

SISTEMA DE CONTROL SCADA DE LAZO CERRADO DE UN CITY GATE

DANIEL ALEXANDER RIVERA SILVA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DE GAS NATURAL
BUCARAMANGA**

2013

SISTEMA DE CONTROL SCADA DE LAZO CERRADO DE UN CITY GATE

DANIEL ALEXANDER RIVERA SILVA

**TRABAJO DE GRADO MONOGRAFIA PARA OPTAR EL TITULO DE
ESPECIALISTA EN INGENIERIA DE GAS NATURAL**

DIRECTOR

ING. MANUEL ENRIQUE CABARCAS SIMANCAS

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

ESPECIALIZACIÓN EN INGENIERIA DE GAS NATURAL

BUCARAMANGA

2013

DEDICATORIA

Este triunfo está dedicado a mis padres que siempre han estado dándome la fortaleza y el apoyo para seguir siempre adelante.

Agradecimientos.

El autor expresa sus agradecimientos a:

Como primera medida agradezco a Dios, por brindarme esta oportunidad de poder realizar estos estudios y la sabiduría para poderlos desarrollar exitosamente.

Agradezco a mis padres y a mi novia quienes incondicionalmente siempre me han brindado el apoyo necesario y me han dado la fuerza para seguir siempre adelante en cada uno de los proyectos y retos que he asumido en mi vida.

Agradezco a la universidad industrial de Santander, por brindar siempre la colaboración y el apoyo para formar nuevos profesionales capaces de asumir los retos que presenta el mundo día a día a nivel profesional.

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1. SISTEMA SCADA	16
2.2. PID	16
2.3. CITY GATE	16
2.4. LÓGICA DIFUSA	16
3. DESCRIPCIÓN DE PROBLEMA	17
4. ETAPAS PARA EL DISEÑO DE UN CONTROL AUTOMÁTICO PARA UN CITYGATE.	17
4.1. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA VÁLVULA	19
4.1.1. LEY DE HOOKE	20
4.1.2. MÉTODO DE CARR-KOBAYASHI-BURROWS	21
4.1.3. MASA Y ÁREA DEL DIAFRAGMA	23
4.2. ANÁLISIS DEL SISTEMA ESTACIONARIO	24
4.3. IMPLEMENTACIÓN CONTROLADOR PID	27
4.4. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE LA VÁLVULA	30
4.4.1. LEY DE HOOKE.	30
4.4.2. MÉTODO DE CARR-KOBAYASHI-BURROWS	30
4.4.3. MASA Y ÁREA DEL DIAFRAGMA	33
4.4.4. ANÁLISIS DEL SISTEMA ESTACIONARIO	33
4.5. IMPLEMENTACIÓN CONTROLADOR PID	35
5. SISTEMA SCADA	38

6. LÓGICA DIFUSA	41
7. ACTUADORES	45
8. CONCLUSIONES	46
9. BIBLIOGRAFÍA	47

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Sistema modelado en hysys	17
Grafica 2. Válvula reguladora	18
Grafica 3. Esquema masa resorte	19
Grafica 4. Grafica de viscosidad de gases a 1 atm	22
Grafica 5. Viscosidad vs temperatura pseudoreducida	23
Grafica 6. Esquema válvula reguladora	24
Grafica 7. Transferencia de función	25
Grafica 8. Grafica de respuesta en estado estacionario.	26
Grafica 9. Grafica de respuesta en estado estacionario	26
Grafica 10. Diagrama de polos y zeros	27
Grafica 11. Esquema de planta controlada	27
Grafica 12. Grafica de respuesta en estado estacionario.	28
Grafica 13. Grafica de respuesta en estado estacionario.	29
Grafica 14. Diagrama de polos y zeros	29
Grafica 15. Grafica de viscosidad de gases a 1 atm	31
Grafica 16. Viscosidad vs temperatura pseudoreducida	32
Grafica 17. Transferencia de función	33
Grafica 18. Grafica de respuesta en estado estacionario	34
Grafica 19. Diagrama de polos y zeros	35
Grafica 20. Esquema de planta controlada	35
Grafica 21. Grafica de respuesta en estado estacionario.	36
Grafica 22. Grafica de respuesta en estado estacionario.	37

Grafica 23. Diagrama de polos y zeros	37
Grafica 24. Diagrama sistema scada	38
Grafica 25. Pantalla hmi	39
Grafica 26. Pantalla hmi	40
Grafica 27. Pantalla hmi	40
Grafica 28. Diagrama fuzzy	42
Grafica 29. Conjuntos presión de entrada	43
Grafica 30. Conjunto posición salida	43
Grafica 31. Simulación	44
Grafica 32. Presión vs posición	44
Grafica 33. Actuador con válvula.	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Cromatografía	15
Tabla 2. Ley de hooke	17
Tabla 3. Dimensiones de modelo 690-01	20
Tabla 4. Ley de hooke	26

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A CODIGO DE MATHLAB.....	48
ANEXO B REGLAS LÓGICA DIFUSA.....	49

RESUMEN

**TITULO: SISTEMA DE CONTROL SCADA DE LAZO CERRADO DE UN CITY GATE*.
AUTOR: DANIEL ALEXANDER RIVERA SILVA**.**

Palabras técnicas: SCADA, PID, Control, HMI, Lógica Difusa.

Resumen:

Este trabajo se realiza con el fin de automatizar un proceso neumático simple a llevarlo a un nivel automático donde facilite al operador variar las presiones deseadas de operación desde el cuarto de control sin necesidad de estar en campo haciendo estas operaciones. Como primera medida para dar inicio a este proceso de automatización el trabajo comienza con la modelización matemática de una válvula reguladora de presión para entender su comportamiento en modo estacionario y así poder implementarle un control en lazo cerrado, el objetivo principal es controlar la presión de un CityGate para esto se diseña y se implementa un control PID en un sistema SCADA el cual estará en continuo monitoreo de las presiones que afectan al CityGate y así mismo corrigiendo a la presión deseada gracias al sistema de control en lazo cerrado. Por otra parte se hace la comparación con un sistema de control en lógica difusa el cual por medio de un PWM puede controlar la posición de apertura de la válvula para controlar la presión de salida de la misma. Por último se selecciona un actuador eléctrico el cual va a controlar la posición del vástago de la válvula por medio de alguno de los dos métodos de control implementados.

* Monografía

** Facultad: Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela: Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: Ing. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

SUMMARY

TITLE: SCADA SYSTEM CLOSED LOOP CONTROL OF A CITY GATE *.

AUTHOR: DANIEL ALEXANDER SILVA RIVERA **.

Technical words: SCADA, PID, Control, HMI, Fuzzy Logic.

Abstract:

This work is made in order to automate a process to carry it a simple automatic level which facilitates the operator to vary the pressure desired operation from the control room without having to be in the field doing these operations. As a first step to begin the process of automating the work begins with the mathematical modeling of pressure regulating valve to understand its behavior in stationary and so to rolling closed loop control, the main objective is to control the pressure of a CityGate for this is designed and PID control is implemented in a SCADA system which will continuously monitor the pressures affecting the CityGate and correcting himself desired pressure thanks to closed loop control. Moreover a comparison is made with a system of fuzzy logic control which via a PWM can control the position of valve opening for controlling the output pressure thereof. Finally you select an electric actuator which will control the position of the valve stem through one of the two control methods implemented. This work is going to facility the operation of the city gate on the CPF where is the place that it is going to regulate the pressure to feed the systems whit gas natural.

* Monograph

** Faculty: Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. School: Escuela de Ingeniería de Petróleos. Advisor: Ing. Manuel Enrique Cabarcas Simancas

INTRODUCCIÓN

Hoy en día existen CityGate o estaciones de regulación de presión a la entrada de sistemas de operaciones, ya sean ciudades o industrias, las cuales van a regular la presión de gas natural a la entrada de estos. En la mayoría de los casos estos sistemas de regulación son únicamente monitoreados por un sistema SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition.*) lo que comúnmente se denomina sistema de Control SCADA de lazo abierto, los cuales monitorean la presión de entrada y de salida, la temperatura, el caudal, entre otros; Ningún control está en la capacidad de tomar decisiones y corregirlas en tiempo real de manera automática; Por ejemplo cuando se presenta una sobre presión o cuando la presión cae a la entrada de la estación, esta no es capaz de mantener una presión constante a la salida del CityGate. El estudio se hace con el fin de encontrar un controlador y un actuador que sean capaces de tomar decisiones ante alguna perturbación del sistema en cuanto a la variable presión. El estudio ayudará a que este opere de una manera automática de los CityGate.

2. Marco Teórico.

2.1 Sistema SCADA: SCADA es el acrónimo de Supervisory Control And Data Acquisition (Supervisión, Control y Adquisición de Datos).

Un SCADA es un sistema basado en computadores que permite supervisar y controlar a distancia una instalación de cualquier tipo, a diferencia de los Sistemas de Control Distribuido el lazo de control es generalmente cerrado por el operador. Los Sistemas de Control Distribuido se caracterizan por realizar las acciones de control en forma automática. Hoy en día es fácil hallar un sistema SCADA realizando labores de control automático en cualquiera de sus niveles, aunque su labor principal sea de supervisión y control por parte del operador.

2.2 PID: es un tipo de control automático por realimentación capaz de calcular la desviación o error entre un valor medido y el valor que se quiere obtener, para aplicar una acción correctora que ajuste un proceso. Este tipo de control integra los tres tipos de controladores:

- Proporcional: determina la reacción del error actual.
- Integral: genera una corrección proporcional a la integral del error asegurándonos que el error se reduzca a cero
- Derivativo: determina la reacción del tiempo en el que el error se produce.

2.3 CITY GATE: también conocida como estación reguladora de presión. Cumple la función de llevar el gas de una presión alta a una presión baja para consumo, la estación comprende diferentes etapas como: Calentamiento, filtración, medición y regulación.

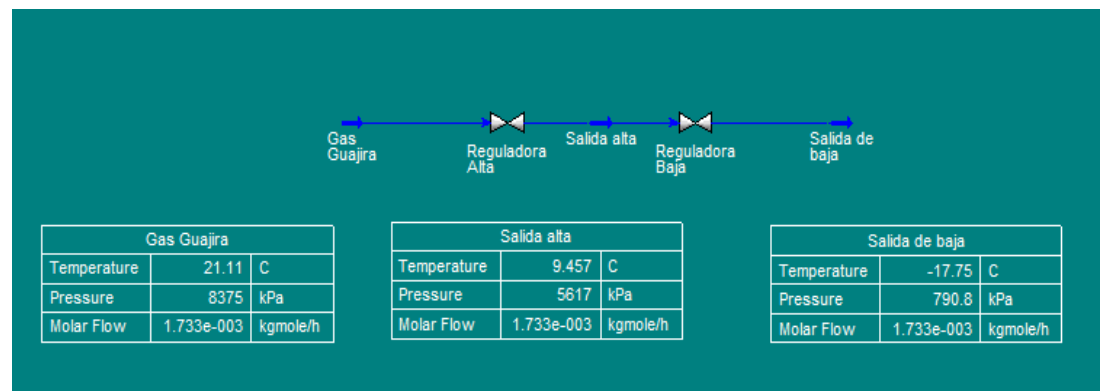
2.4 Lógica Difusa: la lógica difusa es una lógica alternativa a la lógica clásica que pretende introducir un grado de vaguedad en las cosas que evalúa, el razonamiento humano con frecuencia actúa con este tipo de información, este tipo de lógica imita el comportamiento humano ante una decisión.

3. Descripción del problema.

Se analizará un CityGate que está instalado para recibir un caudal de gas de 50000SCFD de la Guajira el cual será recibido a una temperatura media de 70°F y una presión de transporte de 1200 PSI. Se diseñará un controlador para un CityGate que tiene cinco etapas (calentadores, filtración, regulación de alta a media, medición y regulación de media a baja).

Utilizando el software Hysys se simulará el fluido y el comportamiento que presenta ante los cambios de presión.

Grafica 1. Características del gas en el CityGate-Hecha en Hysys



Fuente: autor

4. Etapas en el diseño de un control automático para un CityGate.

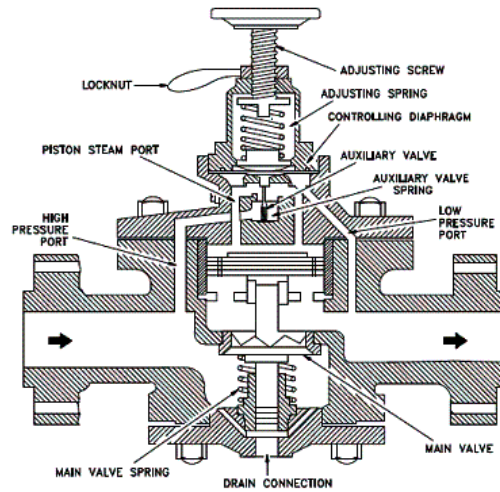
Como primera medida es necesario identificar las variables de entrada y de salida, en la entrada se tiene una presión aguas arriba de la válvula la cual se vá a censar y se vá comparar con el referente para así corregirla y obtener la presión de salida deseada.

Se inicia desde un CityGate ya construido donde los agentes principales son las válvulas reguladoras a las que se les aplicara el controlador.

Las válvulas reguladoras funcionan de forma sencilla, estas reaccionan bajo el efecto variante de presión. La función principal de las válvulas consiste en limitar la presión máxima de un sistema y regular la presión reducida en diferentes partes de un circuito, el funcionamiento se basa en un equilibrio entre la presión y la fuerza

de un resorte. Básicamente es una válvula de recorrido ajustable conectada mecánicamente a un diafragma. El diafragma es equilibrado con la presión de salida o presión de entrega y por una fuerza aplicada del lado contrario a la cara que tiene contacto con la presión de salida. La fuerza aplicada del lado opuesto al diafragma puede ser suministrada por un resorte.

Grafica 2. Esquema válvula reguladora



Fuente: Manual de válvulas, Departamento de sistemas mecánico, IMMPI

Por otra parte se tiene el gas de la guajira que circula por esta facilidad con la siguiente cromatografía.

Tabla 1. Cromatografía Gas Natural-Guajira

Gas Natural de la guajira			
Componente	Yi	Mi	Yi*Mi
Metano	0.9892	16.0420	15.8686
Nitrógeno	0.0028	28.0135	0.0783
Dióxido de carbono	0.0011	44.0100	0.0480
Etano	0.0027	30.0690	0.0815

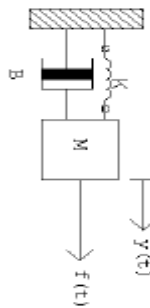
Propano	0.0034	44.0960	0.1520
Sulfuro de Hidrogeno	0.0000	34.0820	0.0002
I-Butano	0.0003	58.1220	0.0153
n-Butano	0.0001	58.1220	0.0041
I-Pentano	0.0001	72.1440	0.0067
n-Pentano	0.0000	72.1440	0.0014
n-Hexano	0.0003	86.1750	0.0269
		Ma=	16.2831

Fuente: Autor

4.1 Modelamiento Matemático de la válvula.

Para modelar matemáticamente la válvula reguladora, se escogerá la válvula reguladora marca CLA-VAL modelo 9001 con un tamaño de 3" que se encuentra instalada en el CityGate. Una vez comprendido el funcionamiento de la válvula reguladora es posible reducirla a un sistema masa resorte con un amortiguador, en este caso sería el mismo gas que fluye dentro del cuerpo de la válvula.

Grafica 3.Sistema dinámico válvula



Fuente: Sistemas masa resorte, Google images.

Con la gráfica 3 se puede concluir que para un instante $T_0=0$.

$$F(t) = M \frac{d^2y(t)}{dt^2} + B \frac{dy(t)}{dt} + K \quad \text{EQ.01}$$

Donde F es la fuerza de entrada calculada con la siguiente Formula.

$$P = \frac{F}{A} \quad \text{EQ.02}$$

P= Presión

A= Área del diafragma de la válvula

B= Coeficiente de viscosidad del gas

K= Coeficiente del resorte que se determina por la ley de Hooke

M= Masa del diafragma.

Organizando el sistema en forma de ecuaciones de estado se obtiene lo siguiente.

$$\begin{cases} \frac{dx_1(t)}{dt} = x_2(t) \\ f(t) = \frac{dx_2(t)}{dt} + Bx_2(t) + Kx_1(t) \end{cases} \quad \text{EQ.03}$$

Para obtener la función de transferencia del sistema es necesario aplicar la transformada de Laplace y suponer condiciones iniciales nulas.

$$T(s) = \frac{Y(s)}{F(s)} = \frac{1}{Ms^2 + Bs + k} \quad \text{EQ.04}$$

Etapla 1.

En esta primera etapa se va a reducir la presión de entrega de 1200 PSI a 800 PSI con una válvula reguladora.

4.1.1 Ley de Hooke.

$$F = -K * X \quad \text{EQ.05}$$

Donde la fuerza es calculada a partir de la presión de operación y resolviendo la ecuación para un estado totalmente abierto y otra para un estado totalmente cerrado.

Tabla 2. Características lineales resorte 1

Resorte 1	
Distancia (cm)	Presión (PSI)
6.4	97.314
0.6	7944
K=	-1352.8769

Fuente: Autor

4.1.2 Método de Carr-Kobayashi-Burrows.

Este método es usado para calcular la viscosidad del gas sometido a una temperatura de 70°F y una presión de 1200 PSI, es necesario conocer la gravedad específica del gas el cual se calcula con la tabla de la cromatografía mencionada anteriormente donde se sabe que:

$$\gamma_{gas} = \frac{M_q}{\rho_{aire}} = \frac{16.2831}{28.6} = 0.5694 \quad \text{EQ.06}$$

Ya calculada la gravedad se pasa a calcular la temperatura Pseudocritica y la presión Pseudocritica a partir de las siguientes ecuaciones.

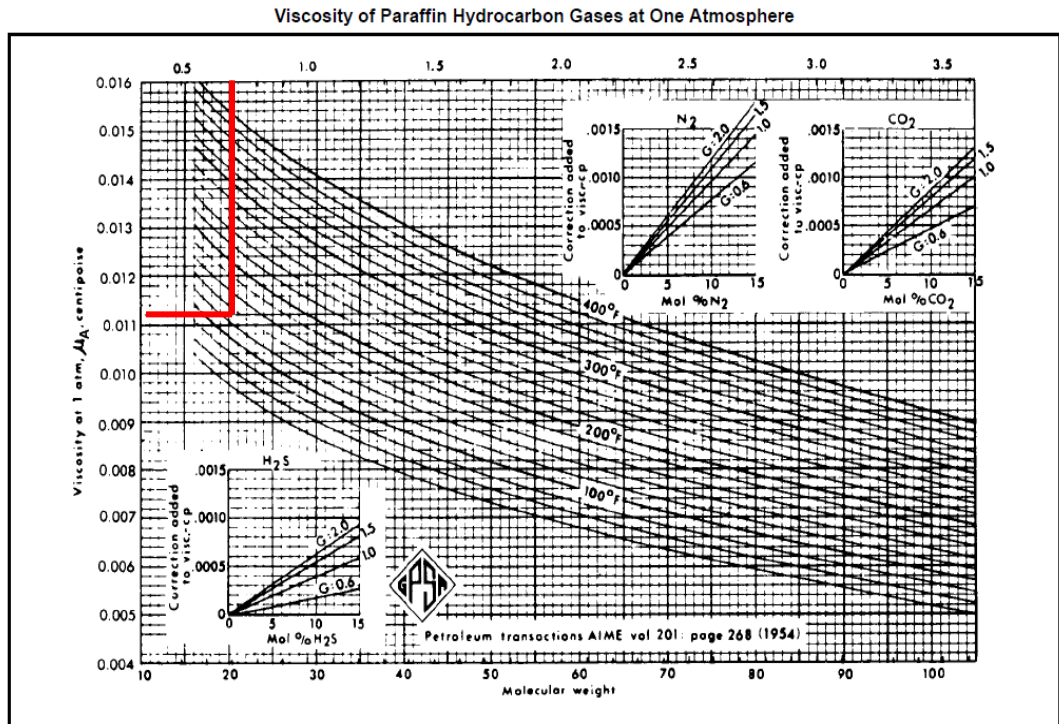
$$T_{pc} = 168 + 325\gamma_{gas} - 12.5\gamma_{gas}^2 = 349.002 \quad \text{EQ.07}$$

$$P_{pc} = 677 + 15\gamma_{gas} - 37.5\gamma_{gas}^2 = 673.383 \quad \text{EQ.08}$$

Según la gráfica 23-22 de la GPSA la viscosidad del fluido a 1 atm a 70F. Con estos datos se obtiene que:

$$\mu_A = 0.0108 \text{ CentiPoises} \quad \text{EQ.09}$$

Grafica 4. Tabla de viscosidad de gas natural a 1 atm



Fuente: GPSA

Ya obtenido el dato el siguiente paso es encontrar la temperatura pseudoreducida y la presión pseudoreducida que están dados por las ecuaciones:

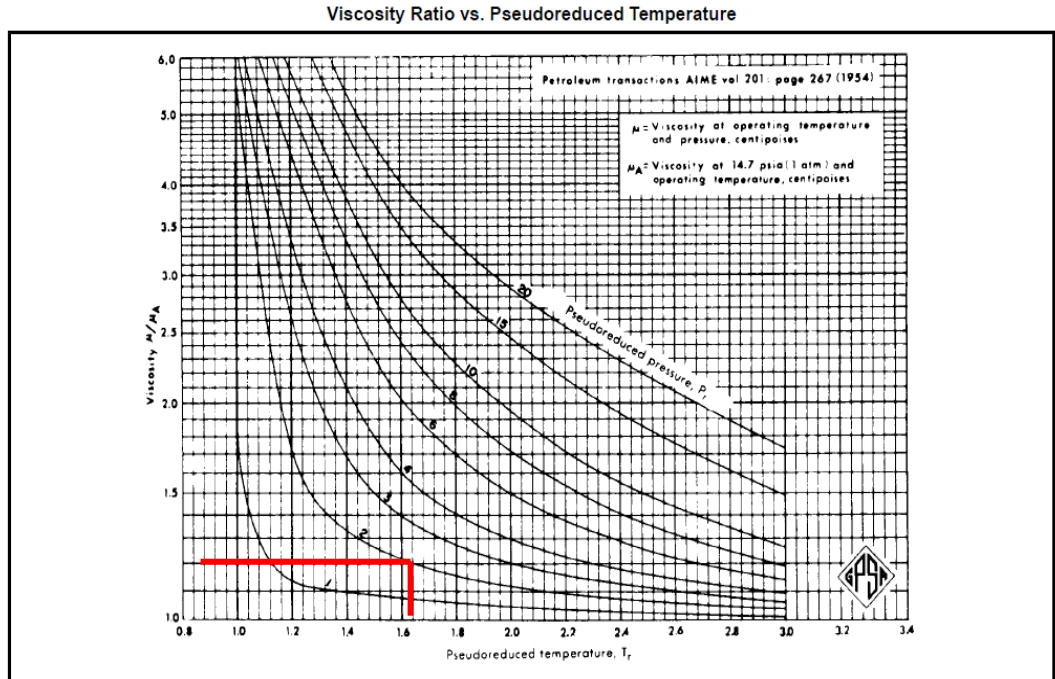
$$P_{pr} = \frac{P_{gas}}{P_{pc}} = \frac{1200}{673.383} = 1.78205 \quad \text{EQ.10}$$

$$T_{pr} = \frac{T_{gas}}{T_{pc}} = \frac{460+70}{349.002} = 1.51862 \quad \text{EQ.11}$$

Una vez obtenida la presión y la temperatura pseudoreducida se utiliza la gráfica 23-24 de la GPSA y se puede hallar una relación de viscosidades

$$\frac{\mu_{gas}}{\mu_A} = 1.25 \text{ Centipoises} \quad \text{EQ.12}$$

Grafica5. Viscosidad vs temperatura Pseudoreducida



Fuente: GPSA

Aplicando la ley de Carr-Kobayashi-Burrows.

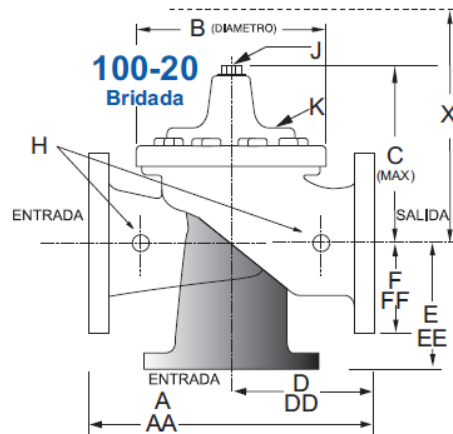
$$\mu_{gas} = \frac{\mu_{gas}}{\mu_A} * \mu_A = 1.25 * 0.0108 = 0.0135 \text{ Centipoises} \quad \text{EQ.13}$$

$$B = 2.8215 * 10^{-7} \text{ Lbf/seg}$$

4.1.3 Masa y área del diafragma.

Para estos datos se utilizan las tablas que fueron suministradas por el fabricante donde dice que el peso del diafragma y el vástago es alrededor de 1 lb y su área es aproximadamente igual a 34.41 in^2

Grafica 6. Esquema de la válvula



Fuente: Manual de válvulas, Departamento de sistemas mecanico, IMMPI

Tabla 3.Tabla característica del fabricante de la válvula

Dimensiones de Modelo 690-01 (en pulgadas)

Medida de Válvula (en pulgadas)	3	4	6	8	10	12	14	16	18	20	24	30	36	42	48
A 150 ANSI	10.25	13.88	17.75	21.38	26.00	30.00	34.25	35.00	42.12	48.00	48.00	63.25	65.00	76.00	94.50
AA 300 ANSI	11.00	14.50	18.62	22.38	27.38	31.50	35.75	36.62	43.63	49.62	49.75	63.75	67.00	76.00	94.50
B Diámetro	6.62	9.12	11.50	15.75	20.00	23.62	27.47	28.00	35.44	35.44	35.44	53.19	56.00	66.00	66.00
C Máximo	7.00	8.62	11.62	15.00	17.88	21.00	20.88	25.75	25.00	31.00	31.00	43.94	54.60	61.50	61.50
D 150 ANSI	—	6.94	8.88	10.69	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	—	—	—	—	—
DD 300 ANSI	—	7.25	9.38	11.19	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	—	—	—	—	—
E 150 ANSI	—	5.50	6.75	7.25	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	—	—	—	—	—
EE 300 ANSI	—	5.81	7.25	7.75	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	CF*	—	—	—	—	—
F 150 ANSI	3.75	4.50	5.50	6.75	8.00	9.50	11.00	11.75	15.88	14.56	17.00	19.88	25.50	28.00	31.50
FF 300 ANSI	4.12	5.00	6.25	7.50	8.75	10.25	11.50	12.75	15.88	16.06	19.00	22.00	27.50	28.00	31.50
H Conexiones en Cuerpo NPT	.375	.50	.75	.75	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
J Tapón central en Tapa NPT	.50	.50	.75	.75	1	1	1.25	1.25	2	2	2	2	2	2	2
K Conexiones en Tapa NPT	.375	.50	.75	.75	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2
Recorrido del Vástago	0.6	0.8	1.1	1.7	2.3	2.8	3.4	3.4	3.4	4.5	4.5	6.5	7.5	8.5	8.5
Peso aproximado en Lbs.	45	85	195	330	625	900	1250	1380	1500	2551	2733	6500	8545	12450	13100
X Sistema de Pilotos	13	15	27	30	33	36	36	41	40	46	55	68	79	85	86
Y Sistema de Pilotos	10	11	18	20	22	24	26	26	30	30	30	39	40	45	47
Z Sistema de Pilotos	10	11	18	20	22	24	26	26	30	30	30	39	42	47	49

*Consulte a fabrica

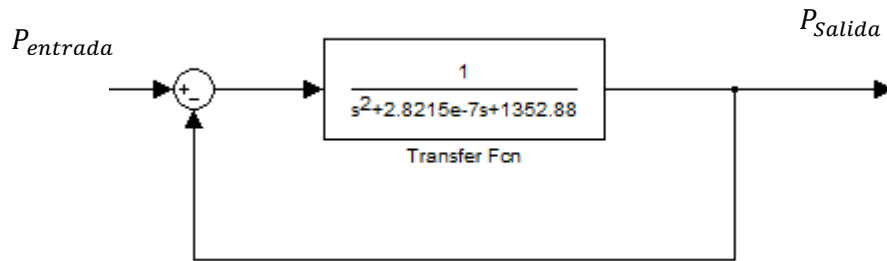
Nota: Los dos orificios superiores de la brida en la válvula de 36 y de 48 son roscados a 1 1/2" - 6 UNC

Fuente: <http://www.cla-val.com/engineering-resources.php>

4.2 Análisis del sistema en estado estacionario.

La representación de la función de transferencia de la válvula la observamos en el siguiente diagrama de bloques.

Grafica 7. Función de transferencia de la válvula



Fuente: Autor

Analizando la función de transferencia de la válvula se observa que es una ecuación de segundo orden. Al realizar un análisis de respuesta transitoria la cual se define por la ecuación:

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\rho w_n s + w_n^2} \quad \text{EQ.14}$$

Igualando los sistemas

$$s^2 + 2\rho w_n s + w_n^2 = s^2 + 2.8215 \times 10^{-7} s + 1352.88 \quad \text{EQ.15}$$

$$2\rho w_n s = 2.8215 \times 10^{-7} s \quad \text{EQ.16}$$

$$w_n^2 = 1352.8 \quad \text{EQ.17}$$

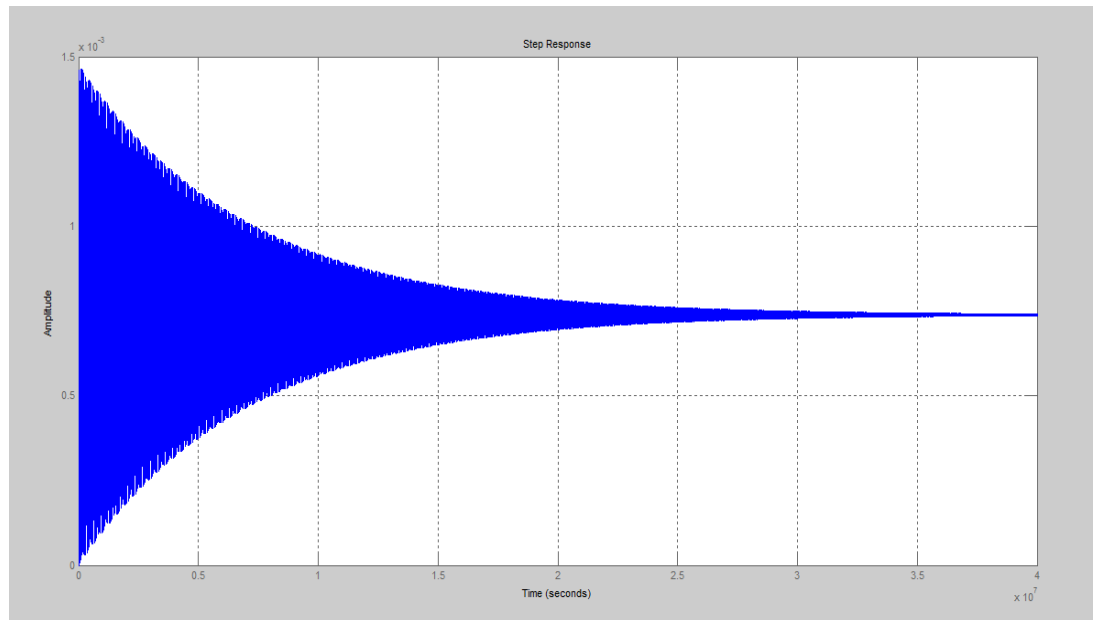
$$w_n = 36.78 \quad \text{EQ.18}$$

$$\rho = \frac{2.8215 \times 10^{-7}}{2 \times 36.78} = 3.83 \times 10^{-9} \quad \text{EQ.19}$$

$$\rho \approx 0 \quad \text{EQ.20}$$

El eje imaginario corresponde a un amortiguamiento de cero ($\rho = 0$). Este resulta en una amortiguación sostenida, y el sistema es marginalmente estable o marginalmente Inestable como lo se ve en la gráfica de posición vs tiempo.

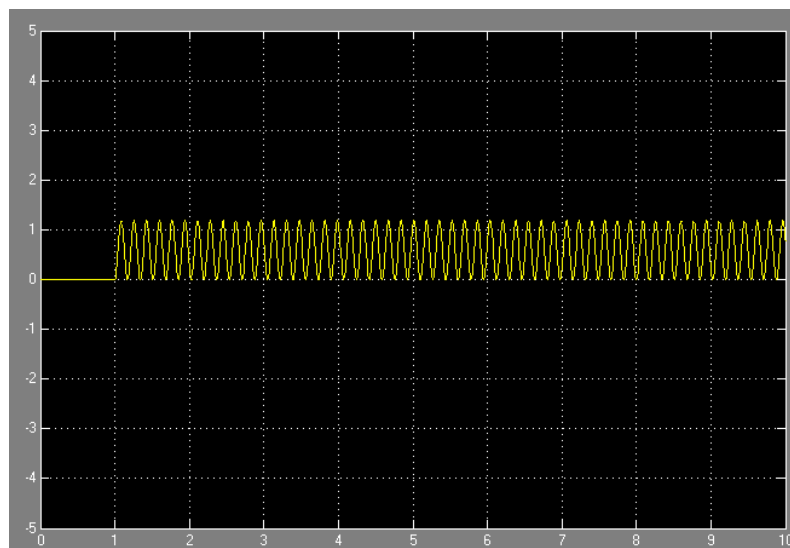
Grafica 8. Posición Vs tiempo-diseñado en Matlab



Fuente: Autor

Haciendo un acercamiento indefinido en el tiempo.

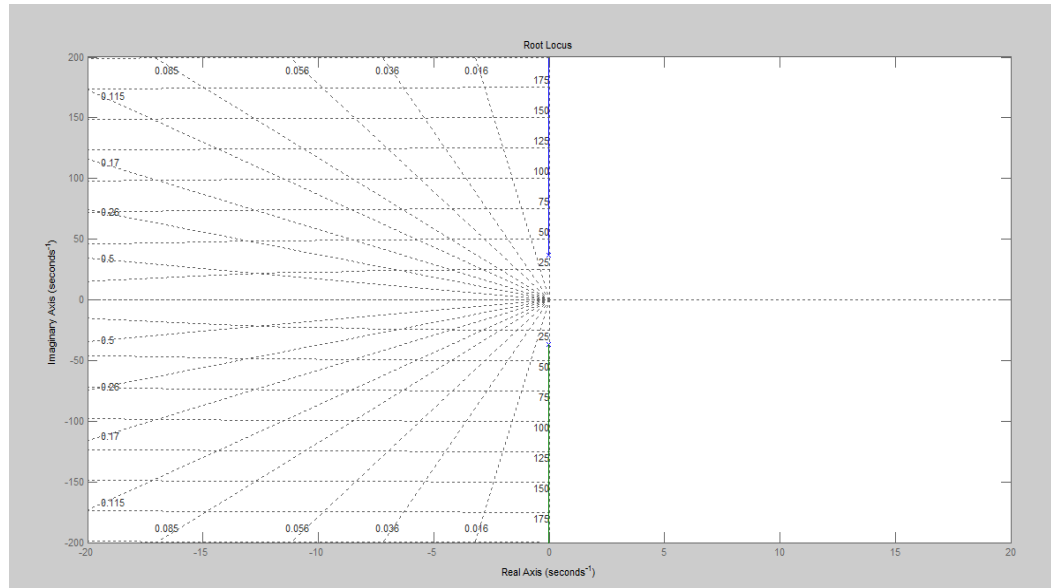
Grafica 9. Posición Vs tiempo-diseñado en Matlab



Fuente: Autor

El sistema es inestable y después de mucho tiempo tiende a estabilizarse, esto es percibido en un diagrama de polos y ceros.

Grafica 11. Esquema de control de lazo cerrado



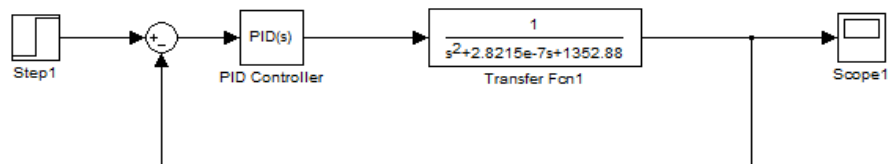
Fuente: Autor

Se confirma que el sistema es inestable al no tener zeros en la gráfica, y se encuentra que los polos del sistema están en el eje cero, lo cual es confirmado al ser $\rho = 0$. Para eso se implementará un control PID el cual traslada los polos al eje imaginario haciendo que el sistema se estabilice.

4.3 Implementación Controlador PID.

Usando la herramienta Matlab® tiene un API llamado simulink la cual permite simular sistemas en este caso se usa la herramienta PID que va a sintonizar la planta por el método de Ziegler y Nichols, el cual se basa en la información obtenida a partir de condiciones límites de estabilidad del proceso de lazo cerrado.

Grafica 11. Esquema de control de lazo cerrado



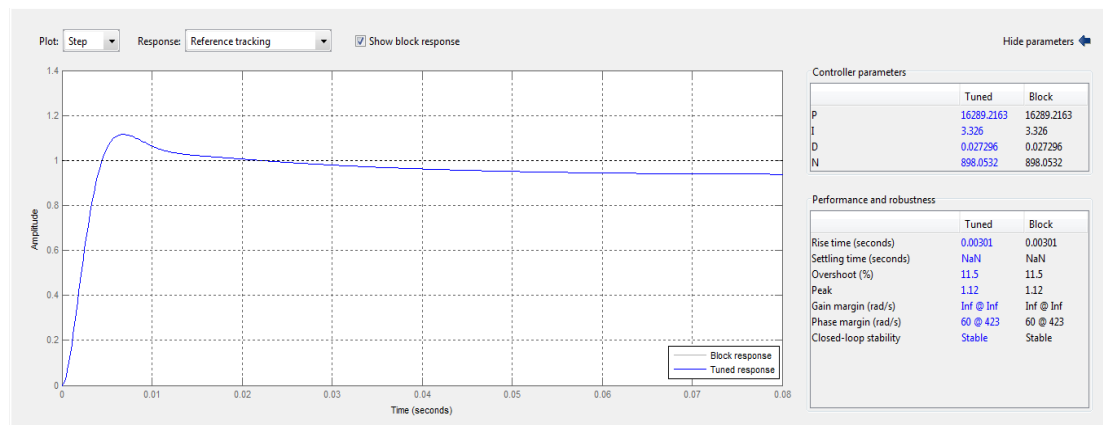
Fuente: Autor

Donde Step 1 es el valor de referencia que en este caso es de 800PSI que va a hacer la presión que se quiere obtener a la salida, teniendo el controlador PID y la función de transferencia. El bloque PID consta de 4 constantes que están regidas por la siguiente función de transferencia.

$$P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right) \quad \text{EQ.21}$$

Donde, P es el controlador proporcional, I el integral, D es el derivativo y N es un coeficiente de filtro.

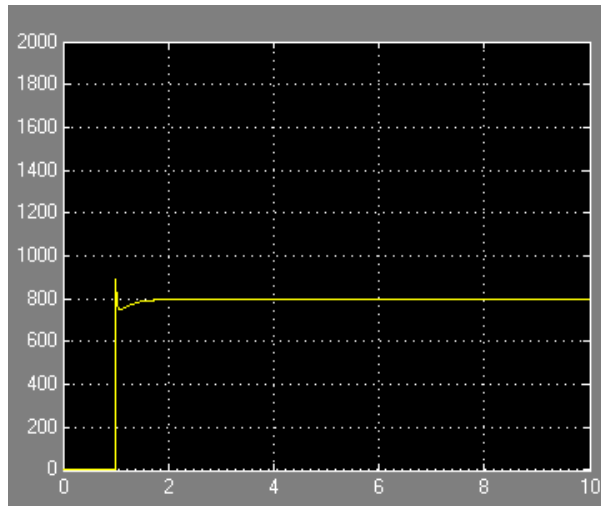
Grafica 12. Respuesta al sistema controlado



Fuente: Autor

Esta es la respuesta transitoria del Controlador, se observa que tiene un pico máximo y desciende manteniendo su pendiente quedando estable, la cual al multiplicarse con la planta va hacer que los polos se desplacen hacia el eje imaginario. Como se muestra en las siguientes gráficas.

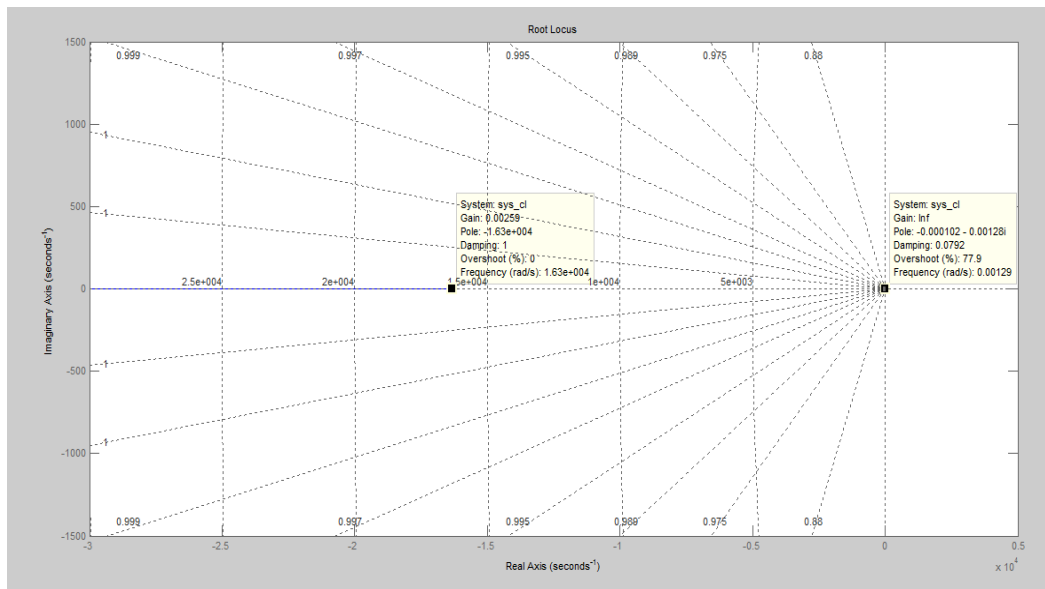
Grafica 13. Respuesta al sistema controlado



Fuente: Autor

La multiplicación del controlador con la planta su resultado entrega un sistema estable que ahora está regido por el siguiente diagrama de polos y zeros en el cual vemos que aparece un Zero en el origen y el polo se traslada al origen imaginario haciendo que $0 < \rho < 1$ lo cual hace que el sistema sea estable y tenga una respuesta sobre amortiguada.

Grafica 14. Diagrama de polos y zeros



Fuente: Autor

De esta manera se tiene la primera etapa de regulación controlada. Como se vio en la simulación realizada en Hysys al principio de este documento la presión ha bajado y con ello está la disminución de temperatura por lo cual van a cambiar las constantes de viscosidad y del resorte.

4.4 Modelamiento Matemático de la válvula.

Etapa 2.

En esta Segunda etapa se reducirá la presión de entrega de 800 PSI a 100 PSI con una válvula reguladora.

4.4.1 Ley de Hooke.

$$F = -K * X \quad \text{EQ.22}$$

Donde la fuerza la calculamos a partir de la presión de operación y resolviendo la ecuación para un estado totalmente abierto y otra para el estado totalmente cerrado.

Tabla 4. Características lineales resorte 2

Resorte 2	
Distancia (cm)	Presión (PSI)
6.4	97.314
0.6	5296
K=	-96.325172

Fuente: Autor

4.4.2 Método de Carr-Kobayashi-Burrows.

Este método se usa para calcular la viscosidad del gas sometido a una temperatura de 49°F y una presión de 800 PSI, para esto se necesita conocer la gravedad

específica de este gas el cual se calcula con la tabla de la cromatografía mencionada anteriormente donde sabemos que es:

$$\gamma_{gas} = \frac{M_q}{\rho_{aire}} = \frac{16.2831}{28.6} = 0.5694 \quad \text{EQ.23}$$

Con este resultado el siguiente paso es calcular la temperatura Pseudocritica y la presión Pseudocritica a partir de las siguientes ecuaciones.

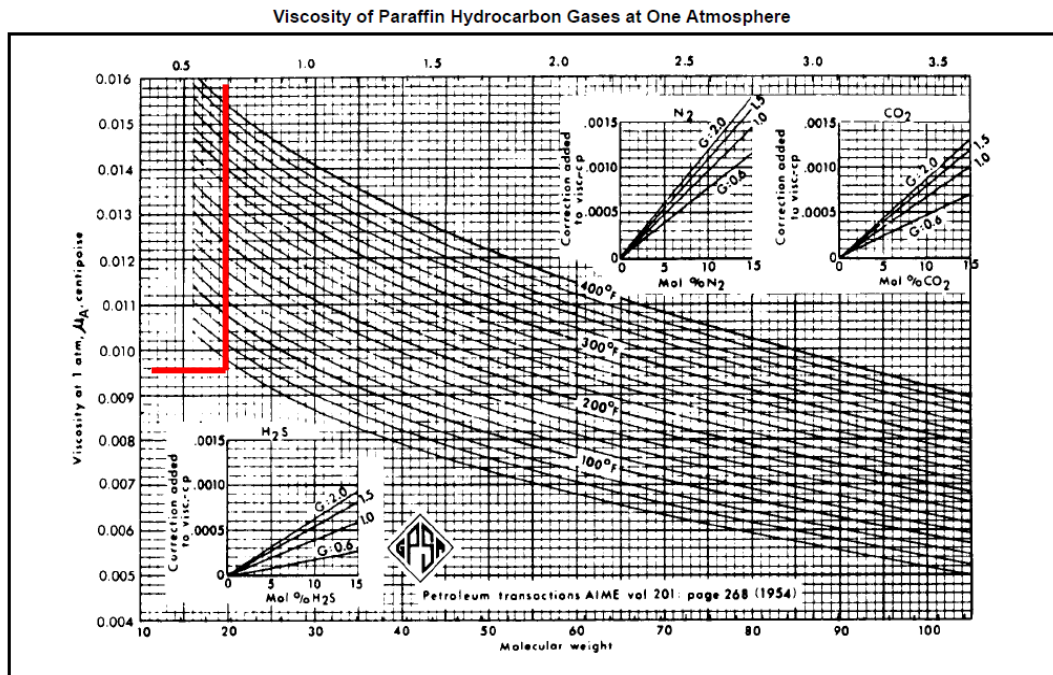
$$T_{pc} = 168 + 325\gamma_{gas} - 12.5\gamma_{gas}^2 = 349.002 \quad \text{EQ.24}$$

$$P_{pc} = 677 + 15\gamma_{gas} - 37.5\gamma_{gas}^2 = 673.383 \quad \text{EQ.25}$$

Según la gráfica 23-22 de la GPSA la viscosidad del fluido a 1 atm a 70F con estos datos se obtiene que:

$$\mu_A = 0.0102 \text{ CentiPoises} \quad \text{EQ.26}$$

Grafica 15. Tabla de viscosidad de gas natural a 1 atm



Fuente: GPSA

Ya obtenido el dato el siguiente paso es encontrar la temperatura pseudoreducida y la presión pseudoreducida que están dados por las ecuaciones:

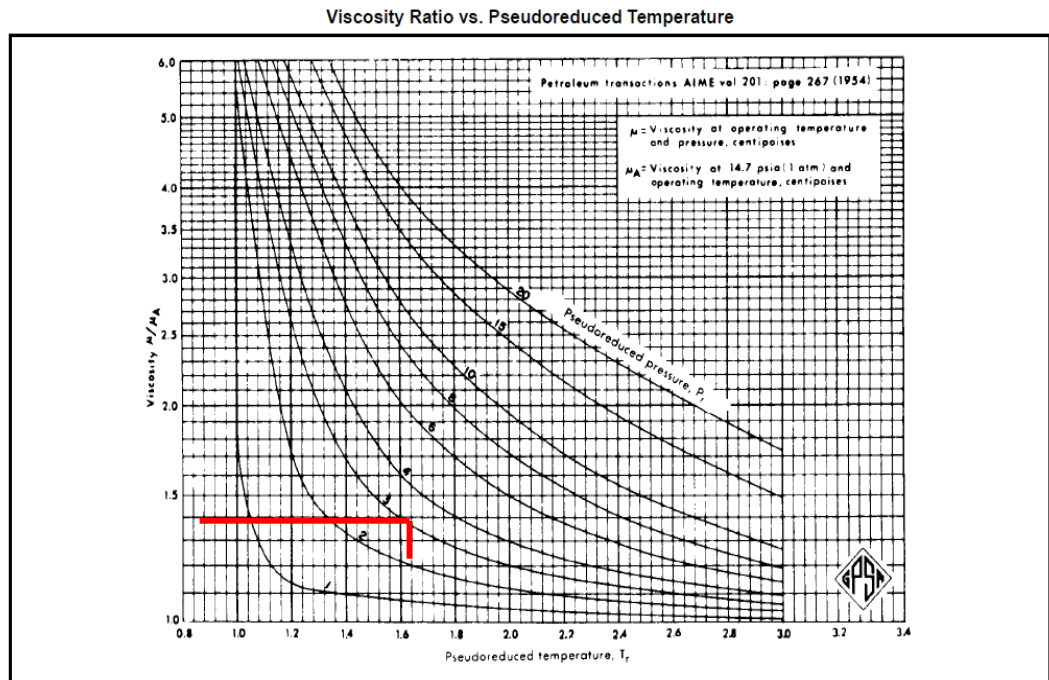
$$P_{pr} = \frac{P_{gas}}{P_{pc}} = \frac{800}{673.383} = 1.1880 \quad \text{EQ.27}$$

$$T_{pr} = \frac{T_{gas}}{T_{pc}} = \frac{460+49}{349.002} = 1.4613 \quad \text{EQ.28}$$

Una vez obtenida la presión y la temperatura pseudoreducida se utiliza la gráfica 23-24 de la GPSA y se puede hallar una relación de viscosidades

$$\frac{\mu_{gas}}{\mu_A} = 1.2 \text{ Centiposises} \quad \text{EQ.29}$$

Grafica 16. Viscosidad vs temperatura Pseudoreducida



Fuente: GPSA Tabla de viscosidad vs Temp. Pseudocritica.

Aplicando la ley de Carr-Kobayashi-Burrows.

$$\mu_{gas} = \frac{\mu_{gas}}{\mu_A} * \mu_A = 1.2 * 0.0102 = 0.01224 \text{ Centiposises} \quad \text{EQ.30}$$

$$B = 2.5581 * 10^{-7} \text{ Lbf/seg}$$

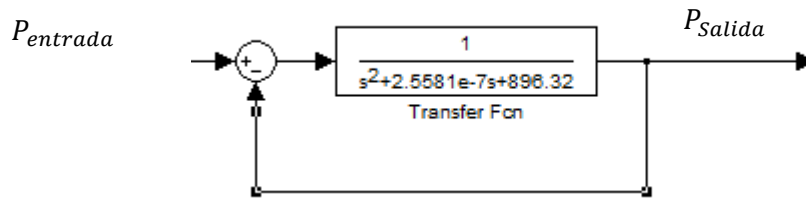
4.4.3 Masa y área del diafragma.

Para estos datos se utilizan las tablas que fueron suministradas por el fabricante donde dice que el peso del diafragma y el vástago es alrededor de 1 lb y su área es aproximadamente igual a 34.41 in^2

4.4.4 Análisis del sistema en estado estacionario.

Como primera medida se observa la función de transferencia que está representada en el siguiente diagrama de bloques.

Grafica17. Función de transferencia válvula-diseñado en Matlab



Fuente: Autor

Observando la función de transferencia de la válvula se observa que es una ecuación de segundo orden al realizar un análisis de respuesta transitoria la cual está definida por la siguiente ecuación

$$\frac{C(s)}{R(s)} = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\rho w_n s + w_n^2} \quad \text{EQ. 31}$$

Igualando los sistemas

$$s^2 + 2\rho w_n s + w_n^2 = s^2 + 2.5581 \times 10^{-7} s + 896.32 \quad \text{EQ. 32}$$

$$2\rho w_n s = 2.5581 \times 10^{-7} s \quad \text{EQ. 33}$$

$$w_n^2 = 896.32 \quad \text{EQ.34}$$

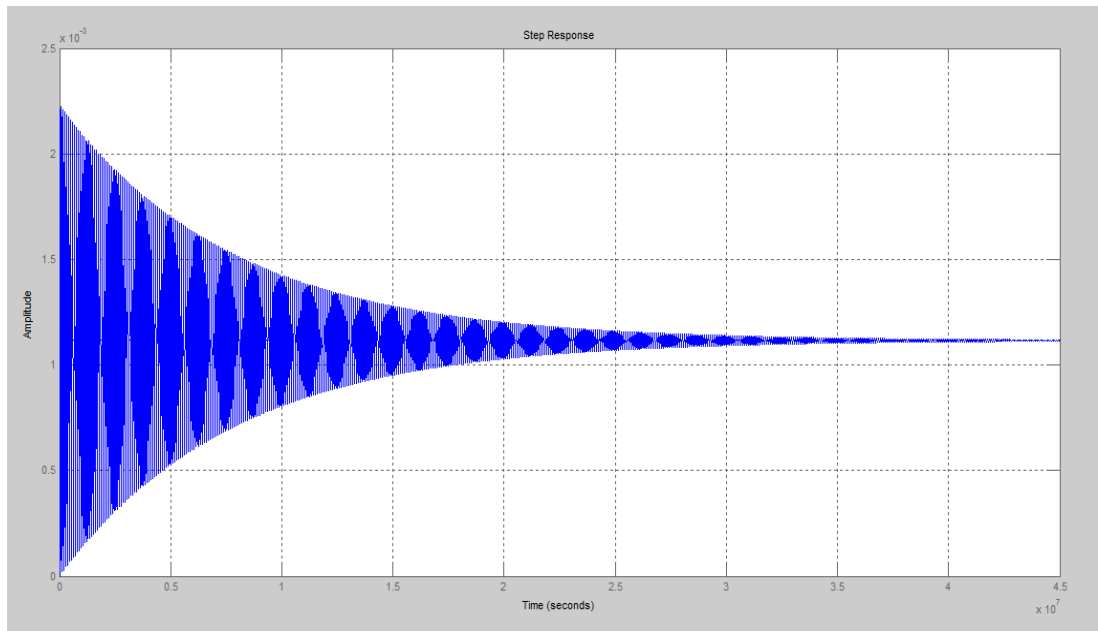
$$w_n = 29.37 \quad \text{EQ.35}$$

$$\rho = \frac{2.5581 \times 10^{-7}}{2 \times 29.37} = 4.27 \times 10^{-9} \quad \text{EQ.36}$$

$$\rho \approx 0 \quad \text{EQ.37}$$

El eje imaginario corresponde a un amortiguamiento de cero ($\rho = 0$). Este resulta en una amortiguación sostenida, y el sistema es marginalmente estable o marginalmente inestable como se ve en la gráfica de posición vs tiempo.

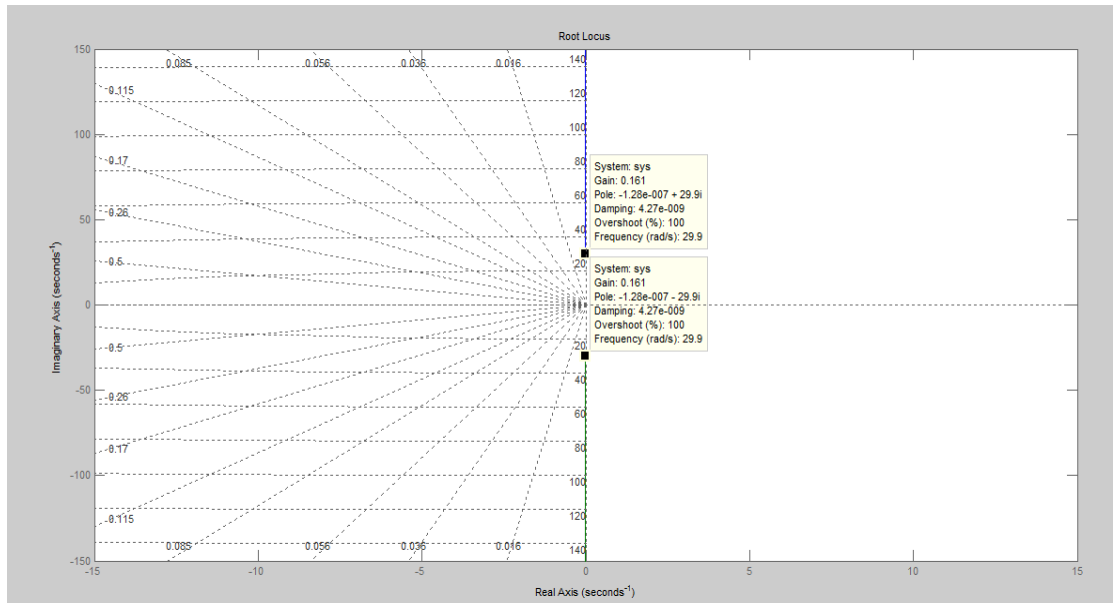
Grafica 18. Posición Vs Tiempo- Matlab



Fuente: Autor

Se observa que el sistema es inestable y después de mucho tiempo tiende a estabilizarse esto lo podemos observar en un diagrama de polos y ceros.

Grafica 19. Diagrama de polos y zeros Matlab



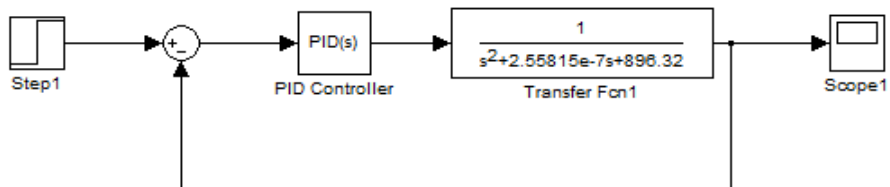
Fuente: Autor

Se confirma que el sistema es inestable al no tener zeros en la gráfica, y se observa que los polos del sistema se encuentran en el eje cero lo cual lo confirma que $\rho = 0$. Para esto vamos se implementa un control PID el cual va a trasladar los polos al eje imaginario haciendo que el sistema se estabilice.

4.5 Implementación Controlador PID.

Usando la herramienta Matlab® tiene un API llamado simulink la cual permite simular sistemas en este caso se usa la herramienta PID que va a sintonizar la planta por el método de Ziegler y Nichols, el cual se basa en la información obtenida a partir de condiciones límites de estabilidad del proceso de lazo cerrado.

Grafica 20. Esquema de control de lazo cerrado



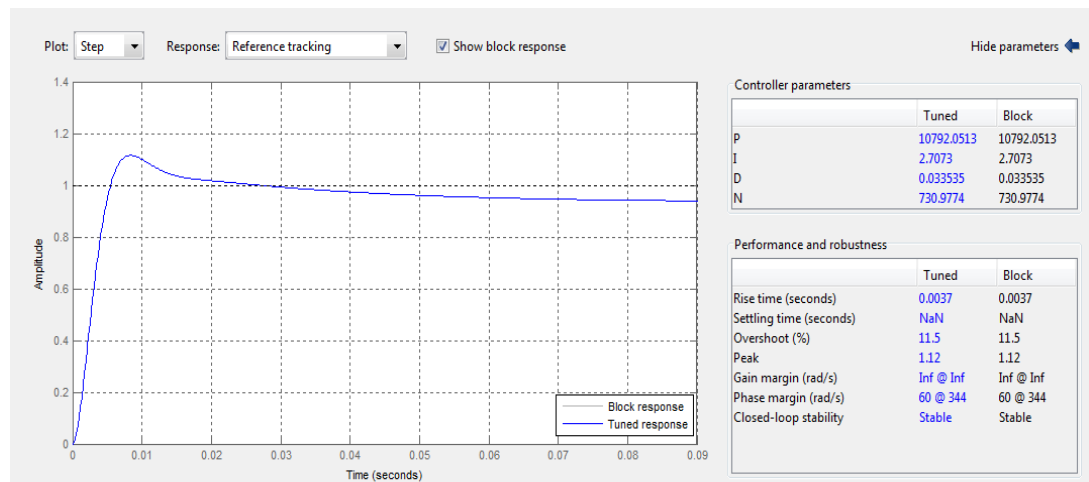
Fuente: Autor

Donde Step 1 es el valor de referencia que en este caso es de 800PSI que va a hacer la presión que se quiere obtener a la salida, teniendo el controlador PID y la función de transferencia. El bloque PID consta de 4 constantes que están regidas por la siguiente función de transferencia.

$$P \left(1 + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \right) \quad \text{EQ.38}$$

Donde, P es el controlador proporcional, I el integral, D es el derivativo y N es un coeficiente de filtro.

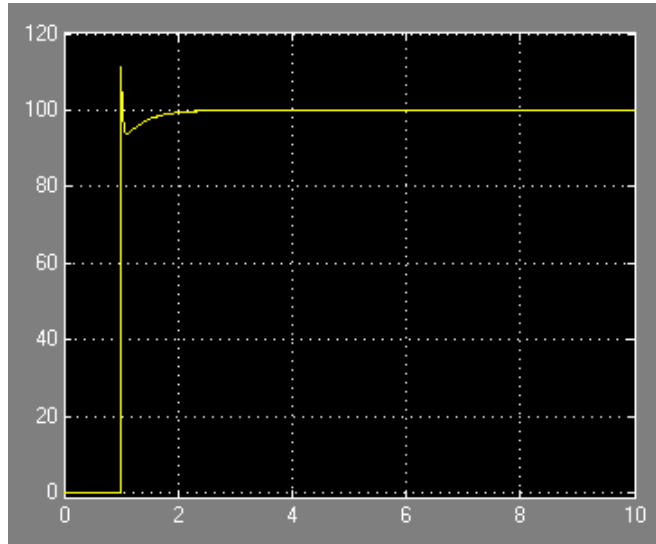
Grafica 21. Respuesta al sistema controlado



Fuente: Autor

Acá se tiene la respuesta transitoria del Controlador, podemos observar que tiene un pico máximo y desciende manteniendo su pendiente quedando estable, el cual al multiplicarse con la planta va hacer que los polos se desplacen hacia el eje imaginario. Como lo vemos en las siguientes gráficas.

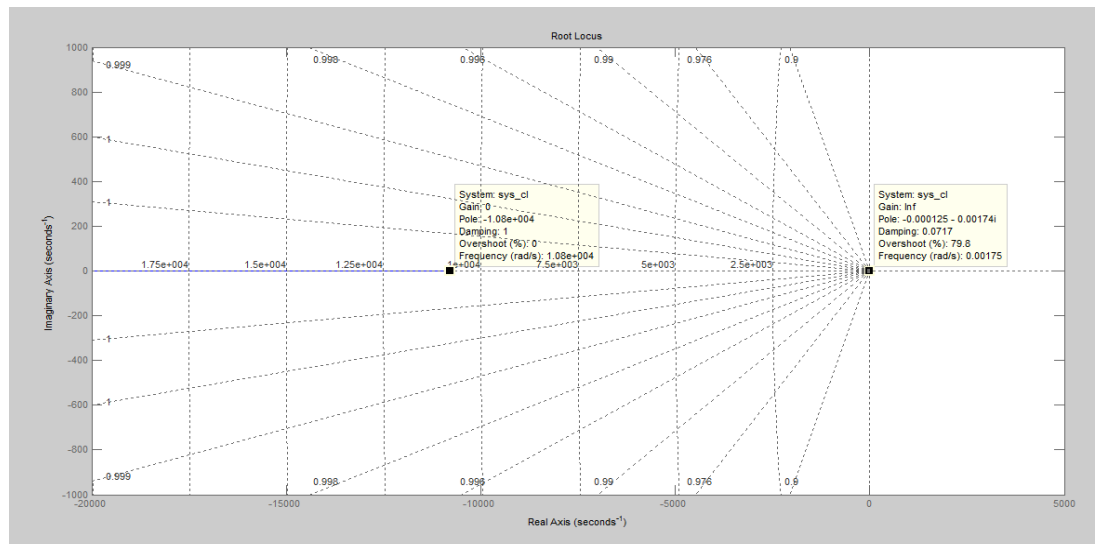
Grafica 22. Respuesta al sistema controlado



Fuente: Autor

La multiplicación del controlador con la planta su resultado entrega un sistema estable que ahora está regido por el siguiente diagrama de polos y zeros en el cual vemos que aparece un Zero en el origen y el polo se traslada al origen imaginario haciendo que $0 < \rho < 1$ lo cual hace que el sistema sea estable y tenga una respuesta sobre amortiguada.

Grafica 23. Diagrama de polos y zeros

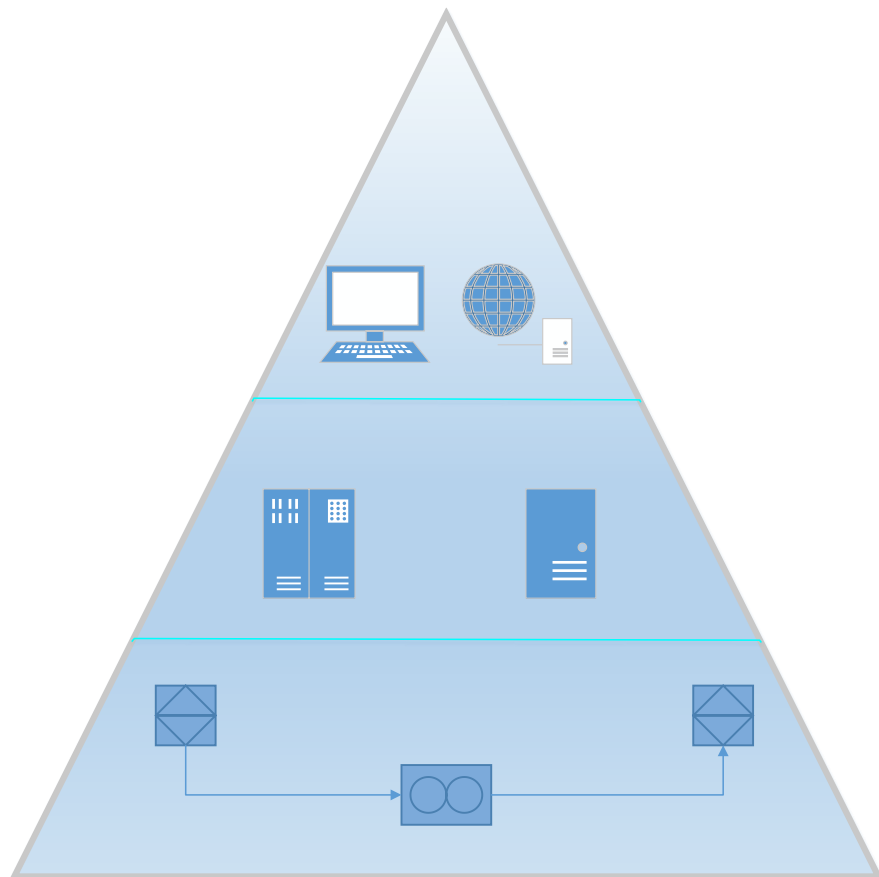


Fuente: Autor

5. Sistema SCADA

el sistema de regulación cuenta con una gran cantidad de sensores que van a muestrear cada una de las variables que afectan el proceso para este caso específico de la implementación del controlador PID la señal de referencia es la suministrada por los PIT (transmisores de presión) que se encuentran instalados antes y después de cada etapa de regulación, estos están conectados mediante un protocolo de dos hilos HART a un computador base quien internamente con los datos suministrados hace las operaciones de corrección e implementación del controlador, enviara la señal correspondiente para que el actuador opere y garantice la presión de salida que se desea.

Grafica 24. Pirámide Scada

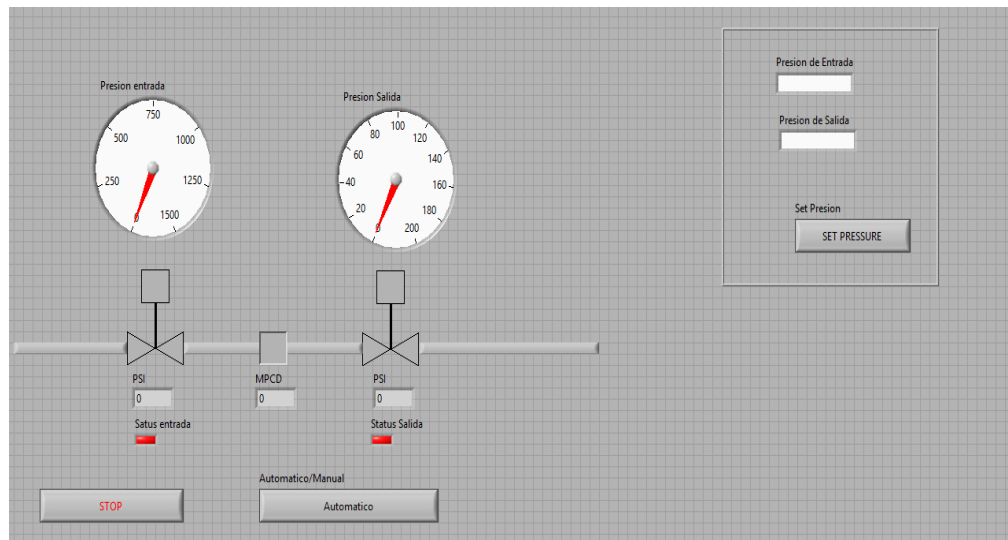


Fuente: Autor

El esquema que se muestra en la gráfica 24 vemos la pirámide de jerarquías del sistema SCADA en la base se tienen los instrumentos de campo, que son los transmisores de presión y el medidor de flujo. En segunda instancia se tiene las RTU o PLC de campo que son los encargados de coger las señales de campo filtrarlas, y codificarlas para que se envíen al cuarto de control que es la siguiente etapa y última en la pirámide que es donde vamos a encontrar el HMI (Human Machine Interface) y un servidor web el cual nos permitirá controlar todo a distancia por un sistema de escritorio Remoto.

El sistema SCADA está implementado en una consola la cual nos va a mostrar la pantalla del sistema donde podemos ajustar y ver los valores en tiempo real, este sistema está programado en LabView. Y tiene como control el PID descrito anteriormente.

Grafica 25. (Pantalla HMI-diseñado en Labview por el autor)

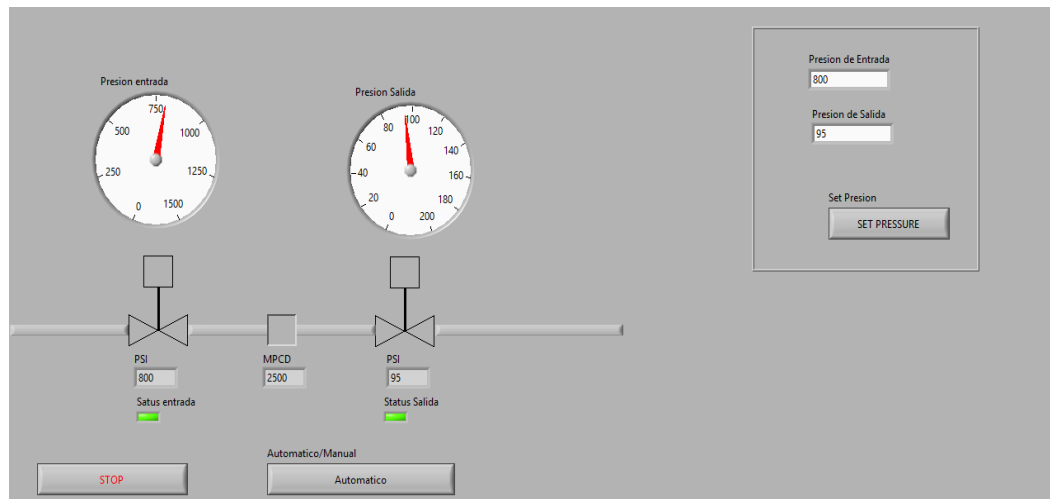


Fuente: Autor

En la gráfica 25 está el sistema donde hay dos válvulas y un medidor de flujo, los dos transmisores de presión un botón automático y otro es un botón de parada de emergencia. En la parte superior derecha hay dos campos para ingresar los valores de Set de presión que deseamos tener en este caso el de arriba es para la presión de entrada, la cual es la que llega a CityGate directamente de la línea, y la otra es la

presión de salida que es la presión a la cual va salir el gas para ser distribuido. Aparte hay dos indicadores que nos mostraran si está fallando son dos leds que activan una alarma cuando hay una sobre presión o caída de la misma, esta alarma tiene un margen de error del 5%.

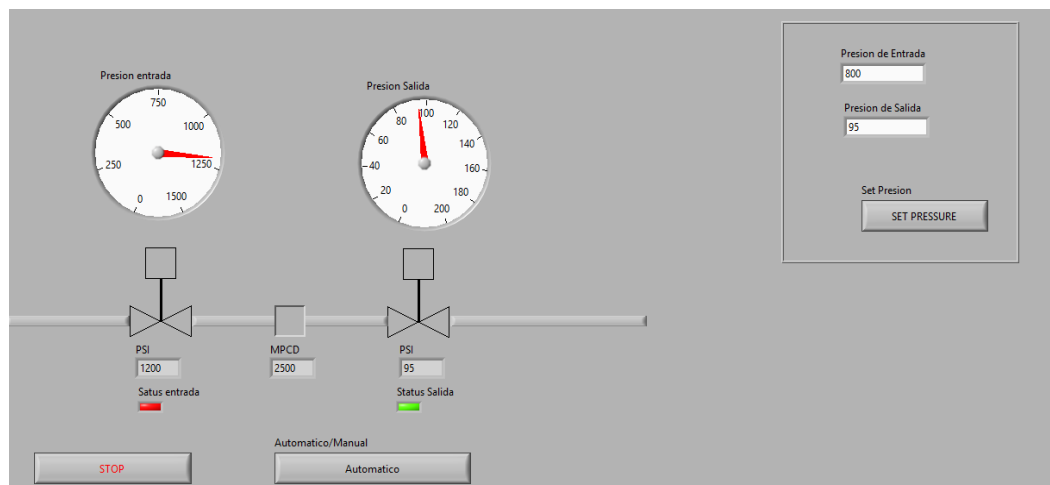
Grafica 26.Pantalla HMI



Fuente: Autor

En este caso el sistema trabaja a perfectas condiciones los indicadores están en verde y vemos que la presión que muestran los transmisores es igual que la presión de Set.

Grafica 27.Pantalla HMI



Fuente: Autor

Para este caso, la presión de entrada esta elevada el sistema genera la alerta y automáticamente corrige con el sistema de control para tener una salida deseada.

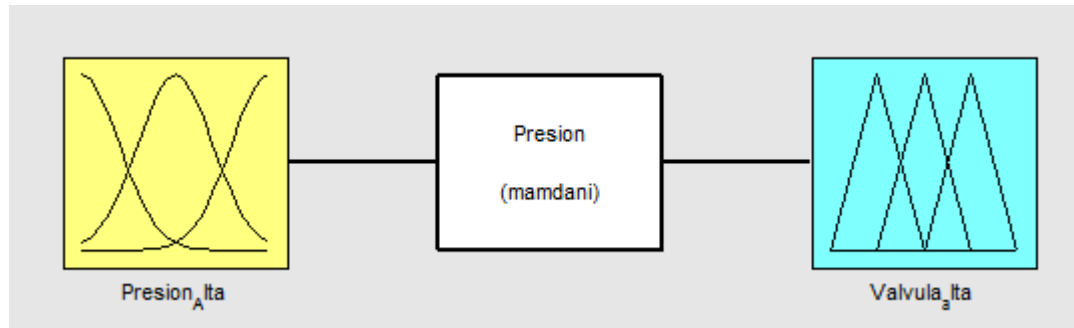
6. Lógica Difusa.

Para aplicar el controlador aplicando lógica difusa usamos la herramienta en Matlab llamada Fuzzy, la cual nos permite crear las entradas al sistema, las reglas y así mismo este opera y nos entrega una salida, para hablar de lógica difusa es importante entender que este tipo de controlador trabaja como la lógica humana es capaz de tomar una decisión con el raciocinio que lo haría una persona, para entenderlo hay que hablar primero de imprecisión y de incertidumbre, la imprecisión es la situación en la que no puede darse un valor exacto para los parámetros del problema, la información no es cuantificable, o es incompleta o no puede obtenerse. La incertidumbre son los parámetros que intervienen en el problema. Aparte de esto esta lógica no exige valores exactos, soporta valoraciones subjetivas e incluso valoraciones lingüísticas para los parámetros del problema y las incorpora apropiadamente a modelos matemáticos complejos. Esta lógica trabaja con datos booleanos y unos conjuntos difusos definidos los cuales están formulados matemáticamente, existen conjuntos triangulares, campanas gaussianas, cuadrados entre otros, al tener una entrada este comienza una travesía a través de todas las reglas y se va acomodando en la que más encaje dándole un peso a una regla para sí generar una sola respuesta.

Para usar esta lógica se define como la entrada al sistema la presión de entrada del CityGate, el controlador de presión que aplica las reglas establecidas y a la salida se tiene un valor de posición que enviara a un motor paso a paso el cual va a abrir o cerrar la posición del diafragma de la válvula.

En las figuras siguientes vamos a ver cuáles son las variables de entrada.

Grafica 28. Función Fuzzy



Fuente:Autor

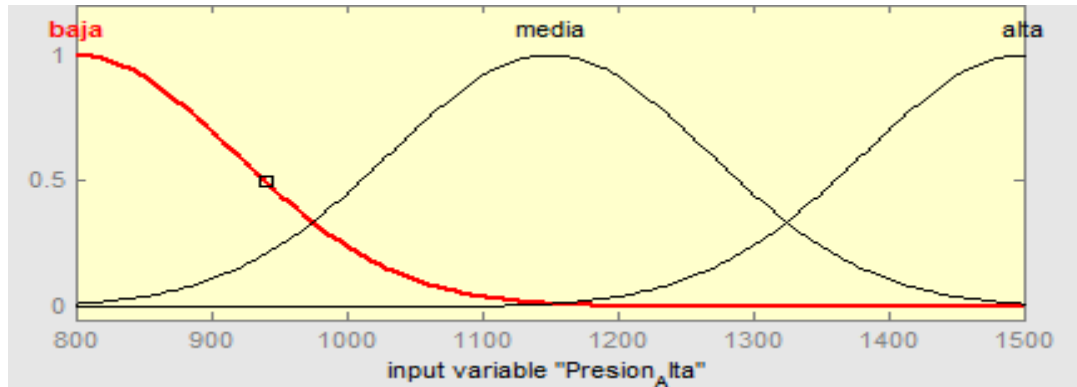
Este es el sistema de control de lógica difusa, se tiene a la entrada un conjunto de campanas gaussianas que van a determinar la presión de entrada característica para que sea fuzificada y así pueda arrojar un resultado. A la salida se tiene un cajón llamado válvula de alta el cual entrega como resultado un valor numérico que pasara a ser codificado por un PLC y finalmente situara un motor paso a paso en dicha posición correspondiente al valor suministrado.

Las entradas están diseñadas con conjuntos difusos regidos por el modelo matemático que representa campanas gaussianas el cual está regido por la siguiente ecuación.

$$f(p) = a * e^{-\frac{(p-b)^2}{2c^2}} \quad \text{EQ.39}$$

Donde está en función de p que es la presión de entrada, a significa la amplitud que va a tener la campana, b es la posición central de la campana y c es el ancho de la campana, en este caso hay tres campanas que definen la presión como alta, media y baja estos criterios se toman a consideración del diseñador. En cada una de las campanas que conforman la entrada las constantes a, b y c varían según la configuración que se le dé al sistema.

Grafica 29. Conjuntos Presión de entrada

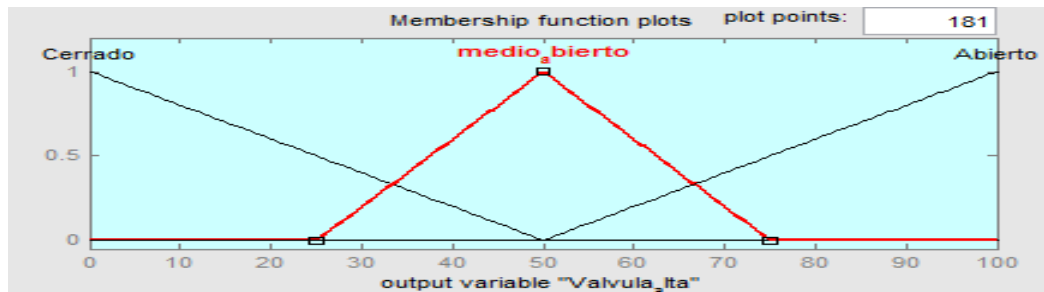


Fuente: Autor

La presión de alta está regida por la siguiente gráfica. La cual genera un valor al fuzificar la entrada, asignándole un conjunto y un valor de 0 a 1. Ejemplo si la presión es de 900 psi lo asignara al conjunto llamado baja con un valor de 0.5, este valor es el dato ya fuzificado.

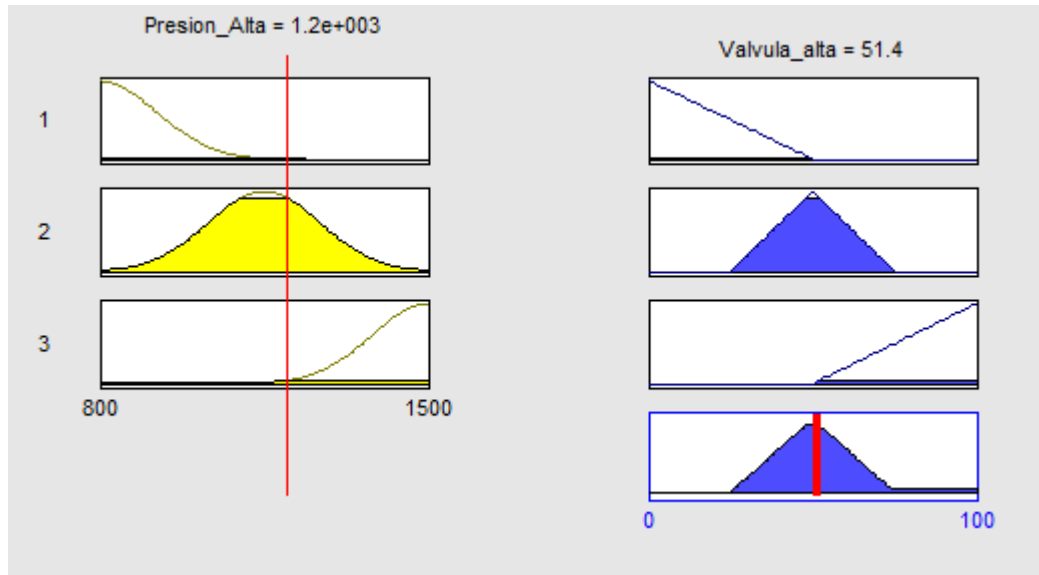
Dándole un vistazo a la salida hay un conjunto de señales triangulares que va a entregar una posición de 0 a 100 que es el porcentaje de apertura del diafragma de la válvula que está siendo operada por el motor paso a paso el cual recibe esta señal.

Grafica 30. Conjunto Posición de salida



Fuente: Autor

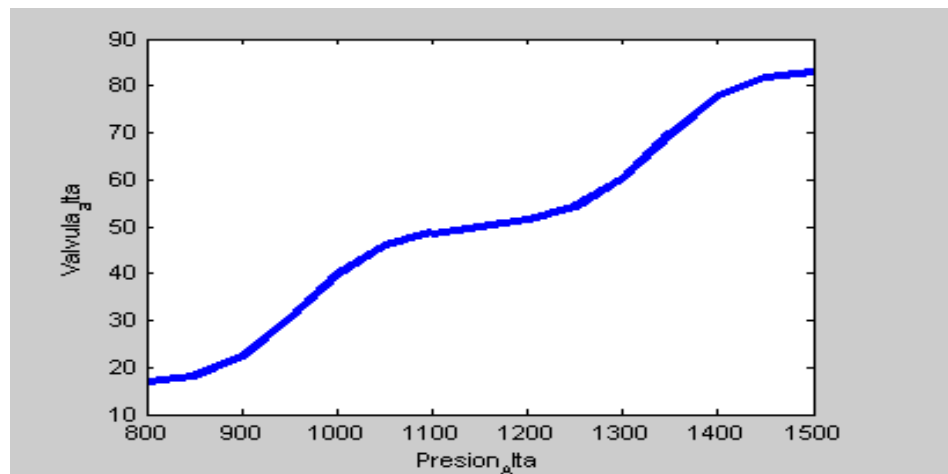
Grafica 31. Simulación



Fuente: Autor

La grafica 31 muestra un ejemplo de una presión de entrada de 1200 psi ubica en el conjunto de entrada y por medio de las reglas ajusta la respuesta a la salida diciendo que la válvula debe estar en un 51.4% abierta para garantizar una presión de 800 psi a la salida de esta.

Grafica 32. Presión vs posición



Fuente: Autor

8. CONCLUSIONES.

- A pesar de que el sistema de control PID es más exacto, un control lógico como el de lógica difusa se acomoda mejor a la aplicación ya que tiene un criterio más amplio para tomar una decisión ante un evento.
- Un controlador de lógica difusa permite evaluar cualquier tipo de evento y tomar la mejor decisión, con un criterio casi humano el cual evalúa muchas posibilidades y determina según el peso del evento que decisión tomar.
- La posibilidad de implementar un equipo de cromatografía para detectar la composición del gas a la entrada y así mismo poder calcular su viscosidad es muy importante para determinar los coeficientes del controlador.
- Un actuador electromecánico tiene mayor efectividad que uno neumático debido a que usando servomotores podemos tener cambios de posición más exactos que uno neumático.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Sistemas masa resorte, Google images.
- Repaso de modelos matemáticos de sistemas dinámicos, Virginia Mazzone, Universidad Nacional de Quilmes.
- Manual de válvulas, Departamento de sistemas mecanico, IMMPI
- Manual de válvulas, Departamento de sistemas mecanico, IMMPI
- Ingeniería de Control Moderna, Ogata, Pearson Prentice Hall.
- <http://www.youtube.com/watch?v=jCxDj8ip-OI> video festo
- <http://www.youtube.com/watch?v=aRM3jbtrbW4&feature=related> válvulas
- <http://www.youtube.com/watch?v=6LR00d6HRPg&feature=related> ventury
- GPSA.
- GPSA Tabla de viscosidad vs Temp. Pseudocritica.
- GPSA Tabla de viscosidad a 1atm
- Fundamentos de Inteligencia artificial, Luis Alvares Munarriz, Universidad de Murcia.
- Datasheet Válvula Cla-val.

ANEXOS

ANEXO A. Códigos de Matlab.

```
%Válvula Alta
%respuesta del sistema.
num=[1];
den=[1 2.8215e-7 1352.88];
[numc,denc]=cloop(num,den);
g=tf(num,den);
gc=tf(numc,denc);
figure (1)
step(numc,denc)
grid on

%diagrama de polos y zeros
rlocus(num,den);

%aplicando PID
plant=tf(num,den);
kp=16289.21;
ki=3.32;
kd=0.027;
control=tf([kp ki kd],[1 0]);
sys_cl=feedback(control*plant,1);
t=0:0.01:2;
step(sys_cl,t);
grid on

%polos y zeros
rlocus(sys_cl);

%Válvula Baja
%respuesta del sistema.
num=[1];
den=[1 2.5581e-7 896.32];
[numc,denc]=cloop(num,den);
g=tf(num,den);
gc=tf(numc,denc);
figure (1)
step(num,den)
grid on;
figure (2)
step(numc,denc)
grid on

%diagrama de polos y zeros
rlocus(num,den);
```

```
%aplicando PID
plant=tf(num,den);
kp=10792.051;
ki=2.7072;
kd=0.033;
control=tf([kp ki kd],[1 0]);
sys_cl=feedback(control*plant,1);
t=0:0.01:2;
step(sys_cl,t);
grid on

%polos y zeros
rlocus(sys_cl);
```

ANEXO B. Reglas Lógica difusa.

1. If (Presion_Alta is baja) then (Valvula_alta is Cerrado) (1)
2. If (Presion_Alta is media) then (Valvula_alta is medio_abierto) (1)
3. If (Presion_Alta is alta) then (Valvula_alta is Abierto) (1)

If
Presion_Alta is

baja
media
alta
none

not

Then
Valvula_alta is

Cerrado
medio_abierto
Abierto
none

not

Connection

or
 and

Weight:

1

Delete rule Add rule Change rule << >>

FIS Name: Presion

Help Close