Nichols*. La variación propuesta por Miller cambia en el cálculo de la constante de tiempo del modelo, ésta se calcula como el tiempo requerido para que la respuesta llegue al 63,2% del cambio total a partir del  $\theta$ . Esta variación hace que la respuesta del modelo y la del sistema real coincidan en por lo menos un punto, y ambas respuestas pasan por el mismo punto en el instante (19).

## A.2. Diferentes métodos de programación del PLC

Para poder generar las señales que entrega el PLC, las cuales logran realizar el movimiento de la compuerta hacia arriba/abajo, se necesita la construcción de ciertos algoritmos que logren llevar a cabo esas funciones. La primera idea que se materializó en líneas de código trata acerca de la entrega de diferentes set-points al posicionador de manera manual, para poder recorrer todo el rango de movimiento que posee la compuerta fijada a la estructura. Este tipo de código de programación logra ser de gran ayuda para la caracterización del sistema, debido a que se logran desarrollar las pruebas de linealidad, histéresis y repetibilidad.

Este algoritmo se programa en el software *RSlogix*, usando el lenguaje de *texto estructurado*, el cual entrega facilidades para el usuario, debido a que incluye una serie de librerías, las cuales son utilizadas frecuentemente para lograr el tipo de instrucción deseada. El programa recorre set-points de forma manual, en espacios de 10% de variación entre uno y otro, para un caso, y para los casos que se necesita tener mayor sensibilidad, se recorren en espacios de 5% de variación entre uno y otro set-point.

La manera de entregar valores al programa, para lograr los set-points deseados, se realiza modificando el valor  $H$ , en un cuadro de texto, el cual almacena y direcciona todos los valores ingresados hacia el PLC, logrando las señales para cada uno de los casos. A continuación, en la **Fig. A.2**, se observa un segmento del código, a modo de ejemplificación, el cual muestra que las señales de 4 a 20[mA] que posee el PLC divididas en set-points de 10%.

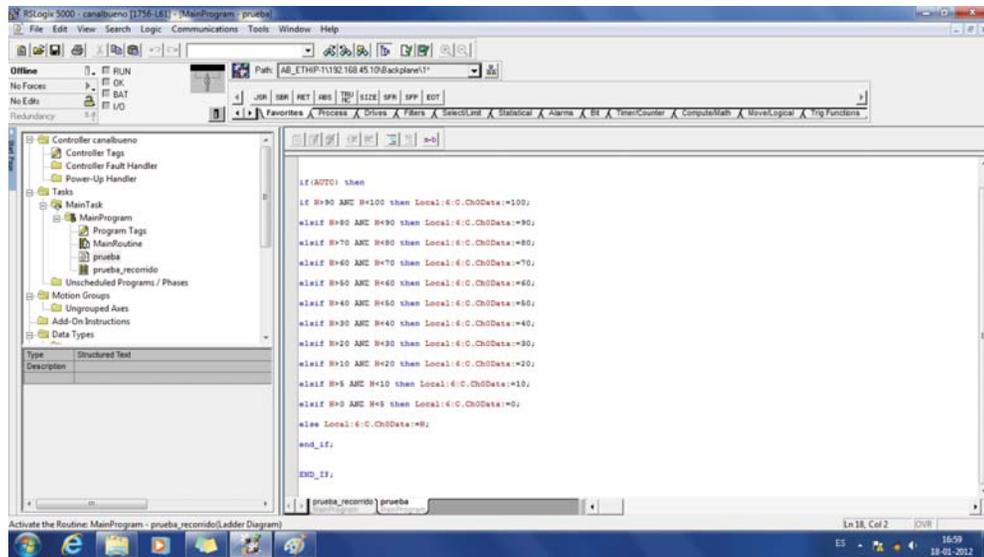


Fig. A.2 Algoritmo de programación en texto estructurado.

Una vez utilizada la programación de texto estructurado, y luego de realizar las pruebas correspondientes para la caracterización, se pensó en desarrollar otro algoritmo, en otro tipo de lenguaje, el cual es denominado *ladder* o *escalera*. Este lenguaje tiene como característica principal ser mas grafico y esta basado en los esquemas eléctricos de control básico, por lo que se hace mas amigable a la hora de ser comprendido por alguien relacionado a esta área.

La idea de este algoritmo trata acerca de realizar una secuencia, para este caso de prueba, la cual recorra cada uno de los set-points posibles del posicionador, con una separación de 10[s] por s.p. Luego que se mueve a lo largo de todo el recorrido, existe una segunda ronda de s.p., la cual se encarga de localizar los puntos medios del rango de movimiento, llegando a 50% después 100%, luego 50% y por último llega al reposo. Esta rutina trabaja de forma explicativa, para mostrar todo el recorrido en el cual se mueve la compuerta y al estar automatizada, no es necesario insertar s.p. manualmente, debido a que la rutina ya tiene los valores predeterminados.

A continuación, en la **Fig. A.3**, se observa un segmento del código *ladder*, a modo de ejemplificación, el cual muestra los diferentes set-points que están predeterminados, para que el equipo pueda moverse en su rango completo de recorrido.

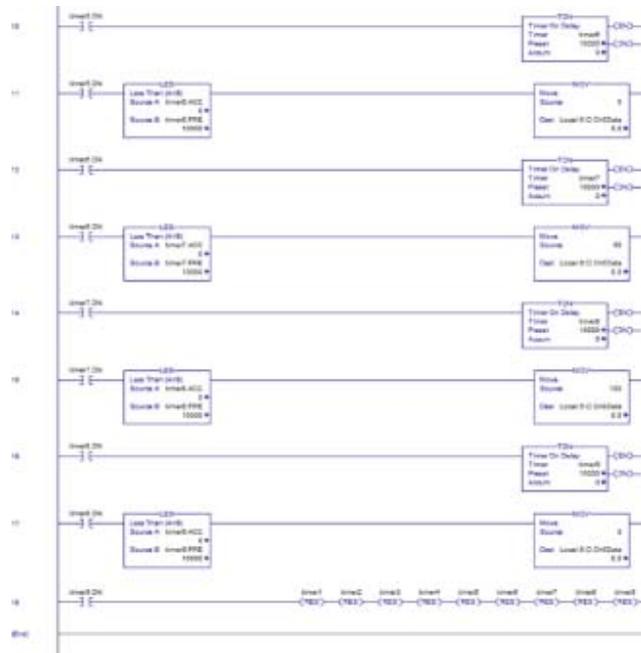


Fig. A.3 Algoritmo de programación en formato ladder.



