

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD**  
**CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### MODELAMIENTO DE LA VALVULA DE CONTROL TEKNOGRAF 202316 PARA LA INCUBADORA NEONATAL

Tesis para optar el Título de Ingeniero electrónico, que presenta el bachiller:

**Edson Bedriñana Enciso**

**ASESOR: José Dávalos Pinto**

Lima, septiembre del 2011

## RESUMEN

En la incubadora, ocurre el proceso de creación de un microclima para tratar al recién nacido, donde el flujo de oxígeno es una de las variables que conforma este proceso y debe ser controlada debido a que en exceso puede causar secuelas irreversibles en los neonatos.

Una manera de controlar el flujo dentro de la incubadora neonatal es mediante el uso de la válvula de control, sin embargo, es necesario obtener la función de transferencia en el plano “s” que describa la dinámica del comportamiento de este tipo de actuador y así poder diseñar aplicaciones de control sobre la válvula.

El objetivo de este trabajo es obtener el modelo matemático no paramétrico de la válvula de control Teknocraft 202316 para la incubadora neonatal. Este modelo matemático representa el comportamiento de la válvula de control dentro de un rango de flujo determinado.

Para obtener la función de transferencia que describa el comportamiento de la válvula, se usaron los métodos de Ziegler y Nichols, Smith, 123c de Alfaro y Strecj. La captura de los datos de los ensayos se realizó mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ) instalado en una computadora.

Mediante un análisis de comparación gráfica y cualitativa, se seleccionó la función de transferencia que representa mejor la respuesta de la válvula. Los parámetros obtenidos son las constantes de tiempo:  $\tau_1$  y  $\tau_2$ , el tiempo muerto  $t_m$  y la ganancia estática  $k_p$ , variando según método

Finalmente, el modelo matemático no paramétrico obtenido mediante el método Smith, función de primer orden, representa mejor el comportamiento de la válvula tekno craft en comparación con los otros métodos propuestos.

FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Modelamiento de la válvula de control Teknocraft 202316 para la incubadora neonatal  
 Área : Bioingeniería # 811  
 Asesor : José Dávalos Pinto  
 Alumno : Edson Bedriñana Enciso  
 Código : 20037006  
 Fecha : 17/05/2010



**Descripción y Objetivos**

Actualmente, en la industria se tienen procesos industriales con cierto grado de complejidad que requieren urgentemente ser resueltos mediante técnicas modernas de modelamiento. Esto se debe a la gran demanda de mercado. Sin embargo, este cambio es debido principalmente a la evolución de tecnología del ordenador. La automatización ha aportado un aumento de la productividad de algunos sectores industriales.

Para aumentar la competitividad ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas: métodos y herramientas que permitan maximizar la eficiencia de los procesos, desarrollando controladores de calidad, maximizando la flexibilidad de los procesos con el menor ajuste de la máquina, esto implica conocer el comportamiento dinámico del proceso. En consecuencia es de suma importancia la obtención de modelos de procesos industriales con la finalidad de conocer su dinámica que describa el comportamiento para diseñar luego el controlador.

El objetivo de este proyecto consiste en realizar un modelado experimental de una electroválvula de control de flujo de oxígeno para la incubadora neonatal.

El sistema para la obtención del modelo consta de una tarjeta de adquisición de datos, una fuente de alimentación de 2A, una computadora, un balón de oxígeno, un transmisor y la válvula de control de flujo. Se elaborará un programa de aplicación para la toma de datos y análisis del sistema usando Matlab y Simulink, obteniendo como resultado una función de transferencia.

MÁXIMO 50 PÁGINAS

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA

*Andrés Flores Espinoza*  
Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica



FACULTAD DE  
CIENCIAS E  
INGENIERÍA



PONTIFICIA  
UNIVERSIDAD  
CATÓLICA  
DEL PERÚ

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

Título : Modelamiento de la válvula de control Teknocraft 202316 para la incubadora neonatal

Índice

Introducción

1. La válvula de control de flujo como actuador
2. Identificación de sistemas.
3. Identificación no paramétrica de la Válvula de control
4. Resultados

Conclusiones

Recomendaciones

Bibliografía

Anexos

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU  
SECCION ELECTRICIDAD Y ELECTRONICA



Ing. ANDRES FLORES ESPINOZA  
Coordinador de la Especialidad de Ingeniería Electrónica

MÁXIMO 50 PÁGINAS



## INDICE

### Introducción

#### Capítulo 1: La Válvula de Control de Flujo como Actuador

1.1	Modelamiento de la Válvula.....	01
1.2	Planteamiento del Problema.....	04
1.3	Introducción de los Proceso de ventilación para una incubadora.....	04
1.4	Declaración del marco problemático.....	05
1.5	Objetivos.....	06

#### Capítulo 2: Identificación de Sistemas

2.1	Descripción de la Válvula.....	07
2.2	Requerimientos de los procesos industriales.....	08
2.3	Sistemas de control y modelos.....	08
2.3.1	Sistemas lineales y no lineales.....	09
2.3.2	Función de Transferencia de un Proceso .....	10
2.4	Identificación de procesos.....	10
2.5	Modelo matemático.....	11
2.5.1	Modelos no paramétricos.....	12
2.5.2	Modelos paramétricos .....	12
2.6	Válvula de control.....	13
2.6.1	Válvula Solenoide.....	13
2.6.2	Válvula solenoide de acción directa.....	15
2.6.3	Modelo matemático de la Válvula Solenoide.....	16
2.7	Identificación de procesos de modelos no paramétricos.....	21
2.7.1	Análisis de la respuesta temporal.....	21
2.7.2	Método de Ziegler y Nichols.....	22
2.7.3	Método de Smith.....	23
2.7.4	Método 123c.....	24
2.7.5	Método de Strecj.....	25
2.8	Métodos de índices de desempeño.....	25
2.9	Criterios de selección de la válvula de control del tipo solenoide.....	27

2.10	Adquisición de datos por computador y frecuencia de muestreo.....	27
<b>Capítulo 3: Identificación no paramétrica de la válvula de control</b>		
3.1	Introducción.....	29
3.2	Diagrama de bloques.....	29
3.3	Etapa de acondicionamiento.....	30
3.4	Característica estática de la válvula.....	33
3.5	Identificación del Modelo.....	37
3.5.1	Identificación mediante el método de Ziegler y Nichols.....	38
3.5.2	Identificación mediante el método de Smith.....	39
3.5.3	Identificación mediante el método de 123c.....	41
3.5.4	Identificación mediante el método de Strecj.....	42
<b>Capítulo 4: Resultados</b>		
4.1	Análisis del modelo de Ziegler y Nichols.....	44
4.2	Análisis del modelo de Smith.....	45
4.3	Análisis del modelo de 123c.....	46
4.4	Análisis del modelo de Strecj.....	47
4.5	Indicadores.....	47
<b>Conclusiones</b>		
<b>Recomendaciones</b>		
<b>Bibliografía</b>		
<b>Anexos</b>		

## Introducción

Para aumentar la competitividad de los procesos, ha sido necesario desarrollar nuevas técnicas: métodos y herramientas que permitan maximizar la eficiencia de los sistemas, desarrollando controladores de calidad, incrementando la flexibilidad de los procesos con el menor ajuste de la máquina, esto implica conocer el comportamiento dinámico del proceso. En consecuencia, es importante la obtención de modelos de procesos industriales con la finalidad de conocer la dinámica que describa el comportamiento del proceso para poder realizar posteriormente el diseño de un controlador.

El objetivo de este trabajo consiste en realizar un modelo experimental de la válvula de control de flujo Teknocraft 202316 para la incubadora neonatal.

El sistema usado para la obtención del modelo consta de una tarjeta de adquisición de datos instalada en una computadora, un amplificador de voltaje de 2A, un balón de oxígeno, un transmisor y la válvula de control de flujo. Se elaborará un programa de aplicación para la toma de datos y análisis del resultado usando el software Matlab y Simulink.

El desarrollo de la presente tesis está dividido en 4 capítulos. En el primer capítulo se realiza la explicación de la válvula de control, la oxigenoterapia en la incubadora neonatal y finalmente se describe el problema.

En el segundo capítulo se realiza la introducción de válvula de control y los métodos que se usan para identificar el comportamiento de un proceso.

En el tercer capítulo se detalla las pruebas que se realizaron a la válvula de control, con la finalidad de obtener su comportamiento.

Finalmente, en el cuarto capítulo se realizaron las pruebas comparativas de cada uno de los modelos obtenidos aplicando criterios de validación y se escogerá el modelo que cumpla con estos criterios.

## CAPÍTULO 1

### LA VALVULA DE CONTROL DE FLUJO COMO ACTUADOR

Las válvulas tienen un papel fundamental en la regulación y control de los distintos flujos de un proceso dentro de una planta industrial. Estos son instrumentos esenciales en la industria, debido a su diseño y materiales de fabricación, estas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. La válvula de control generalmente constituye el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comporta como un orificio cuya acción de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un flujo de una forma determinada.

#### **1.1 Modelamiento de la válvula**

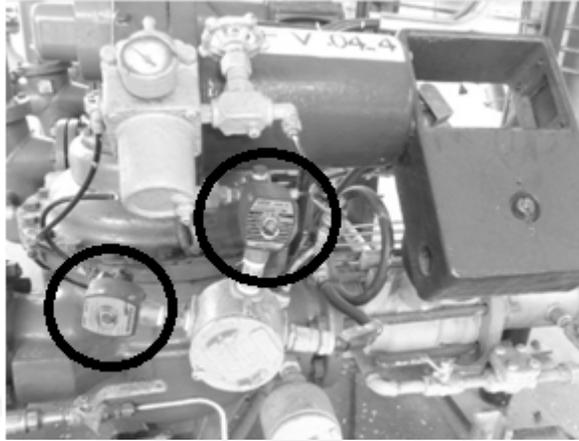
Los sistemas que controlan los procesos industriales han evolucionado en las últimas décadas, coexistiendo equipos electrónicos, mecánicos y de telecomunicaciones dentro de un mismo sistema. Este cambio es debido primordialmente a la evolución de la tecnología del ordenador. El poder automatizar procesos complejos ha significado el aumento de la productividad en algunos sectores, que obligó a la industria adaptarse a las demandas del mercado para aumentar su competitividad. [1]

Estos avances no solo son una mejora en instrumentos de panel: PLC, Controladores, etc, sino también para las válvulas de control. La comunicación de los instrumentos con los controladores de proceso es comúnmente a través del protocolo estándar de señales analógicas de 4 – 20 mA. La tendencia es tratar de migrar a una comunicación totalmente digital (Field Bus Foundation), paralelamente, en el avance tecnológico de las válvulas de control se han incorporado posicionadores y controladores inteligentes.

Dentro del campo de actuadores, la válvula solenoide es una alternativa fiable para accionar actuadores neumáticos o hidráulicos. Este tipo de válvulas en su mayoría funcionan bajo el mismo principio y su uso se incrementó debido a la demanda exigente de los sistemas de control.

Existen sistemas de control cuyos elemento finales de control son válvulas solenoides, como es el caso de una válvula neumática que se muestra en la figura

1.1. Las válvulas solenoides controlan la apertura y cierre de la válvula de control mediante el paso o salida de aire a una presión de 30 PSI, logrando mover el pistón o diafragma para que regule y controle el flujo desplazado.



**Figura 1.1: Vista de las 2 válvulas solenoides de un sistema de control de volumen en la Refinería La Pampilla.**

Obtener el modelo de este sistema, figura 1.1, implica centralizar variables tales como la temperatura del producto y los pulsos del contómetro (equipo que mide el volumen desplazado mediante pulsos), estas señales, entre analógicas y digitales, son las entradas al sistema de control (accuload) quien se encarga de controlar el volumen despachado. El accuload se encarga de procesar la información recibida mediante un modelo matemático complejo almacenado su memoria. Ese modelo matemático fue obtenido mediante pruebas siendo la señal de consigna el volumen a despachar. En este caso específico el modelo de la válvula solenoide forma parte del modelo general del sistema y su comportamiento se ve reflejado en la rápida apertura o cierre de la válvula de control que corresponde a la variable del volumen desplazado.

Existen diferentes aplicaciones e investigaciones específicas que implique el uso de la válvula solenoide, como es la investigación realizada en la universidad Szeant István [2] cuya finalidad fue de realizar un sistema que sea capaz de controlar la posición de un pistón mediante el uso de dos válvulas solenoides ON/OFF. Para la investigación usaron un encoder de desplazamiento, un sensor de presión, convertidores analógicos-digitales, una interfaz de potencia, un controlador programable, un módulo FPGA y el software labview 2009. Desarrollaron ecuaciones matemáticas con las variables físicas de la válvula como la presión,

flujo y rozamiento del pistón. El resultado de la investigación fue la capacidad de lograr un sistema de control de posición del pistón con válvulas solenoides de bajo costo y con una mínima cantidad de sensores.

En el ámbito automotor, existe la tendencia de minimizar el consumo de combustible manteniendo las mismas prestaciones de la máquina, esto es posible debido a la interacción de la mecánica y la electrónica. En este sentido, los actuadores electromagnéticos se han convertido en una mejor alternativa de aplicación en vez de los actuadores neumáticos o hidráulicos. Relacionado a este tema, existe una investigación desarrollada por la universidad técnica Gheorghe Asachi de Rumania [3] donde se realizó una investigación sobre el moldeamiento de la válvula solenoide para un sistema de control automatizado. Se obtuvieron dos modelos matemáticos, el primero es un modelo de entrada-salida linealizado y el segundo es un modelo de espacio de estados, ambas funciones de transferencia fueron simuladas en Matlab/Simulink y validadas mediante la comparación con el resultado obtenido a través de un banco de pruebas, finalmente se concluye que la respuesta del modelo obtenido refleja un comportamiento similar a la respuesta obtenida en el banco de pruebas.

Para comprobar la exactitud del modelo se utiliza una tarjeta de adquisición de datos que tiene como entrada la respuesta del modelo para diferentes tipos de entradas. Como es el caso de la investigación realizada en el Instituto Tecnológico de Madras de India [4] sobre la manera de cómo mantener constante la fuerza que ejerce el émbolo a través de todo su recorrido. Para este propósito se utiliza un sensor de desplazamiento y un sensor de fuerza, las salidas de ambos sensores se conectan con la entrada de un sistema de adquisición de datos, y esta se conecta hacia una computadora. El resultado de la investigación fue que la fuerza se mantuvo constante en toda la carrera del émbolo.

En la investigación realizada en la universidad New South Wales, se logró desarrollar un modelo matemático que permite modificar el comportamiento de una válvula ON/OFF a una válvula proporcional. Para tal fin se utilizó un transformador diferencial LVDT (Linear Variable Differential Transformer) que mide la distancia que recorre el émbolo a partir de la tensión generada por este, para luego ser digitalizada y procesada. Los resultados demostraron una adecuada estabilidad y exactitud en las pruebas de simulación así como también en la implementación del sistema de control, además la respuesta a la señal escalón y rampa son similares tanto en la simulación del modelo como en la parte experimental.

## **1.2 Planteamiento del Problema**

En el Perú, existe un déficit respecto a la tecnología médica empleada en Hospitales del MINSA y centros médicos alejados de la ciudad ya que no brindan una adecuada atención. Dentro de este sector poco atendido podemos encontrar a los recién nacidos prematuros. La tasa de mortalidad de esta parte de la población es alrededor de 22 muertes de cada 1000 nacidos [5]. En los neonatos existe un déficit comúnmente conocido como Hipoxia que se define como una anomalía de oxigenación a los tejidos, que no permite una función metabólica adecuada. De igual manera tenemos la Hipoxemia que es definida como la presión de oxígeno en los gases arteriales por debajo de lo normal ( $PaO_2$ ), esta deficiencia de oxígeno en la sangre arterial puede ser consecuencia de un gasto cardíaco, presión tisular inadecuada o anemia. Los principales síntomas de esta deficiencia son: hipotensión, arritmias cardíacas, taquicardia, disnea, somnolencia, cefalea, desorientación, náusea, cianosis. Para controlar esta deficiencia existe un tratamiento que consiste en someter al paciente a una dosis de oxígeno mediante métodos o sistemas de administración de oxígeno, este tratamiento es conocido como Oxigenoterapia.

Existen diferentes tipos de tratamiento, de manera que solo se mencionará los sistemas de tratamiento de alto flujo de oxígeno, estos equipos proveen todo el flujo requerido por el paciente y en la mayoría de los casos, estos utilizan un mezclador de gases que mezcla precisamente aire y  $O_2$ , regulando de esta manera la concentración de oxígeno inspirado ( $FiO_2$ ) sea la correcta. Estos equipos son aplicados principalmente para recién nacidos, siendo la incubadora el equipo primordial usado para este tipo de tratamiento debido a que posee una cámara diseñada que provee un micro clima al recién nacido. [6]

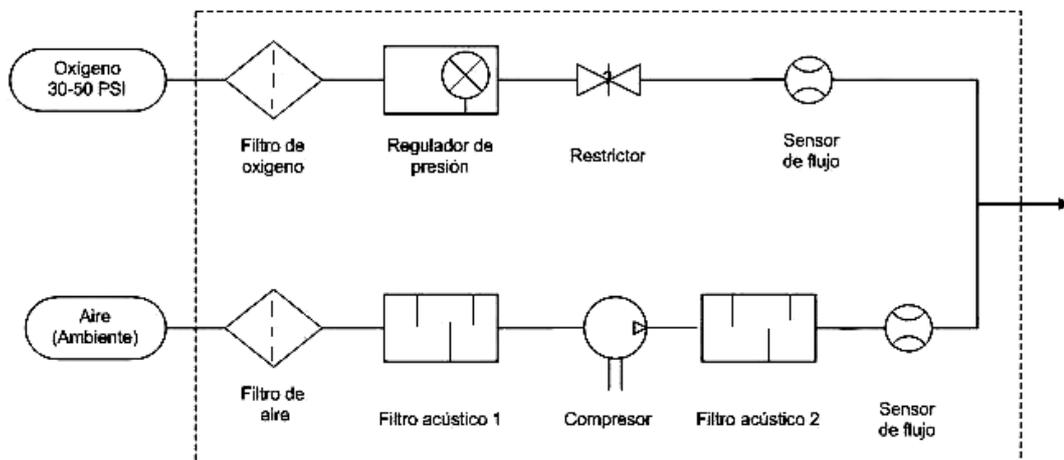
## **1.3 Introducción de los proceso de ventilación para una incubadora**

La incubadora es un equipo médico que posee una cámara normalmente fabricada de plexiglass de manera que en su interior se coloca al neonato con el fin de proporcionarle un medio ambiente artificial controlado. Dependiendo del tipo de incubadora, se pueden controlar los parámetros como la temperatura, la humedad y la oxigenación del aire que rodea al paciente, o algunos de estos parámetros conjuntamente [7].

La energía calorífica puede ser transferida de tres maneras: conducción, convección y radiación. La incubadora transfiere calor al paciente principalmente

por convección, es decir la transferencia de calor se realiza por medio de un fluido (aire en movimiento). El intercambio de calor entre el neonato y su entorno, se ve influenciado por factores como: el tamaño del neonato, la tasa metabólica, las propiedades térmicas del colchón, la temperatura, humedad y velocidad del aire, etc. Por estas razones es importante controlar cada uno de estos parámetros para poder obtener y mantener un ambiente térmico neutral adecuado para el neonato. En particular, es necesario enriquecer el ambiente con oxígeno adicional, pudiendo ser desde un cilindro, tanque o una toma mural de oxígeno conectado mediante una manguera especial y un regulador de presión hacia la incubadora. Existen incubadoras con control y monitoreo de oxígeno integrado facilitando la terapia del paciente.

El elemento final de control es la válvula, esta controlará el flujo de oxígeno de acuerdo a la condición de la terapia para el recién nacido. En la figura 1.2 se muestra parte del circuito del sistema de oxigenación del CPAP (de las siglas en inglés “presión positiva continua en la vía aérea”) [8]. Este circuito está conformado principalmente por un regulador de presión, una válvula de control, transmisor de flujo y filtros.



**Figura 1.2: Sistema neumático del CPAP. [9]**

#### 1.4 Declaración del marco problemático

En el Perú existe la necesidad de obtener mayor cantidad de equipos médicos que puedan satisfacer la demanda de la población alejada de las ciudades, y en particular los neonatos prematuros, esta deficiencia de equipos es una de las causas de la alta tasa de mortalidad infantil, la falta de incubadoras y las

deficiencias técnicas en las incubadoras convencionales son perjudiciales para los recién nacidos, se suma a este punto la inadecuada administración de oxígeno, que pueda ocasionar secuelas irreversibles como ceguera, daños cerebrales, etc. Por esta razón, existe la necesidad de controlar el flujo de oxígeno en las incubadoras para neonatos. Para tal fin se usará una válvula de control que permita regular el flujo de oxígeno; sin embargo, es importante conocer el comportamiento de la válvula de control, obtener una función matemática que represente aproximadamente su dinámica.

## 1.5 **Objetivos**

### **Objetivo general**

Obtener el modelo no paramétrico de la válvula de control Teknocraft 202618.

### **Objetivos específicos**

- a) Estudiar el modelamiento de actuadores tipo solenoide.
- b) Adquirir datos de la válvula de control, mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).
- c) Obtener un modelo matemático mediante los métodos Ziegler y Nichols, Smith, 123c y Strejc.

## CAPÍTULO 2

### IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS

La identificación de un sistema es una representación matemática basada en deducciones y estudios sobre el comportamiento de un sistema hacia una señal de entrada determinada, el resultado es un patrón de dicho comportamiento basado en observaciones y estudios de la respuesta del sistema.

En general, existen diferentes métodos de identificación aplicados a distintas áreas, los modelos resultantes sirven para simular, predecir y realizar un control sin la necesidad de usar el sistema real (planta), ahorrándose dinero y tiempo.

En el presente capítulo se realiza una breve descripción sobre la válvula, la importancia de los requerimientos industriales y los métodos de identificación.

#### **2.1 Descripción de la Válvula**

La válvula consiste de dos partes: el cuerpo y el actuador, en el cuerpo está los elementos que hacen posible el paso del fluido, y en el actuador se encuentra las partes de control que hacen posible el movimiento controlado. Es importante mencionar que el cuerpo de la válvula debe de estar realizado de un material resistente, capaz de soportar altas presiones de línea, permitiendo también garantizar la hermeticidad del dispositivo.

Las válvulas de control se pueden clasificar en función del diseño y forma del cuerpo, o dependiendo de la función que van a desempeñar en el sistema, se tiene lo siguiente:

- Válvulas de control
- Válvulas de seguridad
- Válvulas de retención
- Válvulas de alivio

Dentro de las válvulas de control, una característica importante será su modo de accionamiento, tenemos:

- Válvulas manuales
- Válvulas automáticas
- Válvulas eléctricas

El dimensionamiento de la válvula de control se realiza en función del flujo máximo a controlar, siendo este el resultado de la diferencia de presión entre la entrada y la salida manteniendo la válvula abierta en su totalidad.

En una incubadora, el control de flujo de oxígeno se realiza generalmente en forma manual y el control depende de la pericia y atención del asistente médico.

## **2.2 Requerimientos de los procesos industriales**

Los procesos industriales son evaluados de acuerdo a requerimientos de eficacia, disponibilidad, mantenibilidad y seguridad ya que debido a la complejidad del proceso crece constantemente es necesario el desarrollo de herramientas automáticas que faciliten la operación de la planta. Entre las herramientas automáticas se destaca las destinadas a la detección y diagnóstico de fallos. Con una rápida detección de fallos se puede evitar desde una pérdida de prestaciones hasta un deterioro del sistema con consecuencias que pueden ser catastróficas para el propio sistema, incluso para el personal de planta. Los sistemas de detección de fallos se basan en la obtención de síntomas, de señales indicadoras de fallos que muestran la posible existencia y localización de dicho fallo. Uno de los métodos utilizados para ello es la comparación del proceso con un modelo de simulación, de esta manera se puede predecir el comportamiento de un sistema real. [1], [10]

## **2.3 Sistemas de control y modelos**

Según Seborg [21], las estrategias actuales de diseño de controladores se pueden clasificar en: control convencional y control avanzado. El control convencional consiste en un control: manual, PID, de relación, de cascada, en avance o retardo de fase.

En general, el 90% de los controladores de procesos industriales son actualmente convencionales. En cambio, las estrategias de control avanzado se subdividen en: técnicas de control basadas en modelos (control predictivo, control adaptativo, control robusto, control con modelo interno) y técnicas de control basadas en conocimiento (sistemas expertos, control neuronal, control fuzzy). En la utilización de diseños convencionales así como en diseños avanzados, es necesario obtener un modelo numérico preciso que represente aproximadamente la dinámica del proceso.

Para el diseño de controladores y métodos de detección de fallos, es necesario disponer de un modelo matemático que represente aproximadamente el comportamiento del sistema estudiado.

La predicción del comportamiento de un sistema en su fase de diseño, se ha convertido en una necesidad y una herramienta fundamental que ayuda al diseñador no solo a evaluar su funcionamiento, sino también a disminuir los costos generados por rediseños posteriores a la implementación del mismo. El estudio y desarrollo de técnicas de diseño de controladores utiliza métodos numéricos y técnicas de identificación. La técnica aplicada a procesos con una entrada y una salida (SISO), tuvo su origen a principios de los años 70. No es hasta fines de la década de los 90 que empiezan a aplicarse en procesos industriales, algunas de ellas útiles para el estudio de sistemas de múltiple entrada y múltiple salida (MIMO). [11]

Dentro de los diferentes procesos que se llevan en la industria en general, existe la necesidad de utilizar válvulas de control que forman parte de un lazo o circuito de control y permiten mantener controlado las diferentes variables (flujo, nivel, presión y temperatura) de un proceso.

### **2.3.1 Sistemas Lineales y no Lineales**

Un sistema es lineal si se aplica el principio de superposición. El principio establece que la respuesta producida por la aplicación simultánea de dos entradas diferentes es la suma de las respuestas individuales, en consecuencia, para el sistema lineal la respuesta a varias entradas se calcula iniciando una entrada a la vez y sumando todos los resultados, permitiendo así solucionar ecuaciones diferenciales complejas a partir de soluciones simples.

Un sistema es no lineal si no es aplicable el principio de superposición, en consecuencia la respuesta a dos entradas no puede calcularse tratando a cada una independientemente y sumando los resultados. Sin embargo, muchas relaciones físicas se representan frecuentemente mediante ecuaciones lineales y en la mayor parte de los casos las relaciones reales no son verdaderamente lineales, lo son solo en rangos de operación limitados, como es el caso de la válvula de control. [12]

Debido a la dificultad matemática que existe en los sistemas no lineales, resulta conveniente introducir las ecuaciones lineales equivalentes en sistemas no lineales, estas ecuaciones lineales son válidas para un rango limitado de operación.

### **2.3.2 Función de Transferencia de un Proceso**

En general, las funciones de transferencia son usadas para establecer relaciones entre la entrada y salida de un sistema y se describen mediante ecuaciones diferenciales invariantes con el tiempo. Consideremos el sistema lineal e invariante con el tiempo que se describe mediante la siguiente ecuación diferencial [12]:

$$a_0 y^{(n)} + a_1 y^{(n-1)} + \dots + a_{n-1} \dot{y} + a_n y = b_0 x^{(m)} + b_1 x^{(m-1)} + \dots + b_{m-1} \dot{x} + b_m x \quad (n \geq m) \quad (2.1)$$

Siendo la variable  $x$  la entrada e  $y$  la salida del sistema. La función de transferencia se obtiene tomando la transformada de Laplace a toda la ecuación bajo la premisa de que las condiciones iniciales son cero. Se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La función de transferencia es un modelo matemático debido a que es un método operacional que expresa la ecuación diferencial que relaciona la variable de salida con la variable de entrada.
- Si se conoce la función de transferencia de un sistema, se estudia la respuesta o salida para varias formas de entrada, con la finalidad de entender la naturaleza del sistema.
- La función de transferencia es independiente de la magnitud y naturaleza de la entrada o función de excitación.
- Si se desconoce la función de transferencia, se puede obtener experimentalmente introduciendo entradas conocidas para estudiar la respuesta del sistema, como es el caso de este trabajo de tesis.

### **2.4 Identificación de Procesos**

Se denomina identificación a la técnica de construir un modelo a partir de las variables medidas del proceso: entradas o variables de control, salidas o variables controladas y perturbaciones. En general se puede escoger entre dos tipos: dominio temporal y dominio de la frecuencia.

Se debe tener en cuenta el tipo de modelo matemático que se pretende identificar. Existen varias formas de catalogar estos modelos matemáticos [10]:

deterministas o estocásticos, dinámicos o estáticos, de parámetros distribuidos o concentrados, lineales o no lineales, y finalmente de tiempo continuo o discreto. En general un modelo se desarrolla siempre a partir de una serie de aproximaciones e hipótesis, en consecuencia es una representación parcial de la realidad.

Finalmente, en la etapa de validación del modelo se debe preguntar si el modelo identificado se aproxima al proceso estudiado y así definir criterios para evaluar la calidad del modelo. En la Tabla 2.1, se muestra el objetivo final del modelo y método de identificación.

**Tabla 2.1: Relación entre el objetivo final del modelo (aplicación) y las especificaciones del proceso de identificación [13].**

Objetivo final del modelo, aplicación	Tipos de modelos	Requerimientos de precisión del modelo	Método de identificación
Verificación de modelos teóricos	Lineal, Tiempo continuo, No paramétrico/ Paramétrico	Media / alta	Off-line, Respuesta transitoria, Respuesta frecuencial, Estimación paramétrica.
Sintonía de controladores	Lineal, Paramétrico, Tiempo continuo	Medio	Off-line Respuesta transitoria
Ayuda al diseño de algoritmos de control	Lineal, Paramétrico, (no paramétrico) Tiempo discreto	Medio	Estimación paramétrica On line / off line
Control adaptativo	Lineal, Paramétrico, Tiempo discreto	Medio	Estimación paramétrica On-line
Supervisión y detección de fallos	Lineal / no lineal, Paramétrico, Tiempo continuo	Alto	Estimación paramétrica On-line

## 2.5 Modelo Matemático

El modelo matemático de un sistema dinámico se define como un conjunto de ecuaciones diferenciales que representa la dinámica del sistema, estas ecuaciones se obtienen a partir de leyes físicas que gobiernan un sistema determinado.

Es importante mencionar que los modelos matemáticos pueden adoptar diferentes formas, entre modelos no paramétricos y paramétricos, el primero se usa si se desea modelar un sistema simple con un alto grado de precisión y el segundo si se desea modelar un sistema mucho más complejo y obtener una mayor exactitud, pudiendo ser uno más conveniente que otro. El sistema a modelar a esta tesis es

simple y según Torsten Soderstom [1], indica que es común usar la señal tipo escalón como entrada de un sistema de flujo y que su respuesta se pueda modelar de manera no paramétrica. Es posible mejorar el grado de exactitud y precisión del modelo matemático aumentando las ecuaciones para describir un sistema completo, Sin embargo, se debe establecer un equilibrio entre la simplicidad y precisión de los resultados analizados. [12]

De manera general, cuando se realiza un modelo matemático, es conveniente desarrollar primero un modelo simplificado para obtener una vista panorámica de la solución. Los métodos de identificación pueden clasificarse en función de los modelos obtenidos como: técnicas de identificación no paramétricas y técnicas de identificación paramétricas.

### **2.5.1 Modelos no Paramétricos**

Este método es aplicable siempre y cuando los procesos sean lineales o linealizables, en la práctica, para usar este criterio no se debe suponer de ningún tipo de estructura base; los resultados obtenidos son de tipo gráfico, y de acuerdo a la característica de la curva se puede obtener datos relevantes del modelo. [11]

Análisis de respuesta transitoria, este se basa en la obtención de la respuesta del sistema a una señal de entrada de tipo impulso o escalón y se registra la salida para procesar los datos y obtener el modelo correspondiente.

Análisis de correlación, es un método de dominio temporal, útil para sistemas lineales y con señales continuas o discretas. Se obtiene como resultado la función de correlación entre las variables de interés. Las técnicas frecuenciales son utilizadas directamente para estimar la respuesta frecuencial. En esta técnica se puede diferenciar el análisis de Fourier del análisis Espectral.

### **2.5.2 Modelos Paramétricos**

Lo contrario sucede en el caso de la identificación paramétrica; se toma como modelo una determinada estructura y los parámetros se calculan minimizando ciertos criterios de error entre el modelo y el proceso. Dentro de la técnica de identificación paramétrica se cita:

(1) Técnicas frecuenciales, donde se busca que el error entre la respuesta frecuencial real del proceso y la respuesta frecuencial del modelo sea lo mínimo posible.

(2) Técnicas temporales, la cual minimiza el error temporal entre el modelo y el proceso.

Ambas técnicas pueden ser aplicadas para la estimación de los parámetros de modelos continuos como también discretos. [11]

## 2.6 Válvula de Control

Las válvulas son elementos finales de control, realizan la función de variar el flujo que atraviesa la línea donde la válvula está instalada. Las válvulas se comportan como un orificio de área variable y es regulada de forma manual, neumática o eléctrica.

Principalmente la válvula consta de los siguientes componentes: el actuador convierte la señal de entrada en un desplazamiento lineal o rotacional, este movimiento es trasladado al cuerpo, el cual permite el menor o mayor paso del fluido. En caso de no haber señal de accionamiento en la válvula, esta adoptará una posición determinada (cerrada o abierta en fallo). En la figura 2.1 se muestra los principales actuadores, siendo uno de ellos el actuador tipo solenoide. [14]

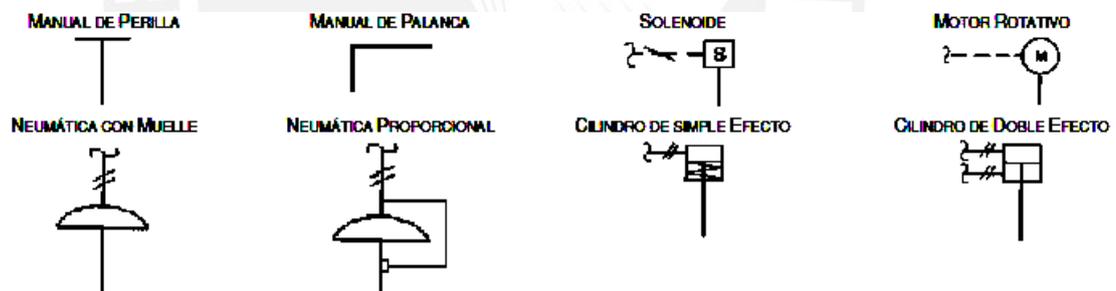


Figura 2.1: Principales tipos actuadores. [10]

### 2.6.1 Válvula solenoide

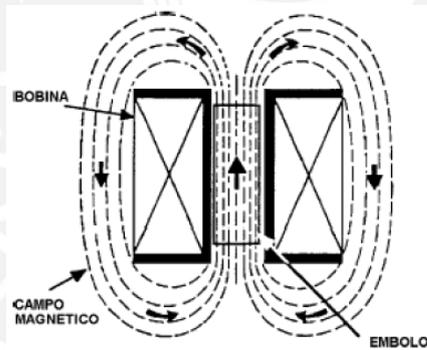
Existen diferentes aplicaciones en donde algún tipo de actuador electromagnético es usado: frenos electromagnéticos, aplicaciones en medicina, motores de combustión, etc. Estas válvulas son usadas en diferentes procesos de la industria, ya que permiten controlar el flujo como gases y líquidos. Las válvulas accionadas por solenoides (conductor, en forma de bobina, ubicado alrededor de un émbolo) son instaladas en lugares donde el acceso es difícil, como también facilitan la automatización del proceso ya que son accionadas eléctricamente.

Los tipos de accionamiento de la válvula solenoide son: el tipo ON/OFF y el tipo proporcional donde la apertura de la válvula tiene relación directa con el voltaje que hay en sus terminales. Estas válvulas son accionadas con la variación de la corriente que circula a través del solenoide. Esta corriente produce un campo magnético y una fuerza que atrae el émbolo móvil. Si se des-energiza la bobina, el efecto de campo magnético desaparece y el émbolo regresa a su posición normal.

El comportamiento del solenoide es similar al comportamiento de un electroimán, debido al efecto de corriente circulante, este campo electromagnético generado incide sobre el émbolo móvil, y como consecuencia se produce una fuerza que ocasiona el movimiento del émbolo permitiendo el cierre o apertura de la válvula. Esta bobina genera un campo magnético siendo la corriente calculada mediante la ley de Ampere:

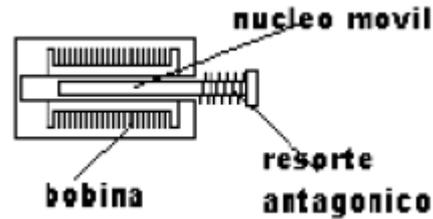
$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = i \quad (2.2)$$

En la figura 2.2 se muestra un diagrama donde se aprecia el campo magnético generado.



**Figura 2.2: Campo magnético producido por una bobina. [15]**

La fuerza que produce el campo magnético generado actúa sobre el émbolo, tal como se aprecia en la figura 2.3, el movimiento generado por dicha fuerza hace que el émbolo se mueva hacia la izquierda.

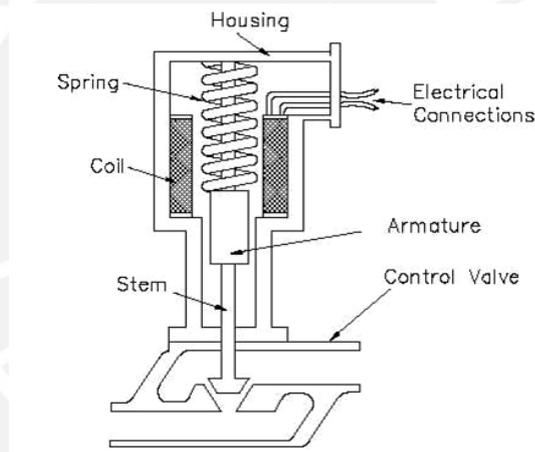


**Figura 2.3: Movimiento del émbolo dentro de una bobina. [15]**

En la industria existe gran variedad de válvulas del tipo solenoide, dentro del cual se pueden agrupar de acuerdo a su aplicación, construcción o forma.

### **2.6.2 Válvula solenoide de acción directa**

Dentro de esta gama de válvulas, el flujo es controlado mediante el émbolo móvil debido a la fuerza magnética generada; en la figura 2.4 se muestra una válvula normalmente cerrada de dos vías.



**Figura 2.4: Corte de una válvula de acción directa. [16]**

Al energizar la bobina, la aguja asociada a la parte inferior obstruye el orificio impidiendo el paso del flujo. Cuando circula corriente por el solenoide, se produce un campo magnético que atrae el émbolo hacia arriba permitiendo el paso del fluido. En el momento que se des-energiza la bobina, el émbolo cae por la gravedad, o por efecto de un resorte, impidiendo el paso del flujo. Según el tipo de aplicación se usan resortes que facilitan la instalación de las válvulas en posiciones no horizontales. Dependiendo de la diferencia de presión entre la entrada y la salida de la válvula, el émbolo necesitará mucha o poca fuerza si esta diferencia es grande o pequeña, si la diferencia de presiones de la válvula de control excede la capacidad máxima, la fuerza generada por el solenoide no podrá ser capaz de

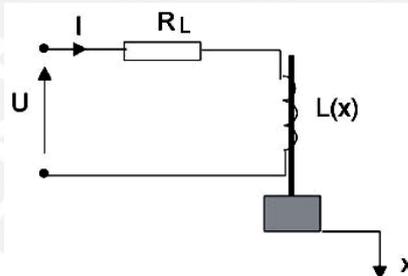
mover el émbolo. Existen otros tipos de válvulas que tienen la capacidad de operar con presiones y flujos altos, a diferencia de las válvulas de acción directa que se limitan a operar a presiones y flujos menores. Las válvulas de mayor capacidad son denominadas *válvulas operadas por piloto*. [15]

### 2.6.3 Modelo matemático de la Válvula Solenoide

La válvula solenoide es utilizada en diferentes procesos así como también donde el acceso del personal técnico es dificultoso o peligroso, estos dispositivos son esenciales en una planta porque son controlados remotamente y se activan por corriente.

En la publicación de Rahman, Cheung y Lim [17], se destaca el uso de la válvula solenoide por su pequeño tamaño, su simple construcción y lo barato de su mantenimiento en comparación con otros actuadores. También se describe el desarrollo de un proyecto que consiste en modelar un actuador no lineal ON/OFF para transformarlo en un actuador proporcional mediante la aplicación de un tipo de control. Es importante resaltar que la mayoría de los actuadores de tipo solenoide trabajan en la región de saturación no lineal magnética. [16]

Para obtener el modelo matemático del solenoide, Rahman [17] realizó un modelo eléctrico de la bobina que permita representar el comportamiento cuando este es energizado, el modelo se muestra en la figura 2.6.



**Figura 2.6: Diagrama eléctrico equivalente de la válvula solenoide. [16]**

El diagrama se conforma de una resistencia ( $R_L$ ) conectada en serie a una bobina ( $L(x)$ ), donde la relación entre corriente y voltaje se obtiene mediante:

$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2.3)$$

EL flujo ( $\lambda$ ) es una variable dependiente de la corriente ( $i$ ) y del espacio de aire ( $x$ ), se detalla las relaciones en la siguiente ecuación:

$$V = Ri + (L_e + \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial i}) \cdot \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2.4)$$

Donde:

- $x$ : desplazamiento lineal del pistón,
- $L$ : inductancia de la bobina electromagnética,
- $R$ : resistencia de la bobina electromagnética,
- $i$ : corriente electromagnética.
- $V$ : voltaje de entrada.
- $\lambda$ : flujo de la bobina.

La ecuación 2.4 representa las características magnéticas del solenoide, y la ecuación 2.5 representa la mecánica de su funcionamiento:

$$m_p \ddot{x} = F_{mag} - K_s x - m_p g \quad (2.5)$$

Donde ( $m_p$ ) representa la masa del émbolo, ( $K_s$ ) es la constante del resorte, ( $g$ ) es la constante de gravedad y ( $F_{mag}$ ) es la fuerza producida por el campo magnético.

Para un instante de tiempo ( $t$ ) y cuando " $x$ " permanezca constante por un periodo de tiempo corto, se obtiene la siguiente ecuación.

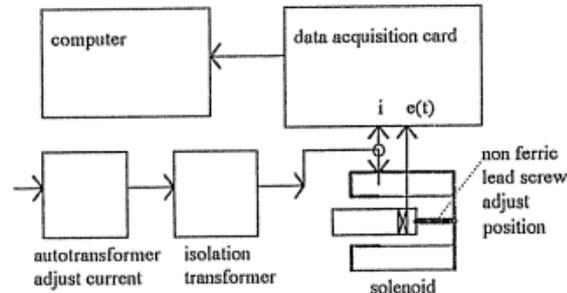
$$F_{mag} = \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial x} \cdot i \quad (2.6)$$

De las ecuaciones 2.3, 2.4, 2.5 se formuló un modelo de estado no lineal.

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= v \\ \frac{dv}{dt} &= \left( \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial x} \cdot i - K_s x - m_p g \right) \cdot \frac{1}{m_p} \\ \frac{di}{dt} &= \left( v - Ri - \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \right) \cdot \frac{1}{L + \frac{\partial \lambda(x,i)}{\partial i}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

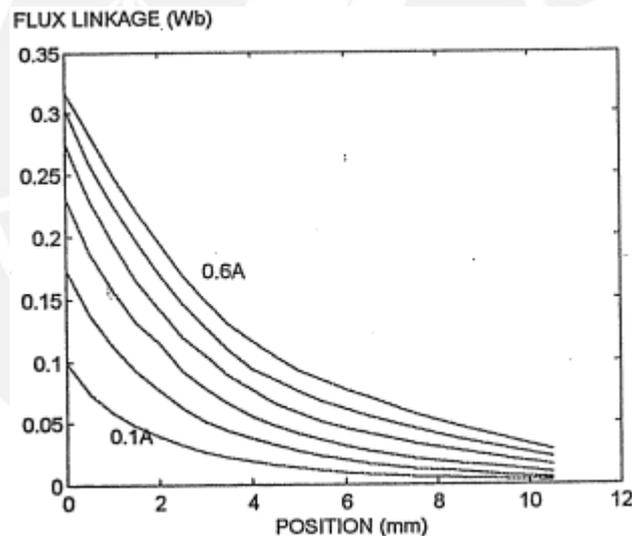
Para medir el flujo se usó una técnica de medición basada en la excitación a.c y la f.e.m inducido. Se colocó un pequeño tornillo para incrementar la posición del

émbolo cada 0.5mm de manera precisa. La finalidad de realizar estas pruebas fue de medir y procesar los parámetros de corriente y voltaje, se muestra en la figura 2.7 el esquema que Rahman realizó para este fin.



**Figura 2.7: Configuración del sistema de medición [17]**

Los valores de  $\frac{\partial \lambda}{\partial x}$  y  $\frac{\partial \lambda}{\partial i}$  fueron obtenidos a partir de las características magnéticas, y se obtuvo la relación del flujo y la corriente respecto a la posición, como se muestra en la figura 2.8.



**Figura 2.8: Relación de flujo vs posición del émbolo y la corriente. [17]**

Para realizar las pruebas y poder obtener un actuador proporcional, Rahman usó un tipo de control de orden reducido, de la misma manera requirió un bloque externo para linealizar la relación de corriente y voltaje. El controlador que aplicó para regular la corriente fue de tipo PI, siendo el procedimiento de Ziegler Nichols para sintonizarlo. [12]

Rahman, utilizó un lazo de control interno para regular la no linealidad de la corriente y voltaje. También incluyó una función que compensa la no linealidad de la

fuerza versus la corriente y la posición, esta función recibe como señal de consigna la fuerza, siendo su resultado la corriente que se aplicará para dicha fuerza. Finalmente el control de trayectoria es de tipo PID, este control supone que el control de corriente tiene una adecuada precisión y que la función no lineal generará una corriente indicada hacia la entrada del controlador de corriente, el diagrama de este sistema se muestra en la figura 2.9.

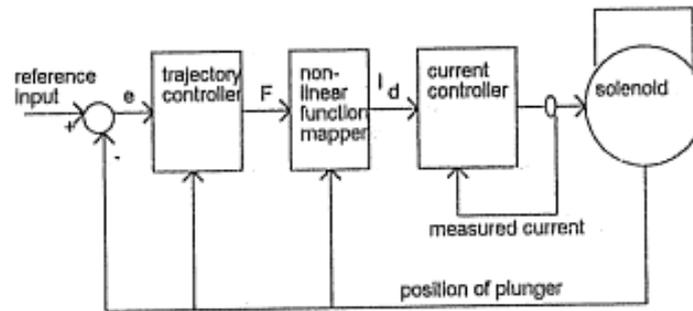


Figura 2.9: Esquema del sistema de control. [17]

La fuerza es calculada a partir de la posición  $x$  del émbolo y la aceleración  $\frac{dv}{dt}$ , estos valores son reemplazados en la ecuación 2.8 para obtener la fuerza requerida.

$$F = m_p \cdot \frac{dv}{dt} + k_s \cdot x + m_p \cdot g \quad (2.8)$$

Luego de plantear el diagrama de bloques del sistema, Rahman simuló la respuesta de la trayectoria y la respuesta al escalón. Se muestra en la figura 2.12 la simulación del controlador; y en la figura 2.10 se muestra la configuración del sistema que implementó.

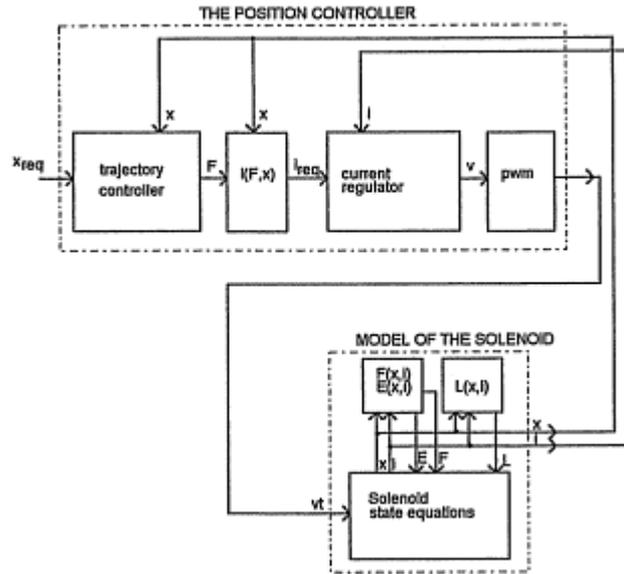


Figura 2.10: Simulación del controlador. [17]

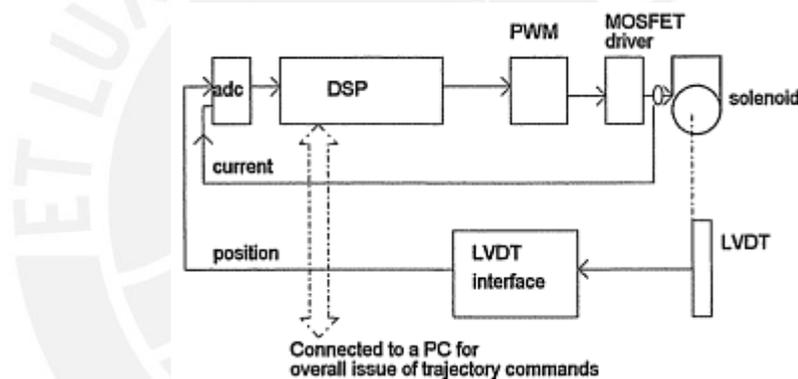


Figura 2.11: Implementación del sistema de control. [17]

En la figura 2.11 se denota los bloques que conforman el sistema de control y se observa la presencia de un sensor, este sensor es básicamente un transformador diferencial LVDT (Linear Variable Differential Transformer) cuya función es medir la distancia que recorre el émbolo a partir de la tensión generada por este, para luego ser digitalizada y procesada.

Los resultados demostraron una adecuada estabilidad y exactitud en las pruebas de simulación así como en la implementación física del sistema de control, además se observó que la respuesta al escalón y de la rampa son parecidos tanto en la simulación como en la parte experimental.

## 2.7 Identificación de procesos de modelos no paramétricos

La principal característica de la identificación de modelos no paramétricos es la manera de cómo se obtiene los modelos a través de curvas o funciones que no pueden ser parametrizados mediante un vector de parámetros. Este tipo de método es utilizado por su simplicidad y aproximación para simular el modelo directamente a partir de la curva de respuesta del sistema. [18][19]

Entre los principales métodos que se usa para la identificación de modelos no paramétricos se tienen los siguientes:

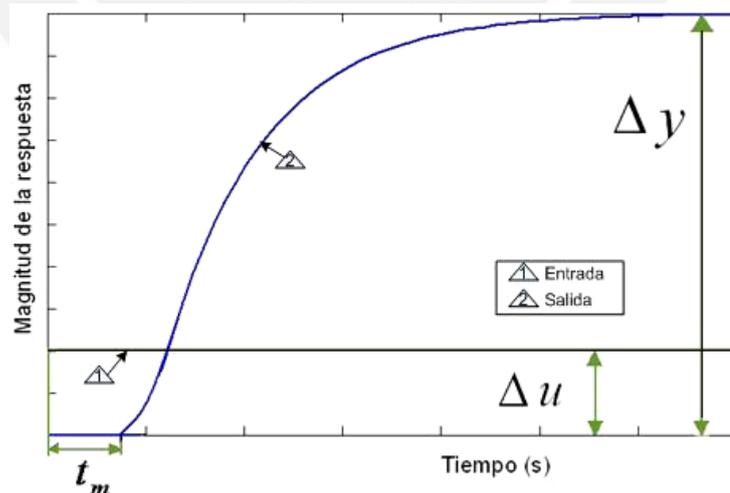
- Análisis de la respuesta temporal
- Análisis de la respuesta frecuencial
- Análisis correlacional
- Análisis espectral

En esta tesis se utilizará el primer ítem, análisis de la respuesta temporal.

### 2.7.1 Análisis de la respuesta temporal

Para este método se usan diferentes tipos de señales, una de ellas es la señal escalón, se usa para estimular el sistema. Mediante técnicas gráficas se estiman los parámetros que forman parte del modelo como coeficientes de las variables. Este modelo representa aproximadamente el comportamiento del sistema.

En la figura 2.12, se muestra la respuesta de un modelo de primer grado a una señal de entrada tipo escalón.



**Figura 2.12: Respuesta de un modelo de primer orden a la señal escalón.**

En la figura 2.12 se observa la respuesta de un sistema con una señal de entrada tipo escalón, se denota los siguientes parámetros:

$\tau_m$  : Tiempo muerto, se obtiene desde el momento de aplicar la señal de excitación hasta que el sistema responda a la señal de entrada.

$\Delta y$  : Ganancia en estado estacionario.

$\Delta u$  : Variación de la entrada aplicada a un sistema.

A continuación se presenta algunos métodos de identificación.

### 2.7.2 Método de Ziegler y Nichols

Este modelo fue propuesto por Ziegler y Nichols y puede utilizarse para obtener un modelo de primer orden más tiempo muerto. Se representa mediante la siguiente ecuación:

$$G_p(s) = \frac{K_p e^{-t_m s}}{\tau s + 1} \quad (2.9)$$

Siendo los parámetros a determinar:

$t$  : Constante de tiempo del proceso

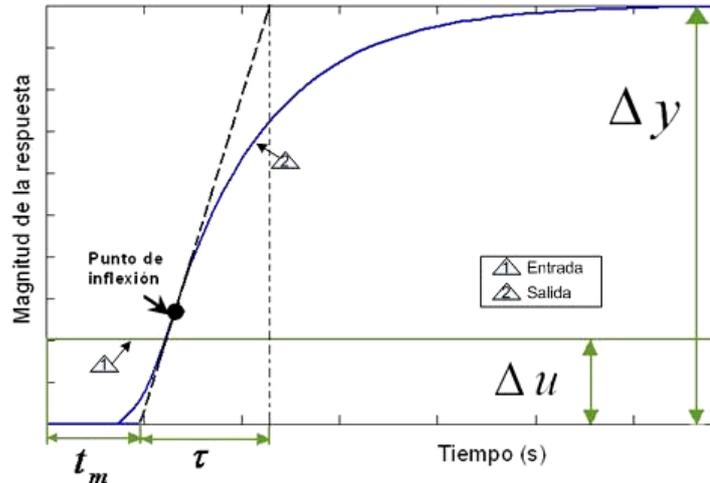
$\tau_m$  : Tiempo muerto del proceso

$k_p$  : Ganancia del proceso

La ganancia  $k_p$  se obtiene a partir de la división entre el cambio total de la salida y el cambio total de la entrada, como se muestra en la ecuación 2.10.

$$k_p = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2.10)$$

Para obtener los 2 parámetros restantes, se traza una recta tangente a la curva de respuesta del proceso, aproximadamente en el punto de inflexión de la curva. Como se muestra en la figura 2.13.

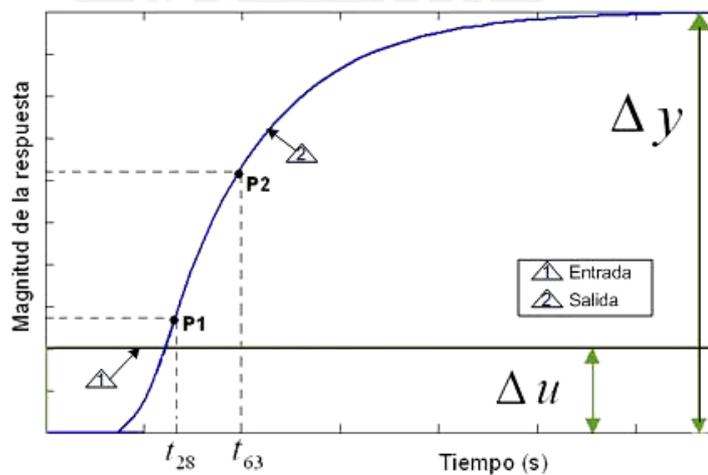


**Figura 2.13: Obtención de los parámetros según el método de Ziegler y Nichols.**

El tiempo muerto ( $t_m$ ) se obtiene desde el instante en que se aplica la señal escalón hasta el punto donde la recta tangente intercepta al eje del tiempo, la constante de tiempo ( $\tau$ ) se obtiene a partir del cruce de la recta tangente con el eje del tiempo y la prolongación del valor de la respuesta estabilizada. [18]

### 2.7.3 Método de Smith

En el método de Ziegler y Nichols existe una pequeña variación en el trazo de la recta tangente afectando el valor del tiempo muerto y la constante de tiempo. Smith establece dos ecuaciones con dos incógnitas utilizando dos puntos sobre la respuesta del proceso, estos puntos se sitúan en el 28.3% y 63.2% de la curva de respuesta, como se muestra en la figura 2.14.



**Figura 2.14: Obtención de los parámetros según el método de Smith.**

Para identificar los dos parámetros que requiere el modelo: la constante de tiempo y el tiempo muerto aparente del sistema; se establece dos ecuaciones:

$$t_{28} = t_m + \tau/3 \quad (2.11)$$

$$t_{63} = t_m + \tau \quad (2.12)$$

De manera que la respuesta del modelo cruza con la del sistema real en estos dos puntos como mínimo. La ganancia se calcula de manera igual al método de Ziegler y Nichols con la ecuación 2.10.

#### 2.7.4 Método 123c

Este método es propuesto por Alfaro [19] y consiste en seleccionar dos puntos correspondientes al 25% y 75% de la respuesta del sistema. Para el presente trabajo se usará la extensión de este método para identificar un modelo de segundo orden sobreamortiguado debido a que la magnitud de la respuesta del estado transitorio no supera a la magnitud de la respuesta estacionaria, de manera que los parámetros del modelo se identifican con las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} \tau' &= 0.5776 \times (t_{75} - t_{25}) \\ t_m' &= 1.5552 \times t_{25} - 0.5552 \times t_{75} \end{aligned} \quad (2.13)$$

Los parámetros  $\tau'$  y  $t_m'$  son parámetros aparentes que se usan para obtener los coeficientes del modelo.

$$\begin{aligned} \tau'' &= \frac{2 \cdot \tau'}{1 + a} \\ \tau_1 &= \tau'', \quad \tau_2 = a \times \tau'', \quad t_m'' = t_m' \end{aligned} \quad (2.14)$$

Donde  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  son las constantes de tiempo y  $t_m''$  el tiempo muerto del modelo, finalmente el valor de "a" es calculado como:

$$a = \frac{t_{50} - t_m' - 1.4362\tau'}{1.9844\tau' - t_{50} + t_m'} \quad (2.15)$$

La ecuación general del modelo a obtener es:

$$G_p(s) = \frac{k_p e^{-t_m'' s}}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}, \quad 0 < a < 1 \quad (2.16)$$

### 2.7.5 Método Strejc

Strejc propuso este método para identificar modelos de polos múltiples. En la figura 2.15, se muestra el trazo de la recta tangente al punto de inflexión y se obtienen valores de  $T_u$  y  $T_a$ . La ganancia estática del modelo se calcula de la misma manera a los métodos Ziegler y Nichols, Smith y 123c de Alfaro.

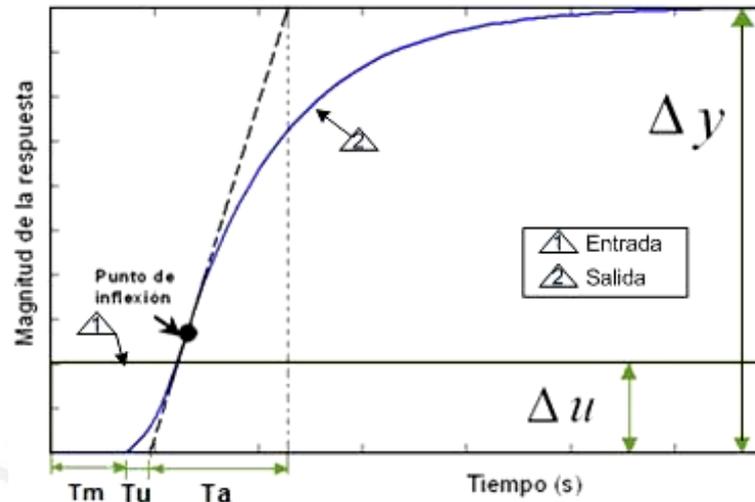


Figura 2.15: Obtención de los parámetros según el método de Strejc.

Strejc propuso el siguiente modelo:

$$G_p(s) = \frac{k_p}{(\tau s + 1)^n}$$

Donde  $n$  indica el orden del modelo y  $\tau$  la constante de tiempo. Siendo el orden del modelo igual al resultado de la ecuación 2.17 redondeado al número inmediato inferior de la Tabla 2.2.

$$n \approx \frac{T_u}{T_a} \tag{2.17}$$

Y la constante de tiempo se obtiene mediante la ecuación 2.18:

$$\tau = T_a \cdot \frac{(n-1)^{n-1}}{(n-1)!} e^{-(n-1)} \tag{2.18}$$

El tiempo muerto del modelo es igual a la suma del tiempo muerto real con el valor  $T_u$  real menos el valor  $T_u$  teórico, este último se obtiene de la Tabla 2.2.

$$T_m = T_{mr} + T_{ur} + T_{ut} \tag{2.19}$$

Tabla 2.2: Parámetros para obtener el orden de la ecuación.

n	Ta/τ	Tu/τ	Tu/Ta
1	1	0	0
2	2.718	0.282	0.104
3	3.695	0.805	0.218
4	4.463	1.425	0.319
5	5.119	2.1	0.41
6	5.699	2.811	0.493
7	6.226	3.547	0.57
8	6.711	4.307	0.642
9	7.164	5.081	0.709
10	7.59	5.869	0.773

### 2.8 Métodos de índice de desempeño

Un modelo es una aproximación del comportamiento dinámico real de un proceso, de modo que es necesario establecer criterios de validación de modelo para tener un índice que indique que tan aproximado es el modelo obtenido al modelo real. Se establecieron los siguientes índices de validación. [18][19]

Integral del error de predicción absoluto:

$$IEAP = \int_0^{\infty} |y_p(t) - y_m(t)| dt \quad (2.20)$$

Integral del error cuadrático de predicción:

$$IECP = \int_0^{\infty} (y_p(t) - y_m(t))^2 dt \quad (2.21)$$

Donde:

$y_p(t)$ : Respuesta del sistema

$y_m(t)$ : Respuesta del modelo

El índice IEAP representa el área diferencial entre la respuesta de la planta y la respuesta del modelo, a menor área diferencial indica que el modelo obtenido se aproxima mejor al sistema real.

El índice IECP indica si existen grandes diferencias entre la respuesta del modelo y la respuesta del sistema, ya que este índice es una función cuadrática. El modelo que resulte con menor IECP indicará que no presenta grandes diferencias con respecto a la respuesta del sistema.

## **2.9 Criterios de selección de una válvula de control**

Para la selección de una válvula, se debe poner énfasis en los diferentes parámetros:

- Fluido a controlar.
- El intervalo de presión de trabajo.
- Características eléctricas de la válvula.

Se debe tener en consideración el rango del voltaje y la frecuencia de la alimentación para no dañar la bobina y dejar la válvula inutilizada. [17]

## **2.10 Adquisición de datos por computador y frecuencia de muestreo**

En las industrias, se utilizan sistemas computacionales para monitorear y manipular datos involucrados en fenómenos físicos que ocurren en los sistemas como: control industrial, sistemas de pruebas y mediciones. En general, la mayoría de los casos, los datos son variables de naturaleza analógica, pueden tomar valores dentro de un rango continuo de tiempo. Como ejemplo podemos tener: flujo, nivel, temperatura, presión, señales de audio, posición, velocidad, etc. Estos sistemas basados en una PC, usan tecnologías recientes como: tarjetas de adquisición de datos insertables o sistemas de control complejos. Esta medida se adopta para resolver un mayor número de aplicaciones que se han vuelto exigentes, como es el caso de los sistemas en tiempo real.

En referencia a la frecuencia de muestreo, se debe tener en cuenta que esta frecuencia debe ser, por lo menos, el doble de la frecuencia de la señal a muestrear, por este motivo se selecciona una frecuencia de muestreo óptima. El teorema de Nyquist afirma que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de la frecuencia más alta de la señal a muestrear; sin embargo, es preferible seleccionar la frecuencia de muestreo de 10 veces la frecuencia mayor de la señal por razones prácticas.

Una señal muestreada mostrará mayor información si la frecuencia de muestreo es de aproximadamente de 10 a 20 veces la frecuencia más alta de la señal. Se puede

obtener la frecuencia de muestreo a partir de la ecuación de primer grado como sigue en la ecuación 2.22. [20]

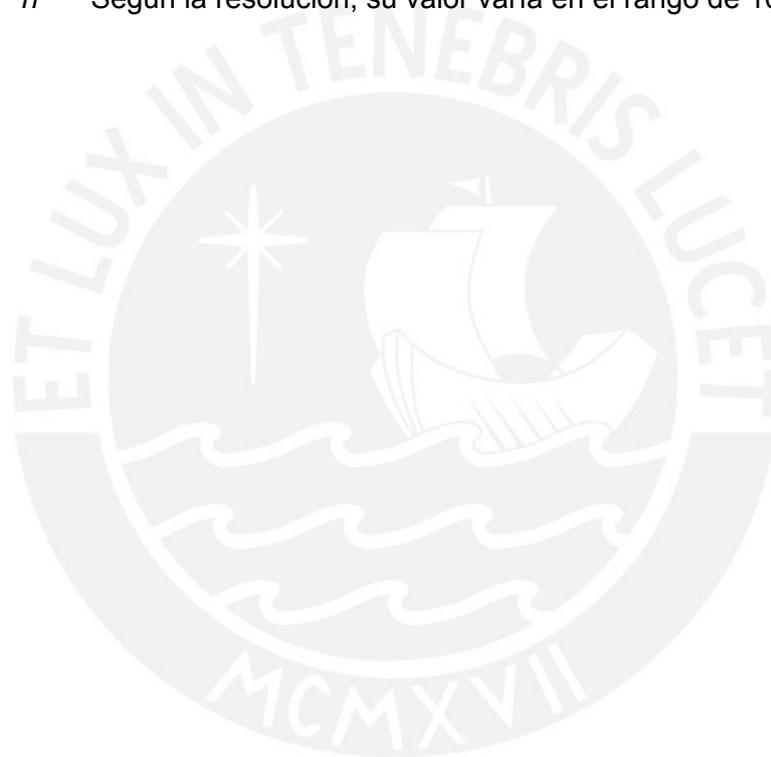
$$G(s) = \frac{k}{s + p} \quad (2.22)$$

El tiempo de muestreo se presenta en la ecuación 2.23.

$$T_m = \frac{1}{n} \left( \frac{1}{p} \right) \quad (2.23)$$

Donde:

- $\frac{1}{p}$  Representa la constante de tiempo dominante
- $n$  Según la resolución, su valor varía en el rango de 10 a 20.



## CAPÍTULO 3

### IDENTIFICACION NO PARAMETRICA DE LA VALVULA DE CONTROL

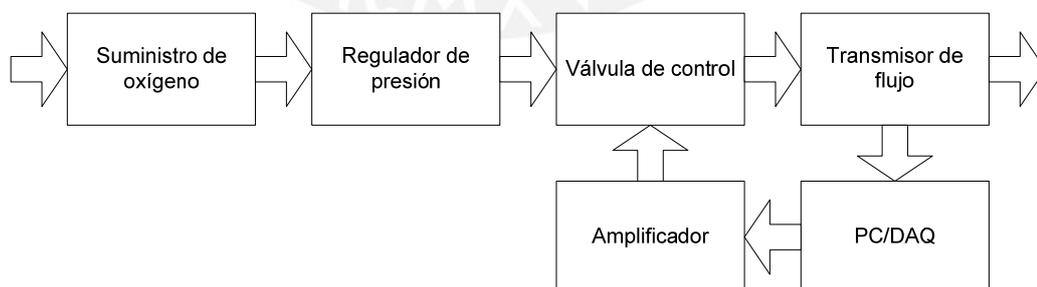
#### **3.1 Introducción**

En este capítulo se presenta el procedimiento que se utilizó para realizar la identificación de la válvula de control que se propone en esta tesis. Este mecanismo es construido para representar el comportamiento de un sistema de regulación de oxígeno. Se señaló en los capítulos 1 y 2 que la identificación es un método de construcción de modelos basados en pruebas.

Para la obtención del modelo se realizaron ensayos con la finalidad de obtener el rango de operación de la válvula, se colocó un regulador de presión a la entrada del sistema para mantener la presión constante a la entrada de la válvula así como también para proteger al transmisor de una tasa de flujo alto que no está dentro del rango de medición del sensor. Se excitó la válvula con la señal escalón para poder realizar la identificación no paramétrica y también se han utilizado los softwares MATLAB® y SIMULINK® para adquirir los datos de las pruebas mediante una tarjeta de adquisición de datos (DAQ).

#### **3.2 Diagrama de bloques**

En la figura 3.1 se presenta el diagrama de bloques del sistema que se usó para la identificación de la válvula. Se usó un balón de oxígeno, un regulador de presión, una válvula de control, un transmisor de flujo, un amplificador de voltaje y finalmente una tarjeta de adquisición de datos. La tarjeta de adquisición de datos realiza la función de interfaz entre la computadora con la válvula de control y el transmisor.



**Figura 3.1: Diagrama de bloques para la adquisición de datos del sistema.**

En el diagrama de bloques que se presenta en la figura 3.1 se observa un regulador de presión, el uso de este regulador es principalmente el de obtener una presión constante y uniforme a la entrada de la válvula. Con este regulador se

puede obtener un flujo de 20 lt/min, siendo el flujo máximo que puede soportar el transmisor para su correcta medición. Esta prueba se realizó con la válvula de control totalmente abierta y se logró obtener una salida de 4.9v del transmisor, esto indica que por el transmisor circula un flujo de 20lt/min aproximadamente.

El tipo de válvula que se usó para los ensayos pertenece a la familia Teknocrافت, y son usadas en diferentes industrias, incluyendo el campo de la medicina.

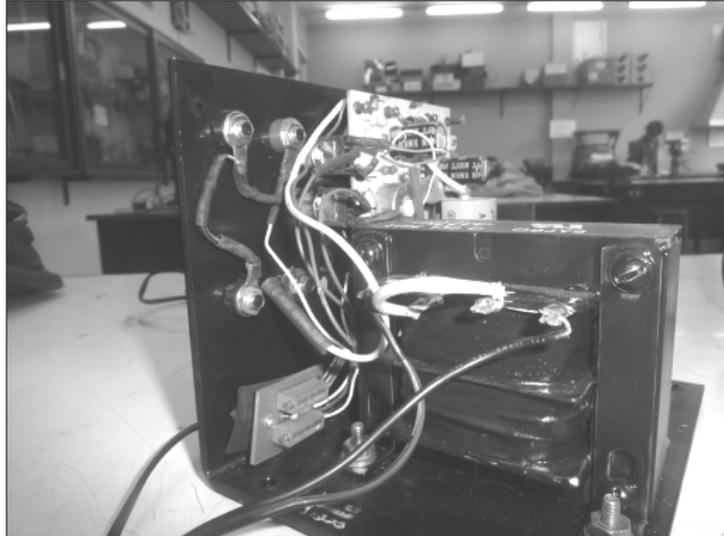
La válvula cuenta con un solenoide que al ser energizada produce una fuerza magnética que hace posible mover el émbolo. Una de las particularidades de esta válvula es brindar una alta respuesta en frecuencia con baja histéresis. Esta marca de válvulas proporcionales es también llamado iQ valves y se activa con un voltaje de 6 a 24 voltios. En la Tabla 3.1, se detalla las características principales de la válvula modelo 202316.

**Tabla 3.1: Datos de la válvula 202316 Teknocrافت. Anexo II**

Part No.	Valve Type	DC Voltage	Orifice Size	PSI Range	Inlet Port Size	Outlet Port Size	Wetted Parts Material
202316	PFCV	24	.625	0-15	3/8 NPT	1/2 NPT	Hard Anodized Alum

### 3.3 Etapa de acondicionamiento

En la etapa de potencia, se cuenta con el amplificador de voltaje de la marca Sola Electric Class 83 de 60 vatios el cual se modificó para poder adaptar la señal de salida de la tarjeta DAQ debido a que la potencia que consume la válvula de control es superior comparado a la pequeña potencia que puede entregar tarjeta DAQ. Se añadió dos potenciómetros al circuito del amplificador para poder usar la fuente como amplificador. En la figura 3.2 se muestra los 2 potenciómetros añadidos.



**Figura 3.2: Amplificador de voltaje modificado.**

Se calibró la relación entre la entrada y salida del amplificador mediante los potenciómetros añadidos a la tarjeta, ya que se necesita que se amplifique la señal según las características eléctricas de funcionamiento de la válvula. El resultado se muestra en la Tabla 3.2.

**Tabla 3.2: Voltaje del amplificador**

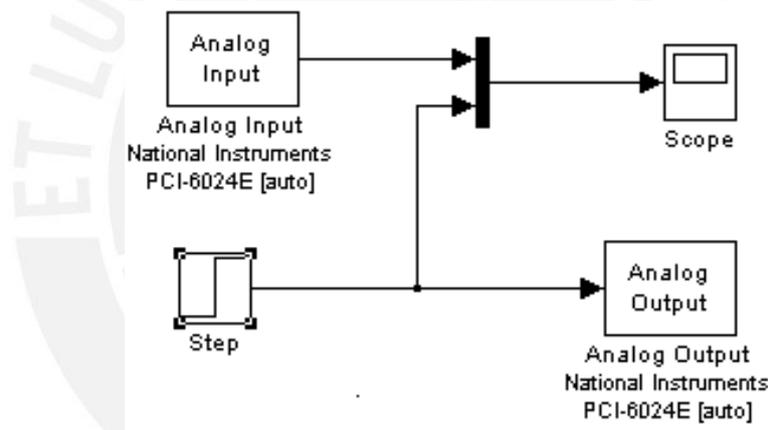
<b>Voltaje de entrada (volt)</b>	<b>Voltaje de salida (volt)</b>
<b>1,00</b>	<b>5,76</b>
<b>2,00</b>	<b>9,54</b>
<b>3,00</b>	<b>14,4</b>
<b>4,00</b>	<b>19,07</b>
<b>4,96</b>	<b>23,66</b>

Se puede observar que hay una ganancia aproximada de 5.76. La calibración de los potenciómetros se realizó de tal manera que el voltaje de salida del amplificador esté comprendido en el rango de funcionamiento de la válvula, evitando el riesgo de dañar a la bobina por sobrevoltaje. Esta configuración se realizó de manera que el voltaje de entrada al amplificador este comprendido dentro de 1 a 5 voltios y se obtenga de 6 a 24 Voltios de salida, ya que este es el rango de operación de la válvula de control.

Se usó para los ensayos la tarjeta de adquisición de datos de la marca Nacional Instruments PCI-6024E, las características técnicas de esta tarjeta se encuentran en el anexo I.

Entre la etapa de salida de la tarjeta DAQ y la entrada del amplificador se colocó el Opam TL081 en configuración seguidor de voltaje, comúnmente llamado buffer, para minimizar el efecto de carga y además para proteger de sobrecorrientes que podrían afectar y dañar la salida analógica de la tarjeta DAQ.

La tarjeta DAQ sin un software adecuado que nos permita realizar y controlar el proceso de adquisición de datos mediante la computadora sería de muy poca utilidad, por este motivo se utiliza un software que integra la tarjeta DAQ con los recursos de la computadora, el driver usado es el NI-DAQ. También se dispuso para las pruebas un software de aplicación que permita manipular los datos adquiridos por la computadora, como también manejar las interfaces de la tarjeta con la computadora, para tal efecto, se usó el software comúnmente aplicado en el área de la ingeniería como es el MAT LAB y SIMULINK. Se muestra en la figura 3.3 la configuración del SIMULINK para obtener los datos de las pruebas.

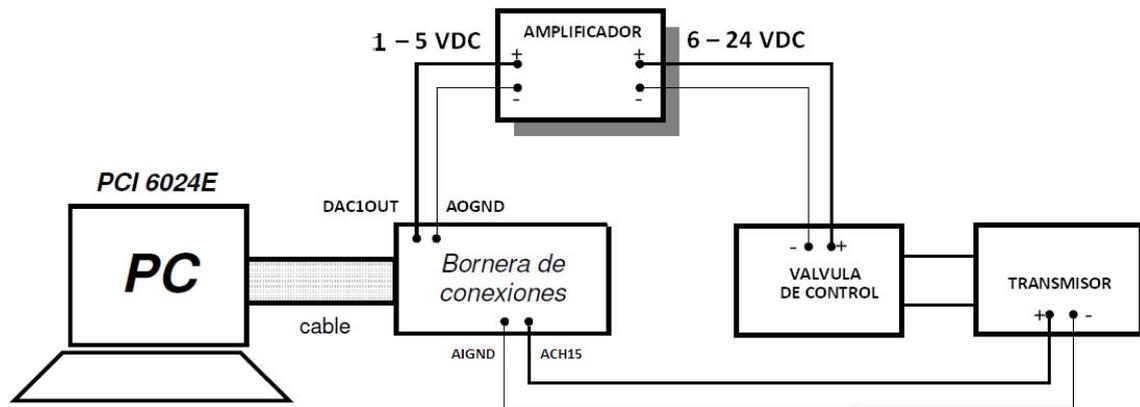


**Figura 3.3: Diagrama en Simulink de ensayos de la válvula.**

Esta tarjeta DAQ cuenta con 16 canales de entradas analógicas y 02 canales de salidas analógicas con un rango máximo: -10 a 10v. Para los ensayos respectivos se usó la bornera de conexiones y se asignaron los pines de comunicación como se muestra la Tabla 3.3 y en la figura 3.4 se muestra el diagrama de conexiones.

**Tabla 3.3: Asignación de pines de la tarjeta DAQ.**

	Pin		
<b>ACH15</b>	<b>23</b>	<b>67</b>	<b>AIGND</b>
<b>DAC1OUT</b>	<b>21</b>	<b>55</b>	<b>AOGND</b>



**Figura 3.4: Diagrama de conexiones del proceso.**

Finalmente, el transmisor que se usó para medir el flujo de oxígeno es de la marca Honeywell, modelo AWM5104N, una característica del transmisor es la respuesta lineal. Más detalle de este transmisor se observa en el anexo III.

### 3.4 Característica estática de la válvula

Una alternativa en la identificación de sistemas dinámicos, es usar los datos experimentales de entrada y salida. Este método se puede usar cuando es complicado de obtener una modelación analítica del sistema, en consecuencia, es recomendable la realizar la identificación no paramétrica. Como se mencionó anteriormente, es importante obtener la identificación de un sistema ya que permite diseñar, posteriormente, una ley de control aplicado al sistema.

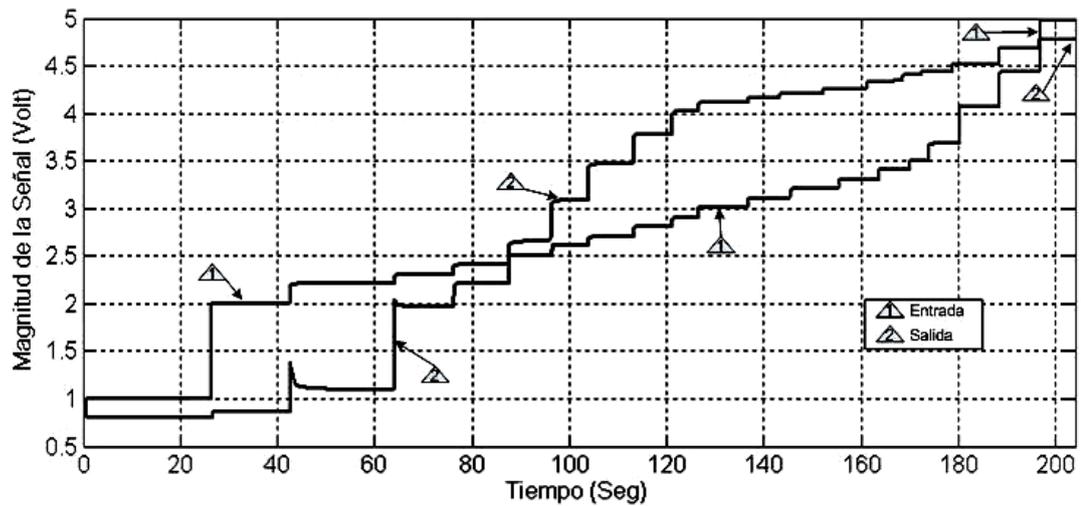
Para obtener la característica estática del proceso se establece una zona lineal en el cual se hará variar el valor de amplitud de la señal escalón. Si excitamos la entrada del sistema con un escalón de amplitud 1V, el voltaje amplificado es 5.76v y la salida del transmisor es 0.8V, esto indica que la válvula no se abrió, ya que para abrir la válvula se necesita como mínimo de 6v en los bornes de la válvula o 1.26v en la entrada del amplificador. Se procedió a aumentar la amplitud del escalón como sigue en la Tabla 3.4.

**Tabla 3.4: Entrada del amplificador y la salida del transmisor.**

IN (volt)	OUT (volt)
1,00	0,80
2,00	1,12
2,20	1,29
3,00	3,51
3,20	4,08
4,00	4,41
4,90	4,79

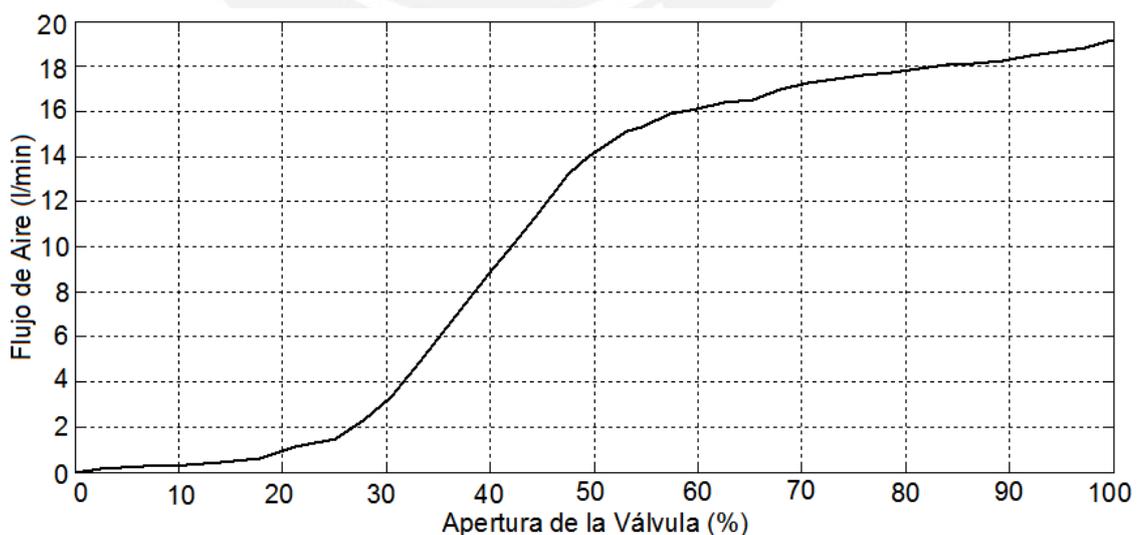
La señal escalón, una de las señales de prueba más comunes, consiste en la transición inmediata de un valor de entrada constante a otro. Existen variedad de criterios de modelamiento y diseño basados en este tipo de señal, ya que a partir de la respuesta de salida del sistema se puede dar una clasificación a través de ciertas mediciones en la gráfica, obteniendo una aproximación de la función de transferencia. Después de cada incremento, se registró el valor de la respuesta en una Tabla para posteriormente, con estos datos, obtener la curva característica de la válvula.

En este sentido, en la figura 3.5 se observa la respuesta del proceso a una señal de entrada escalón con un aumento gradual de pequeños intervalos con la finalidad de obtener la zona de trabajo lineal. Esta zona se determina por la relación lineal que existe entre la señal de entrada con respecto a la respuesta de la válvula, donde la relación de la entrada y la salida es aproximadamente constante dentro de dicho rango.



**Figura 3.5: Excitación - Respuesta de la válvula 202216.**

El primer paso de la identificación no paramétrica es realizar una prueba de ganancia estática con la finalidad de obtener la zona de trabajo. Para este fin se procede a realizar una prueba inyectándole al sistema la señal escalón, mediante el cual se varía el voltaje en bornes de la válvula de control rápidamente ocasionando la apertura de la válvula. Este proceso se realiza para entender el comportamiento dinámico del sistema al aplicarle una señal escalón y determinar los parámetros, los cuales se usarán para obtener el modelo. En la figura 3.6, se muestra la relación del porcentaje de apertura de la válvula con respecto a la medida de flujo del transmisor.



**Figura 3.6: Curva estática de la válvula 232316.**

A partir de este ensayo se obtiene un registro de muestras y se genera tres vectores:  $u$  (entrada),  $y$  (salida) y  $t$  (tiempo). Si se denota como  $u(t)$  a la señal de entrada del amplificador, se obtiene a la salida del amplificador la señal  $u(t)$  multiplicada por 5.76. La válvula funciona dentro del rango de 6 a 24 voltios y la apertura de la válvula es proporcional al voltaje de sus bornes. La relación entre el porcentaje de apertura de la válvula con la salida de la tarjeta DAQ se representa como:

$$Y = 25 \cdot X - 25$$

Donde  $Y$ : Indica el porcentaje de apertura,

$X$ : Señal de salida de la tarjeta DAQ.

De la misma manera, el flujo (litros/minuto) es proporcional al voltaje de salida del transmisor. Para obtener la cantidad de litros por minuto que pasa por el transmisor se realiza una etapa de escalamiento a los datos obtenidos mediante el uso de Matlab; se muestra la relación en la siguiente ecuación:

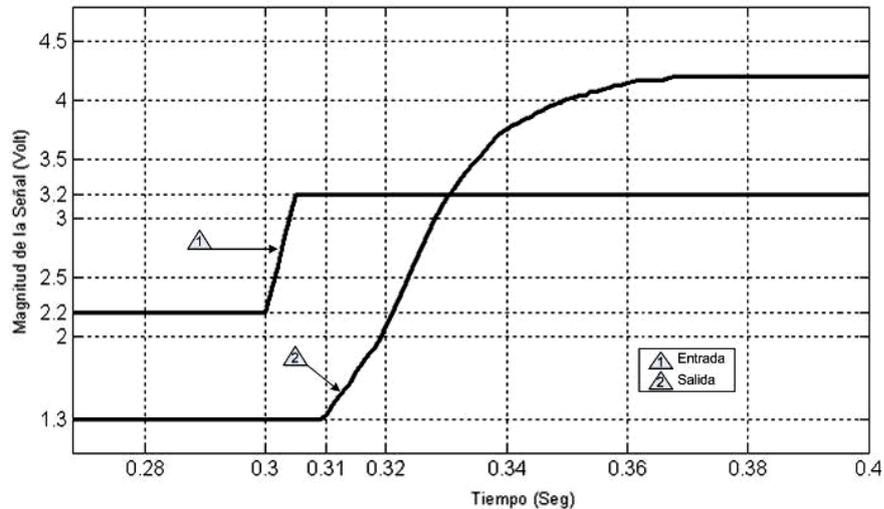
$$F = 5 \cdot Y_{out} - 5$$

Donde:

$F$ : Flujo medido en litros/minuto

$Y_{out}$ : Salida del transmisor (V)

La figura 3.6 muestra que a partir del porcentaje comprendido en el rango de 25% y 51% de apertura de la válvula, existe una zona que se puede considerar para fines prácticos casi lineal, siendo este rango de 2.2 a 3.2 voltios. En la figura 3.7 se muestra la respuesta de la válvula a la señal escalón.



**Figura 3.7: Ensayo de respuesta al escalón en el rango de 2.2 y 3.2 Voltios.**

Inicialmente se eligió una frecuencia de muestreo igual a 100Hz. Luego de obtener un modelo matemático de primer grado mediante el método Ziegler y Nichols y de aplicar la fórmula 2.23, se escoge nuevamente una frecuencia de muestreo igual a 1KHz, la cual se usará para identificar los modelos.

### 3.5 Identificación del Modelo

Se ha excitado la entrada del sistema para obtener la respuesta del proceso, este resultado permitirá identificar un tipo de modelo dinámico. La técnica que se usará para la identificación experimental está relacionada con los métodos basados en la curva de reacción del proceso, identificación no paramétrica, y son técnicas usadas en lazo abierto, como es el caso del sistema a identificar.

Esta técnica se basa en la curva de respuesta [1], y son procedimientos principalmente gráficos. La gran parte de los métodos de sintonización de controladores se fundamentan en los parámetros de un modelo de orden reducido, principalmente los más empleados son los de primer orden o segundo orden más un tiempo muerto, estos modelos de orden reducido permiten representar sistemas dinámicos de orden superior.

La gráfica que se obtiene es la curva de reacción del proceso que se realiza mediante la prueba en lazo abierto, siendo estas las condiciones: se excita la válvula y se registra la señal de entrada y la señal de salida del proceso desde el momento que se aplica el escalón hasta que el sistema alcance un nuevo punto de operación estable para luego aplicar un método de identificación.

### 3.5.1 Identificación mediante el método de Ziegler y Nichols

En este método, se realiza el trazo de una recta tangente a la respuesta del proceso en su punto de inflexión para obtener los valores de  $\tau$ ,  $\tau_m$  y la ganancia  $k_p$  como se observa en la figura 3.8.

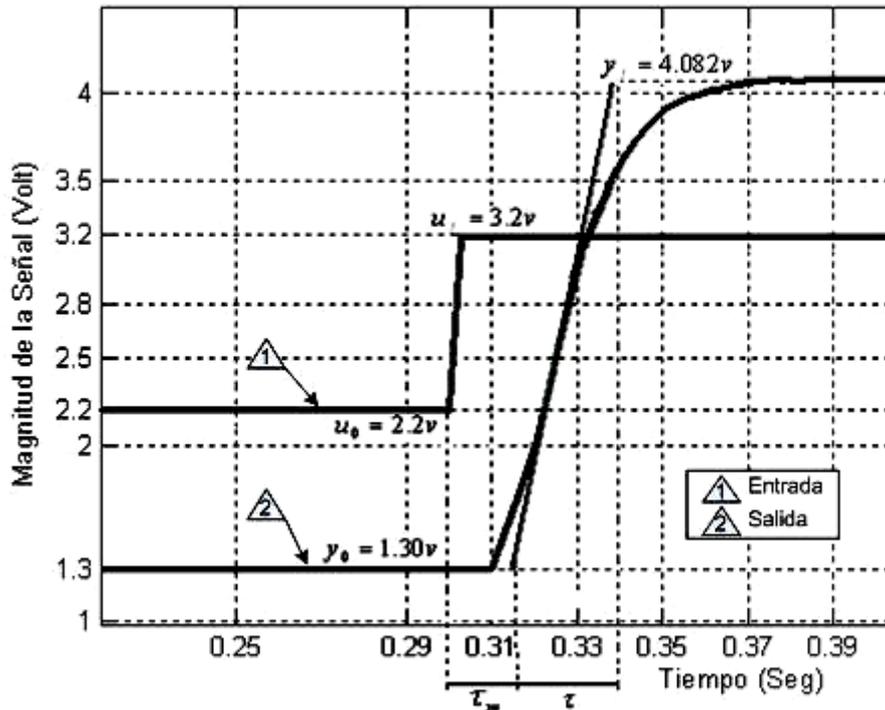


Figura 3.8: Obtención del modelo mediante el criterio de Ziegler y Nichols.

En base a la figura 3.8 y la aplicación de la ecuación 2.10, se obtiene la ganancia del modelo.

$$k_p = \frac{4.082 - 1.3}{3.2 - 2.2} = 2.782 \quad (3.1)$$

El tiempo muerto  $\tau_m$  y la constante de tiempo  $\tau$  son calculados a partir de la figura 3.8.

$$\tau = 0,025\text{seg} \quad t_m = 0.017\text{seg} \quad (3.2)$$

Finalmente, según el método de Ziegler y Nichols, se obtiene el siguiente modelo:

$$G_p(s) = \frac{2.782 \times e^{-0.017.s}}{0.025s + 1} \quad (3.3)$$

Para contrastar la frecuencia de muestreo de 1 KHz que se usó en las pruebas, se utilizarán nuevamente las formulas 2.22 y 2.23. La ecuación del modelo Ziegler y Nichols toma la siguiente forma para aplicar las formulas.

$$G_p(s) = \frac{112.8 \times e^{-0.017s}}{s + 40}$$

Con el valor de n igual a 20, se obtiene mayor cantidad de muestras para obtener exactitud en los resultados.

$$T_m = \frac{1}{20} \times \frac{1}{40} = 0.00125 \text{ seg}$$

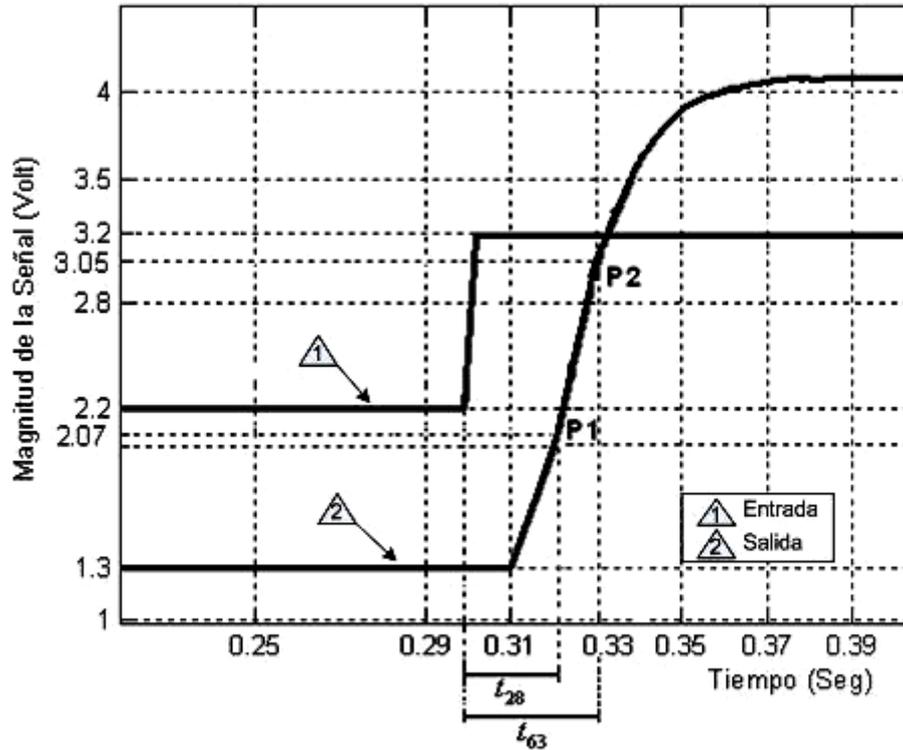
El resultado muestra que se debe escoger una frecuencia de muestreo igual o mayor a 800Hz, esto valida la frecuencia de muestreo de 1 KHz que se usó para las pruebas.

### 3.5.2 Identificación mediante el método de Smith

Se colocan dos puntos sobre la curva de respuesta del sistema en lugar de trazar una recta tangente, estos dos puntos representan el 28.3% y 63.2% del valor estable del sistema, los tiempos  $t_{28}$  y  $t_{63}$  se obtienen de la figura 3.9 y los valores se obtienen como:

$$P1: v_{28} = 1.3 + 0.28 \times (4.082 - 1.3) = 2.07v$$

$$P2: v_{63} = 1.3 + 0.632 \times (4.082 - 1.3) = 3.05v \quad (3.4)$$



**Figura 3.9: Ubicación de puntos sobre la respuesta del sistema.**

Situados los dos puntos en la curva de respuesta se procede a obtener los valores de la respuesta en los instantes  $t_{28}$  y  $t_{63}$  respectivamente.

$$t_{28} = 0.021\text{seg} \quad , \quad t_{63} = 0.03\text{seg} \quad (3.5)$$

Los valores de  $t_{28}$  y  $t_{63}$  son reemplazados en las ecuaciones 2.11 y 2.12 para obtener la constante de tiempo del sistema y el tiempo muerto.

$$\begin{aligned} \tau &= 1.5 \times (0.03 - 0.021) = 0.0135\text{seg} \\ t_m &= 0.03 - 0.0135 = 0.0165\text{seg} \end{aligned} \quad (3.6)$$

La ganancia se obtiene con la ecuación 2.10.

$$k_p = \frac{4.082 - 1.3}{3.2 - 2.2} = 2.782 \quad (3.7)$$

Finalmente, según el método de Smith, se obtiene el modelo siguiente:

$$G_p(s) = \frac{2.782 \times e^{-0.0165 \cdot s}}{0.0135s + 1} \quad (3.8)$$

### 3.5.3 Identificación mediante el método 123c

En este método, al igual que el método de Smith, se selecciona varios puntos sobre la curva de respuesta del sistema, estos puntos son correspondientes al 25%, 50% y 75% del cambio total de la respuesta, como se muestra en la figura 3.10.

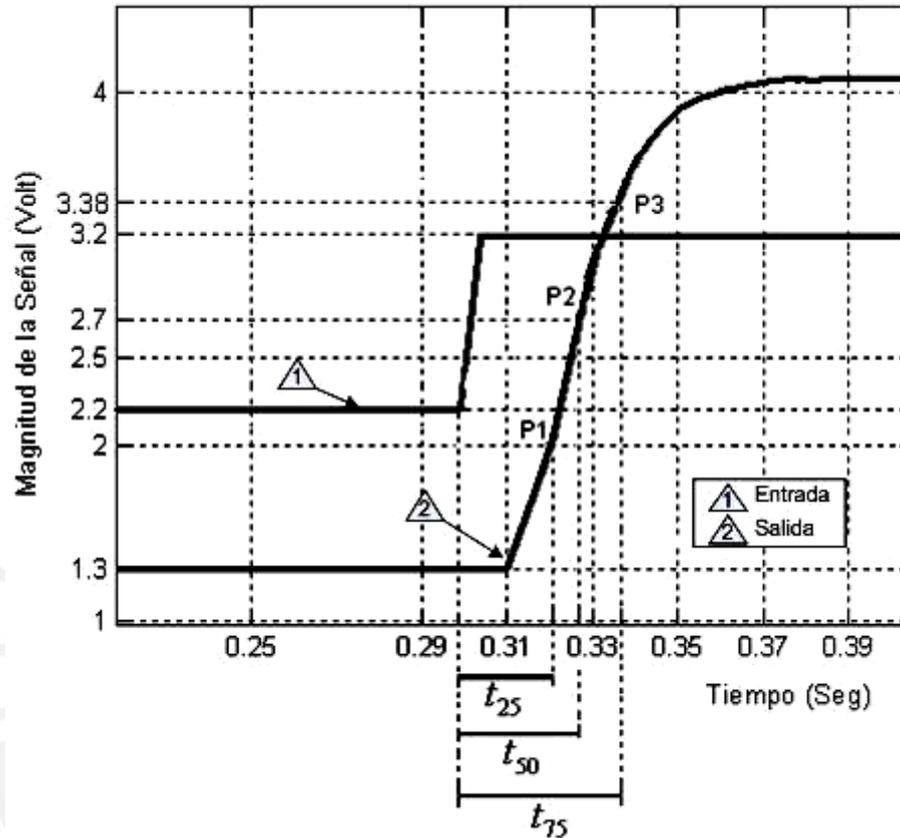


Figura 3.10: Ubicación de 3 puntos sobre la respuesta del sistema.

De la figura 3.10 se obtienen los valores de  $t_{25}$ ,  $t_{50}$  y  $t_{75}$ , siendo estos 0.019, 0.0255 y 0.035 segundos respectivamente.

La constante de tiempo ( $\tau'$ ) y el tiempo muerto aparente ( $t'_m$ ) son calculados con la ecuación 2.13:

$$\tau' = 0.5776 \times (0.035 - 0.019) = 0.009241 \text{seg}$$

$$t'_m = 1.5552 \cdot 0.019 - 0.5552 \cdot 0.025 = 0.0101 \text{seg} \quad (3.9)$$

A partir de los valores obtenidos en 3.9 y usando la ecuación 2.15 se obtiene el valor de a.

$$a = \frac{0.0255 - 0.0101168 - 1.4362 \cdot 0.00924}{1.9544 \cdot 0.009241 - 0.0255 + 0.0101168} = 0.714 \quad (3.10)$$

Con la ecuación 2.14 se calcula  $\tau_1$ ,  $\tau_2$  y  $t_m''$ .

$$\tau'' = \frac{2 \cdot 0.009241}{1 + 1.0629} = 8.959 \cdot 10^{-3} = \tau_1$$

$$\tau_2 = 0.71398 \cdot 8.959 \cdot 10^{-3} = 6.3965 \cdot 10^{-3} \text{ seg}$$

$$t_m'' = t_m' = 0.01011 \text{ seg} \quad (3.11)$$

Finalmente, según el método de 123c, se obtiene el siguiente modelo:

$$G_p(s) = \frac{2.782 \cdot e^{-0.010117 \cdot s}}{(8.959 \cdot 10^{-3} s + 1) \cdot (6.396 \cdot 10^{-3} \cdot s + 1)} \quad (3.12)$$

### 3.5.4 Identificación mediante el método de Strecj

Se traza la línea tangente al punto de inflexión sobre la curva de respuesta del sistema y se obtienen los valores de  $t_m$ ,  $T_u$  y  $T_a$ , estos valores se muestran marcados en la figura 3.11.

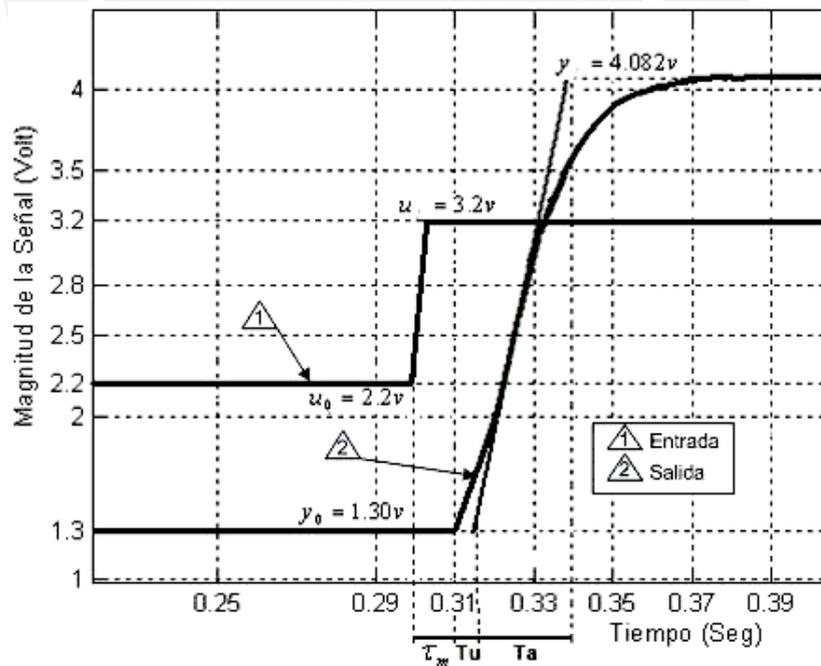


Figura 3.11: Trazo de la recta sobre el punto de inflexión de la respuesta del sistema.

Los valores de  $t_m$ ,  $Tu$  y  $Ta$  son 0.10, 0.004 y 0.025 respectivamente.

El valor de  $n$  se obtiene mediante la división de  $Tu$  entre  $Ta$  :

$$\frac{Tu}{Ta} = 0.160$$

El valor inmediatamente inferior a 0.160, según la tabla 2.2 de Strecj, es 0.104 e indica que el modelo es de orden 2. Se calcula el valor de  $\tau$  según la ecuación 2.18.

$$\tau = \frac{0.025 \cdot (2-1)^{(2-1)}}{(2-1)!} \cdot e^{-(n-1)} = 9.2 \times 10^{-3} \text{ seg} \quad (3.13)$$

Se calcula el valor de  $Tu$  teórico con la relación restante de la tabla.

$$Tut = 9.2 \times 10^{-3} \cdot 0.282 = 1.59 \times 10^{-3} \text{ seg}$$

Con la ecuación 2.19 se obtiene el tiempo muerto  $Tm$

$$Tm = 0.01 + 0.004 - 0.00259 = 0.01241 \text{ seg}$$

Finalmente, según el método de Strecj, se obtiene el siguiente modelo:

$$G_p(s) = \frac{2.782 \cdot e^{-0.01241}}{(1 + 0.0091 \cdot s)^2} \quad (3.14)$$

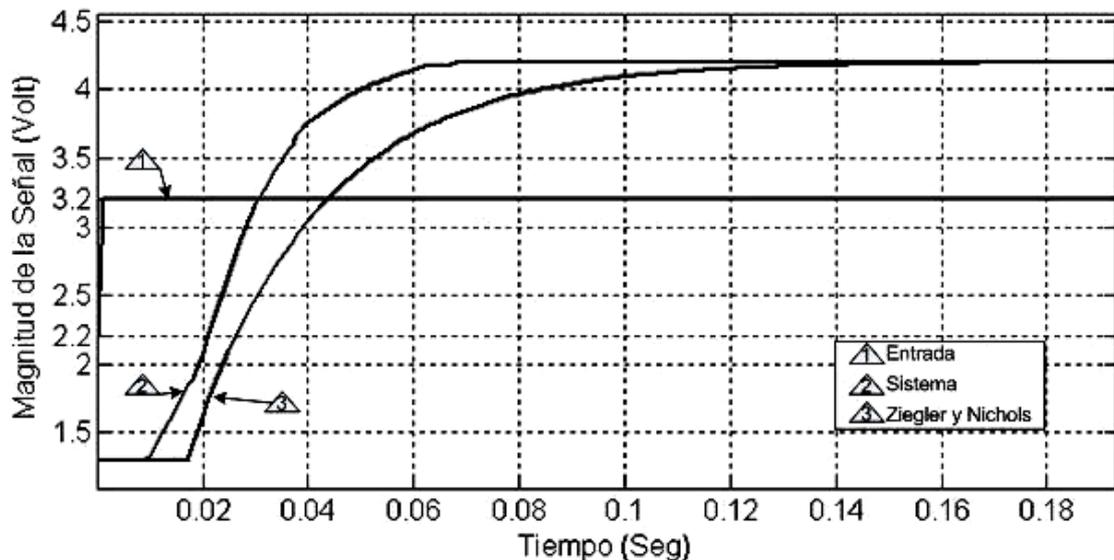
## CAPITULO 4

### RESULTADOS

En este capítulo se realizará el análisis comparativo de la respuesta de cada modelo con la respuesta del sistema. Estos modelos fueron obtenidos por diferentes métodos y son funciones que aproximadamente simulan la respuesta de la válvula de control en un rango de 1.2 lt/min a 15 lt/min. Se usó el Software Matlab R2007b para el procesamiento de los datos obtenidos de la tarjeta DAQ, de la misma manera se hará uso de este software para obtener los índices de predicción absoluto (IEAP) y cuadrático (IECP). Debido que la adquisición de datos se realizó con una frecuencia de muestreo de 1 KHz y es la misma frecuencia que se usará para muestrear cada modelo, el objetivo de muestrear es de obtener puntos de la curva en un instante de tiempo determinado de tal manera que estos puntos coincidan, en tiempo, con los puntos de la respuesta del sistema para poder aplicar los criterios de comparación.

#### **4.1 Análisis del modelo de Ziegler y Nichols**

Al modelo obtenido mediante el método de Ziegler y Nichols, se le aplica la señal de entrada de tipo escalón de 1V de magnitud, la respuesta a esta señal de entrada se le realiza el escalamiento respectivo; finalmente se muestrea este resultado para compararlo con la respuesta del sistema, como se muestra en la figura 4.1.



**Figura 4.1: Respuesta del modelo Ziegler y Nichols.**

Según la gráfica se observa:

- El tiempo de retardo del modelo es prolongado y no le permite responder en el mismo instante que la respuesta del sistema, no coincidiendo en ningún punto.
- El modelo no sigue la dinámica del sistema, el tiempo de estabilización es lento comparado con la respuesta del sistema.
- La ganancia estática del modelo es válida, ya que ambas respuestas se estabilizan en el mismo valor.

#### 4.2 Análisis del modelo de Smith

De la misma manera que el método anterior, al modelo obtenido mediante el método Smith se le aplica la señal de entrada de tipo escalón de 1V de magnitud, luego se realiza el escalamiento respectivo para finalmente muestrear el resultado y poder obtener la respuesta del sistema, como se muestra en la figura 4.2.

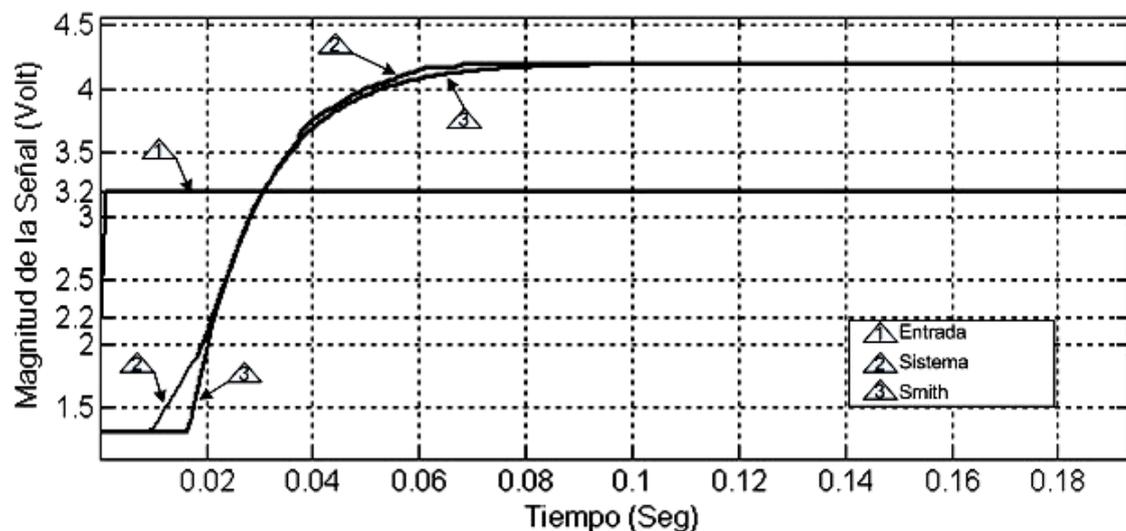


Figura 4.2: Respuesta del modelo Smith.

Según la gráfica se observa:

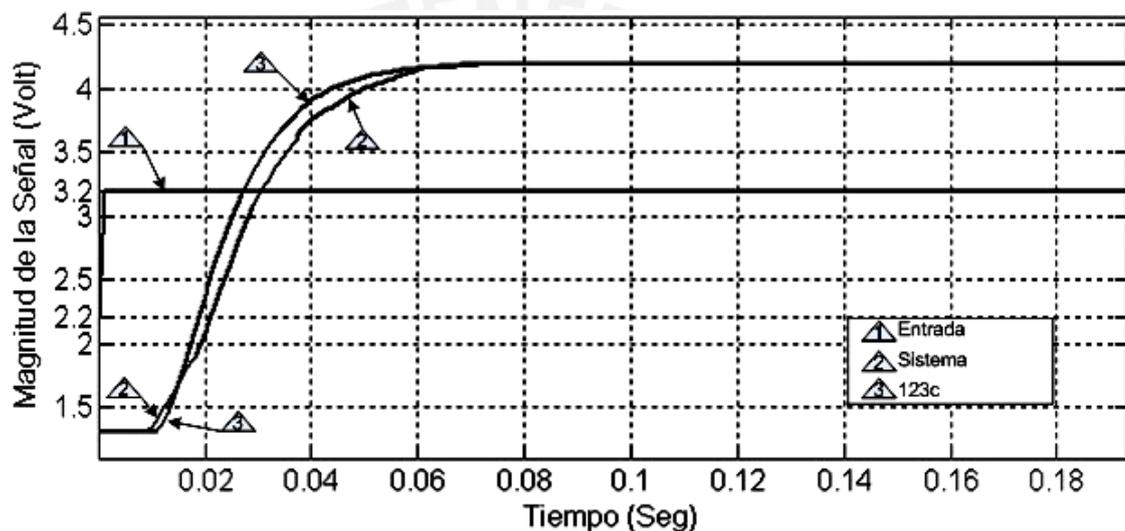
- El tiempo de retardo del modelo es prolongado al del proceso real. La respuesta del modelo, coincide al menos en dos puntos (28 y 63% aproximadamente del valor final) con la respuesta del proceso real.
- El modelo trata de seguir la dinámica del sistema y el tiempo de estabilización es menor en comparación con la respuesta del modelo Ziegler y Nichols. Sin embargo, la respuesta del modelo muestra mayores diferencias con respecto a

la respuesta del sistema, entre el rango de 70% a 80% del valor de la respuesta.

- La ganancia estática del modelo es igual a la respuesta del sistema, se logra estabilizar en el mismo punto para la misma señal de entrada.

#### 4.3 Análisis del modelo de 123c

Se aplica la señal de entrada de tipo escalón de 1v de magnitud al modelo obtenido por el método 123c, luego se escala el resultado, para finalmente realizar la comparación con la respuesta del sistema, como se muestra en la figura 4.3.



**Figura 4.3: Respuesta del modelo 123c.**

Según la gráfica se observa:

- El tiempo muerto del modelo se aproxima a la del proceso real.
- A partir del 20% de la magnitud total, la respuesta del modelo se adelanta a la respuesta del sistema.
- La ganancia estática del modelo es igual a la respuesta del sistema, al igual que los modelos anteriores.

#### 4.4 Análisis del modelo de Strecj

Finalmente, la respuesta del modelo obtenido mediante el método Strecj se muestra en la figura 4.4. De la misma manera que los otros métodos, se escala la respuesta del modelo para compararla con la respuesta del sistema.

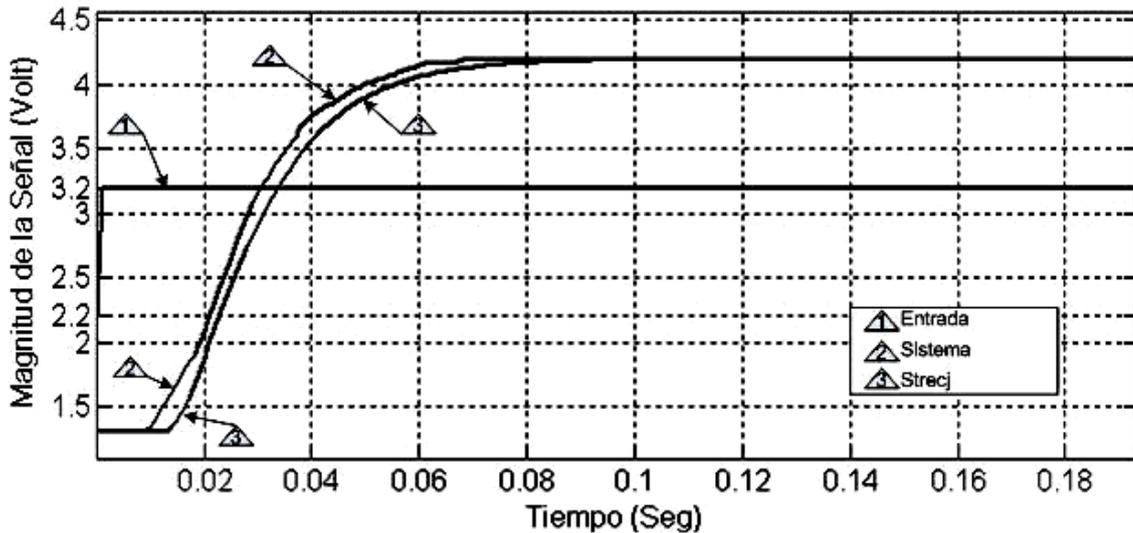


Figura 4.4: Respuesta del modelo Strecj.

Según la gráfica se observa:

- Existe un retardo en la respuesta, comparado con los otros modelos el tiempo muerto es prolongado.
- La respuesta del modelo no se aproxima a la dinámica de la respuesta del sistema.
- La ganancia estática del modelo es igual a la ganancia del sistema.

La ganancia de los modelos obtenidos se mantiene siempre constante debido a que la magnitud de la señal escalón se mantiene constante, realizar pruebas con diferentes magnitudes implicaría tener mayor o menor ganancia estática en la respuesta debido a que la ganancia del modelo se multiplica por la magnitud del escalón.

#### 4.5 Indicadores

Las ecuaciones 2.20 y 2.21 se aplicarán de manera discreta debido a que la curva de respuesta del sistema está conformada por puntos.

$$IEAP = \sum_{k=1}^k |y_p(k) - y_m(k)| \quad (4.1)$$

$$IECP = \sum_{k=1}^k (y_p(k) - y_m(k))^2 \quad (4.2)$$

Donde:

$y_p$  : Representa los valores discretos de la respuesta del sistema

$y_m$  : Representa los valores discretos de la respuesta del modelo

K: Indica la cantidad de muestras

Se muestra en la figura 4.5, el diagrama de flujo para obtener los resultados de los índices de error.

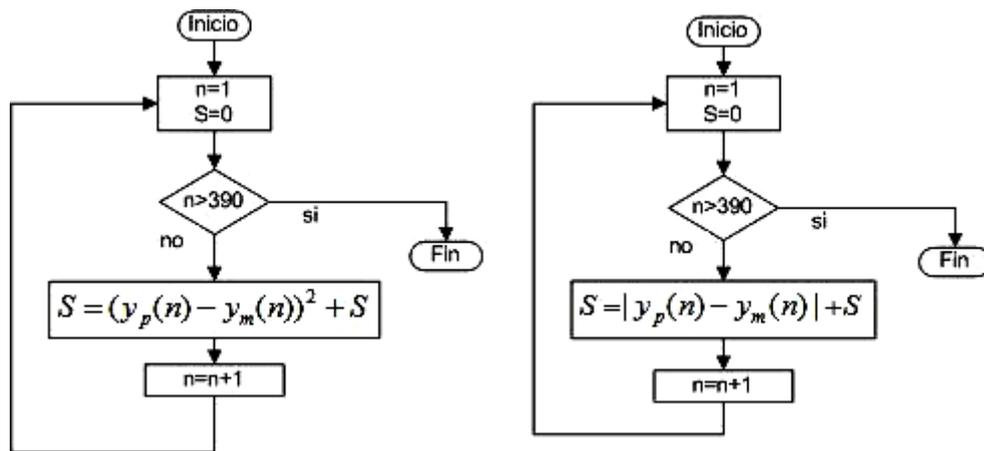


Figura 4.4: Diagrama de flujo para obtener el valor de IEAP y IECP.

Se elije las primeras 390 muestras de la respuesta del sistema, de igual forma se elije 390 muestras de la respuesta de cada modelo y mediante el uso del software Matlab se obtiene los resultados de manera cuantitativa, como se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Cuadro comparativo de los modelos según indicadores.

Método	Indicador	
	IEAP	IECP
Ziegler y Nichols	32.3181	12.0797
Smith	3.1646	0.2970
Strcj	3.6771	0.7290
123c	13.8457	4.1990

De la Tabla 4.1, se observa que el método Smith tiene un menor índice de predicción absoluto (IEAP) y cuadrático (IECP), debido a que el modelo coincide en varios puntos con la respuesta del sistema.

Según los índices de predicción, el modelo obtenido por el método Smith es el que se aproxima a la respuesta del sistema para un flujo comprendido en 1.2 lt/min a 15 lt/min y una presión de 12 PSI a la entrada de la válvula de control.



## Conclusiones

La curva del modelo obtenido por el método de Smith es el que tiene mayor aproximación a la dinámica de la válvula de control para un flujo en un rango de 1.2 lt/min a 15 lt/min, con una presión de 12 PSI a la entrada de la válvula de control.

A través de un análisis comparativo de índices se determinó que el modelo obtenido por el método Smith muestra un índice de predicción absoluto (IEAP) y un índice de predicción cuadrática (IECP) menores a los modelos obtenidos por los métodos 123c, Strecj y Ziegler y Nichols.



### Recomendaciones

Se recomienda usar el Opamp TL085 en configuración buffer, para asilar la parte digital de la etapa de potencia (amplificador)

Se sugiere que se identifique el modelo por al menos tres procedimientos diferentes, de manera que el modelo obtenido en cada procedimiento se compare con la respuesta del sistema real.



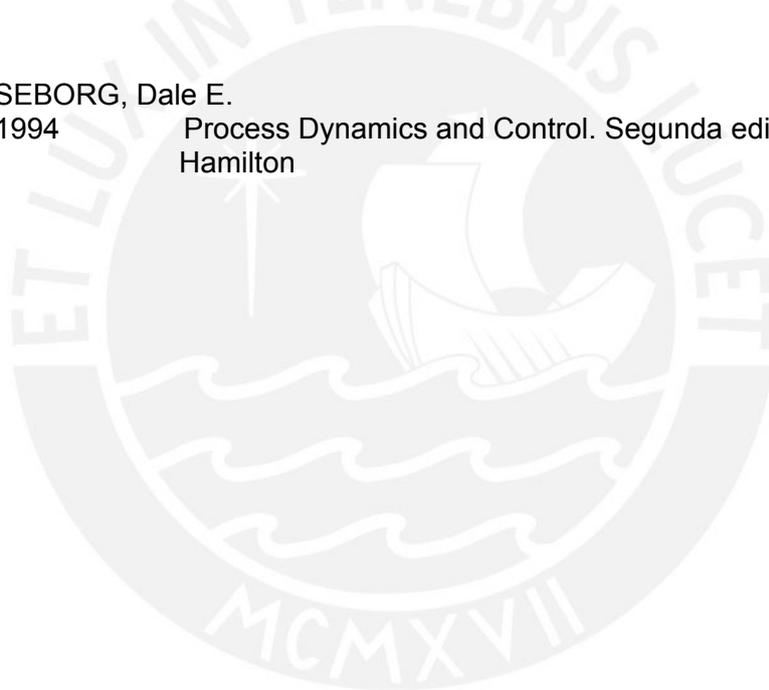
### Bibliografía

- [1] SODERSTROM, Stoica  
System Identification. Prentice Hall
- [2] L. Földi, Z. Béres, E. Sárközi  
2011 Novel cylinder positioning system realised by using solenoid valves  
Consulta: 20 de julio de 2011  
<[www.scad.ugent.be/journal/2011/SCAD\\_2011\\_2\\_1\\_142.pdf](http://www.scad.ugent.be/journal/2011/SCAD_2011_2_1_142.pdf)>
- [3] CONSTANTIN FLORIN CĂRUNTU  
2009 Modelling of an electromagnetic valve actuator  
Consulta: 20 de julio de 2011  
< [www.tuiasi.ro/users/103/Bind1.pdf](http://www.tuiasi.ro/users/103/Bind1.pdf) >
- [4] INDIAN INSTITUTE OF TECHNOLOGY MADRAS  
2009 Technology development of proportional solenoid valve for space application  
Consulta: 20 de julio de 2011  
< [ed.iitm.ac.in/~robotics\\_lab/files/RAKESH%20POSTER.pptf](http://ed.iitm.ac.in/~robotics_lab/files/RAKESH%20POSTER.pptf)>
- [5] La República  
2010 “Tasa de mortalidad infantil en el Perú disminuyó cuatro puntos.” La República. Lima 11 de abril de 2010. Consulta 20 de abril de 2010.  
<<http://www.larepublica.pe/sociedad/11/04/2010/tasa-de-mortalidad-infantil-en-el-peru-disminuyo-cuatro-puntos>>
- [6] GONZÁLEZ DÍAZ, Ricardo  
s/a Oxigenoterapia. Consulta: 10 de abril de 2010  
<[http://www.hsorient.cl/prin/documentos/neo/guiascli/30\\_Oxigenoterapia.pdf](http://www.hsorient.cl/prin/documentos/neo/guiascli/30_Oxigenoterapia.pdf)>
- [7] Centro Nacional de Excelencia Tecnológica en Salud  
2004 Guía tecnológica N°. 4: Incubadora Neonatal. México  
Consulta: 27 de abril de 2010  
<[http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/equipo\\_guias/guias\\_tec/4gt\\_incubadora.pdf](http://www.cenetec.salud.gob.mx/descargas/equipo_guias/guias_tec/4gt_incubadora.pdf)>
- [8] Medline  
2010 Enciclopedia Ilustrada de Salud. EEUU: A.D.A.M  
Consulta: 16 de abril de 2010  
<<http://www.nlm.nih.gov/medlineplus/spanish/ency/article/001916.htm>>
- [9] GIDEMS  
s/a Burbuja Neonatal con Presurizador [Diapositivas]. Lima  
Consulta: 26 de abril de 2010  
<<http://www.concytec-storage.org/docproysub/presentacion/070524-bancpap-concytec.pdf>>

- [10] Pontificia Universidad Católica del Perú  
2009 Control de Procesos Industriales. Material se enseñanza.  
Lima.  
Consulta: 29 de abril de 2010
- [11] LJUNG, Lennart  
1994 System Identification. Segunda edición. New Jersey. Prentice  
Hall
- [12] OGATA, Katsuhiko  
1998 Ingeniería de Control Moderna. Tercera edición. México:  
Prentice Hall
- [13] RINCÓN, José Juan  
s/a Introducción a la Identificación de Sistemas Dinámicos.  
UNMSM  
Consulta: 02 de mayo de 2010  
<<http://lc.fie.umich.mx/~jrincon/Identificacion%20de%20sistemas%20lineales.pdf>>
- [14] Emerson  
2005 Control valve hand book. Consulta: 6 de noviembre de 2010.  
<<http://www.documentation.emersonprocess.com/groups/public/documents/book/cvh99.pdf> >
- [15] RENÉ VARGAS, Juan Pablo Carvallo  
2003 Válvulas de Solenoide. Valparaiso. Consulta: 24 de abril de  
2010  
<<http://profesores.elo.utfsm.cl/~jgb/CARVALLOVARGASc.pdf>  
>
- [16] Department of Energy  
s/a Instrumentation and Control, pp. 54-59. Consulta: 14 de mayo  
de 2010  
<[http://www.tpub.com/content/doe/h1013v2/css/h1013v2\\_166.  
htm](http://www.tpub.com/content/doe/h1013v2/css/h1013v2_166.htm)>
- [17] M.F. Rahman, N.C. Cheung, K.W. Lim  
2003 Converting a switching solenoid to a proportional actuator.  
Consulta: 6 de noviembre de 2010  
< <http://158.132.178.85/norbert/Papers/C011.pdf> >
- [18] VÍCTOR M. Alfaro  
2001 Identificación De Procesos Sobreamortiguados Utilizando  
Técnicas De Lazo Abierto. San José. Consulta: 20 de mayo  
de 2010

<[http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub\\_inv/articulos/valfaro01A.pdf](http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/valfaro01A.pdf)>

- [19] VÍCTOR M. Alfaro  
2006 Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curva de reacción del proceso. San José. Consulta: 22 de mayo de 2010  
<[http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub\\_inv/articulos/2006CyT.VAlfaro.cyt.v24n2\\_2006.pdf](http://eie.ucr.ac.cr/uploads/file/documentos/pub_inv/articulos/2006CyT.VAlfaro.cyt.v24n2_2006.pdf)>
- [20] Escuela superior politécnica del litoral  
s/a Identificación de sistemas usando matlab. Consulta: 6 de noviembre de 2010.  
<[http://200.126.14.82/web/Documentos/Prepr%C3%A1ctica2\\_Identificaci%C3%B3nSistemas.pdf](http://200.126.14.82/web/Documentos/Prepr%C3%A1ctica2_Identificaci%C3%B3nSistemas.pdf)>
- [21] SEBORG, Dale E.  
1994 Process Dynamics and Control. Segunda edición. EEUU. Hamilton



## Anexos

- I. Hoja Técnica de la tarjeta DAQ PCI-6024E Nacional Instruments.
- II. Hoja Técnica de la válvula de control Teknocraft 202316.
- III. Hoja Técnica del transmisor Honeywell, modelo AWM5104N.
- IV. Hoja Técnica del TI081.

