

ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO

DEPARTAMENTO DE ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRONICA,
AUTOMATIZACIÓN Y CONTROL**

**PROYECTO DE GRADO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERÍA ELECTRONICA**

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL
CON LOGICA DIFUSA PARA LA ESTACION DE BOMBEO N°1
LAGO AGRIO DEL OLEODUCTO TRANSECUTORIANO**

JUAN CARLOS CASAÑAS FUENTES

Sangolquí – Ecuador

2006

CERTIFICACION

Certificamos que el presente proyecto de grado titulado “DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN SISTEMA DE CONTROL CON LOGICA DIFUSA PARA LA ESTACION DE BOMBEO N°1 LAGO AGRIO DEL OLEODUCTO TRANSECUATORIANO” ha sido desarrollado en su totalidad por el SR. JUAN CARLOS CASAÑAS FUENTES con C.I. 180358865 – 4 bajo nuestra dirección.

Ing. Hugo Ortiz
DIRECTOR

Ing. Rodolfo Gordillo
CODIRECTOR

RESUMEN

Petroecuador - Gerencia de Oleoducto, institución que tiene como función principal el transporte de petróleo mediante el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano (SOTE), migró el control PID principal en la Estación de Bombeo Lago Agrio a uno basado en lógica difusa empleando herramientas propias del Sistema DeltaV, el FLC (Fuzzy Logic Controller). En el presente proyecto se realizó un estudio previo de dicha lógica y posteriormente un análisis de la estructura del controlador, diseño, simulación para la posterior implementación en la Estación.

En la fase de simulación, debido a la importancia del controlador PID se realizó las respectivas simulaciones en el programa MATLAB, para ello se determinó la ecuación de la planta y se comparó su respuesta bajo la acción de los dos controladores. Finalmente se implementó el FLC en el lazo principal que controla la presión de descarga de la Estación el 29 de Octubre de 2006 y desde entonces se encuentra operativo.

Con el FLC se comprobó una respuesta más rápida del sistema, se verificó también un control más preciso; lo que contribuye a una mayor celeridad en la operación. Además se logró un comportamiento más estable y robusto de la planta que constituye, a largo plazo, en un ahorro de mantenimiento de equipos, de horas de trabajo y horas hombre, y de manera indirecta en un incremento de bombeo de barriles de crudo a través del SOTE.

DEDICATORIA

Principalmente a quienes tomaron la firme decisión de sacrificar sus sueños para que yo pueda forjar un mejor futuro y me enseñaron a triunfar.

A quien me demostró que puedo volar tan alto como mi alma quiera, tuvo siempre una palabra de aliento cuando me vio llorar y nunca juzgo mis lágrimas.

A quien me dijo alguna vez: “te digo esto porque te quiero, se que vas a salir adelante” y es mi referente en la vida.

A quien necesitaba pero no esperaba que llegue. A mi razón de vivir.

A todos quienes pusieron su granito de arena para edificar este gran sueño, me ayudaron a recorrer este camino y se sienten parte de mi historia.

Todo esto es como “una caja de música que al abrirla emitirá una sinfonía que deleitará, hará vibrar y disfrutar, solamente a quienes no pueden escuchar.”

A todos ustedes les dedicó este, mi esfuerzo.

AGRADECIMIENTO

A la Escuela Politécnica del Ejército, por haberme inculcado una educación integral.

Al personal de Instrumentación de la Estación Lago Agrio quienes me brindaron todo el apoyo para culminar con éxito este proyecto.

PROLOGO

Desde que la lógica difusa se introdujo de manera formal en la literatura técnica a mediados del siglo XVII por el Dr. Lofti Zadeh, se han generado, a partir de la misma, una serie de aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, a través de las reglas “SI – ENTONCES”, buscando como principal objetivo imitar el comportamiento humano, principalmente en el control de subsistemas y procesos industriales complejos. Los controladores basados en lógica difusa ofrecen un mejor rendimiento que los controladores tradicionales, por tanto mayor estabilidad y velocidad de respuesta del proceso controlado.

En base a lo anterior, Petroecuador - Gerencia de Oleoducto, institución que tiene como función principal el transporte de petróleo desde la región Amazónica mediante el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano denominado SOTE hasta el Puerto marítimo en Esmeraldas desde donde se lo exporta, pretende migrar el control PID principal implementado actualmente en las estaciones de bombeo del Oleoducto Transecuatoriano a uno basado en lógica difusa para aprovechar estas importantes ventajas, que contribuyen principalmente a una mayor celeridad en la operación del sistema e indirectamente a un incremento en el bombeo del crudo.

Empleando las herramientas propias del Sistema DeltaV, implementado en el SOTE desde el año 2000, se realiza un estudio integro del FLC (Fuzzy Logic Controller) en cuanto a estructura, diseño, simulación para su posterior implementación en la Estación de Bombeo N°1 Lago Agrio.

En la fase de diseño, se planteó también el reemplazo de la tarjeta de control de velocidad implementada, *2301A SPEED CONTROL*, para cada una de las unidades de bombeo.

En la fase de simulación, debido a la importancia del controlador PID se realiza las respectivas simulaciones en el programa MATLAB, para lo cual se determinó la ecuación de la planta y se comparó su respuesta bajo la acción de los dos controladores. Para el reemplazo de la 2301A se diseñó un módulo de control, ya que se determinaron ciertas condiciones que el FLC no satisfacía, luego con la ayuda de un banco de pruebas se realizó la se verificó el comportamiento de dicho módulo.

En la fase final, se implementó el FLC en el lazo principal que controla la presión de descarga de la estación el 29 de Octubre de 2006, desde entonces se encuentra operativo sin presentar falla alguna en el sistema.

INDICE DE CONTENIDO

CAPITULO 1 : MARCO TEORICO

1.1. Lógica Difusa.....	1
1.1.1. Historia.....	1
1.1.2. Criterios Fundamentales.....	4
1.1.3. Aplicaciones.....	5
1.2. Conjuntos difusos.....	7
1.2.1. Conceptos básicos asociados a los conjuntos difusos.....	13
1.2.2. Operaciones.....	15
1.2.3. Operaciones Adicionales.....	17
1.2.4. Principio de Extensión.....	20
1.2.5. Relaciones difusas.....	22
1.2.6. Variables lingüística	25
1.2.7. Reglas IF – THEN difusas.....	29
1.2.9. Reglas de Inferencia.....	31
1.2.10. Difusidad versus Probabilidad.....	33
1.3. Sistemas de Control Difuso.....	35
1.3.1. Fusificación.....	37
1.3.2. Base de Reglas o Conocimientos.....	39
1.3.3. Inferencia.....	40
1.3.4. Defusificación.....	42

CAPITULO 2: DESCRIPCION DEL PROCESO DE BOMBEO EN LA ESTACION N°1 LAGO AGRIO DEL OLEODUCTO TRANSECUTORIANO

2.1. Descripción General.....	46
2.1.1. Estación de Bombeo N°1 Lago Agrio.....	50
2.1.1.1. Proceso de Bombeo.....	51
2.2. Sistema DeltaV en el SOTE.....	51
2.2.1. Hardware.....	52
2.2.1.1. Estación de trabajo.....	53
2.2.1.2. Red de Control.....	54
2.2.1.3. Fuentes de poder.....	55
2.2.1.4. Controlador DeltaV M5 PLUS.....	56
2.2.1.5. Subsistema de ENTRADA/SALIDA (E/S).....	58
2.2.1.6. Instrumentación de campo.....	60
2.2.2. Software.....	66
2.2.2.1. Herramientas de Ingeniería.....	67
2.3. Levantamiento del sistema de control actual.....	72
2.3.1. Control de la Estación.....	73
2.3.2. Unidades de bombeo.....	75
2.3.2.1. Modulo de control de velocidad.....	75
2.3.2.2. BIAS/GAIN (BG).....	78
2.3.2.3. Tarjeta 2301A.....	78
2.3.2.4. Actuador.....	79
2.3.2.5. Motores ALCO.....	79
2.3.2.6. Incrementador.....	79
2.3.2.7. Bomba centrífuga (UCP).....	79

CAPITULO 3: DISEÑO DEL CONTROL DIFUSO

3.1. DeltaV Fuzzy.....	80
3.1.1. Bloque de función FLC.....	81

3.2. Reemplazo de los controladores PID del lazo principal por controladores FLC..	86
3.3. Reemplazo de la tarjeta 2301A por un FLC.....	87
3.3.1. Requerimientos de diseño.....	87
3.3.2. Diseño del módulo de control.....	90

CAPITULO 4: SIMULACION DEL CONTROL DIFUSO

4.1. Reemplazo del PID por el FLC en el lazo de control principal.....	95
4.1.1. Obtención del modelo matemático.....	96
4.1.2. Construcción del controlador difuso en MATLAB.....	101
4.1.3. Simulación.....	103
4.2. Reemplazo de la tarjeta 2301A por un FLC.....	104

CAPITULO 5: IMPLEMENTACION DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO EN LA ESTACION DE BOMBEO N°1. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Reemplazo del bloque de función PID en el lazo principal.....	110
5.1.1. Preliminares.....	110
5.1.2. Programación del FLC y puesta en marcha.....	113
5.1.3. Pruebas.....	113
5.1.4. Resultados.....	117
5.2. Reemplazo de la tarjeta 2301A.....	120
5.2.1. Preliminares.....	120
5.2.2. Programación del módulo de velocidad a implementar el mismo que contiene al FLC.....	124
5.2.3. Pruebas.....	125
5.2.4. Resultados.....	126

CAPITULO 6: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.....	127
6.2. Recomendaciones.....	129

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....130

ANEXOS.....131

INDICE DE TABLAS

CAPITULO 1

Página

Tabla 1.1. Criterios intuitivos para GMP.....32

Tabla 1.2. Criterios intuitivos para GMT.....33

CAPITULO 3

Tabla 3.1. Reglas difusas del FLC.....83

Tabla 3.2 Factores de escalamiento para FLC en el lazo de control principal.....86

Tabla 3.3. Presión de descarga máxima versus unidades de bombeo en línea.....87

Tabla 3.4. Mapa de estados de la secuencia del motor.....88

CAPITULO 4

Tabla 4.1. Muestreo de la curva de la curva de la planta.....96

Tabla 4.2. Ejemplo de la operación del FLC.....103

Tabla 4.3. Factores de escalamiento para FLC reemplazo de la tarjeta 2301A.....106

Tabla 4.4. Tiempos de estabilización del sistema en el banco de pruebas.....109

CAPITULO 5

Tabla.5.1. Parámetros actuales del PID de descarga.....112

Tabla 5.2. Datos tomados del arranque del motor ALCO5.....122

INDICE DE FIGURAS

Página

Capítulo 1

Figura 1.1. Función de pertenencia de conjuntos clásicos.....	9
Figura 1.2. Función de membresía de conjuntos difusos.....	11
Figura 1.3. Función de membresía de tipo trapezoidal.....	12
Figura 1.4. Función de membresía de tipo triangular.....	12
Figura 1.5. Función de membresía de tipo Z.....	12
Figura 1.6. Función de membresía de tipo singleton.....	13
Figura 1.7. Función de membresía de tipo exponencial.....	13
Figura 1.8. Términos relativos a los conjuntos difusos.....	14
Figura 1.9. a) Funciones de membresía de los conjuntos A y B, b) Complemento \bar{A} , c) Unión $A \cup B$, d) Intersección $A \cap B$	17
Figura 1.10. Conjuntos difusos de la variable lingüística “temperatura de este lugar”.....	26
Figura 1.11. Funciones de membresía de los límites “muy” y “más o menos”.....	28
Figura 1.12. Sobre impulso versus tiempo de respuesta.....	35
Figura 1.13. Reglas y funciones de membresía aproximadas a una función no lineal.....	36
Figura 1.14. Diagrama de bloques de un controlador difuso.....	36
Figura 1.15. Sistema difuso multi-entrada-multi-salida.....	37
Figura 1.16. Fusificación.....	38
Figura 1.17. Variable de salida del sistema.....	41
Figura 1.18. Mecanismo de inferencia.....	41
Figura 1.19. Composición.....	42
Figura 1.20. Defusificador por centro de gravedad.....	43
Figura 1.21. Defusificador por media ponderada.....	43
Figura 1.22. Defusificador por máximo a) más grande, b) más pequeño, c) promedio.....	45

Capítulo 2

Figura 2.1. a) Perfil y b) Mapa del Oleoducto Transecuatoriano.....	47
Figura 2.2. Diagrama de control de una estación Reductora de presión.....	48
Figura 2.3. Estación de bombeo Lago Agrio.....	50
Figura 2.4. Hardware DeltaV.....	53
Figura 2.5. Estación de trabajo.....	54
Figura 2.6. Red de control DeltaV.....	55
Figura 2.7. Controlador DeltaV M5PLUS.....	58
Figura 2.8. Transmisor de presión Rosemount 3051.....	60
Figura 2.9. Transmisor de temperatura multivariable Rosemount 3244MV.....	61
Figura 2.10. a) Principio de medición ultrasónico, b) Computador de flujo Controlotron 1010N.....	61
Figura 2.11. Sistema HTG.....	62
Figura 2.12. Instrumentos HTG empleado en el SOTE.....	63
Figura 2.13. Medición de nivel por ultrasonido y radar.....	63
Figura 2.14. Actuador eléctrico EIM E796.....	64
Figura 2.15. Actuador eléctrico ProAct Analog and Digital Plus.....	64
Figura 2.16. Tarjeta 2301A SPEED CONTROL.....	65
Figura 2.17. Diagrama de bloques de la tarjeta 2301A.....	65
Figura 2.18. a) Menú principal de la Touch Screen, b) Submenú de válvulas.....	66
Figura 2.19. Despliegue de herramientas del software DeltaV.....	67
Figura 2.20. Explorador DeltaV.....	68
Figura 2.21. Control Studio.....	70
Figura 2.22. Diagramas de función secuenciales.....	71
Figura 2.23. FlexLock.....	72
Figura 2.24. Diagrama de bloque del sistema de control.....	73
Figura 2.25. Control de Estación.....	74
Figura 2.26. Control Selectivo.....	74
Figura 2.27. Lazo de control secundario.....	75
Figura 2.28 Secuencia del motor ALCO en la unidad de bombeo.....	76
Figura 2.29 Unidad de bombeo.....	77

CAPITULO 3

Figura 3.1. Bloque de función de control con lógica difusa (FLC).....	81
Figura 3.2. Funciones de membresía del a) error y b) cambio del error.....	82
Figura 3.3. Funciones de membresía del cambio en la salida.....	82
Figura 3.4. Variación de la salida en función de las entradas.....	83
Figura 3.5. Relación no lineal del FLC.....	85
Figura 3.6. Diagrama interno del bloque de función FLC.....	86
Figura 3.7. Diagrama de estados de la secuencia del motor.....	88
Figura 3.8. Diagrama de bloques del módulo a implementar.....	90
Figura 3.9. Arranque del motor.....	92
Figura 3.10. Propiedades del FLC.....	93
Figura 3.11. Módulo de control de velocidad a implementar.....	94

CAPITULO 4

Figura 4.1. Curva de la planta, tomada en el Sistema DeltaV.....	95
Figura 4.2. System Identification Toolbox.....	97
Figura 4.3. a) Aproximaciones de modelamiento, b) Modelamiento escogido.....	98
Figura 4.4. Regla lazo cerrado.....	98
Figura 4.5. Función de la planta en lazo abierto.....	100
Figura 4.6. Fuzzy Logic Toolbox.....	101
Figura 4.7. Funciones de membresía de a) error, b) variación de error y c) salida.....	102
Figura 4.8. Modo de operación del controlador.....	102
Figura 4.9. Simulación de la planta.....	103
Figura 4.10. Control difuso versus PI.....	104
Figura 4.11. Lazo de simulación implementado.....	105
Figura 4.12. Módulo de pruebas con PID.....	105
Figura 4.13. Módulo de simulación para reemplazo de la tarjeta 2301A.....	107
Figura 4.14. Prueba del FLC.....	108

Figura 4.15. Comportamiento del sistema ante a) cambios incrementales de setpoint de 5RPM y b) cambios de 250RPM.....	109
---	-----

CAPITULO 5

Figura.5.1. PID de descarga en el Sistema DeltaV.....	112
Figura.5.2. FLC implementado.....	113
Figura 5.3. Proceso de reinicio de bombeo.....	116
Figura 5.4. Auto-sintonización del FLC con la ayuda del <i>DeltaV Tune</i>	117
Figura 5.5. Respuesta del controlador a) PID y b) FLC.....	119
Figura 5.6. a) Arranque del motor en función del tiempo y b) Porcentaje de corriente versus RPM con la tarjeta 2301A.....	123
Figura 5.7. Módulo que reemplaza a la tarjeta 2301A en el sistema DeltaV.....	125
Figura 5.8. Pruebas de sintonización del controlador PID para reemplazo de la 2301A...	126

GLOSARIO

Custody Transfer. En el caso de las grandes terminales y plantas de almacenamiento, que reciben y despachan enormes volúmenes todos los días, pequeños errores en la medición de todos los días, pueden provocar grandes pérdidas, o ganancias, financieras. Y el éxito o la bancarrota de Terminales intermediarias.

En la mayoría de los países la contabilización de entradas y despachos de producto tiene que cumplir con rígidos reglamentos aduaneros e impositivos. Para que la facturación en base a la medición de un instrumento sea aceptable a ambas partes, tanto la compradora como la vendedora, necesita tener certificación para “Custody Transfer”.

La certificación, para este caso en particular, es emitida por la Organización Internacional de Metrología Legal (OIML)

DST. (Device signal tag). Direccionamiento de las señales de entrada y salida del subsistema E/S en el software DeltaV, con ello se especifica la ubicación y el tipo de canal asociado con las mediciones de campo para elaborar las diferentes estrategias de control.

Graduación API (American Petroleum Institute). Es la medida de la densidad de los productos líquidos del petróleo, derivada de la densidad relativa (densidad del agua = 1 g/cm³) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Densidad [}^\circ\text{API]} = (141.5 / \text{densidad relativa}) - 131.5.$$

La mayoría de los crudos tienen densidades menores de 1 g/cm³. Mientras más liviano es un crudo, mejor es su calidad y mayor es su precio.

TIPO DE CRUDO	DENSIDAD [°API]
Condensado	A partir de 42
Liviano	más de 30
Mediano	de 22,0 hasta 29,9
Pesado	de 10,0 hasta 21,9
Extrapesado	hasta 9,9
Bitumen	promedio 8,2

IEEE 802.3 es un conjunto de estándares del IEEE (Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos) que definen normas o reglas para la capa física y la capa de enlace de datos (según el modelo OSI) con tecnología Ethernet.

LAS (Link Active scheduler). Organizador activo de enlace, maneja la transmisión de los mensajes sobre el segmento de red fieldbus.

Lógica Formal o Clásica. Disciplina y rama de la filosofía que estudia los principios formales del conocimiento humano. Su principal análisis se centra en la validez de los razonamientos y argumentos, por lo que se esfuerza por determinar las condiciones que justifican que el individuo, a partir de proposiciones dadas, llamadas premisas, alcance una conclusión derivada de aquéllas. La validez lógica depende de la adecuada relación entre las premisas y la conclusión, de tal forma que si las premisas son verdaderas la conclusión también lo será. Por ello, la lógica se encarga de analizar la estructura y el valor de verdad de las proposiciones, y su clasificación.

La validez de una proposición se tomará de la veracidad de la conclusión. Si una de las premisas, o más, es falsa, la conclusión de una proposición válida será falsa. Por lo tanto, la validez lógica depende de la forma que adopta la argumentación, no su contenido. Haciendo referencia a todo lo expuesto la lógica clásica adopta como únicos valores: VERDADERO y FALSO.

Paridad. Método matemático para reconstruir los datos que fueron perdidos de una solo disco, aumentando la avería-tolerancia. Los datos y la paridad se dividen a través de todo el disco duro. La paridad se dividida en una secuencia rotatoria para reducir los embotellamientos asociados a los cálculos de la paridad.

PlantWeb. Arquitectura de planta digital probada que utiliza el poder de inteligencia predictiva para mejorar el diseño de la planta. Emplea estándares de comunicación abierta para inteligencia de campo enlazada, sistemas y aplicaciones en una red de planta que libera información cuando y donde esta es necesitada.

Proceso BATCH. Proceso basado en lotes. Cuando se tiene almacenado petróleo de diferente grado API, para transportarlos se los envía por lotes a través del oleoducto. Por ejemplo se envía un lote de 50000 barriles de crudo de 30°API y luego un lote de 150000 de crudo de 24°API.

Ralentí. Número de revoluciones por minuto mínimo a que se ajusta un motor para mantener su funcionamiento de forma estable aunque no se esté accionando el acelerador.

Sistema experto, en su sentido amplio, indicaría la capacidad de un artefacto de realizar los mismos tipos de funciones que caracterizan al pensamiento humano. Es decir, establecen inferencias tras la presentación de alguna situación a fin de encontrar la solución más adecuada.

Se los define como un tipo de programa de aplicación informática que adopta decisiones o resuelve problemas de un campo determinado, empleando los conocimientos y las reglas analíticas definidas por los expertos en dicho campo.

Los expertos solucionan los problemas utilizando una combinación de conocimientos basados en hechos y en su capacidad de razonamiento. En los sistemas

expertos, estos dos elementos básicos están contenidos en dos componentes separados, aunque relacionados:

- Una base de conocimientos que proporciona hechos objetivos y reglas sobre el tema.
- Una máquina de deducción, o de inferencia, que proporciona la capacidad de razonamiento que permite al sistema experto extraer conclusiones.

Los mecanismos de explicación, la parte más fascinante de los sistemas expertos, permiten a los sistemas explicar o justificar sus conclusiones, y también posibilitan a los programadores verificar el funcionamiento de los propios sistemas. Sus campos de aplicación son la química, la geología, la medicina, la banca e inversiones y los seguros.

CAPITULO 1

MARCO TEORICO

1.1. Lógica Difusa

1.1.1. Historia.

La evolución de la lógica está íntimamente ligada al progreso intelectual del ser humano, ya que como ciencia del razonamiento, su historia representa la historia misma del hombre; surge desde el primer momento en que este deduce y razona.

La lógica difusa como tal, no es una ciencia relativamente nueva, la idea de lo difuso o vago ya había sido discutida. En la antigüedad Aristóteles, creador de la lógica clásica, admitía ya la existencia de diferentes grados de veracidad y falsedad; su obra 'Organón', contiene el primer tratamiento sistemático de las leyes de pensamiento en relación con la adquisición de conocimiento.

En el siglo XVIII David Hume intentó probar que el razonamiento esta basado en asociaciones habituales con diferentes sensaciones o experiencias. De esta manera se empezaba a poner en tela de juicio la rigidez de la lógica clásica, pero esto aún no fue bien aceptado.

La escuela americana de la filosofía llamada pragmatismo¹ fundada a principios del siglo XIX por Charles Sanders Peirce, fue la primera en considerar "vaguedades", más que falso o verdadero. Según esta filosofía, ningún objeto o concepto posee validez innata o

¹ Doctrina filosófica según la cual la prueba de la verdad de una proposición esta en función de su utilidad práctica.

tiene importancia, su trascendencia se encuentra tan sólo en los efectos prácticos resultantes de su uso o aplicación.

La idea de que la lógica formal produce contradicciones fue popularizada por el británico Bertrand Russell, a principios del siglo XX. Estudió las vaguedades del lenguaje, se alejó de la lógica clásica con sus suposiciones de la existencia de cosas omitidas en las afirmaciones universales, concluyendo con precisión que la vaguedad es un grado.

El austriaco Ludwig Wittgenstein, estudió y publicó en sus Investigaciones Filosóficas las formas en las que una palabra puede ser empleada para muchas cosas que tienen algo en común, esto le llevó a la conclusión de que la gente interpreta diferentes juegos de lenguaje.

Alrededor de 1920, el matemático polaco Jan Lukasiewicz propuso un modelo formal de vaguedades, una lógica basada en más valores que VERDADERO o FALSO. 1 representaba VERDADERO, 0 representaba FALSO, $\frac{1}{2}$ representaba POSIBLE.

Peter Strawson representante de la filosofía analítica, en su primera obra 'Introducción a la teoría lógica' analizó la relación existente entre la lógica formal y las características del lenguaje común; concluyendo entonces que la complejidad del último está representada de una forma inapropiada por la lógica formal y que, además de esta, son necesarias otras herramientas analíticas para proceder a su adecuado y correcto estudio.

En 1965, el Dr. Lofti Zadeh, profesor de la Universidad de California en Berkeley, propuso un método de razonamiento abstracto similar al patrón de pensamiento humano para representar los problemas del mundo real. Publicó un reporte llamado Conjuntos difusos, donde presentó la teoría de estados multivaluados que expande la idea de los estados clásicos de lógica Booleana a los que nombró estados difusos. Considera un número infinito de grados de valor entre verdadero y falso, algunas cosas podían ser parcialmente verdaderas y parcialmente falsas a la vez. Con ello se introdujo de manera formal el término difuso en la literatura técnica.

Esto fue recibido con escepticismo en la comunidad científica internacional. El desafío más grande llegó desde matemáticos en estadística y probabilidades quienes aseguraron que la Probabilidad es suficiente para caracterizar la vaguedad, y que cualquier problema que la teoría difusa pueda resolver puede ser determinado igualmente bien o mejor por la teoría de Probabilidades.

Debido a la falta de aplicaciones prácticas de la teoría difusa en sus inicios, se hizo difícil defender este campo desde un punto de vista puramente filosófico. No obstante, muchos investigadores se dedicaron de manera particular a este campo y a finales de 1960s nuevos métodos como algoritmos difusos, toma de decisiones difusas, etc., fueron propuestos.

En 1975, el británico Ebrahim Mamdani, estableció la estructura básica de un controlador difuso y la aplicó en una máquina de vapor. Este sistema combinaba la experiencia de un operador humano con un conjunto de reglas lógicas para controlar automáticamente la cantidad de vapor y la temperatura de la caldera de acuerdo a la velocidad y presión de la máquina. Luego en 1978 se desarrollo el primer sistema de control difuso comercial destinado a una planta de cemento.

Pero a principios de los 80s este campo tuvo un progreso muy lento. Uno de los motivos que explica esta situación es que el término difuso, da la interpretación de algo complejo, razón por la cual alejaba a los científicos a utilizarla y, además, el hecho de que no necesitaba de modelos matemáticos como lo hacia el control clásico.

En contraste con este punto de vista, ingenieros japoneses descubrieron que el control difuso era muy fácil de diseñar y trabajaba muy bien en muchos problemas. En este país evolucionó más rápidamente la fase experimental y es así que en la actualidad es el líder mundial en la producción de aplicaciones basadas en la lógica difusa.

En los Estados Unidos y en Europa se empezó a dar importancia a esta teoría sólo cuando llegó información desde Japón de numerosas aplicaciones.

1.1.2. Criterios Fundamentales.

La lógica difusa es esencialmente una generalización de la lógica bivaluada (lógica Booleana). Esta última impone a sus enunciados únicamente valores *falso* o *verdadero*, la transferencia de un estado a otro es instantánea (un elemento pertenece a un estado o no). Y si bien ha modelado satisfactoriamente una gran parte del razonamiento "natural"; es cierto también que el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son "tan deterministas".

En cambio en la lógica difusa la transición puede ser gradual. En un sistema difuso, un pequeño cambio en la variable de entrada, da como resultado un cambio más natural en el funcionamiento del sistema.

Formalmente: "La lógica difusa sostiene la idea fundamental que no es posible precisar, en un instante dado, el valor exacto de una variable X sino el grado de pertenencia a cada uno de los conjuntos en los que se ha particionado o dividido el rango de variación de la misma. La variable puede tener diversos niveles de verdad o falsedad representados por valores entre el 1 (verdadero) y el 0 (falso)."

Pretende producir resultados exactos, a partir de ambigüedades o información imprecisa, operando con palabras o términos del lenguaje natural mediante reglas SI-ENTONCES, por lo cual es particularmente útil en aplicaciones electrónicas o computacionales de control.

El adjetivo "difuso" aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no-deterministas utilizados tienen, por lo general, una insinuación de incertidumbre o difusidad. Por ejemplo: Un vaso medio lleno no está lleno completamente ni está vacío completamente.

Ahora bien, los valores de verdad asumidos por enunciados aunque no son deterministas, no necesariamente son desconocidos. Es de suma importancia entender que la lógica difusa es una *lógica de lo borroso*, y no una lógica que por sí misma, es borrosa.

Contraria a la lógica clásica que requiere un profundo entendimiento de un sistema, ecuaciones exactas, y valores numéricos precisos, la Lógica Difusa incorpora una vía alternativa de pensamiento, que permite modelar sistemas complejos usando un alto nivel de abstracción originado desde el propio conocimiento y experiencia. Permite expresar este conocimiento con conceptos subjetivos como “velocidad media”, “un tiempo largo” que son registrados en rangos numéricos exactos.

Con la lógica difusa se pueden diseñar aplicaciones para que las máquinas respondan con mayor inteligencia a la imprecisión y a las condiciones del mundo exterior, con lo que se busca imitar el comportamiento humano. La creación de este tipo de máquinas es forjar un sistema experto en donde el comportamiento va a estar basado totalmente en los criterios del experto o de la persona que aporta sus conocimientos de cómo controlarla, sin conocer ningún modelo del sistema a intervenir.

Representan la transición del procesamiento de datos al procesamiento de conocimientos y sustituyen al mismo tiempo los algoritmos por mecanismos de inferencia. Por estas propiedades es que ciertos sistemas de lógica difusa aparentan una labor de aprendizaje, y son excelentes mecanismos de control de procesos.

1.1.3. Aplicaciones²

En la década de los 80s la lógica difusa salió de los laboratorios científicos y llegó a ser una herramienta industrial. Se destacan tres aplicaciones desarrolladas en Japón que marcaron el inicio y evolución de esta lógica:

Control Difuso en un helicóptero inteligente no tripulado. Uno de los mayores desafíos tecnológicos de la lógica difusa cuyo control es en tiempo real. El helicóptero Yamaha R-50 de 3,6 m. de envergadura ha sido capaz de mejorar al control convencional. Las razones por las que se implementó el control difuso fueron:

• ² REZNIK Leonid, **Fuzzy Controllers**, Primera Edición, Biddles Ltd, Inglaterra 1997, 13 – 18.

- Comportamiento no lineal. En control convencional, el modelo es diseñado por una aproximación lineal sobre un punto de equilibrio, produciendo dificultades operacionales en los estados que se desvían de este.
- Sistema inestable. Por tanto hay un tiempo de retraso entre las operaciones de entrada y salida. Esto imposibilita alcanzar la estabilidad por el control de retroalimentación convencional.
- Efectos del medio ambiente. No hay técnicas asociadas con el control convencional para tratar con estas variaciones. Control difuso lo hace añadiendo reglas ‘SI - ENTONCES’ para acomodarse a este entorno.

Sistema de control difuso del tren subterráneo (Sendai, Japón). Este es un sistema de ingeniería completo. El controlador convencional del tren estaba basado en un control PID, que requiere un modelo del sistema linealizado, un estado deseado, y un criterio de error, esto depende fuertemente de la representación analítica del sistema.

El control difuso se ajusta a la operación humana, evalúa el estado actual y dispone el efecto de un comando de control sobre el estado resultante, demostrando que es posible usar el conocimiento de un experto para diseñar las leyes de control, es decir trasladar el lenguaje natural a estrategias de control.

Control y Evaluación Financiera. Esta es una primicia aplicada al sistema financiero, el Fondo Difuso Yamaichi. Manejó 65 industrias y constaba de aproximadamente 800 reglas fuzzy que fueron determinadas mensualmente por un grupo de expertos. El sistema fue probado por dos años, y su desempeño en términos de retorno y crecimiento excedió a su antecesor sobre el 20%.

La lógica difusa (Fuzzy Logic) ha surgido como una herramienta importante principalmente en el control de subsistemas y procesos industriales complejos.

Dentro del sector automotor existe un gran número de patentes sobre sistemas de frenado y cambio de marcha automáticos. También se ha comenzado a implementar en los controles de inyección electrónica del carburante y en los sistemas de guiado automático de coches.

En el sector de los electrodomésticos se han diseñado buen número de aplicaciones fuzzy como lavadoras que a pesar de su complejidad tecnológica resultan más fáciles de operar que las lavadoras tradicionales, sistemas de aire acondicionado capaces de conmutar un ventilador según los conocimientos de cantidad de polvo, olores, temperatura y humedad ambiente; procesadores de arroz, limpiadores al vacío, hornos microondas, etc.

Es empleada también para: Reconocimiento de patrones ambiguos, procesamiento de señales e imágenes, software de diagnóstico y seguridad, diseño computarizado, bases de datos, reconocimiento de palabras, etc., incursionando en otros campos de la ciencia y tecnología como son: Domótica, Robótica, Telecomunicaciones, Agricultura, Biomédica, Química, entre otros.

1.2. Conjuntos difusos.

El término “Lógica difusa” ha sido utilizado en la literatura en dos sentidos diferentes. Por una parte, como una generalización de varias lógicas multivalores que han sido estudiadas en la lógica simbólica desde principios del siglo pasado. Pero también es vista como un sistema de conceptos, principios y métodos de comportamiento con modos de razonamiento que son aproximados bastante exactos, siendo esta una aplicación de la teoría de conjuntos difusos.

Los conjuntos difusos son un desarrollo adicional del concepto matemático de un conjunto, por ello es conveniente recordar primero el significación formal de este.

Conjunto. Es una reunión de objetos que pueden ser tratados como un todo. Sea un conjunto A en un universo U, puede ser definido de las siguientes formas:

- Como una lista de todos sus miembros, que puede ser usado solo cuando el conjunto es finito.
- Por una propiedad que satisfaga a todos sus miembros, que es más general.

$$A = \{x/x \text{ tenga alguna condición} \} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

- Empleando la función de membresía **cero-uno**, se asigna 1 a los elementos que pertenecen al conjunto A y 0 a los elementos no están en dicho conjunto. Llamada también función característica o función discriminación para A denotada $\mu_{A(x)}$, tal que:

$$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in A \\ 0 & \text{si } x \notin A \end{cases} \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Para ejemplificar esto se considera un conjunto A para control de nivel:

$$A = \{x \in \mathfrak{R} / x \leq 5m \in \text{nivel bajo}\}$$

Con su función característica que gráficamente se la representa en la figura 1.1:

$$\mu_{A(x)} = \begin{cases} 1 & \text{si } x \leq 5 \\ 0 & \text{si } x > 5 \end{cases}$$

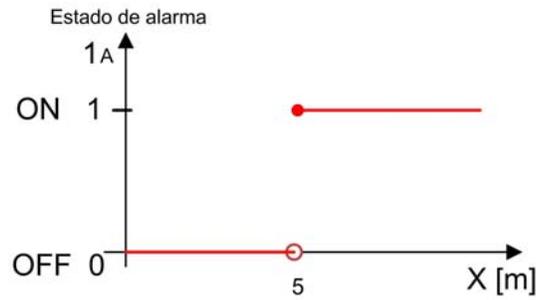


Figura 1.1. Función de pertenencia de conjuntos clásicos

2 tiene grado de pertenencia **0** por tanto no pertenece al conjunto A y 6 que tiene grado de membresía **1** si pertenece al conjunto A.

Este concepto ha sido suficiente para muchas áreas de aplicación. Pero también se encuentran fácilmente situaciones que carecen de flexibilidad. Para ello se hace mención al siguiente ejemplo:

$$B = \{ \text{crudo mediano} \}$$

Si se establece como crudo mediano uno cuya densidad es 26°API se plantea la interrogante: ¿crudos de 25.9°API o 26.1°API ya no son considerados como medianos, si la diferencia es de 0.1°API respecto al valor central?

Este es un problema estructural ya que si se escoge otros valores se trazaría la misma pregunta. La teoría clásica requiere que los conjuntos tengan las propiedades bien definidas. Para superar esta limitación que se torna fundamental se necesita una nueva teoría, esta es la **teoría de conjuntos difusos**.

Definición. El conjunto difuso F de un conjunto U (universo en discurso) está caracterizado por una función de membresía $F(x)$ que toma cualquier valor en el intervalo $[0,1]$

Zadeh propuso que los diferentes valores que puede adoptar una variable del mundo real (**universo de discurso**), se subdividen en grupos (**conjuntos difusos**) y a cada elemento dentro de un grupo se le asigne una cuota de pertenencia, a la misma se la denominada **grado de pertenencia o membresía**.

El grado de membresía, dado el conjunto difuso F , de cualquier elemento x puede ser interpretado como el grado de verdad de la proposición “ x es un miembro de F ”. El valor de esta función determina si el elemento pertenece al conjunto difuso y en que grado.

Un conjunto difuso F puede ser representado como un par ordenado, cuyo primer elemento es un elemento x de U , y el segundo elemento el grado de membresía de x en F que se denota con μ

$$F = \{(x, \mu_{F(x)}) / x \in U\} \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Se lo denota de una manera más formal como:

$$F = \int_U \mu_{F(x)} / x \quad \text{Si el conjunto } U \text{ es continuo} \quad (\text{Ec. 1.4})$$

$$F = \sum_U \mu_{F(x)} / x \quad \text{Si el conjunto } U \text{ es discreto} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Donde los símbolos \int y \sum no expresan la operación matemática correspondiente, sino una colección de todos los puntos respectivamente.

Continuando con el ejemplo expuesto, al conjunto B lo define la función de membresía de la figura 1.2 y analíticamente (Ec.1.4):

$$crudo_mediano = \begin{cases} \int_{densidad} \frac{1}{4}(x-22)/x \in [22,26] \\ \int_{densidad} -\frac{1}{4}(x-30)/x \in [26,30] \end{cases}$$

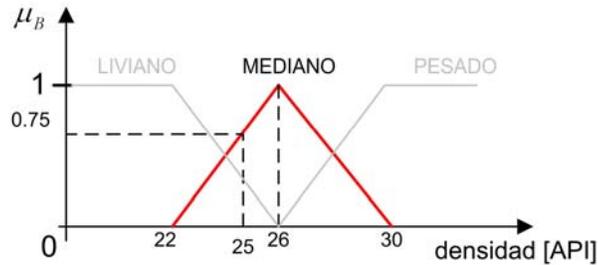


Figura 1.2. Función de membresía de conjuntos difusos

Según la figura un crudo de 25°API se lo considera crudo mediano en un grado del 75 por ciento.

En el primer ejemplo se codificó todos los elementos del Universo con 0 o 1. La interpretación de los números ahora asignados (intervalo entre 0 y 1) es algo más difícil. Por supuesto, 1 significa que el elemento está en el conjunto B y 0 significa que no está definitivamente en el conjunto B. El resto de valores significan una pertenencia gradual.

Es así como se introduce el concepto de conjunto difuso, que está asociado con un determinado valor lingüístico definido por una etiqueta, palabra o adjetivo (liviano, mediano, pesado)

Surgen preguntas importantes: ¿cómo determinar las funciones de membresía? Si hay una variedad de funciones de membresía ¿cómo elegir una de esas alternativas? Conceptualmente, hay dos aproximaciones para determinar una función de membresía.

- Usando el conocimiento humano, esto es, preguntando al experto para especificar las funciones de membresía. Usualmente una sintonización fina es requerida.

- Usando datos recogidos de varios sensores.

Hay que enfatizar que **un conjunto difuso tiene correspondencia uno a uno con su función de membresía**. Esto es, cuando se habla de un conjunto difuso, existe una única función de membresía que lo representa. Conjuntos difusos y sus funciones de membresía son equivalentes en este sentido.

Para la definición de estas funciones se utilizan normalmente ciertas formas estándar que se presentan a continuación:

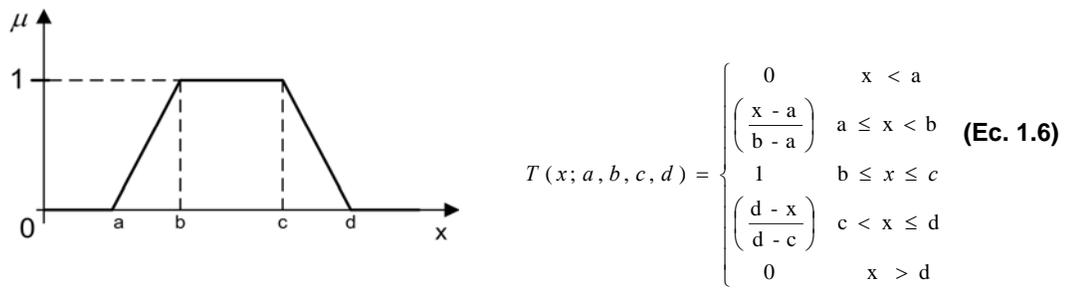


Figura 1.3. Función de membresía de tipo trapezoidal

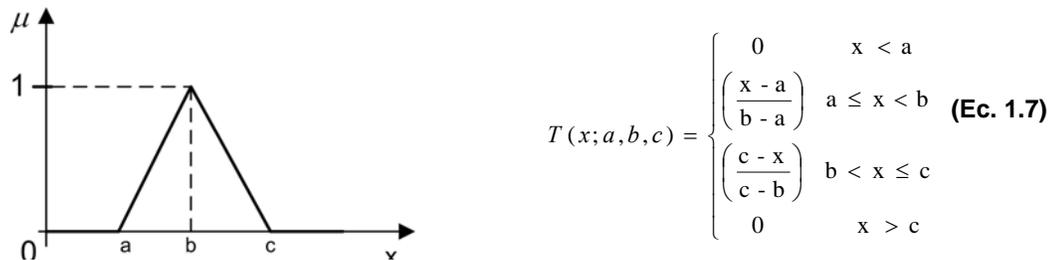


Figura 1.4. Función de membresía de tipo triangular

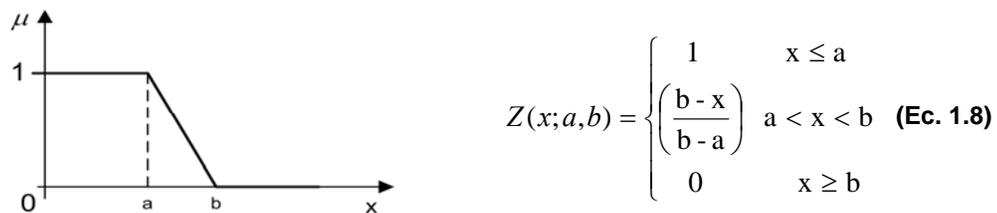
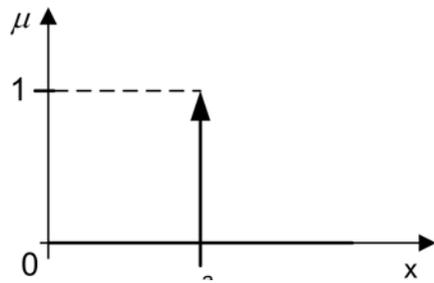
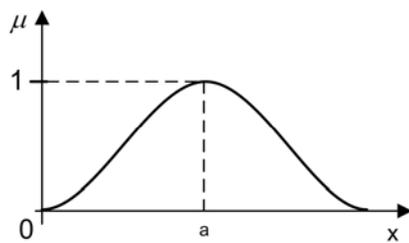


Figura 1.5. Función de membresía de tipo Z



$$S(x;a) = \begin{cases} 1 & x = a \\ 0 & x \neq a \end{cases} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

Figura 1.6. Función de membresía de tipo singleton



$$E(x;b) = e^{-(x-a)^2} \quad (\text{Ec. 1.10})$$

Figura 1.7. Función de membresía de tipo exponencial

Las funciones de membresía de las figuras 1.3-6 se emplean en mayor orden. Una razón posible para esto es la simplicidad de estas funciones para la predicción y cálculos de una salida del sistema difuso. La función singleton simplifica los cálculos y requiere menos memoria para almacenar la base de reglas.

En general, la elección de una función de membresía no tiene procedimiento específico a seguir. Diferentes investigadores eligen numerosas formas para sus problemas de aplicación.

1.2.1. Conceptos básicos asociados a los conjuntos difusos.

Dado un cierto *conjunto difuso* F , se definen los siguientes términos.

El **soporte** de un conjunto difuso es el conjunto clásico que contiene todos los elementos cuyo grado de membresía es diferente de cero.

$$\text{sup } p(F) = \{x \in U / \mu_{F(x)} > 0\} \quad (\text{Ec. 1.11})$$

Un **singleton difuso** es un conjunto difuso cuyo soporte es un solo punto en U (véase Figura 1.8.).

Los **puntos de cruce** son valores que tienen grado de membresía en F igual a 0,5. La **altura** de un conjunto difuso es el grado de membresía superior. Si la altura es igual a 1, el conjunto está **normalizado**.

Se denomina **conjunto α -corte** o **conjunto α -nivel** (F_α), al conjunto de todos los puntos x de U que tienen valor de membresía mayor o igual a α

$$F_\alpha = \{x \in U / \mu_{F(x)} \geq \alpha\} \quad (\text{Ec. 1.12})$$

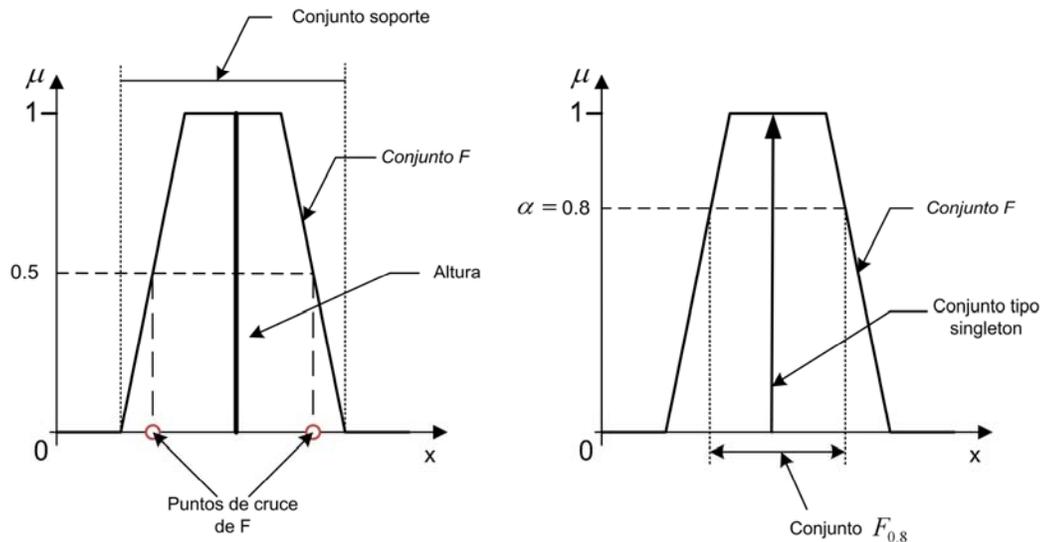


Figura 1.8. Términos relativos a los conjuntos difusos

Dada, por ejemplo, la variable *crudo* (véase figura 1.2), definida en un rango entre x_1 y x_2 , es posible establecer en ella diferentes particiones. Se denomina **partición** a un conjunto de los conjuntos difusos que se han definido para dicha variable. Así para esta variable se constituyó una partición con tres conjuntos, cada uno identificados por una etiqueta (liviano, mediano, pesado) y una función de membresía $\{ \mu_{liviano}(x), \mu_{mediano}(x), \mu_{pesado}(x) \}$.

Se dice que es una **partición completa** si los conjuntos definidos cubren todo el rango del conjunto U. Los conjuntos difusos están **solapados** si su intersección es no nula.

1.2.2. Operaciones.

A los conjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos dando como resultado otro conjunto difuso. Debido a que una función de membresía caracteriza a un conjunto difuso, es natural entonces definir estas operaciones por medio de dichas funciones. Se definen tres operaciones principales: Complemento, Unión e Intersección.

El **Complemento** de A , corresponde a una operación lógica NOT, es un conjunto difuso \bar{A} cuya función de membresía es definida como

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{Ec. 1.13})$$

La **Unión** de A y B es un conjunto difuso en U, denotado por $A \cup B$, cuya función de membresía esta definida por

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 1.14})$$

La **Intersección** de A y B es un conjunto difuso $A \cap B$ en U, cuya función de membresía es

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 1.15})$$

Por ejemplo, dados $A = \{(0,0.5), (1,0.3), (2,0.5), (4,1)\}$ y $B = \{(0,0.7), (1,0.5), (2,0.9), (4,0.2)\}$. Se aplica a estos las operaciones expuestas mediante las ecuaciones 1.13, 1.14 y 1.15, empleando la notación de Ec. 1.3.

$$\mu_C(x) = 1 - \mu_B(x)$$

$$C = \bar{B} = \{(1-0.7)/0, (1-0.5)/1, (1-0.9)/2, (1-0.2)/4\}$$

$$C = \{0.3/0, 0.5/1, 0.1/2, 0.8/4\}$$

$$C = \{(0, 0.3), (1, 0.5), (2, 0.1), (4, 0.8)\}$$

$$\mu_D(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$D = A \cup B = \{\max(0.5,0.7)/0, \max(0.3,0.5)/1, \max(0.5,0.9)/2, \max(1,0.2)/4\}$$

$$D = \{0.7/0, 0.5/1, 0.9/2, 1/4\}$$

$$D = \{(0,0.7), (1,0.5), (2,0.9), (4,1)\}$$

$$\mu_E(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

$$E = A \cap B = \{\min(0.5,0.7)/0, \min(0.3,0.5)/1, \min(0.5,0.9)/2, \min(1,0.2)/4\}$$

$$E = \{0.5/0, 0.3/1, 0.5/2, 0.2/4\}$$

$$E = \{(0,0.5), (1,0.3), (2,0.5), (4,0.2)\}$$

En otro ejemplo, estas operaciones se representan gráficamente en la figura 1.9.

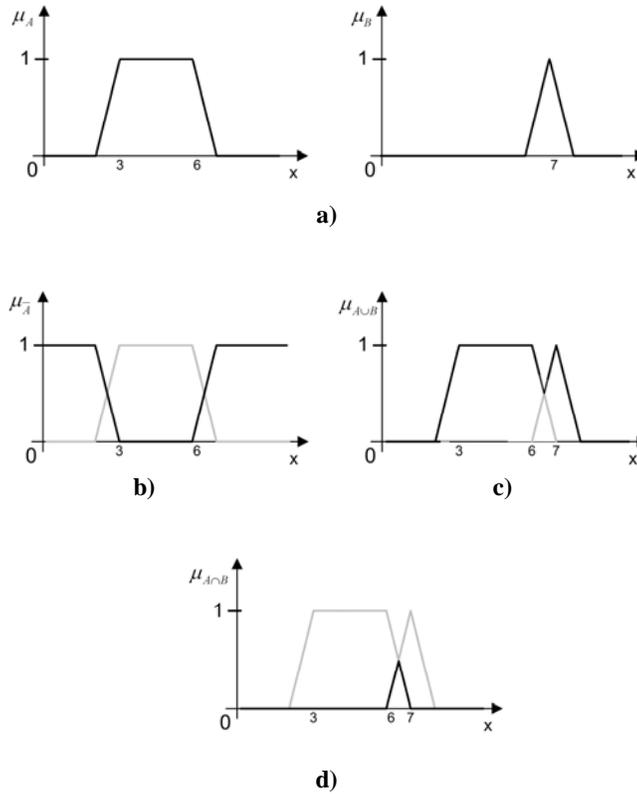


Figura 1.9. a) Funciones de membresía de los conjuntos A y B, b) Complemento \bar{A} , c) Unión $A \cup B$, d) Intersección $A \cap B$

1.2.3. Operaciones Adicionales

En la sección anterior se introdujo las siguientes operaciones básicas de conjuntos difusos:

- Complemento $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$ (Ec. 1.13)

- Unión $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (Ec. 1.14)

- Intersección $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$ (Ec. 1.15)

Pero existen otras posibilidades propuestas sobre bases axiomáticas. Las razones para establecer estas nuevas operaciones es que las ya establecidas no satisfacen algunas situaciones, por ejemplo: si se toma la intersección entre dos conjuntos se pretendería tener un conjunto difuso grande, que tenga impacto en el resultado, pero el operador que se tiene

actualmente (Ec. 1.15) no tiene impacto. Desde el punto de vista teórico es importante buscar otras alternativas para operar con este tipo de conjuntos.

A continuación se establecen algunos axiomas que el complemento, unión e intersección satisfacen para ser calificadas como estas operaciones. Además se presenta en el Anexo A una lista particular de fórmulas que cumplen con estos postulados.

1.2.3.1. Complemento Difuso

Cualquier función $c: [0,1] \rightarrow [0,1]$ que satisfaga obligatoriamente los axiomas c1 y c2 es llamada complemento difuso.

$$c[\mu_A(x)] = \mu_{\bar{A}}(x) \quad (\text{Ec. 1.16})$$

- Axioma c1. $c(0) = 1$ y $c(1) = 0$ (condición límite)
- Axioma c2. Para todo $a, b \in [0,1]$, si $a < b$, entonces $c(a) \geq c(b)$, donde a y b indican funciones de membresía de algún conjunto difuso, $a = \mu_A(x)$ y $b = \mu_B(x)$.

Este axioma solicita que un incremento en el valor de membresía de como resultado un decremento en el valor de membresía de su complemento.

La Ec. 1.13 satisface dichos axiomas por tanto es considerado como complemento difuso

$$c[\mu_A(x)] = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{Ec. 1.17})$$

1.2.3.2. Unión Difusa – La S-Norma

Cualquier función $s: [0,1] * [0,1] \rightarrow [0,1]$ que satisfaga obligatoriamente los axiomas s1 – s4 es llamada s-norma o t-conorma.

$$s[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cup B}(x) = \mu_A(x) + \mu_B(x) \quad (\text{Ec. 1.18})$$

- Axioma s1. $s(1,1) = 1$, $s(0,a) = s(a,0) = a$ (Condición límite)
- Axioma s2. $s(a,b) = s(b,a)$ (Condición Conmutativa)
- Axioma s3. Si $a \leq a'$ y $b \leq b'$, entonces $s(a,b) \leq s(a',b')$

Este muestra un requerimiento natural para la unión: Un incremento en el valor de membresía en dos conjuntos difusos debe resultar en el incremento del valor de membresía en la unión de los dos conjuntos difusos.

- Axioma s4. $s(s(a,b),c) = s(a, s(b,c))$ (Condición Asociativa)

La Ec. 1.14 satisface los axiomas establecidos, por tanto es considerado como s-norma

$$s[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 1.19})$$

1.2.3.3. Intersección Difusa – La T-Norma

Cualquier función $t: [0,1] * [0,1] \rightarrow [0,1]$ que satisfaga obligatoriamente los axiomas t1 – t4 es llamada t-norma.

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \mu_{A \cap B}(x) = \mu_A(x) * \mu_B(x) \quad (\text{Ec. 1.20})$$

- Axioma t1. $t(0,0) = 0$, $t(1,a) = t(a,1) = a$ (Condición límite)
- Axioma t2. $t(a,b) = t(b,a)$ (Conmutatividad)
- Axioma t3. Si $a \leq a'$ y $b \leq b'$, entonces $t(a, b) \leq t(a', b')$

Al igual que en el axioma s3, este muestra un requerimiento natural para la intersección: Un incremento en el valor de membresía en dos conjuntos difusos debe resultar en el incremento del valor de membresía en la intersección de los dos conjuntos difusos.

- Axioma t4. $t(t(a,b),c) = t(a, t(b,c))$ (Asociatividad)

La Ec. 1.15 satisface los axiomas establecidos, por tanto es considerado como t-norma

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad (\text{Ec. 1.21})$$

Otro operador comúnmente utilizado para la t-norma es el producto algebraico.

$$t[\mu_A(x), \mu_B(x)] = a * b \quad (\text{Ec. 1.22})$$

La aplicación de cada uno de los operadores expuestos en esta sección y en el Anexo A, no tiene un entorno de acción específico. Su utilidad depende del problema que se esté tratando.

1.2.4. Principio de Extensión

En cualquier sistema, incluidos los de control, diferentes variables están interconectadas con otras mediante fórmulas algebraicas. Esta relación puede reflejar una ley física o la estructura de un sistema. Por ejemplo: se sabe que el voltaje a través de un

resistor está vinculado a la corriente eléctrica con la fórmula $I = V/R$ y a la potencia con la ecuación $P = V^2/R$. Entonces surgen las interrogantes: ¿Cómo expresar estas operaciones no-lógicas a través de un conjunto difuso?, ¿Cómo obtener un modelo difuso para una variable si se conoce el modelo difuso para otra y la relación funcional entre ambas?

La respuesta es el *principio de extensión* que permite al dominio de una función ser extendido desde los puntos clásicos o no-difusos en U al conjunto difuso en V . Más específicamente, permite $f : U \rightarrow V$, mediante el siguiente axioma.

Principio de Extensión 1. Suponer que un conjunto difuso A en el universo U está dado, y se quiere determinar $B = f(A)$ en V que es inducido por f . Se define la función de membresía como:

$$\mu_B(y) = \sup_{x \in f^{-1}(y)} [\mu_A(x)], \quad x \in U \wedge y \in V \quad (\text{Ec. 1.23})$$

La **operación supremum (sup)** es empleada porque la función f puede registrar diferentes elementos del universo U en un mismo elemento del universo V . Como resultado este elemento puede heredar algunos grados de membresía, por lo tanto, se necesita uno y se escoge el más alto.

Por ejemplo, dado un conjunto cualquiera $A = \{-2/0.3, -1/0.4, 0/0.8, 1/1, 2/0.7\}$ e $y = f(x) = x^2$ se aplica el operador $f(x)$ normalmente a los elementos del conjunto y su correspondiente grado de membresía se obtiene con Ec.1.23 Entonces:

$$B = \{4/0.3, 1/0.4, 0/0.8, 1/1, 4/0.7\} = \{0/0.8, 1/1, 4/0.7\}.$$

Esto es simple cuando se trata con sistema SISO (uno – entrada – una – salida), pero si el sistema tiene más de una entrada; se necesita una forma más general del principio de extensión.

Principio de Extensión 2. Suponer que X es un producto cartesiano de los universos $X = U_1, U_2, \dots, U_r$ y A_1, A_2, \dots, A_r son conjuntos difusos en estos universos. Se quiere determinar $f : X \rightarrow Y$ donde $y = f(x_1, x_2, \dots, x_r)$. Entonces se define

$$\mu_B(y) = \sup \min[\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)]_{y=f(x_1, \dots, x_r), (x_1, \dots, x_r) \in X} \quad (\text{Ec. 1.24})$$

Para un mayor entendimiento se considera solo un caso de dos variables: la suma $y = x_1 + x_2$, entonces se tiene

$$\mu_B(y) = \sup \min[\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2)]_{y=x_1+x_2}$$

En este caso, la suma es igual a y , el grado de membresía se determina como el mínimo de los grados de membresía de los sumandos correspondientes. Luego se aplica la operación *sup*, si el caso lo amerita, como en el ejemplo anterior para determinar el valor de membresía final.

1.2.5. Relaciones difusas

Las relaciones difusas indican el grado de presencia o ausencia de relación entre los elementos de dos o más conjuntos difusos pertenecientes a universos de discurso diferentes.

Definición. Una relación difusa es un conjunto difuso Q definido en el producto Cartesiano $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ como

$$Q = \{(u_1, u_2, \dots, u_n), \mu_Q(u_1, u_2, \dots, u_n) \mid (u_1, u_2, \dots, u_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n\} \quad (\text{Ec. 1.25})$$

$$\text{Donde } \mu_Q = t[\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n]$$

Como un caso particular, una relación difusa binaria sobre un producto Cartesiano finito es usualmente representada por una matriz relacional difusa, matriz cuyos elementos son los grados de membresía de los pares correspondientes que pertenecen a la relación.

Por ejemplo, dados los conjuntos $U = \{\text{tipo de crudo (TC), desgaste mecánico (DM), condiciones ambientales (CA)}\}$ y $V = \{\text{presión de succión (PS), presión de descarga (PD)}\}$. En una matriz funcional se representa la relación difusa $P(U,V)$ ‘influencia’ entre estos dos conjuntos.

		V	
		PS	PD
U	TC	0,8	0,6
	DM	0,3	0,9
	CA	0,5	0,45

1.2.5.1. Composición.

Sean $P(U,V)$ y $Q(V,W)$ dos relaciones binarias que comparten un conjunto V . La composición de P y Q , denotada por $P \circ Q$, esta definida como una relación UxW cuya función de membresía esta dada por

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} t[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)] \quad (\text{Ec. 1.26})$$

Para cualquier (x,z) pertenece a UxZ , donde t es cualquier t-norma.

Las dos composiciones más comúnmente usadas en la literatura son:

La composición max-min o sup-min $P \circ Q$ en UxW de las relaciones difusas $P(U,V)$ y $Q(V,W)$ definida por la función de membresía.

$$\mu_{R \circ S}(x, z) = \max_{y \in V} \min[\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z)] \quad (\text{Ec. 1.27})$$

La composición max-product o sup-product $P \circ Q$ en UxW de las relaciones difusas $P(U,V)$ y $Q(V,W)$ definida por la función de membresía.

$$\mu_{R_{os}}(x,z) = \max_{y \in V} [\mu_P(x,y)\mu_Q(y,z)] \quad (\text{Ec. 1.28})$$

Para entender esto se considera además de los conjuntos U y V con su correspondiente relación $P(U,V)$, definidos en el ejemplo anterior; el conjunto $W = \{\text{eficiencia de la bomba (EB), proceso batch (PB)}\}$.

Se determina la relación difusa “cercaños” en VxW denotada por $Q(v,W)$, con la matriz relacional.

		W	
		EB	PB
V	PS	0,2	0,7
	PD	0,8	0,9

Usando la notación de la Ec. 1.5 se puede escribir P y Q como

$$P = 0.8/(TC, PS) + 0.6/(TC, PD) + 0.3/(DM, PS) + 0.9/(DM, PD) + 0.5/(CA, PS) + 0.5/(CA, PS)$$

$$Q = 0.2/(PS, EB) + 0.7/(PS, PB) + 0.8/(PD, EB) + 0.9/(PD, PB)$$

Se genera la composición $P \circ Q$ que contiene tres elementos: (TC, PB) , (CA, EB) , (DM, EB) . Usando max-min se tiene.

$$\begin{aligned} \mu_{P \circ Q}(TC, PB) &= \max\{\min[\mu_P(TC, PS), \mu_Q(PS, PB)], \min[\mu_P(TC, PD), \mu_Q(PD, PB)]\} \\ &= \max[\min(0.8, 0.7), \min(0.6, 0.9)] \\ &= \max(0.7, 0.6) \\ &= 0.7 \end{aligned}$$

Procediendo de manera similar con los dos elementos restantes de la composición el $P \circ Q$ final es

$$P \circ Q = 0.7/(TC, PB) + 0.5/(CA, EB) + 0.8/(DM, EB)$$

Para obtener $P \circ Q$ mediante max-product se reemplaza min por producto consiguiendo.

$$\begin{aligned} \mu_{P \circ Q}(TC, PB) &= \max\{\mu_P(TC, PS)\mu_Q(PS, PB), \mu_P(TC, PD)\mu_Q(PD, PB)\} \\ &= \max[(0.8 * 0.7), (0.6 * 0.9)] \\ &= \max(0.56, 0.54) \\ &= 0.56 \end{aligned}$$

$$P \circ Q = 0.56/(TC, PB) + 0.4/(CA, EB) + 0.72/(DM, EB)$$

1.2.6. Variables lingüística ³

Hasta aquí se ha presentado a la teoría de conjuntos difusos como una especie de modelo matemático que puede reemplazar a otro. Sin embargo, esta teoría permite además modelar términos del lenguaje natural con la ayuda de las variables lingüísticas abriendo así un área extensa del uso de la misma en control y otras aplicaciones.

En la cotidianidad las palabras son empleadas, a menudo, para describir variables. Por ejemplo: “la temperatura en este lugar es agradable”, emplea la palabra “agradable” como valor para describir la variable “temperatura en este lugar”, la misma que puede tomar, también, números como 17°C, 20°C, etc., como valores.

El que una variable tome números como valores es una estructura matemática bien definida. Pero cuando la variable toma una palabra como su valor, no tiene una estructura matemática establecida. En este orden se introduce el concepto de variable lingüística.

³ WANG Lin-Xi, *A Course in Fuzzy Systems and Control*, Sin edición, Prentice Hall, Estados Unidos 1997, pag 59.

Definición. Si una variable toma palabras del lenguaje natural como valores, esta es llamada *variable lingüística*. Donde estas palabras son caracterizadas por los conjuntos difusos definidos en el universo en discurso de la variable misma. Una definición más formal fue propuesta por el Dr. Zadeh, y es dada a continuación:

“Una *variable lingüística* está caracterizada por (X,T,U,M) , donde:

- X es el nombre de la variable lingüística.
- T es el conjunto de la variable lingüística que X puede tomar.
- U es el dominio físico actual en que la variable lingüística X toma sus valores cuantitativos.
- M es una regla semántica que relaciona cada variable lingüística en T con un conjunto difuso en U .”

Retomando al ejemplo anterior la variable lingüística “temperatura en este lugar” se define como:

(temperatura en este lugar; $T = \{baja, agradable, alta\}$; $U = [0,45]$;
 $baja = [0,20]$, $agradable = [15,30]$, $alta = [25,45]$)

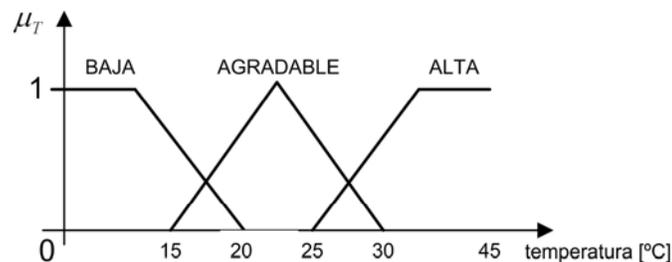


Figura. 1.10. Conjuntos difusos de la variable lingüística “temperatura de este lugar”

La importancia de esta definición radica en la consideración de la misma como elemento fundamental del conocimiento humano. Cuando se emplean sensores para medir una variable, ellos dan números; cuando se pide la ayuda de expertos humanos para evaluar una variable, ellos dan palabras. Además, surge la capacidad de formular términos matemáticos precisos a partir de las descripciones ambiguas empleadas en el lenguaje natural, siendo este el primer paso para incorporar el conocimiento humano en sistemas de ingeniería de manera metódica y eficiente.

Generalmente, una variable lingüística es una composición de términos atómicos o simples $u = u_1, u_2, \dots, u_n$. Estos términos atómicos pueden ser divididos en cuatro categorías:

- *Términos principales*, que son las etiquetas de los conjuntos difusos. Por ejemplo en la figura 1.10 son los términos: “baja”, “agradable”, “alta”. Usualmente describen las palabras que el experto usa para emitir su criterio.
- *Conectores* AND, OR y la negación o complemento NOT. Analizados ya en secciones anteriores.
- *Límites o modificadores* tal como “muy”, “bastante”, “mas o menos”, etc.
- *Marcadores* tal como paréntesis.

Los **límites** son utilizados para definir conjuntos más largos o más cortos de los valores de una variable lingüística a partir de procesos de dilatación e intensificación o concentración respectivamente. Estos operadores modifican la acción de un término, generando un cambio significativo en la función de membresía y determinando cambios consecuentes.

Aunque los términos “*muy*” y “*más o menos*” no tienen un significado bien establecido actúan como concentrador y dilatador, respectivamente. El límite de intensificación reduce el grado de membresía de cada valor del dominio difuso, mientras

que la dilatación lo incrementa. A continuación se postulan los dos límites que son empleados con mayor frecuencia.

Sea el conjunto A un conjunto difuso en U , entonces *muy A* está definido con la función de membresía:

$$\mu_{muyA}(x) = [\mu_A(x)]^2 \quad (\text{Ec. 1.29})$$

Y más o menos A con la función de membresía:

$$\mu_{mas\ o\ menos\ A}(x) = [\mu_A(x)]^{1/2} \quad (\text{Ec. 1.30})$$

Dado el conjunto “líquido denso” definido por la función de membresía de la figura 1.11, se toman ciertos valores, como ejemplo:

$$denso = 1/1.4 + 0.8/1.23 + 0.6/1.15 + 0.4/1.1 + 0.2/0.9$$

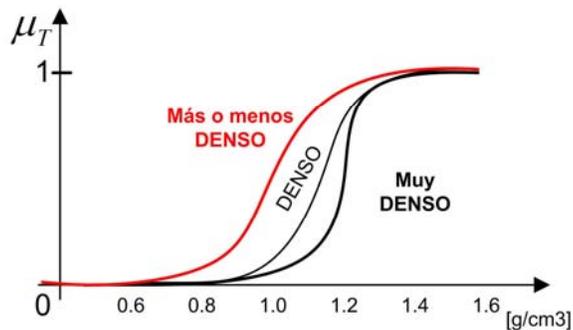


Figura. 1.11. Funciones de membresía de los límites “muy” y “más o menos”

Y se establecen los conjuntos “muy denso” y “más o menos denso”, así:

$$muy\ denso = (denso)^2 = 1/1.4 + 0.64/1.23 + 0.36/1.15 + 0.16/1.1 + 0.04/0.9$$

$$\begin{aligned} \text{muy muy denso} &= \text{muy}(\text{muy denso}) = ((\text{denso})^2)^2 \\ &= 1/1.4 + 0.4096/1.23 + 0.1296/1.15 + 0.0256/1.1 + 0.0016/0.9 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{mas o menos denso} &= (\text{denso})^{1/2} \\ &= 1/180 + 0.894/170 + 0.774/167 + 0.632/165 + 0.447/162 \end{aligned}$$

Algunos experimentos psicológicos se han encaminado a determinar parámetros de modelos matemáticos expresando límites lingüísticos. Los parámetros propuestos expresan una opinión promedio de un promedio de expertos humanos. Se han planteado límites como: ‘casi’, ‘cercano’, ‘bastante’, ‘alrededor’, entre otros. Su significado puede variar de acuerdo al sentido común y la interpretación matemática que se les dé.

Se debe tener cuidado en aplicación de los límites. Su empleo puede exceder el dominio de trabajo de los conjuntos difusos dejando un grado de ambigüedad imprevisto.

Dada la expresión ‘no bastante cercano a cero’; con los **marcadores** es interpretada como

$$\text{no}(\text{bastante}(\text{cercano}_a(\text{cero})))$$

Siendo *cero* el valor lingüístico, primero se crea una región difusa ‘cercano a cero’, luego se aplica el límite ‘bastante’ para finalmente aplicar el complemento difuso ‘no’. Por lo tanto, los marcadores ayudan a delimitar el cálculo, computacional principalmente, haciéndolo más claro y ordenado.

Se debe recordar que las variables lingüísticas y sus límites permiten construir modelos matemáticos a partir de expresiones del lenguaje natural. Este proceso puede ser usado para escribir y procesar reglas y otros objetos.

1.2.7. Reglas IF – THEN difusas

Muchas de las aplicaciones de la lógica difusa envuelven la construcción y procesamiento de reglas difusas. Estas reglas sirven para describir una relación cualitativa entre dos o más variables. Lo hacen mediante la expresión condicional expresada como:

$$SI < \text{proposición difusa } _1 > \text{ ENTONCES } < \text{proposición difusa } _2 > \quad (\text{Ec. 1.31})$$

Estas reglas pueden ser interpretadas como una relación difusa en el espacio producto entrada – salida UxV . La proposición difusa 1 combina uno o más conjuntos difusos de entrada, en tanto que a la proposición difusa 2 se le asocia un conjunto difuso de salida.

Hay dos tipos de proposiciones difusas:

- *Atómicas*, tales como $X \text{ es } A$, donde x es la variable lingüística, y A es un conjunto difuso definido en el dominio físico de x .
- *Compuestas*, son una composición de proposiciones difusas atómicas usando los conectadores “y”, “o” y “no”, que representan la intersección difusa, unión difusa y complemento difuso, respectivamente. Por tanto, si se requiere determinar alguna función de membresía, se la puede calcular con los postulados de la sección 1.2.3. Como ejemplo de proposiciones difusas compuestas se tiene:

$$T \text{ es no } B \text{ y } H \text{ es } M$$

$$T \text{ es no } AL \text{ o } H \text{ es no } D$$

$$(T \text{ es } A \text{ y } H \text{ es } F) \text{ o } T \text{ es no } M$$

Donde T, B, A, AL denotan la variable “temperatura” y los conjuntos difusos “baja”, “agradable”, “alta” respectivamente. Al igual que H, F, M, D la variable “humedad” y los conjuntos difusos “fluida”, “media”, “densa”.

Para expresar el conocimiento humano de forma completa normalmente se precisa de varias reglas, las mismas que se agrupan en un conjunto llamado **base de reglas** o **base de conocimiento**.

Esta base de reglas se puede representar adecuadamente como una tabla de las reglas o bien como una **memoria asociativa difusa (FAM)**, que es una matriz que representa la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas, similar a la matriz de relación explicada. Es posible también definir FAM de más de dos dimensiones, pero su tamaño se incrementa y son más difíciles aún de manejar.

En el Anexo A se muestran algunos axiomas que partiendo de la lógica clásica profundizan la interpretación de las reglas IF-THEN difusas desde el punto de vista matemático.

1.2.9. Reglas de Inferencia.

El último objetivo de la lógica difusa es proveer fundamentos para el razonamiento aproximado con proposiciones imprecisas usando la teoría de conjuntos difusos como principal herramienta, ya que se puede inferir de una regla una conclusión aunque el antecedente (premisa) no se cumpla plenamente.

En lógica booleana: $p \Rightarrow q$

SI p es *verdadero* entonces q es *verdadero*

En lógica difusa: $p \Rightarrow q$

SI p es *verdadero en algún grado* entonces q es *verdadero en algún grado*.

$$0.5p \Rightarrow 0.5q$$

Para alcanzar esta meta se proponen dos principios importantes, que representan extensiones o generalizaciones del razonamiento clásico.

1.2.9.1. Modus Ponens Generalizado (GMP)

Se conoce como razonamiento directo y manifiesta que dadas dos proposiciones difusas denominadas premisas, se debe inferir una nueva proposición, así:

Premisa 1: $x \text{ es } A' \rightarrow \text{Hecho}$

Premisa 2: SI $x \text{ es } A$ ENTONCES $y \text{ es } B \rightarrow \text{Conocimiento}$ (Ec. 1.32)

Conclusión: $y \text{ es } B'$

Donde A, A', B y B' son conjuntos difusos.

La tabla 1.1 muestra diversos criterios que pueden aplicarse para la selección del conjunto B' a partir del conjunto A' . Los criterios 1 a 3-2 están de acuerdo al sentido común. Se destaca que el criterio 4-2 es interpretado como: “SI $x \text{ es } A$ ENTONCES $y \text{ es } B$ CASO CONTRARIO y es no B' ”, aunque no es válido en la lógica formal, se lo utiliza en el razonamiento común.

Tabla 1.1. Criterios intuitivos para GMP

	$x \text{ es } A'$	$y \text{ es } B'$
Criterio 1	$x \text{ es } A$	$y \text{ es } B$
Criterio 2-1	$x \text{ es muy } A$	$y \text{ es muy } B$
Criterio 2-2	$x \text{ es muy } A$	$y \text{ es } B$
Criterio 3-1	$x \text{ es más o menos } A$	$Y \text{ es más o menos } B$
Criterio 3-2	$x \text{ es más o menos } A$	$y \text{ es } B$
Criterio 4-1	$x \text{ no es } A$	desconocido
Criterio 4-2	$x \text{ no es } A$	$y \text{ no es } B$

1.2.9.2. Modus Tollens Generalizado (GMT)

Se conoce como razonamiento inverso y manifiesta que dadas dos proposiciones difusas denominadas premisas, se debe inferir una nueva proposición, así:

Premisa 1: $y \text{ es } B' \rightarrow \text{Hecho}$

Premisa 2: $\text{SI } x \text{ es } A \text{ ENTONCES } y \text{ es } B \rightarrow \text{Conocimiento}$ (Ec. 1.33)

Conclusión: $x \text{ es } A'$

Donde A, A', B y B' son conjuntos difusos.

La tabla 1.2 muestra también diversos criterios que pueden aplicarse para la selección del conjunto A' de la consecuencia en función del conjunto B' . Todos estos criterios están de acuerdo al sentido común. Se destaca que el criterio 8-2 al igual que en caso anterior no es válido en la lógica formal, pero se lo utiliza en el razonamiento común.

Tabla 1.2. Criterios intuitivos para GMT

	y es B'	x es A'
Criterio 5	y no es B	x no es A
Criterio 6	y no es muy B	x no es muy A
Criterio 7	y no es más o menos B	x no es más o menos A
Criterio 8-1	y es B	x es desconocido
Criterio 8-2	y es B	x es A

1.2.10. Difusidad versus Probabilidad⁴

Este es el tema más polémico que se ha generado alrededor de la teoría difusa y ha desprendido intensos debates en el pasado. Actualmente, se evita discutir sobre sus principios filosóficos que pueden crear nuevamente controversia; más bien, se plantean sus principales diferencias técnicas para que el lector juzgue los argumentos.

⁴ DEL BRIO Martín, SAENZ Alfredo, Redes Neuronales y Sistemas Difusos, Segunda edición, Alfaomega Grupo Editor S.A., México DF 2002, pag. 268.

Aunque ambas manejan ambigüedades, los problemas prácticos que ellas intentan resolver son completamente diferentes. Además, semánticamente la diferencia entre lógica difusa y teoría de probabilidad tiene que ver con la diferencia entre las nociones de probabilidad y grado de pertenencia.

La función de membresía de un conjunto difuso indica el grado de pertenencia de un cierto valor de una magnitud a un conjunto difuso, mientras que la función de densidad de probabilidad, por su parte, mide o determina cuantitativamente la posibilidad de que ocurra un determinado suceso.

La función de membresía de un conjunto es fijada arbitrariamente por el observador, siendo él quien especifica que significado se asigna a cada una de las variables lingüísticas que definen los conjuntos. Por el contrario, las afirmaciones probabilísticas se determinan por la observación de ocurrencia de los valores de una magnitud, en algunos casos se realiza la medida de esta probabilidad, y en otros se supone un modelo que compruebe su validez.

Explicando esto con un ejemplo, la función de pertenencia indica el grado en que se puede incluir una cierta botella en el conjunto de botellas vacías y en el de botellas llenas, mientras que la probabilidad informa sobre cuantas botellas de las encontradas se puede incluir en cada uno de dichos conjuntos. Una probabilidad 0.33 de botellas llenas indica que de cada 100 botellas que se tome 33 estarán llenas, mientras que una membresía de 0.33 al conjunto de botellas llenas indicará que la botella incluye un tercio de la capacidad del recipiente del líquido que se trate.

Desde el punto de vista práctico, la teoría difusa trata de formular razonamiento y percepción humana y por ende interviene en problemas claves en áreas tales como el control de procesos industriales, reconocimiento de patrones, etc., donde factores humanos han tenido un mayor impacto. La teoría de las probabilidades, por otro lado, se concentra en áreas como mecánica estadística, análisis de datos, sistemas de comunicaciones, etc., donde el razonamiento y la percepción humana no juegan un papel importante.

1.3. Sistemas de Control Difuso

Se habla de que la gente maneja modelos matemáticos o información cuantitativa cuando ejecuta tareas que lo rodea, realizando un control altamente adaptable. Por ejemplo el caminar por la calle sin chocar contra los objetos y personas, o estacionar un automóvil, etc.

En este orden, una de principales aplicaciones de la teoría de conjuntos difusos es el diseño de sistemas de control que, en esencia, contienen un algoritmo capaz de convertir una estrategia de control lingüística empleada en la vida diaria (por ejemplo: SI la velocidad de un carro es *alta* ENTONCES aplicar *menos* fuerza en el acelerador), en una estrategia de control automático.

El control difuso puede aplicarse en innumerables sistemas, tanto sencillos, como en sistemas superiores cuando el entorno no se conoce de forma precisa. Los modelos matemáticos complejos son reemplazados por técnicas de razonamiento aproximado que gobiernan la relación entre las entradas y salidas de un sistema. Dicha característica permite mayor flexibilidad que el control clásico en el que para la realización de un controlador se requiere un alto grado de control matemático.

En la figura 1.12 se muestra la relación del sobre impulso versus el tiempo de respuesta en el control clásico de un sistema que controla la temperatura en función de la velocidad de un ventilador. Se observa que estos dos parámetros no pueden ser satisfechos al mismo tiempo.

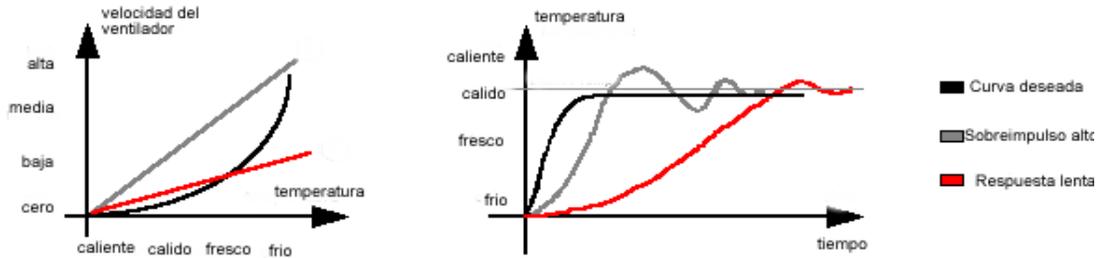


Figura 1.12. Sobre impulso versus tiempo de respuesta

La lógica difusa provee un tiempo de respuesta rápido con una virtual ausencia de sobre impulso. Emplea reglas y funciones de membresía para aproximar cualquier función continua a cualquier grado de precisión.

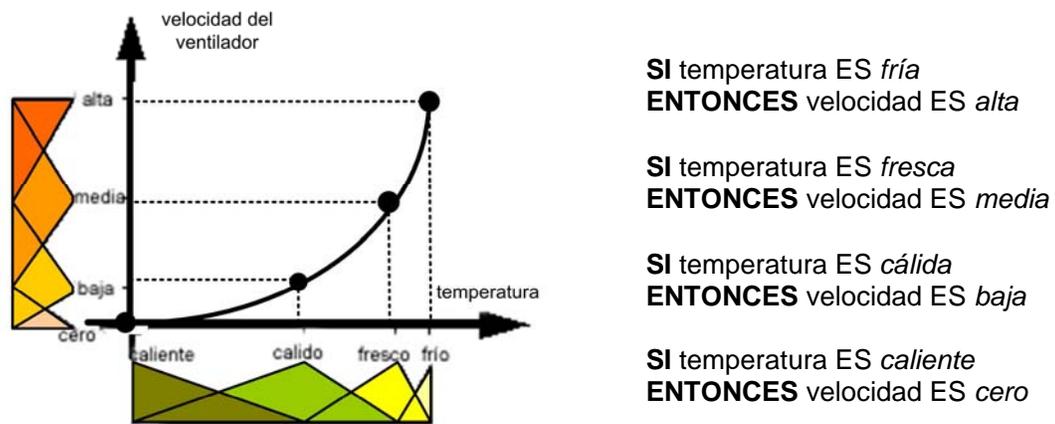


Figura 1.13. Reglas y funciones de membresía aproximadas a una función no lineal

La figura 1.13 ilustra como se puede aproximar al control deseado un sistema no lineal usando cuatro puntos (o cuatro reglas). Claro esta, que se debe añadir reglas para incrementar la exactitud de la aproximación debido a que la aritmética difusa interpola la forma de la función no-lineal.

En la figura 1.14 se muestra el funcionamiento de los sistemas de control difuso, que se detalla a continuación.

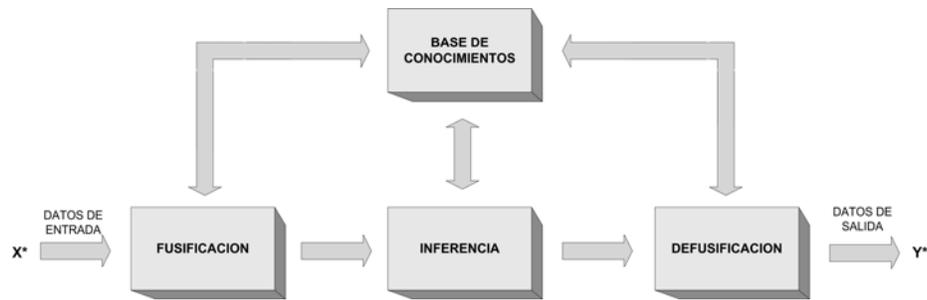


Figura. 1.14. Diagrama de bloques de un controlador difuso

En esta descripción se considera el análisis de sistemas MISO (multi-entrada-una-salida), porque un sistema de salidas múltiples se puede descomponer siempre en una colección de sistemas con salida simple. En la figura 1.15 se representa un sistema de 4 entradas 3 salidas.

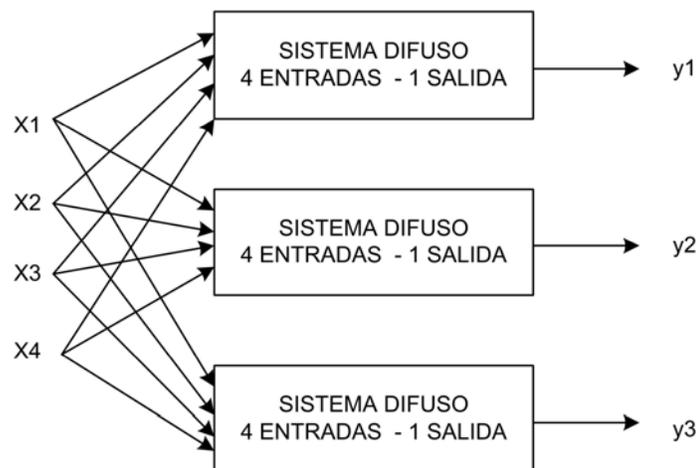


Figura. 1.15. Sistema difuso multi-entrada-multi-salida

En muchas aplicaciones, la entrada y la salida de un conjunto difuso son números reales, por tanto se necesita de una interfaz entre el sistema de control y su entorno. Esta interfaz la realizan la fusificación y la defusificación respectivamente.

1.3.1. Fusificación.

Es el proceso por el cual se determina el grado de pertenencia de los datos de entrada a uno o varios conjuntos difusos en que se divide el rango de valores posibles de dicha variable. En la figura 1.16 se ilustra este hecho:

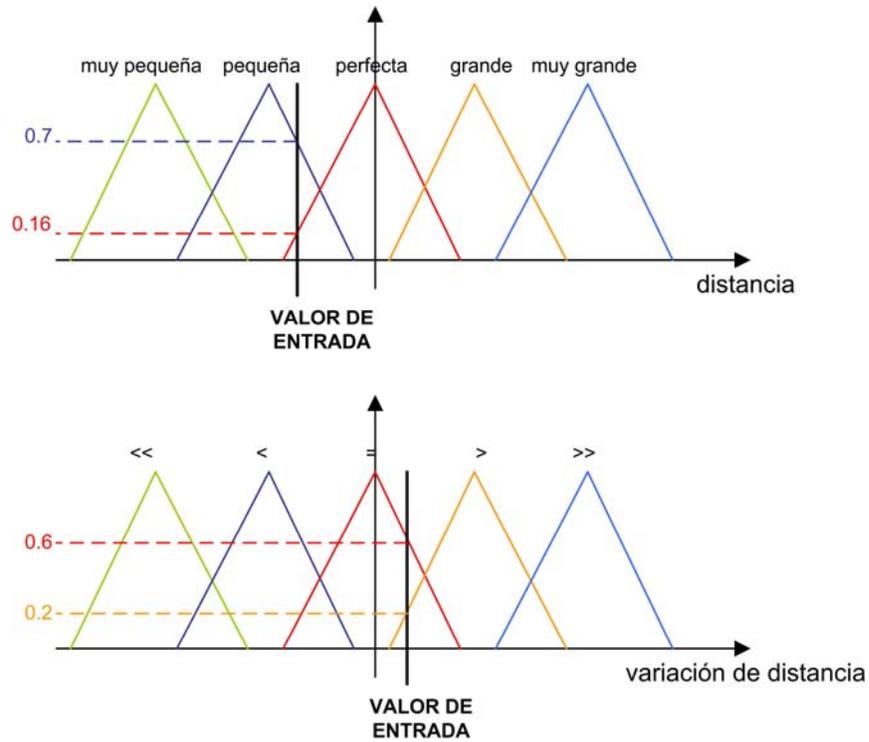


Figura 1.16. Fusificación

Para el diseño de los fusificadores se debe considerar algunos criterios:

- El fusificador debe considerar que la entrada es un valor real, por tanto se debe tener funciones de membresía para estos valores.
- Si la entrada es alterada por ruido, entonces el fusificador se debe ayudar con un supresor de ruido.
- El fusificador debe simplificar la computación envuelta en la inferencia difusa.

Se proponen dos fusificadores:

Fusificador singleton. Es el método más utilizado, registra un valor real x^* en un singleton difuso A' , (véase fig. 1.16) y tiene un valor de membresía que es:

$$\mu_{A'}(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x = x^* \\ 0 & \text{cualquier otro valor} \end{cases} \quad (\text{Ec. 1.34})$$

Fusificador gaussiano. Registra valores x^* en un conjunto difuso A' . Tiene la siguiente función de membresía.

$$\mu_{A'}(x) = e^{-\left(\frac{x_1 - x_1^*}{\alpha_1}\right)^2} * \dots * e^{-\left(\frac{x_n - x_n^*}{\alpha_n}\right)^2} \quad (\text{Ec. 1.35})$$

Donde α_i es parámetro positivo y $*$ t-norma escogida como producto algebraico o min. Este fusificador puede suprimir el ruido en la entrada.

1.3.2. Base de Reglas o Conocimientos.

Consiste en un conjunto de reglas SI-ENTONCES que utilizaría un ser humano que controlase el proceso, con toda la imprecisión que poseen el lenguaje natural. Es la parte fundamental del sistema difuso en el sentido que todos otros componentes son usados para implementar esta base de reglas en una manera razonable y eficiente.

Sólo a partir de estas reglas, se generan las acciones que realizan el control. Las reglas se expresan entonces en términos de las variables lingüísticas, y comprenden las siguientes reglas difusas:

$$\text{SI } x_1 \text{ es } A_1 \text{ y...y } x_n \text{ es } A_n \text{ ENTONCES } y \text{ es } B \quad (\text{Ec. 1.36})$$

Donde A_i y B son conjuntos difusos en $U \subset \mathfrak{R}$ y $V \subset \mathfrak{R}$, respectivamente, y $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U$, $y \in V$ son las entradas y salidas del sistema difuso.

Se dice que una base de reglas es completa si para cualquier $x \in U$, existen al menos una regla en la base de conocimiento, tal que

$$\mu_{A_i}(x_i) \neq 0 \text{ para todo } i = 1, 2, \dots, n.$$

1.3.3. Inferencia.

El mecanismo de inferencia es la unidad lógica que extrae las conclusiones de la base de reglas, es decir, los principios de la lógica difusa son usados para combinar las reglas IF – THEN difusas en un registro desde los conjuntos difusos A' a un conjunto difuso en B'.

El módulo básico para establecer conclusiones lógicas de una base de reglas es el modus ponens (sección 1.2.9). Una vez obtenidos los grados de membresía de los datos de entrada, a través de la fusificación, el valor de verdad para la premisa 1 (véase Ec. 1.32) de cada regla es calculado⁵ y posteriormente aplicado a la sección de conclusión de cada regla.

Como resultado de esto se obtiene un conjunto difuso asignado a la variable de salida para cada regla. Estos conjuntos son combinados para formar un único conjunto difuso de salida, denominado composición. Usualmente son utilizadas las operaciones min y producto como métodos de inferencia, y max y suma como composición.

Para ilustrar esto, se tiene que determinar la aceleración de un vehículo mientras este se va acercando a un lugar de estacionamiento que tiene enfrente, considerando como variables de entrada la distancia al sitio y la variación de la misma representadas en los conjuntos difusos de la figura 1.16, además, la aceleración que se debe aplicar como variable de salida (figura 1.17)

⁵ Si la premisa es una proposición difusa compuesta, calcular el valor de membresía como se indica en la pág.32

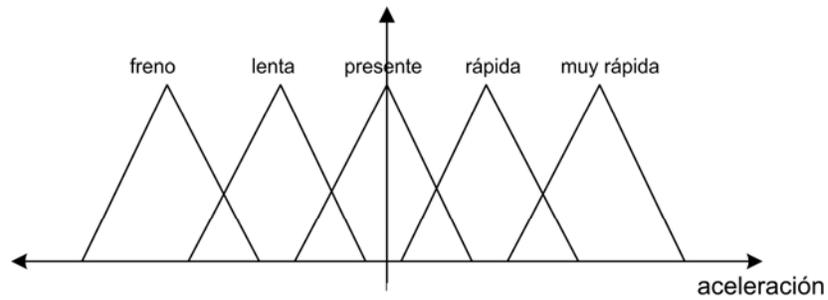


Figura 1.17. Variable de salida del sistema

Se toman dos reglas de la base o conocimiento, y la fusificación ya realizada (figura 1.16) para aplicar el mecanismo de inferencia.

1. SI la *distancia* es *pequeña* ENTONCES ir *lento*
2. SI el *cambio de distancia* es = ENTONCES mantener la aceleración *presente*

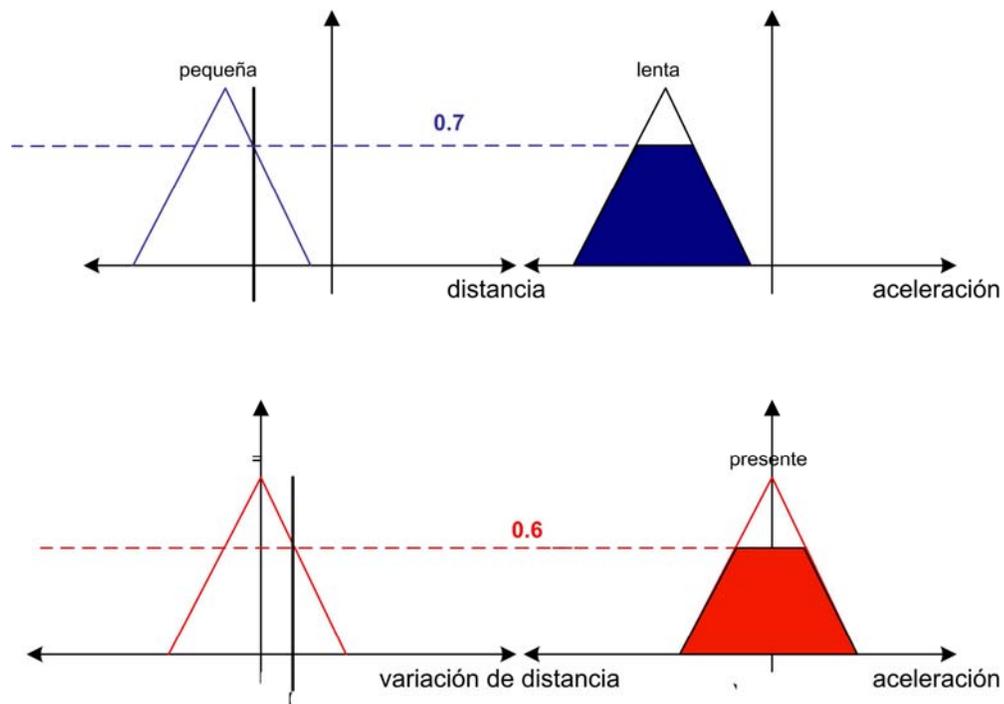


Figura 1.18. Mecanismo de inferencia

A continuación se realiza la composición en la figura 1.19.

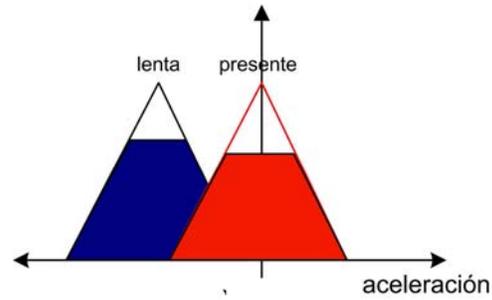


Figura 1.19. Composición

1.3.4. Defusificación.

Mecanismo a través del cual se debe convertir la salida difusa en un valor numérico real $y^* \in V$. Conceptualmente, la tarea del defusificador es especificar un punto y^* (figura 1.14, dato de salida del sistema) que mejor represente al conjunto difuso B' (Ec. 1.36), construido a través de la composición.

Se proponen tres tipos de defusificadores.

- Centro de gravedad. Especifica el valor de y^* como el centro del área cubierta por la función de membresía de B' , que es:

$$y^* = \frac{\int_V y \mu_{B'}(y) dy}{\int_V \mu_{B'}(y) dy} \quad (\text{Ec. 1.37})$$

Donde \int_V es la integral convencional. La figura 1.20 muestra la operación gráfica.

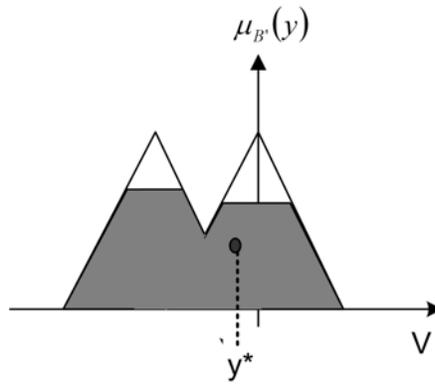


Figura 1.20. Defusificador por centro de gravedad

Una desventaja es que requiere mayor intensidad en los cálculos computacionales.

- **Media Ponderada.** Es el más comúnmente utilizado en sistemas difusos y control difuso, debido a su simplicidad computacional. Es definido como

$$y^* = \frac{\sum_{k=1}^M \bar{y}^k w_k}{\sum_{k=1}^M w_k} \quad (\text{Ec. 1.38})$$

Porque el conjunto composición es la unión o intersección de M conjuntos difusos, donde \bar{y}^k es el centro del k 'vo conjunto difuso y w_k su altura.

A manera de ilustración se tiene la composición de $M = 2$, cuya operación se muestra gráficamente en la figura 1.21

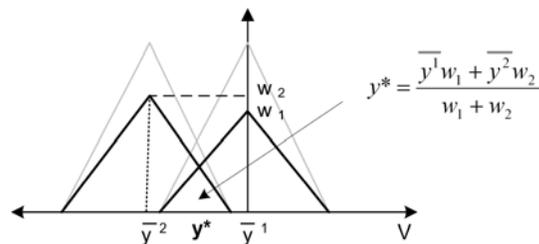


Figura 1.21. Defusificador por media ponderada

- **Máximo.** Conceptualmente, el defusificador máximo escoge y^* como un punto en V donde $\mu_{B'}(y)$ alcanza sus máximos valores.

$$hgt(B') = \{y \in V \mid \mu_{B'}(y) = \sup_{y \in V} \mu_{B'}(y)\} \quad (\text{Ec. 1.39})$$

Donde $hgt(B')$ contiene todos los puntos donde $\mu_{B'}(y)$ alcanza su máximo valor de donde se determina el valor de y^* del más pequeño del defusificador máximo:

$$y^* = \inf \{y \in hgt(B')\} \quad (\text{Ec. 1.40})$$

El más grande del defusificador máximo:

$$y^* = \sup \{y \in hgt(B')\} \quad (\text{Ec. 1.41})$$

O el promedio de los defusificadores máximos:

$$y^* = \frac{\sum_{i=1}^n y_i}{n} \quad \text{donde } y \in hgt(B') \quad (\text{Ec. 1.42})$$

Este método es fácilmente aplicable, pero presenta la desventaja que un mínimo cambio en B' puede resultar en un gran cambio de y^* , sobre todo si se aplican las ecuaciones 1.40 o 1.41 (véase las figuras 1.22 a) y b))

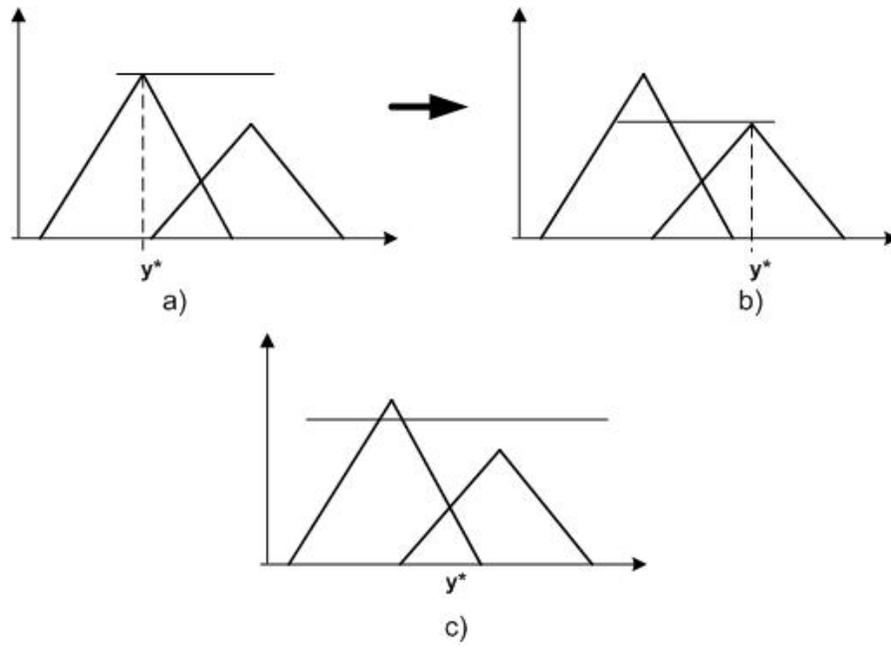


Figura 1.22. Defusificador por máximo a) más grande, b) más pequeño, c) promedio

CAPITULO 2

DESCRIPCION DEL PROCESO DE BOMBEO EN LA ESTACION N°1 LAGO AGRIO DEL OLEODUCTO TRANSECUATORIANO

2.1. Descripción General

Petroecuador - Gerencia de Oleoducto tiene como función principal el transporte de petróleo desde Lago Agrio provincia de Sucumbíos, mediante el Sistema de Oleoducto Transecuatoriano denominado SOTE, hasta el Puerto de Balao desde donde se lo exporta; y también parte de este crudo se envía a la Refinería Estatal para la producción de combustibles, ambos ubicados en Esmeraldas.

El Oleoducto Transecuatoriano, en su etapa inicial, fue construido entre 1970 y 1972 por la compañía norteamericana William Brothers, contratista del Consorcio Texaco-Gulf. Es un medio de transporte estratégico al interior de la industria petrolera, ya que armoniza la relación entre la fase productiva, la industrialización y la exportación del crudo.

El SOTE bombea crudo de 24°, 28° y 30° API. Esta constituido por un ducto de aproximadamente 503 Km. de longitud, con tubería que varía entre 20 y 26 pulgadas de diámetro. Dispone de una capacidad total de almacenamiento de 5'220000 barriles. En Lago Agrio operan ocho tanques (véase figura F2a, Anexo F) con capacidad de 250000 barriles cada uno. En dos de estos se recibe exclusivamente la producción de la compañía Repsol - YPF.

El **Terminal de Balao** recibe el flujo transportado por el SOTE en diez tanques de capacidad de 322000 barriles cada uno. En este lugar operan dos monoboyas denominadas

“X” y “Y”, ubicadas a tres kilómetros de la playa, con capacidad de 100000 toneladas de peso muerto.

Debido a la geografía que el oleoducto debe atravesar, de oriente a occidente por la Cordillera de Los Andes, cuenta con seis estaciones de bombeo, cuatro estaciones reductoras de presión, un Terminal y un puerto marítimo en Esmeraldas. (Véase figura 2.1)



a)



b)

Figura 2.1. a) Perfil y b) Mapa del Oleoducto Transecuatoriano

Las **estaciones reductoras**, diseñadas y ubicadas en lugares estratégicos de la Cordillera Occidental, controlan la presión del crudo que viene por el oleoducto, descendiendo desde una altura máxima de 4.096 metros, cerca del Alto de la Virgen en Papallacta hasta el nivel del mar. Esto se lo hace con el control automático de 4 válvulas de

8 pulgadas, y adicionalmente un mecanismo hidráulico de 4 válvulas de 6 pulgadas que puede operar simultáneamente al otro, manejados independientemente (véase la figura 2.2)

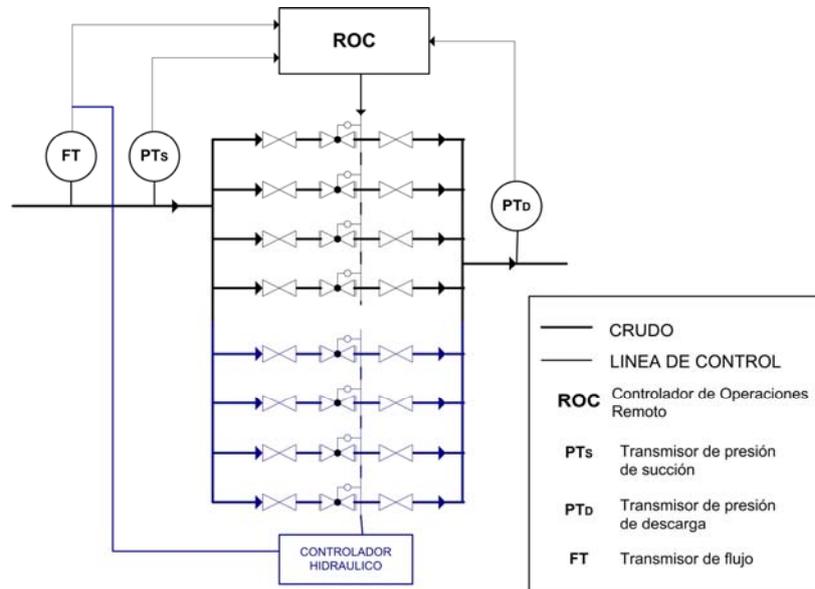


Figura 2.2. Diagrama de control de una estación Reductora de presión

Las **estaciones de bombeo**, de las cuales se tratará en adelante, inicialmente contaban con cuatro unidades de bombeo propulsadas por motores ALCO a diesel, que posteriormente fueron adaptados para el consumo de crudo combustible.

Desde el año 1985 hasta el año 2000, el Oleoducto Transecuatoriano ha registrado cuatro ampliaciones en su sistema. Las 5 estaciones del lado occidental, cuentan en la actualidad con 7 unidades de bombeo cada una, conectadas en paralelo¹, accionadas con motores ALCO, operando con 6 unidades en línea y 1 en stand-by. La estación Quinindé en el lado occidental cuenta con tres unidades conectadas en serie, operando con 2 unidades en línea y 1 en stand-by.

El Oleoducto cuenta además con un sistema de medición y fiscalización permanente del flujo de petróleo, actividad que se realiza en la estación de Lago Agrio y en el Terminal de Balao.

¹ Funcionamiento que permite aumentar el caudal del fluido circulante.

La determinación de volúmenes se realiza diariamente a las 6H00. Todas las compañías productoras disponen de un banco de medidores de flujo propio que contabiliza los barriles entregados al Oleoducto para el transporte. Luego de los correspondientes análisis de laboratorio, se obtiene la calidad de petróleo, con el objetivo de realizar las liquidaciones por diferencial de los grados API y establecer los volúmenes que se han recibido y la cantidad exportada, de conformidad con las normas vigentes.

Antes de que el crudo llegue al Terminal de Balao, el oleoducto tiene una derivación que permite entregar el petróleo a la Refinería Estatal de Esmeraldas.

La modernización tecnológica del SOTE tuvo sus inicios en Enero del 2000, con la instalación de instrumentación Foundation Fieldbus y el Sistema de Control DeltaV, siendo este el mayor proyecto ejecutado en los últimos años en el área de Instrumentación y Control en el Ecuador.

Los dispositivos inteligentes de campo que usa el SOTE proporcionan información no solo del proceso sino también de su condición de operación. Esta característica integrada es importante para la versatilidad y poder de la arquitectura PlantWeb (ver glosario). Por ejemplo: los diagnósticos en línea de los dispositivos junto con la base de datos de mantenimiento se traducen en aumento de disponibilidad y reducción de variabilidad del proceso.

La facilidad con que el Sistema Delta V puede intercambiar información con paquetes de software utilizados internamente tales como: Paquetes de Detección de Fugas, Paradas de Emergencia, Modelación, etc. y con otros sistemas informáticos brinda una ventaja que está siendo explotada por Gerencia de Oleoducto para la implementación del Sistema SCADA².

² Sistema de Adquisición de Datos y Control Supervisorio

2.1.1. Estación de Bombeo N°1 Lago Agrio

La estación de Lago Agrio (figura 2.3) es la cabecera de la línea principal del Oleoducto y controla el sistema total, se encarga de coordinar toda la operación localizada en la provincia de Sucumbíos, cantón Nueva Loja.



Figura 2.3. Estación de bombeo Lago Agrio

Aquí se receipta y almacena el crudo proveniente de toda la Región Amazónica, extraído en los campos de producción, a través de un sistema de válvulas (MANIFOLD) que permite el control de entrada y salida del petróleo a los tanques de almacenamiento.

Estos tanques poseen techo flotante (figura F2c, Anexo F). El objetivo de esto es mantener siempre un contacto directo con el combustible y evitar así la evaporación y acumulación de gases inflamables. Tienen además agitadores (figura F2d, Anexo F) para homogenizar la mezcla de las diferentes calidades de crudo, y evitar también que los sedimentos se acumulen en el fondo del tanque lo que ocasionaría taponamiento. Disponen de un sistema de drenaje de agua de fondo.

2.1.1.1. Proceso de Bombeo

Se toma el petróleo de los tanques, que por gravedad sale a una presión máxima de 10 – 12psi. Pasa por el manifold (figura F3, Anexo F) a la sala de Booster's³, mostrada en la figura F4, (operan dos unidades y una esta en reserva) donde se eleva la presión (presión de succión⁴) a un valor aproximado de 120psi. Atraviesa por la sala de medidores (figura F5, Anexo F) la misma que esta certificada para Custody Transfer (ver glosario).

Luego cruza por los intercambiadores de calor (figura F6, Anexo F), existentes antes de cada unidad de bombeo, con el objeto de enfriar el agua que sirve para bajar la temperatura en los motores ALCO, y a su vez la temperatura del crudo se eleva (el incremento de temperatura de un líquido viscoso es inversamente proporcional a su resistencia al flujo).

Finalmente pasa por la sala de máquinas (figura F7, Anexo F) donde las unidades de bombeo elevan la presión del crudo (presión de descarga) que va a ser enviado por el oleoducto a la siguiente estación. Esta variable es controlada de manera indirecta con la velocidad de los motores ALCO.

Como dato técnico, las estaciones de bombeo soportan una parada súbita de sus operaciones, por baja succión o alta descarga

2.2. Sistema DeltaV en el SOTE



El sistema DeltaV, del fabricante EMERSON, emplea plataformas estándares escalables, paquetes de software de tipo modular integrados y protocolos de comunicación abiertos. Realiza planificación, ingeniería, instalación, entrenamiento, operación y mantenimiento en un proyecto, que acelera el éxito en el desempeño

³ Elevadoras de presión

⁴ En Lago Agrio está variable es más estable debido a la presencia de las Booster. En las otras estaciones se ve afectada por factores geográficos y por el desgaste de la tubería.

de la planta.

2.2.1. Hardware

El hardware del sistema, mostrado en la figura 2.4, posee los siguientes dispositivos:

- Una o más estaciones de trabajo DeltaV.
- Una red de control (opcionalmente redundante) para comunicación entre los nodos⁵ del sistema.
- Fuentes de poder.
- Uno o más controladores DeltaV (opcionalmente redundantes) que ejecutan control local de los segmentos de red de campo.
- Un subsistema Entrada/Salida (E/S) por controlador que procesa la información desde los dispositivos de campo.

⁵ Parte física de la red de control

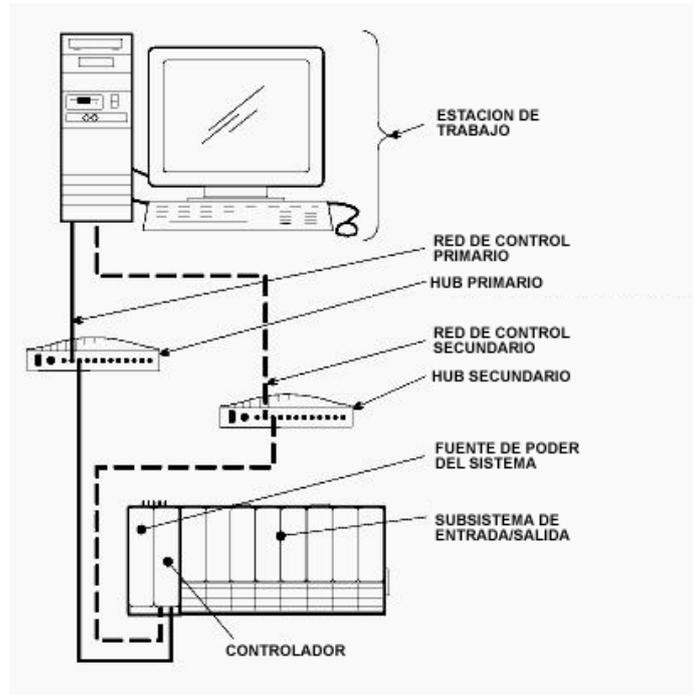


Figura 2.4. Hardware DeltaV

2.2.1.1. Estación de trabajo

Es empleada para el desarrollo de la configuración y operación del proceso, se comunica con los controladores DeltaV y otras estaciones de trabajo a través de la red de control. Maneja el sistema e información de proceso. Cada estación de trabajo es designada mediante una etiqueta por ejemplo PC-01001.

El software DeltaV opera sobre una estación de trabajo (figura 2.5) con procesador de 32 bits Intel Pentium 4, disponible como servidor con dos monitores en todas las estaciones de bombeo del SOTE. Provee el trabajo necesario para crear las estrategias de control y operar los procesos.



Figura 2.5. Estación de trabajo

Cada servidor dispone de 5 discos duros de 17 GB de capacidad:

- 3 discos con controladores RAID 5 (véase Anexo B) que brindan la máxima protección de los datos (redundancia) así como la optimización de los tiempos de lectura y escritura de datos.
- 2 discos que están en estado *hot stand by*, como reserva por si se pierden alguno de los discos activos.

Las estaciones de trabajo poseen dos puertos de interfaz Ethernet, dando la posibilidad de una conexión simple o también redundante; que permite asegurar la disponibilidad de la red ante la falla de alguno de los componentes del hardware.

2.2.1.2. Red de Control

La red de control DeltaV es el backbone del sistema (véase figura 2.6). Conecta las estaciones de trabajo con los controladores. Con tecnología Ethernet 10/100BaseT, cableado UTP que enlaza cada nodo al hub o switch. Posee las siguientes características:

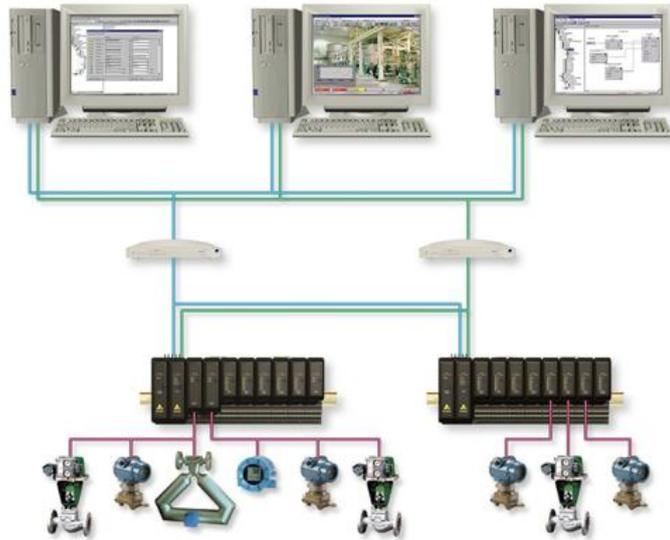


Figura 2.6. Red de control DeltaV

- Se puede expandir fácilmente, ya que se cuenta con dispositivos plug-and-play, y el software de control tiene múltiples opciones, adaptables a cualquier necesidad.
- Los componentes de red cumplen con los estándares IEEE, EMC (Electromagnetic Compatibility) y CSA (Canadian Standards Association).
- Posee comunicación rápida y verificación del estado apropiado de la línea de comunicación.
- Se tiene la ventaja de poder instalar o remover los nodos aun cuando el sistema este energizado.

2.2.1.3. Fuentes de poder

Dos sistemas de energía DeltaV están disponibles para usar en la planta: AC a DC 115/220 VAC y DC a DC 12/24 VDC. El sistema acepta un rango amplio de fuentes de energía de entrada y las convierte en salidas de energía exactas.

Los rack que contienen al controlador, la fuente y las tarjetas de E/S poseen un bus de alimentación interna, por lo que no es necesario cableado externo. La estructura modular permite un desprendimiento simple para energía adicional en el campo.

El sistema de energía DeltaV puede ser redundante de 1 a N versus 1 a 1 en otros sistemas, esto provee una solución económica en cuanto a redundancia.

La distribución de energía previene sobrecargas en el sistema. No más de 8A pueden ser transportados por los rack del controlador y los subsistemas de E/S. Salidas de relé internas cambian el estado y alertan al usuario si el voltaje entrante o el sistema de energía fallan. No existe degradación de energía.

2.2.1.4. Controlador DeltaV M5 PLUS

El controlador M5 PLUS es un tipo específico de nodo de red que ejecuta estrategias de control para una porción del proceso, maneja entradas de campo y datos de salida, provee comunicación entre los dispositivos y otros nodos de la red de control.

El controlador, y en general cualquier dispositivo, que ha sido conectado a la red pero no ha sido definido dentro del sistema es un **dispositivo decomisionado**. Cuando se lo especifica, es decir se le asigna una dirección, y se guarda automáticamente esta información en la base de datos se lo conoce como **dispositivo comisionado**.

A continuación se enuncian sus características:

- Protección de datos. Toda la información procesada en línea o fuera de línea es bien almacenada.
- Único que tiene la capacidad de auto-direccionamiento.

-
- Administra todas las actividades de los canales de interfaz E/S. Tan pronto como un dispositivo de campo es conectado el controlador reconoce sus características generales.
 - Maneja todas las funciones de comunicación de la red, tiempos de interferencia, alarmas, objetos diseccionados.
 - Establece un control semi-distribuido. Los equipos de campo tienen la capacidad de realizar tareas de control independientes.
 - Al generarse una nueva aplicación para el controlador, esta se la carga solo a la tarjeta específica, permitiendo que las demás se mantengan en línea. O también se ejecuta una descarga normal al controlador como en un PLC (todas las tarjetas de interfaz fuera de línea). En ambos casos se efectúa una actualización interna de la información ingresada.
 - En caso de una falla en el suministro de energía, el controlador puede reiniciarse sin intervención manual.
 - Esta equipado con la capacidad de pasar información inteligente HART o FOUNDATION FIELDBUS desde los dispositivos de campo a cualquier nodo de la red de control. Lo que permite tener ventaja de aplicaciones.
 - Debido al crecimiento del sistema se puede incrementar el número de DSTs (ver glosario) localizados en el controlador DeltaV. Comienza con 50 y se puede expandir hasta 500 DSTs.
 - Un controlador redundante (en stand by) puede ser agregado como reserva de un M5 PLUS en línea.

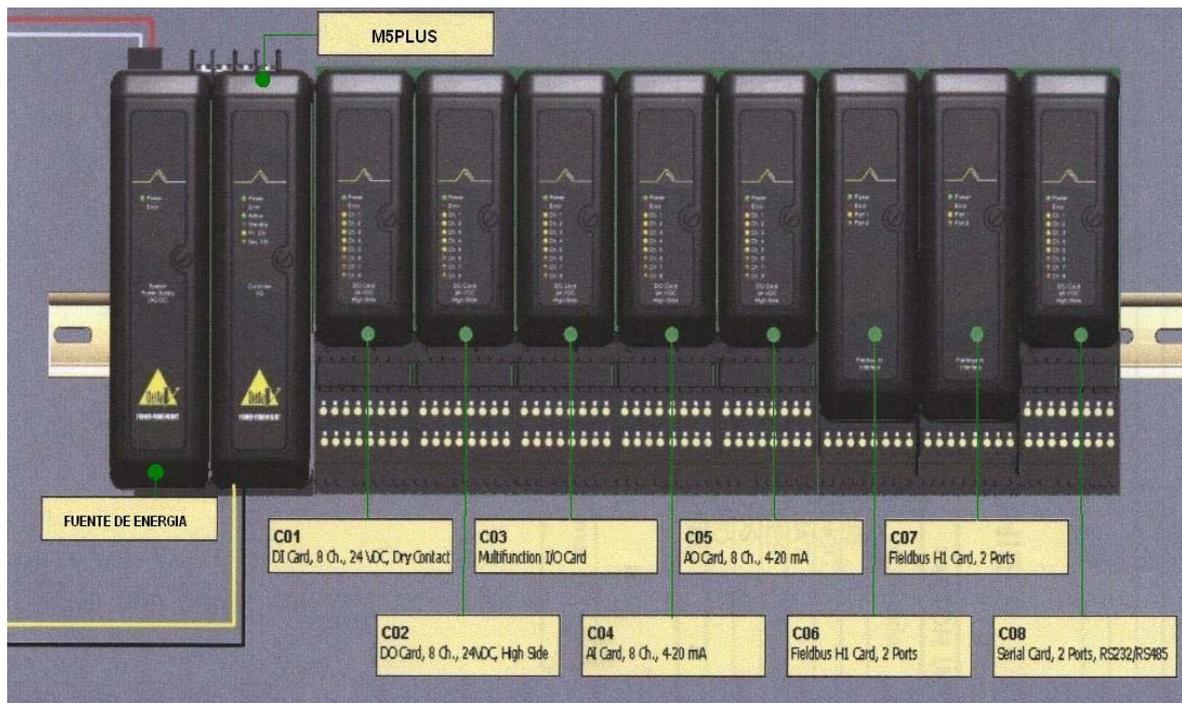


Figura 2.7. Controlador Delta V M5PLUS

En el SOTE, un controlador con su correspondiente subsistema de E/S está habilitado para cada unidad de bombeo.

2.2.1.5. Subsistema de ENTRADA/SALIDA (E/S)

Las tarjetas de interfaz E/S permiten al sistema comunicarse con los equipos de campo. A continuación se detalla el subsistema mostrado en la figura 2.7:

- Tarjeta de entradas analógicas (AI), 8 canales, 4 – 20mA. Reporta los valores presentes en los diferentes canales y además, con la configuración correspondiente, cuatro valores digitales desde los dispositivos HART.
- Tarjeta de salidas analógicas (AO), 8 canales, 4 – 20mA. Maneja los valores de la salida escritos por el controlador. El tipo de canal HART envía comandos como variables dinámicas.

-
- Tarjeta de entradas discretas (DI), 8 canales, 24 VDC. Se lo puede configurar también como canal de entrada contador de pulsos, la frecuencia máxima por pulsos es 125Hz.
 - Tarjeta de salidas discretas (DO), 8 canales, 24 VDC. Sus canales pueden ser configurados como:
 - Salida discreta que controlan la salida de los valores escritos por el controlador.
 - Salida momentánea que produce un pulso de un período de tiempo especificado.
 - Salida de pulsos continua, que es controlada por un porcentaje de un período de tiempo específico.
 - Tarjeta multifunción. Reporta el número de pulsos discretos o picos de una señal sinusoidal detectada en el canal. Frecuencia máxima 50 KHz. Usada con el bloque de función Pulse Input (PIN) para leer la frecuencia enviada por el Magnetic Pickup (MPU).
 - Tarjeta serial con puertos RS232 y RS422/485 half duplex y full duplex. La tasa de transmisión manejada es de 300 – 112500bps. Protocolos utilizados pueden ser RTU o ASCII.
 - 2 tarjetas H1 Fieldbus. Cada una con dos puertos de comunicación Ethernet, controla un segmento de red que tiene un número máximo de 16 dispositivos. Funciona como dispositivo maestro dentro de la red fieldbus.

2.2.1.6. Instrumentación de campo.

Los equipos de campo que interactúan con el Sistema DeltaV son:

2.2.1.6.1. Transmisores de presión.

Se emplean transmisores *Rosemount 3051* (figura 2.8), aceptan protocolos de comunicación HART y FIELDBUS.



Figura 2.8. Transmisor de presión Rosemount 3051

Monitorean esta variable en diferentes puntos de las unidades de bombeo: presiones de succión y descarga (de toda la estación y de cada unidad de bombeo), presión en los cabezotes del motor, presión del combustible, presión diferencial en la entrada y salida del intercambiador de calor y del filtro de aceite, salida del turbo, acumulador de agua.

2.2.1.6.2. Transmisores de Temperatura.

Con Foundation Fieldbus modelo *Multivariable 3244 MV* (figura 2.9) proveen fiabilidad, estabilidad y exactitud superior.

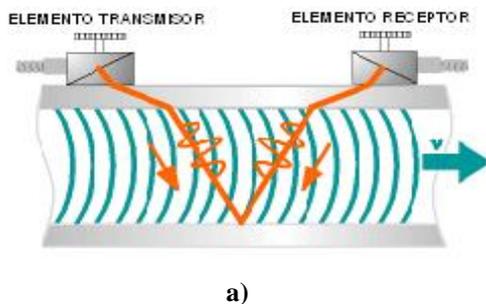


Figura 2.9. Transmisor de temperatura multivariable Rosemount 3244MV

Tienen capacidad de entrada de sensor dual, que permite medir temperaturas diferenciales, temperatura promedio o medición de temperatura redundante. Además posee diagnóstico avanzado. Monitorean en los mismos puntos que los transmisores de presión.

2.2.1.6.3. Transmisores de flujo.

El flujo a la entrada de cada unidad de bombeo se lo mide con un computador de flujo (figura 2.10b) cuyo principio de medición es el envío de señales ultrasónicas (figura 2.10a).



a)



b)

Figura 2.10. a) Principio de medición ultrasónico, b) Computador de flujo Controlotron 1010N

El flujo de salida de la estación es medido indirectamente por presión diferencial a través de una placa-orificio y transmisores de presión de 4 – 20mA, marca Rosemount.

2.2.1.6.4. Transmisores de nivel.

Para la el control de esta variable, en la estación se trabaja con tres métodos de medición.

Medición de tanques hidrostática (HTG). Empleada para el control referencial de nivel en los tanques de almacenamiento (250000 barriles), véase figura 2.11.

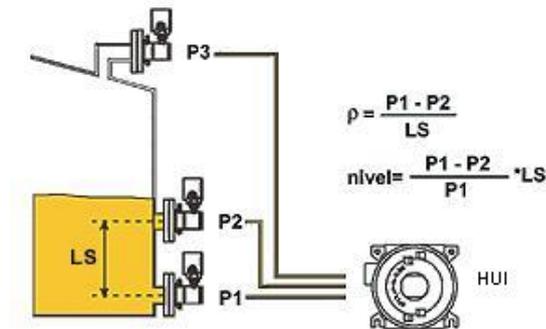


Figura 2.11. Sistema HTG

Los sistemas HTG están basados en la medida de nivel mediante transmisores de presión hidrostática. Estas mediciones son enviadas a una unidad de interfaz hidrostática (HIU) que realiza las operaciones correspondientes. Adicionalmente esta instalado un transmisor de temperatura para cálculos de compensación. Estos equipos se encuentran en el campo.

En la sala de control existe un módulo de interfaz de aplicación (AIM) que permite interactuar con el sistema DeltaV. El SOTE emplea los equipos HTG mostrados en la figura 2.12.



Figura 2.12. Instrumentos HTG empleado en el SOTE

Medición de tanques por ultrasonido y radar. Empleados en la medición de nivel de los sumideros y tanques de crudo combustible, respectivamente.



Figura 2.13. Medición de nivel por ultrasonido y radar

Se basan en el mismo principio: Emiten un pulso o una onda, y miden las características, o el tiempo, de su reflejo desde el objeto medido, véase figura 2.13.

2.2.1.6.5. Actuadores eléctricos.

Control de las válvulas de succión, descarga y bypass de las unidades de bombeo. El actuador de la figura 2.14, tienen la versatilidad de controlar a una válvula por el porcentaje de apertura. Pero en las estaciones de bombeo, esta programado para manipular válvulas de compuerta, es decir, realizan un control es ON/OFF.

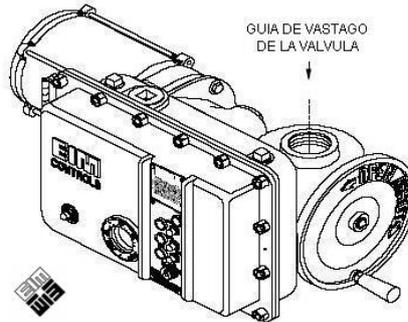


Figura 2.14. Actuador eléctrico EIM E796

Control de la velocidad de los motores ALCO se lo realiza con un actuador eléctrico Woodward (figura 2.15) que es un posicionador con control integral. Recibe una señal análoga de control y provee una salida de indicación de posición actual al eje de acción que esta unido a la barra de combustible del motor ALCO. También acepta señales PWM.

Es programable en el campo, debe ser configurado y calibrado para una aplicación específica con un PC y una Herramienta de Servicio de Ventana Woodward que se comunica serialmente al actuador vía RS232 usando el protocolo ServLink, propio del fabricante.



Figura 2.15. Actuador eléctrico ProAct Analog and Digital Plus

2.2.1.6.6. Tarjeta 2301A Speed Control.

Controla la velocidad o la carga de los motores ALCO de acuerdo a la señal de referencia enviada por el controlador M5 PLUS de 4 – 20mA. El control esta alojado en un chasis de metal y consiste en un solo circuito impreso. Todos los potenciómetros están accesibles desde la parte frontal.



Figura 2.16. Tarjeta 2301A SPEED CONTROL

El MPU (Magnetic Pickup) genera una señal AC con frecuencia proporcional a la velocidad del motor ALCO. El convertidor frecuencia-voltaje, interno de la tarjeta 2301A (figura 2.17), recibe dicha frecuencia y la cambia a una señal de voltaje DC proporcional.

El circuito *velocidad de referencia* genera un voltaje de DC a partir de la señal de control 4 – 20mA para ser comparada con la señal proporcional.

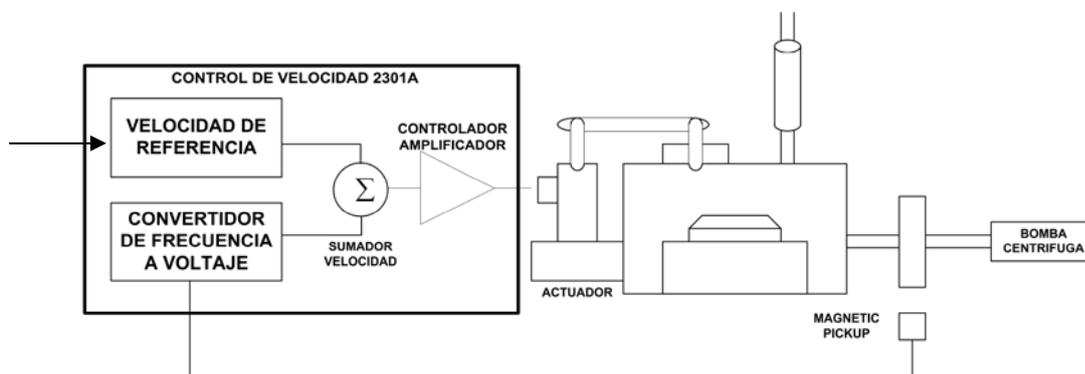


Figura 2.17. Diagrama de bloques de la tarjeta 2301A

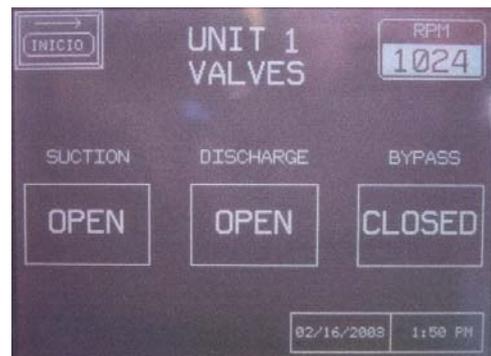
La tarjeta 2301A realiza un control PID, esta señal es transmitida al actuador Woodward, el mismo que regula el paso de combustible hasta que la velocidad referencia y el voltaje proporcional sean iguales.

2.2.1.6.7. Touch Screen.

Cada unidad de bombeo posee un tablero de control en el cual se encuentran las tarjetas del sistema DeltaV, cada uno posee un quick panel (figura 2.18) donde aparecen los datos principales de la unidad: temperaturas de los cilindros, datos de la presión de la unidad, estado de las válvulas.



a)



b)

Figura 2.18. a) Menú principal de la Touch Screen, b) Submenú de válvulas

2.2.2. Software

El software DeltaV incluye una serie de aplicaciones que ayuda al usuario a configurar, operar, documentar y optimizar el proceso. Las aplicaciones principales son categorizadas como Herramientas de Ingeniería y Herramientas de Operador. Herramientas adicionales están disponibles: Control Avanzado, Instalación y Ayudas en línea. (Véase figura 2.19)

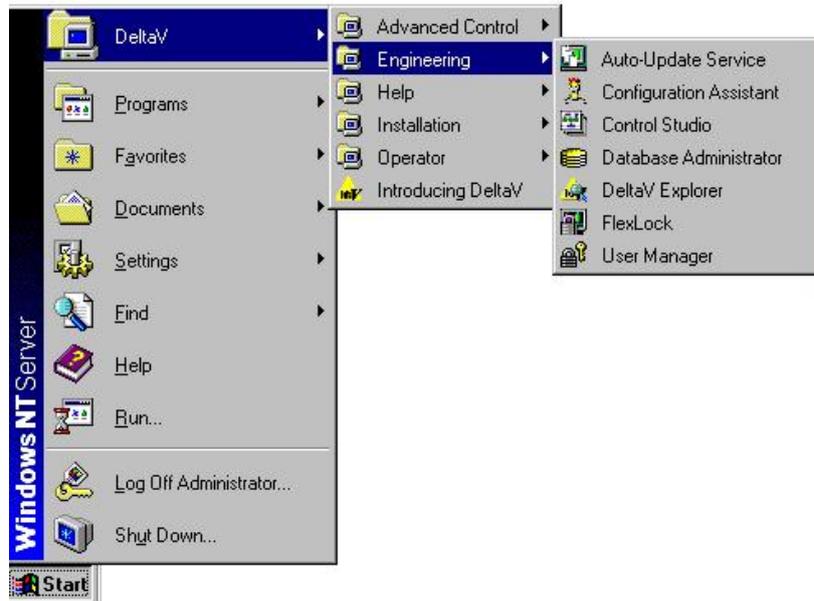


Figura 2.19. Despliegue de herramientas del software DeltaV

A la interfaz de aplicación principal de operación en el SOTE a través del *DeltaV Operate* que es parte del menú *Operator*.

2.2.2.1. Herramientas de Ingeniería

2.2.2.1.1. Asistente de configuración.

Si es un usuario por primera vez, esta es una gran herramienta para aprender las bases del Sistema DeltaV.

2.2.2.1.2. Explorador DeltaV.

Tiene una apariencia similar al explorador de Windows, es una aplicación que permite definir los componentes del sistema (tales como áreas, nodos, módulos, alarmas) y una vista de la estructura total y distribución del sistema.

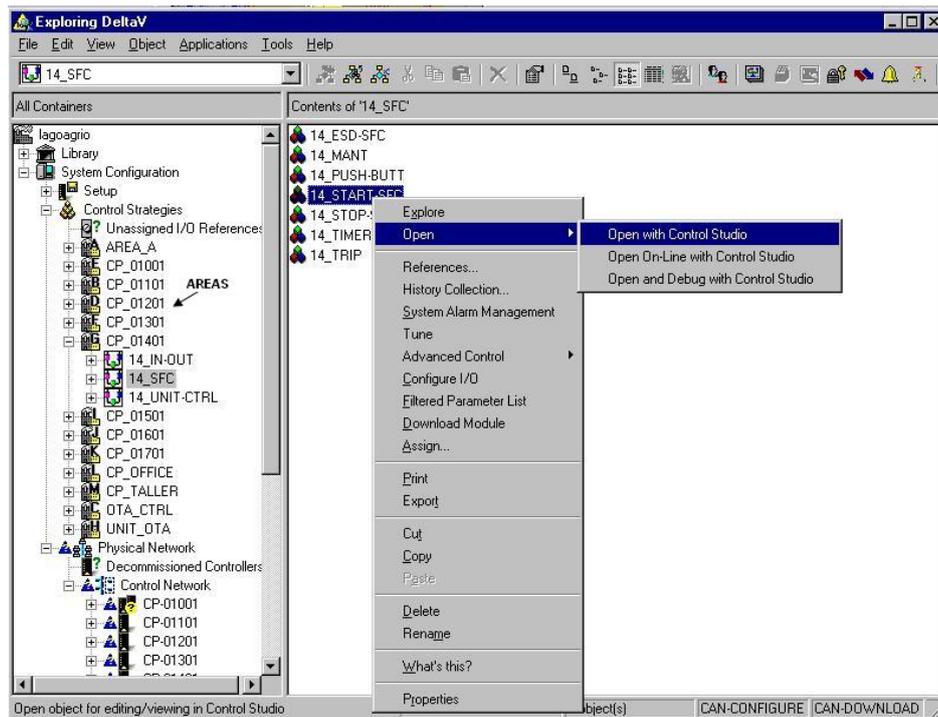


Figura 2.20. Explorador DeltaV

Como se ve en la parte izquierda de la figura 2.20, en la Configuración del Sistema se ven las mismas etiquetas en las estrategias de control y en la red física.

Las *estrategias de control*, son los módulos y la parte lógica agrupados de manera funcional. La *red de control* son los equipos de campo agrupados en jerarquía de conexión física.

Las etiquetas son coincidentes por efectos de organización del usuario, que asocia los módulos de control con sus correspondientes equipos de campo.

2.2.2.1.3. Control Studio.

Es usado para diseñar y modificar módulos individuales y plantillas que hacen una estrategia de control. Con esta aplicación se puede construir gráficamente un módulo de control arrastrando los ítems de la paleta de librerías.

Control Studio soporta un rango de conceptos industriales incluyendo Bloques de Función (para control continuo) y diagramas de control secuencial (para control secuencial). El usuario puede mezclar elementos de estos lenguajes de control en un solo módulo de control.

2.2.2.1.3.1. Control en el Sistema DeltaV

El sistema DeltaV esta estructurado de tal manera que se puede crear y mantener estrategias de control como componentes modulares pequeños. Estos componentes son únicos, etiquetados, llamados módulos de control.

Un **módulo** (figura 2.21) es la unidad de control lógico más pequeña, contiene algoritmos, condiciones, alarmas, displays, información de históricos. Generalmente contiene una única identificación. Puede comunicarse directamente con E/S y con cualquier otro módulo, también pueden ser usados por otros módulos para ejecutar estrategias de nivel mas alto.

El sistema esta dividido en áreas (Véase figura 2.20). Areas son usadas para agrupar módulos, típicamente representan ubicaciones de la planta. Todos los módulos en un área usualmente trabajan para control del proceso en una ubicación de la planta específica. El sistema soporta 16 áreas.

Por ejemplo en la figura 2.20 el área CP_01201 controla **01** en la estación Lago Agrio, **2** la unidad de bombeo 2, con el número de identificación **01**. **CP** representa al panel de control.

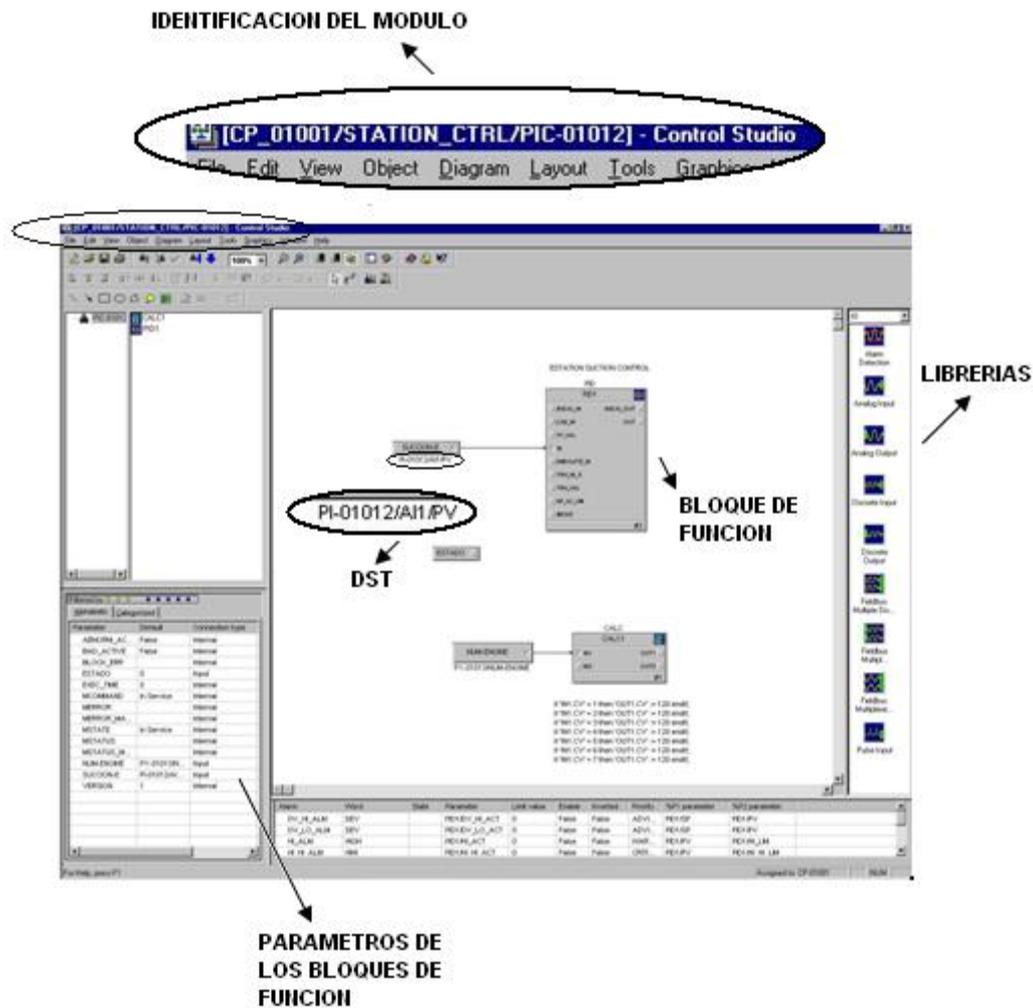


Figura 2.21. Control Studio

La etiqueta del dispositivo representa los instrumentos, válvulas, y otros elementos de campo, se lo conoce como DST.

Las **librerías DeltaV** (Anexo D) contienen plantillas de bloques de función pre-establecidas con características básicas para control analógico, lógicas, E/S entre otras funciones básicas. Cada una de estas contiene parámetros que pueden ser personalizados por el usuario para elaborar el algoritmo de control correspondiente.

Adicionalmente a los bloques de función, se puede utilizar diagramas de función secuencial (SFC) para construir algoritmos de control. (Véase figura 2.22)

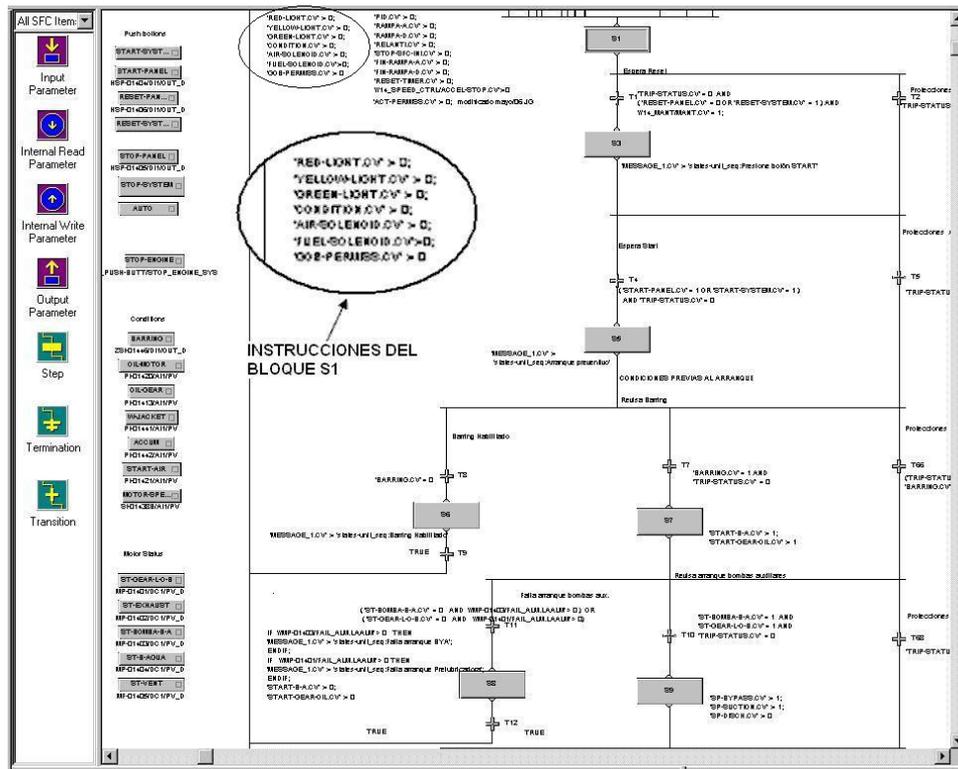


Figura 2.22. Diagramas de función secuenciales

2.2.2.1.4. Administrador de usuario.

Permite especificar niveles de acceso para grupos o individuos. Se define los roles que el usuario puede tener (administrador, operador, ingeniero, y otros), privilegios típicos y el rango de control requerido para cada rol.

2.2.2.1.5. Administrador de base de datos.

Permite al usuario con los privilegios de administrador necesarios ejecutar tareas de mantenimiento de la base de datos tales como crearlas, borrarlas, copiarlas y sacar una reserva de ellas.

2.2.2.1.6. FlexLock

Esta aplicación crea escritorios duales en una misma estación de trabajo para proveer a ambos un ambiente de operación segura y un ambiente de ingeniería abierto ampliamente.

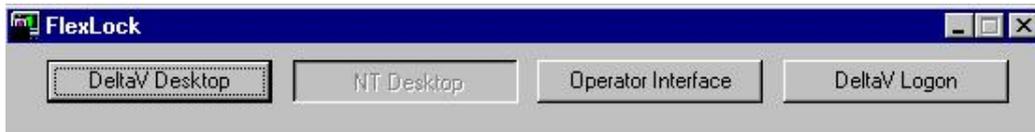


Figura 2.23. FlexLock

Los escritorios disponibles son:

- Escritorio NT, cuyo acceso a las aplicaciones y recursos Windows NT esta determinado por privilegios de usuario.
- Escritorio DeltaV limita al usuario a la aplicación interfaz de operador.

Un usuario que tiene privilegios de administrativo NT, administrativo DeltaV, o acceso DeltaV puede acceder a ambos escritorios, sino únicamente al escritorio DeltaV

2.3. Levantamiento del sistema de control actual

Con el sistema DeltaV se monitorea y manipula desde la sala de control (figura F8, Anexo F) las variables de proceso de toda la estación, brindando así información del desempeño y la seguridad de las diferentes unidades de bombeo.

Las estaciones de bombeo son operadas mediante un lazo principal de control selector entre los PI respectivos de las presiones de succión y descarga (Véase figura 2.24), que de acuerdo a los requerimientos del operador regula la velocidad de los motores de las unidades en un rango de 670rpm – 1050rpm.

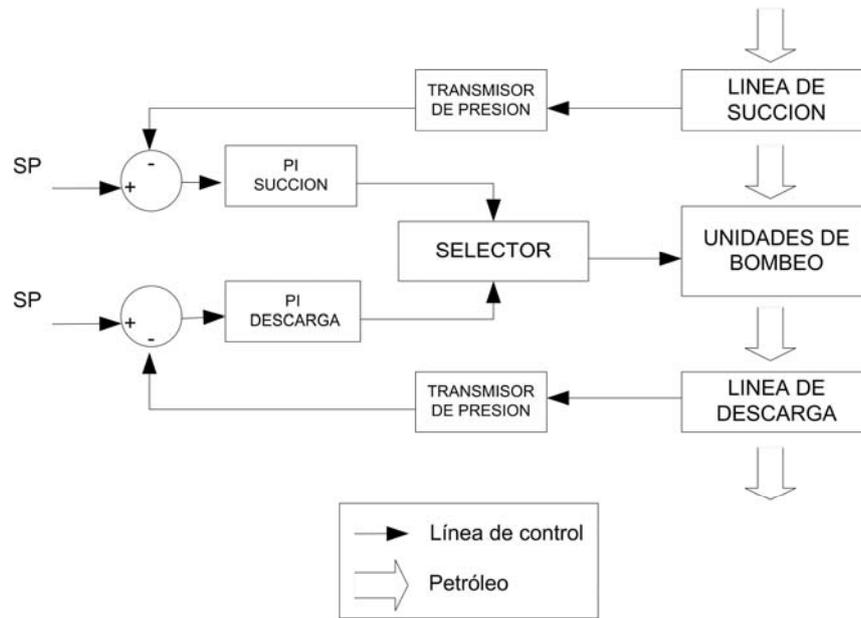


Figura 2.24. Diagrama de bloque del sistema de control

2.3.1. Control de la Estación

En la figura 2.25 se muestra la pantalla de control principal donde se despliegan los valores de presión de succión y descarga de toda la estación, en la parte central la representación del control selector, en la parte superior derecha el flujo, la velocidad de las unidades en RPM, en la parte inferior cinco bloques de alarma que indican si hay fallas en cualquier dispositivo (se van encendiendo con color rojo, de acuerdo al orden de aparición de la falla de izquierda a derecha y se desactiva cuando se corrigió el desperfecto y el operador desactiva dicha alarma) y el modo de operación de la estación.

Las escalas de color amarillo corresponden al valor de la presión en unidades de ingeniería, en tanto que las escalas azul claro corresponden al porcentaje de salida⁶ de los lazos PI tanto de succión como de descarga. El rango de trabajo de los motores es 950rpm – 1030rpm cuyo porcentaje de salida es 73.7% – 94.7% respectivamente.

⁶ Debido a que se emplean diferentes escalas en el proceso, el porcentaje de salida es el estándar para la conversión de una escala a otra.

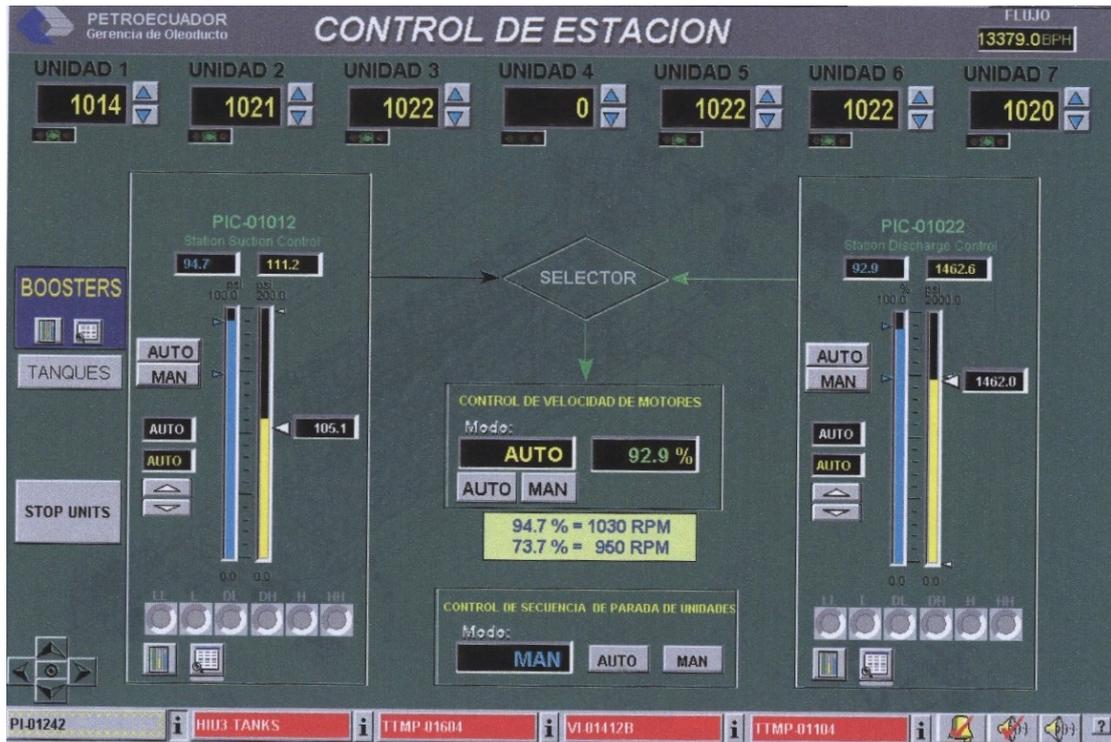


Figura 2.25. Control de Estación

2.3.1.1. **Control Selector** (figura 2.26) Las dos salidas (porcentaje de salida de succión y descarga) son comparadas (XY), y la más baja es empleada para regular las velocidades de todas las unidades, siempre y cuando el modo de control este en automático.

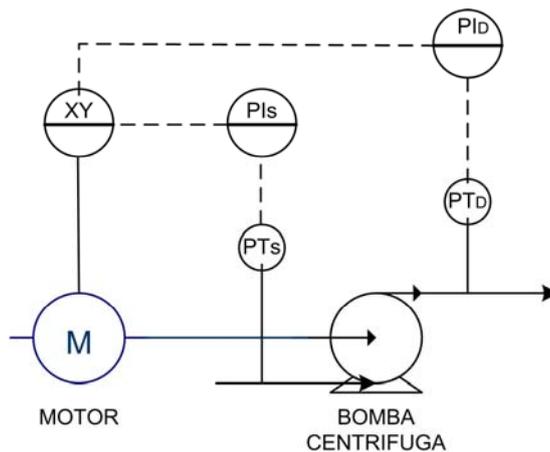


Figura 2.26. Control Selectivo

El *control de la presión de succión es directo*, a mayor presión mayor velocidad de bombeo. El *control de la presión de descarga es inverso*, a mayor presión de descarga se reduce la velocidad de bombeo.

El control de la estación se efectúa en condiciones de funcionamiento normales, con el controlador de la presión de descarga (PI_D) y cuando, por cualquier desperfecto, la presión de succión baja del límite inferior de seguridad entra en funcionamiento su controlador.

2.3.2. Unidades de bombeo

A continuación se detalla el lazo de control secundario (figura 2.27) que se establece en las unidades de bombeo (figura F9, Anexo F) donde se controla el arranque, la velocidad de operación y parada de estas dependiendo directamente de las condiciones de presión de succión y descarga.

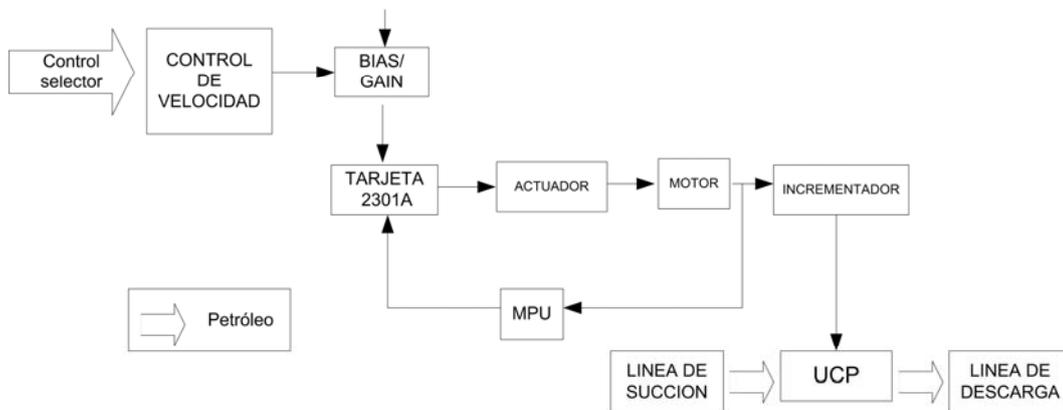


Figura 2.27. Lazo de control secundario

2.3.2.1. Módulo de control de velocidad.

Este módulo controla la secuencia del motor mostrada en la figura 2.28

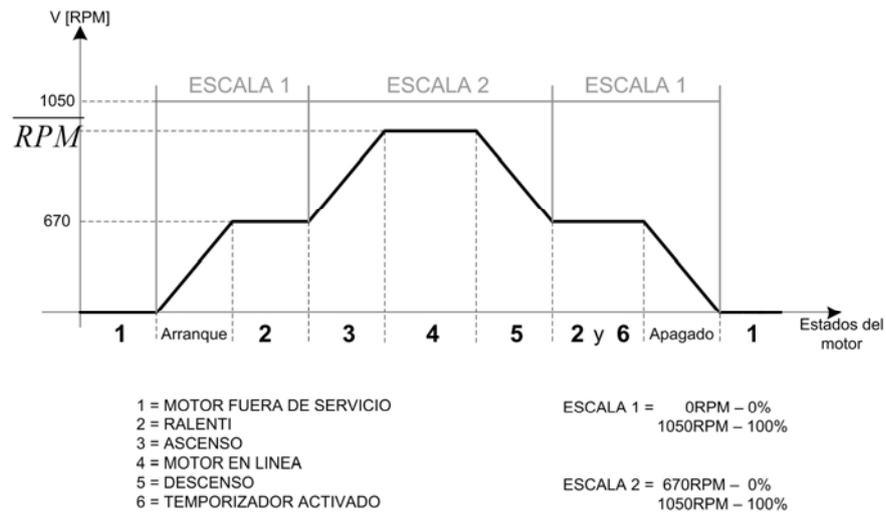


Figura 2.28 Secuencia del motor ALCO en la unidad de bombeo

En la unidad que va a entrar en funcionamiento, primeramente se realiza un arranque preventivo (condiciones necesarias como son: verificación de alarmas, temperaturas, presiones en los diferentes dispositivos, apertura de las válvulas de combustible y aire. Alineamiento de arranque de las válvulas de succión (abierta), descarga (cerrada) y bypass (abierta)). En la figura 2.29 se muestra esta condición de arranque, el color rojo significa abierto y el color verde cerrado.

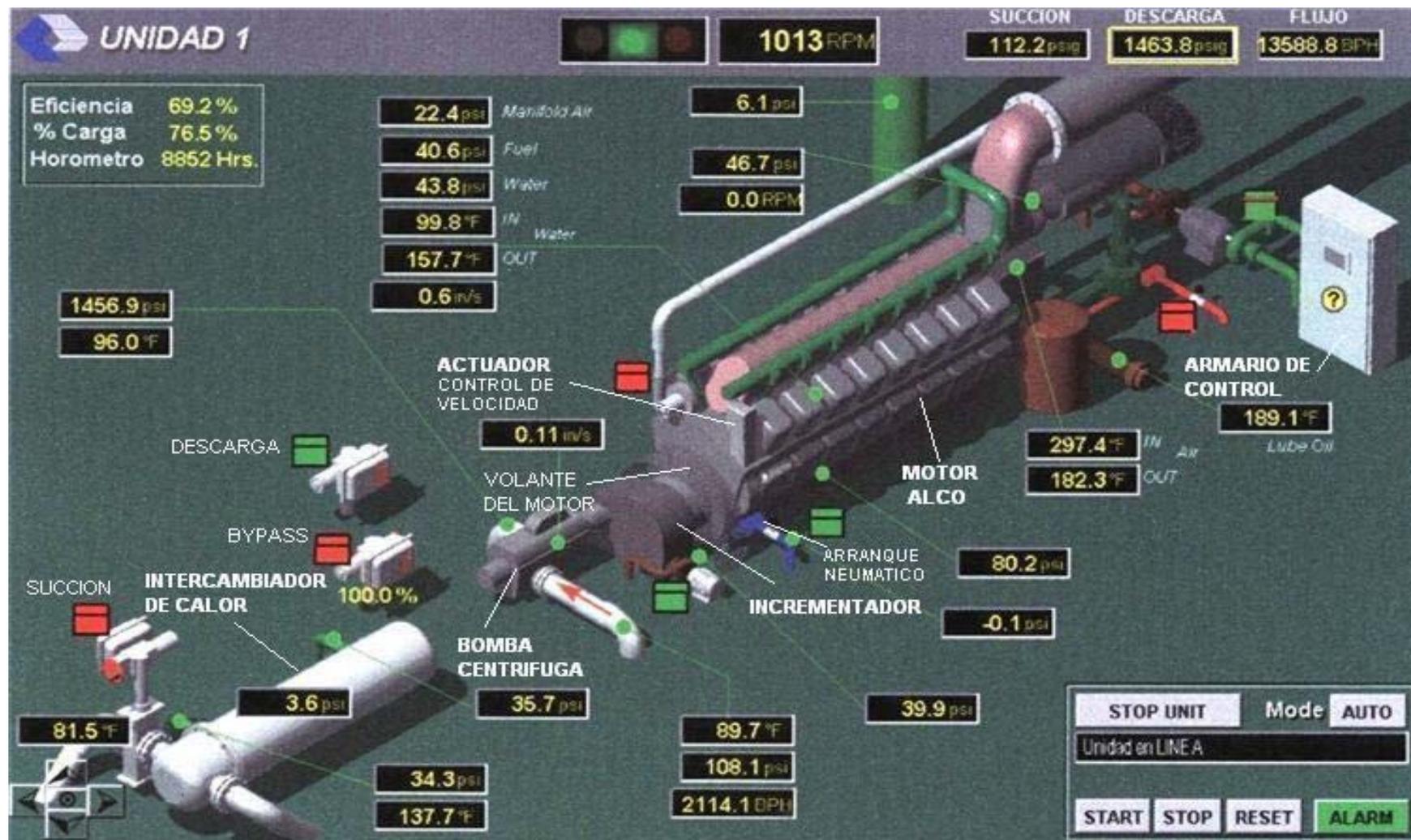


Figura 2.29 Unidad de bombeo

Luego en la sala de máquinas, el operador acciona el paso de aire al motor de arranque neumático. Cuando el motor ALCO alcanza la velocidad de vacío o ralentí de 670rpm (en un máximo de 3 min.), se activa el horómetro de puesta en línea, que es de suma importancia para control de tiempo y mantenimiento.

Desde la sala de control se acciona el control automático de velocidad⁷ de los motores ALCO en el sistema DeltaV que administra la *ESCALA2* desde los 670RPM (0% corriente 4mA) hasta 1050 RPM (100% corriente 20mA); con ello la unidad se encuentra en línea en el sistema.

2.3.2.2. BIAS/GAIN (BG)⁸

Ganancia o perturbación externa que puede variar en un rango de $\pm 5\%$ del setpoint de la máquina. Se utiliza para compensar el desgaste mecánico de los motores. (Figura E2, Anexo E)

2.3.2.3. Tarjeta 2301A.

Controla la secuencia del motor ALCO mostrada en la figura 2.28. Está ubicada en el armario de control (Véase figura F10, Anexo F). Recibe la señal de frecuencia (PV), proporcional a la velocidad del motor, generada por el MPU_{X1} y mediante el convertidor frecuencia-voltaje produce una señal de voltaje DC; esta es comparada con la velocidad de referencia (SP) enviada por el controlador M5PLUS (señal 4 – 20mA).

Con esta señal de error (SP – PV) la 2301A realiza un control PID directo cuya salida es transmitida al actuador.

⁷ Véase Anexo E

⁸ Véase Anexo D, funciones de CONTROL ANALÓGICO

2.3.2.4. Actuador

Se encuentra ubicada sobre el motor de cada unidad (Véase figura F11, Anexo F). Recibe la señal de control 0-200mA de la tarjeta 2301A con la que regula el paso de combustible hasta que la velocidad del motor ALCO y la velocidad de referencia sean iguales.

2.3.2.5. Motores ALCO

La figura 2.29 muestra al motor ALCO empleado en todas las unidades de bombeo. Es modelo 251-F de 16 cilindros de una capacidad operativa de 2.500HP y 1.050 RPM.

En la parte superior izquierda de la figura 2.29 se muestra el horómetro que contabiliza el tiempo de funcionamiento del motor. Se realiza mantenimiento cada 16000 horas

2.3.2.6. Incrementador.

Sistema de engranajes que se lo puede definir como un transmisor mecánico de velocidad. Se encuentra entre el eje de rotación de los motores ALCO (impulsor) y el eje de la bomba centrífuga (impulsado). Este sistema está presente en todas las unidades de bombeo. La relación lineal entrada/salida del incrementador es 1/3.64 en un rango de potencia de 2800Hp.

2.3.2.7. Bomba centrífuga (UCP)

A esta van conectadas la línea de succión y descarga. (Véase figura F12, Anexo F)

CAPITULO 3

DISEÑO DEL CONTROL DIFUSO

3.1. DeltaV Fuzzy.

Actualmente el SOTE emplea controladores PID para el proceso de bombeo. Pero existe otra alternativa, el DeltaV Fuzzy, que ofrece un control más robusto y fácil de implementar. El algoritmo patentado proporciona un desempeño superior sobre el control PID tradicional. Pruebas realizadas por el fabricante muestran un mejoramiento en el desempeño de los lazos de 30 – 40%.

DeltaV Fuzzy a través de su bloque de función **FLC** provee respuestas más rápidas y herméticas, minimiza al mismo tiempo la presencia de sobre-impulso, por tanto es apto para el lazo de control de las estaciones de bombeo del SOTE que experimentan frecuentes *cambios del setpoint* o perturbaciones de carga.

El FLC también supera al PID en la tolerancia de señales de ruido y respuestas no-lineales del proceso tales como cambio de la densidad del crudo bombeado, cambios repentinos en el número de unidades de bombeo en línea; elimina el comportamiento oscilatorio incrementando la estabilidad de los lazos.

Se obtiene un control más flexible, que permite mantener operando a la estación en un punto óptimo de trabajo, evitando así la subutilización o la sobrecarga de las unidades de bombeo, y consecuentemente el deterioro innecesario de los equipos.

3.1.1. Bloque de función FLC

El FLC (figura 3.1) opera con reglas difusas y funciones de membresía predefinidas, además parámetros ajustables conocidos como *factores de escalamiento*. Traslada los valores absolutos¹ del lazo de control en valores difusos mediante el cálculo del grado de membresía del error (e) y la variación del error (Δe) escalados (fusificación); aplica las reglas difusas (inferencia) y, finalmente, retraslada los valores en un movimiento de control (defusificación).

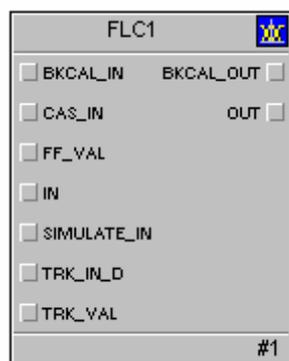


Figura 3.1. Bloque de función de control con lógica difusa (FLC)

La potencialidad de esta herramienta esta en la facilidad de los cálculos en el algoritmo de control, que hace de esta técnica más intuitiva reduciendo considerablemente el tiempo de ejecución de un ciclo de máquina.

3.1.1.1. Funciones de membresía

El FLC usa dos funciones de membresía para cada señal de entrada: error y cambio en el error, y la señal de salida es un cambio en la acción de control. La relación entre estas tres variables representa un controlador no-lineal.

¹ Valores, propios del proceso, que se generan de la expresión $PV - SP$; sin ningún tipo de escalamiento, ni ganancia

Las dos funciones de membresía son **negativo** y **positivo** (véase figura 3.2). El escalamiento de la membresía (S_e y $S\Delta_e$) del error y el cambio de error, respectivamente, determinan el grado de membresía.

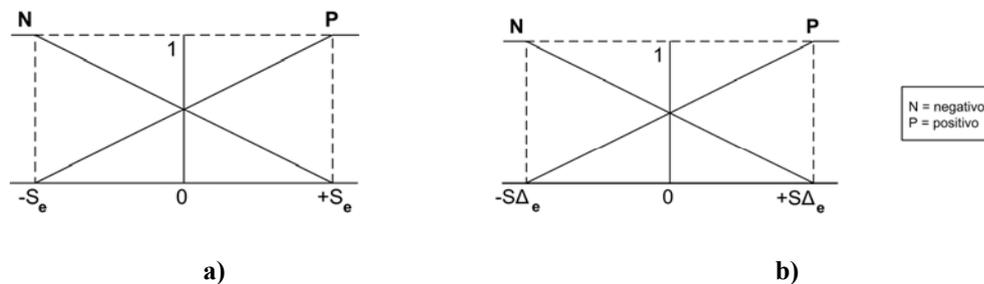


Figura 3.2. Funciones de membresía del a) error y b) cambio del error

Las funciones de membresía del cambio en la salida son del tipo **singleton** (figura 3.3), ellas representan los conjuntos difusos de la salida. El escalamiento de la membresía ($S\Delta_u$) determina la magnitud del cambio de la salida.

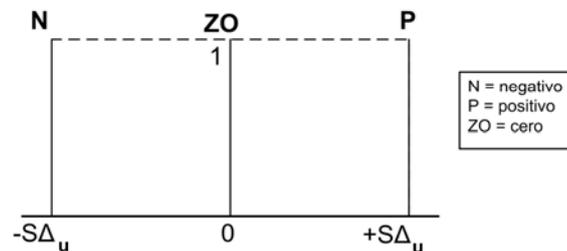


Figura 3.3. Funciones de membresía del cambio en la salida

3.1.1.2. Reglas difusas

El FLC trabaja con cuatro reglas difusas (Tabla 3.1) generando un control de acción inversa. La gráfica 3.4 muestra la acción del controlador ante una señal de error de proceso, la pendiente de dicha señal es el cambio en el error.

Tabla 3.1. Reglas difusas del FLC

N	Regla
1	Si error es N y cambio en error es N, haga cambio en la salida P
2	Si error es N y cambio en error es P, haga cambio en la salida ZO
3	Si error es P y cambio en error es N, haga cambio en la salida ZO
4	Si error es P y cambio en error es P, haga cambio en la salida N

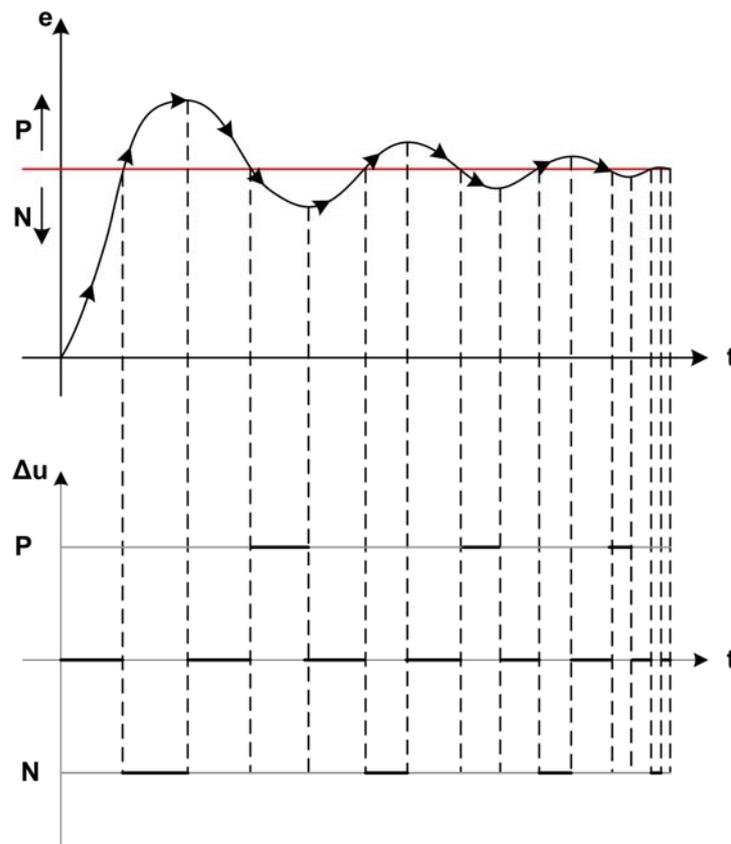


Figura 3.4. Variación de la salida en función de las entradas

Al tener un algoritmo de control sencillo, cuya acción final (Δu en la figura 3.4) es intuitiva e inmediata, el tiempo de ejecución de este controlador es menor.

3.1.1.3. Factores de escalamiento

Para un pequeño error de control y cambio de setpoint menores al valor nominal (ΔY_{sp}), los factores de escalamiento (S_e , $S_{\Delta e}$, $S_{\Delta u}$) del FLC están relacionados con las

constantes: proporcional (K_p) e integral (T_i) de un control PID, y se las determina de la siguiente forma:

$$S\Delta_e = \beta * \Delta Y_{sp} \quad (\text{Ec.3.1})$$

$$S\Delta_u = 2 * S\Delta_e * K_p \quad (\text{Ec.3.2})$$

$$S_e = T_i * S\Delta_e \quad (\text{Ec.3.3})$$

Donde:

S_e = error escalado

$S\Delta_e$ = cambio de error escalado

$S\Delta_u$ = cambio a la salida del controlar escalado

β = constante que varia entre 0.2 – 0.5. Se calcula

$$\beta = 0.2 + \frac{\text{tiempo_muerto}(DT)}{\text{tiempo_de_establecimiento}(TC)} \quad (\text{Ec.3.4})$$

El FLC cuanta con un tiempo de escaneo (Δt) y recalcula S_e

$$S_e = \frac{T_i * S\Delta_e}{\Delta t} \quad (\text{Ec.3.5})$$

Cuando el cambio de setpoint es mayor que el valor nominal ΔY_{sp} , estos factores de escalamiento son internamente incrementados por el bloque de función FLC. Este escalamiento interno es cambiado en la razón del cambio de setpoint actual con respecto al cambio nominal inicial; y es usado mientras el **error** de control (**PV – SP**) queda grande en relación al cambio de setpoint. Cuando el error de control ha retornado a valores pequeños y los mantiene así para un período de tiempo, los factores son regresados a los parámetros inicialmente calculados.

3.1.1.4. Relación Nolineal del FLC

Para regiones donde el error absoluto es mayor que el factor escalado del error o el cambio de error absoluto es mayor que el factor escalado del cambio de error, estos valores son ajustados al valor de escalamiento máximo respectivo como muestra la figura 3.5.

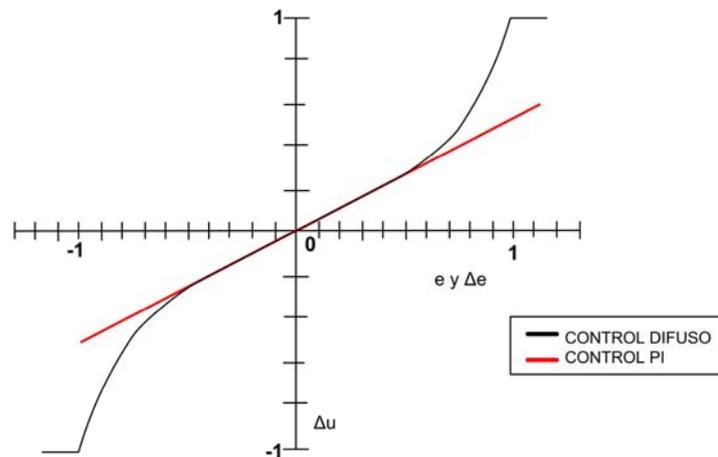


Figura 3.5. Relación nolineal del FLC

En la figura 3.5., se muestra la relación nolineal cuando el error es igual al cambio de error. Cuando el error y el cambio de error incrementan, el cambio en la salida de un controlador PI estándar incrementa linealmente. Para errores pequeños la ganancia del FLC es similar a la del PI.

Esta nolinealidad construida por este bloque de función reduce el sobre-impulso y el tiempo de establecimiento, alcanzando un control más ajustado en el lazo de proceso. Para anticipar un cambio rápido en el proceso con el FLC, se provee una acción derivativa en la vía de retroalimentación del lazo como se muestra en la figura 3.6

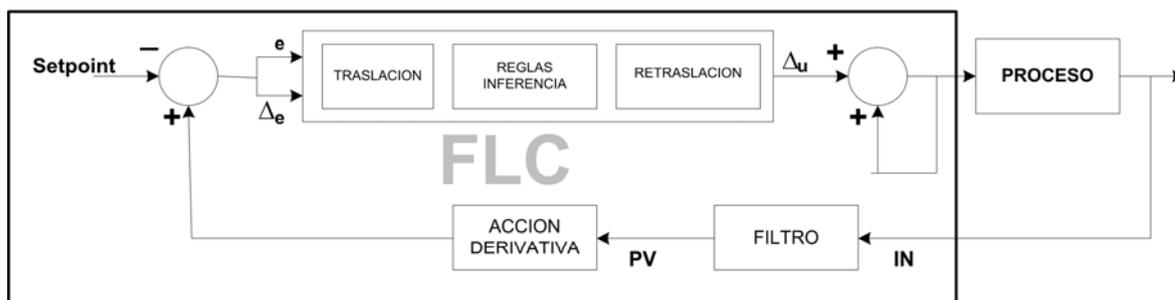


Figura 3.6. Diagrama interno del bloque de función FLC

3.2. Reemplazo de los controladores PID del lazo principal por controladores FLC.

Al estar implementado el bloque de función PID en el lazo principal, se lo reemplaza por un FLC, para ello se requiere

Las constantes del PID, cuyos valores ya definidos en el controlador de descarga de la Estación son:

$K_p =$	1
$T_i =$	10
$\beta =$	0,2

Con estas se determina, los factores de escalamiento (Tabla 3.2), a partir de las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 para posibles cambios de setpoint realizado por los operadores de la Estación, donde se considera además casos críticos como caídas de presión por agentes externos tales como la caída o disminución de una unidad de bombeo (Tabla 3.3).

Tabla 3.2 Factores de escalamiento para FLC en el lazo de control principal

Δsp	$S\Delta e$	S_e	$S\Delta u$
1	0,2	2,0	0,4
2	0,4	4,0	0,8
3	0,6	6,0	1,2
4	0,8	8,0	1,6
5	1,0	10,0	2,0
10	2,0	20,0	4,0

20	4,0	40,0	8,0
30	6,0	60,0	12,0
40	8,0	80,0	16,0
50	10,0	100,0	20,0
60	12,0	120,0	24,0
70	14,0	140,0	28,0
80	16,0	160,0	32,0
90	18,0	180,0	36,0
100	20,0	200,0	40,0

Tabla 3.3. Presión de descarga máxima versus unidades de bombeo en línea

# unidades de bombeo	Presión de descarga [RPM]
1	975
2	1000
3	1240
4	1290
5	1464
6	1506

Los valores de la tabla 3.3 están establecidos en el Manual de Operaciones del Oleoducto Transecuatoriano. El número de unidades de bombeo en línea influye directamente en la presión de la estación.

3.3. Reemplazo de la tarjeta 2301A por un FLC

3.3.1. Requerimientos de diseño.

De igual manera se requiere las constantes proporcional e integral de la tarjeta 2301A. Al carecer de esta información se debe realizar para la sintonización inicial del FLC las pruebas correspondientes con el bloque de función PID y además emplear la herramienta del sistema *DeltaV Tune* para la auto-sintonización de dicho controlador.

Debido a que esta tarjeta realiza control permanente en un lazo secundario se debe considerar la secuencia del motor figura 2.28. De donde se obtiene el diagrama y el mapa de estados mostrado en figura 3.7 y la tabla 3.4, respectivamente.

La 2301A empieza a controlar cuando la velocidad del ALCO es 530RPM, debido a que algunos motores no alcanzan el ralenti (670RPM). **Se debe considerar también que el bloque de función FLC, tiene como salida inicial por defecto 100%** por tanto se la debe forzar a un valor determinado para que tenga un rango de trabajo operable.

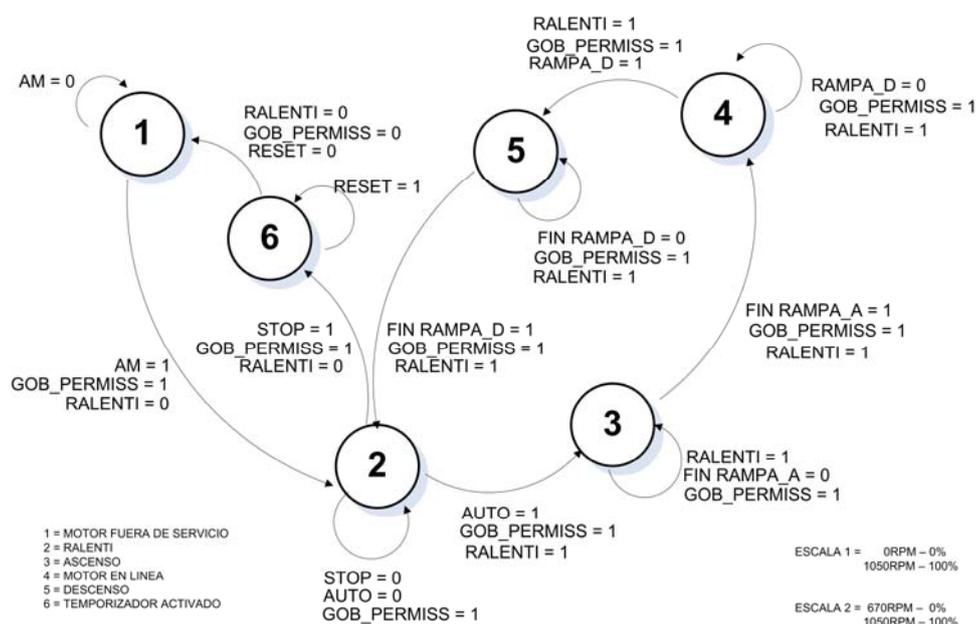


Figura 3.7. Diagrama de estados de la secuencia del motor

Tabla 3.4. Mapa de estados de la secuencia del motor

	GOB_			FIN		FIN		ESC.	ESC.	SALIDA
AM	PERMISS	RALENTI	AUTO	RAMP A	RAMP D	RAMP D	RESET	1	2	0RPM
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
0	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0
0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0
0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0

AM. Accionamiento que da el operador para que el motor de arranque neumático entre en funcionamiento aplicando sobre el volante del motor ALCO (véase figura 2.29) una presión de 125lbf para vencer la inercia de reposo.

GOB_PERMISS. Señal que gobierna el control de velocidad, activa un contacto en la tarjeta 2301A para que esta entre en funcionamiento.

RALENTI. Velocidad del motor igual a 670RPM.

AUTO. Modo de operación de la unidad de bombeo, se encuentra en la pantalla de control de cada unidad. Véase la figura 2.27, parte inferior derecha.

FIN RAMPA_A. Señal que indica que la rampa de ascenso ha concluido, por tanto la máquina alcanza la velocidad promedio.

RAMPA_D. Señal que indica que el inicio de la rampa de descenso desde la velocidad actual a 670RPM.

FIN RAMPA_D. Señal que indica que la rampa de descenso ha concluido, la máquina está en 670RPM.

Las tres últimas señales son parte del módulo de velocidad (véase figura E2).

RESET. Cuando la velocidad está en ralentí, un contador de 3 minutos comienza. El operador puede reiniciarlo mediante esta señal si requiere realizar otra acción. Existen un contador más general de 15 minutos que controla al antes mencionado; si este alcanza su valor máximo la máquina se apaga automática, para evitar daños mecánicos, sin importar que el operador haya reiniciado el conteo de 3 minutos.

ESCALA 1. Como se muestra en la figura 3.7 es el rango de velocidad en el cual opera el motor

$$\begin{aligned} 0RPM &- 0\% - 4mA \\ 1050RPM &- 100\% - 20mA \end{aligned}$$

ESCALA 2. Es el rango de velocidad en el cual opera el motor cuando modo de control es AUTOMÁTICO. La salida que se maneja es la AO1 proveniente del módulo de control de velocidad de la figura E2.

$$\begin{aligned} 670RPM &- 0\% - 4mA \\ 1050RPM &- 100\% - 20mA \end{aligned}$$

SALIDA 0RPM. El motor está apagado.

3.3.2. Diseño del módulo de control.

Una vez establecidas todas las condiciones el módulo de control a diseñar se muestra en la figura 3.8.

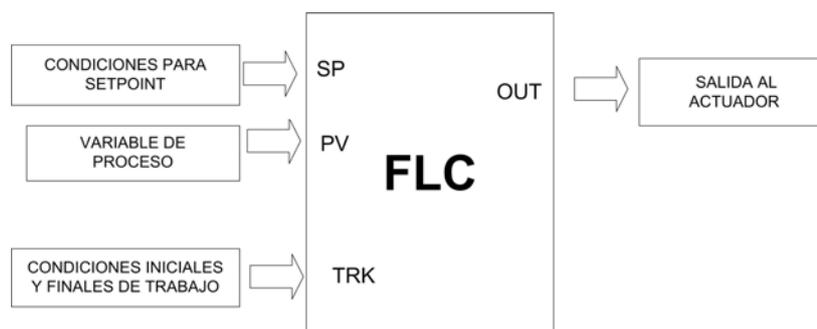


Figura 3.8. Diagrama de bloques del módulo a implementar

3.3.2.1. Condiciones para SETPOINT

- Si la velocidad es menor a ralenti (670RPM) o el modo de operación es MANUAL, el FLC debe mantener como punto de control 670 RPM.
- Si la velocidad es igual o mayor a ralenti (670RPM) y el modo de operación es AUTOMATICO, el punto de control es la señal AO1 proveniente del módulo de la figura E2, que maneja la ESCALA2 (670 – 1050RPM).
- Cuando el motor este el ralenti y se de la señal de parada de la unidad (STOP), el punto de control deberá ser 0RPM.

Programa SP

```
IF VELOCIDAD ≥ 670 AND AUTO = 1 THEN
  OUT := 11_SPEED_CONTROL/AO1
ELSE
  OUT := 670
ENDIF
```

```
IF STOP = 1 AND VELOCIDAD ≤ 670 THEN
  OUT := 0
ENDIF;
```

3.3.2.2. Variable de proceso.

- Es la señal que viene del Magnetic Pickup y actualmente se emplea para monitoreo de la velocidad.

3.3.2.3. Condiciones iniciales/finales de trabajo.

- Cuando la señal `GOB_PERMISS` esta desactivada todas las señales del módulo de control deben partir cero por tanto la salida al actuador debe ser cero.
- Para determinar el porcentaje de corriente inicial (*VALOR INICIAL en porcentaje del 0 – 100%, véase figura 3.11*) se debe considerar que en el arranque del motor (véase figura 3.9) se produce un pico que hace que su salida disminuya para poder igualar la variable de proceso al setpoint. Además que en el ascenso y descenso del motor entre el ralentí y la velocidad en línea el controlador debe tener porcentaje de corriente disponible para efectuar estas operaciones.

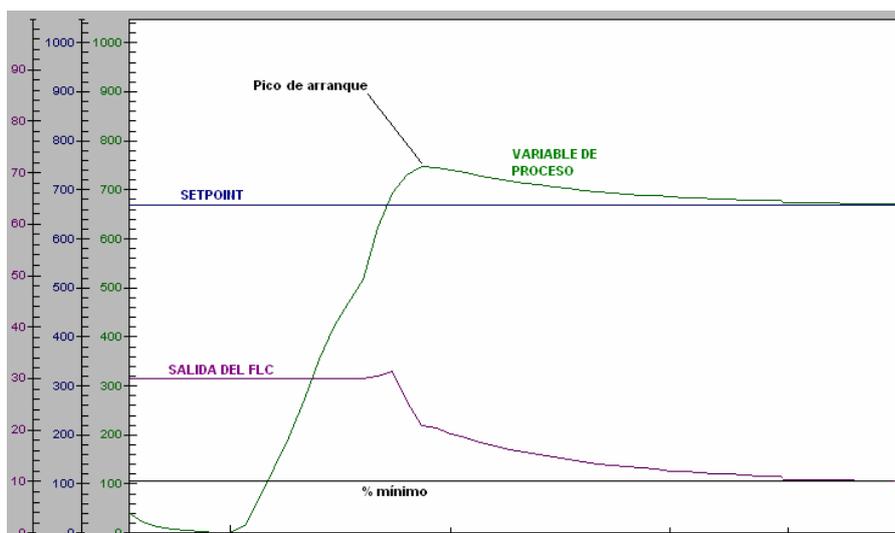


Figura 3.9. Arranque del motor

- Se establece que la velocidad mínima a la que la tarjeta 2301A comienza a controlar es 530RPM.
- Antes del arranque neumático de la unidad de bombeo, la salida del controlador debe ser 0%. Luego de este arranque se deber dar un valor de corriente para que el motor llegue al ralentí o al menos a 530RPM.

Para forzar la salida del controlador a un valor determinado, necesariamente se debe marcar la opción *Track Enable* (activar seguimiento) como se muestra en la figura 3.10, y trabajar con las entradas (véase figura 3.1):

- TRACK_IN_D, que ante la presencia de un valor discreto inicializa la función externa de seguimiento.
- TRACK_VAL, que es valor aplicado a la salida (OUT)

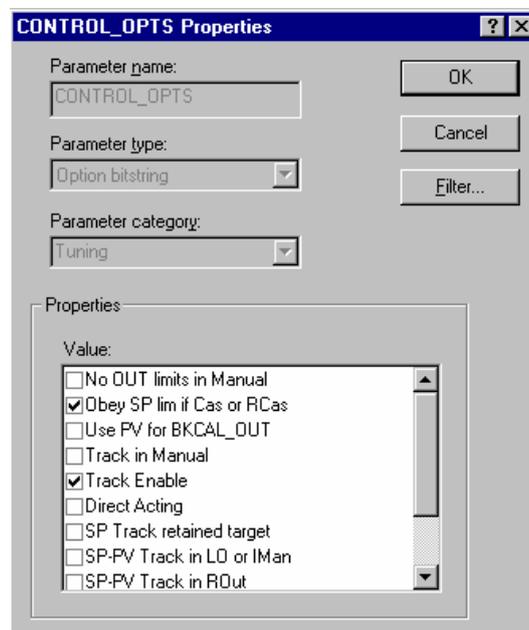


Figura 3.10. Propiedades del FLC

Programa COND_ON_OFF

```

IF GOB_PERMISS = 0 OR VELOCIDAD < 10 THEN
    TRACK_IN := 1
    TRACK_VAL := 0
ELSE
    IF VELOCIDAD < 530 AND THEN
        TRACK_IN := 1

```

```
TRACK_VALOR := VALOR INICIAL
ELSE
  TRACK_IN := 0
ENDIF;
ENDIF;
```

El modulo de control final, se muestra en la figura 3.11

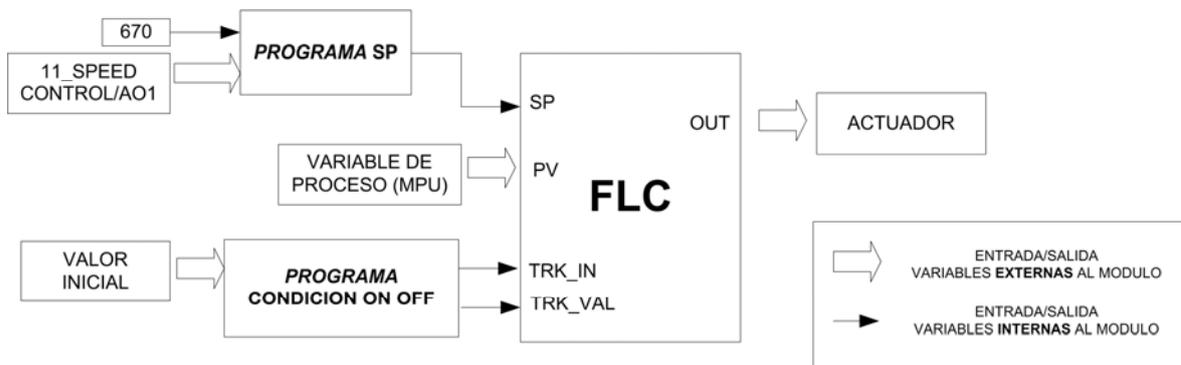


Figura 3.11. Módulo de control de velocidad a implementar

CAPITULO 4

SIMULACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

4.1. Reemplazo del PID por el FLC en el lazo de control principal.

Debido a la importancia del bloques de función PID (controlan presiones de succión y descarga de toda la Estación) se realizó las respectivas simulaciones en el programa MATLAB.

Para ello primero se determinó el modelo matemático de la planta, dando un cambio de setpoint de 2psi en la presión de descarga cuando la estación estaba trabajando con seis unidades de bombeo obteniendo como resultado la curva de la figura 4.1.

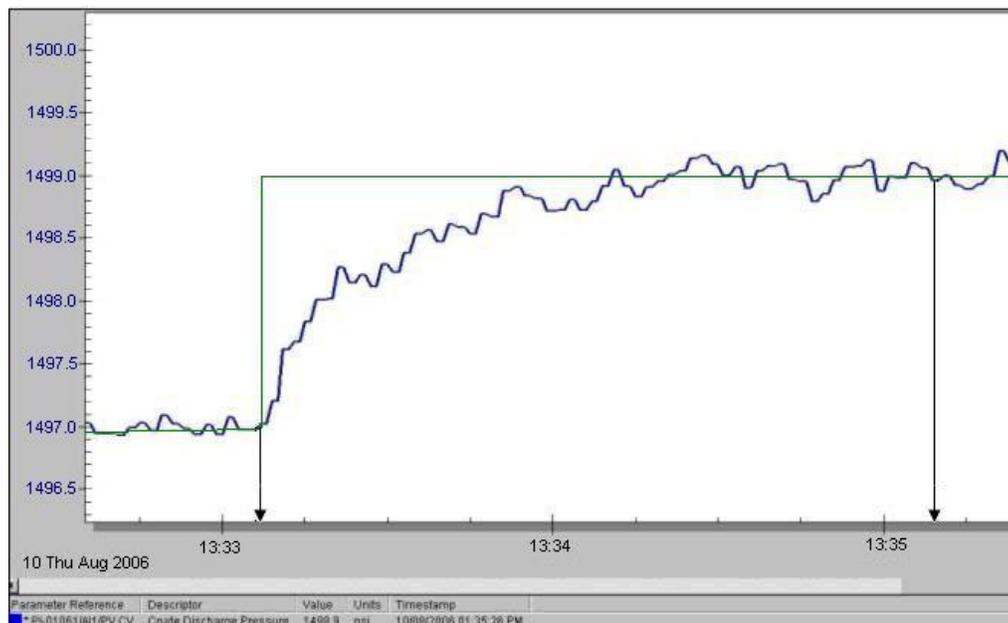


Figura 4.1. Curva de la planta, tomada en el Sistema DeltaV

Posteriormente, con la ayuda de MATLAB se desarrolló el resto del proceso.

4.1.1. Obtención del modelo matemático.

De la figura 4.1, se obtuvo la tabla 4.1 que muestra los datos en un período de tiempo de dos minutos aproximadamente (delimitado por las flechas).

Tabla 4.1. Muestreo de la curva de la curva de la planta

Tiempo [s]	Presión [psi]	Δ Presión [psi]
0,0	1496,98	0,00
2,0	1497,02	0,04
4,0	1497,61	0,63
6,0	1497,68	0,70
8,0	1497,83	0,85
10,0	1498,01	1,03
12,0	1498,20	1,22
14,0	1498,14	1,16
16,0	1498,21	1,23
18,0	1498,12	1,14
20,0	1498,29	1,31
22,0	1498,22	1,24
24,0	1498,39	1,41
26,0	1498,52	1,54
28,0	1498,51	1,53
30,0	1498,47	1,49
32,0	1498,61	1,63
34,0	1498,70	1,72
36,0	1498,68	1,70
38,0	1498,89	1,91
40,0	1498,91	1,93
42,0	1498,82	1,84
44,0	1498,80	1,82
46,0	1498,710	1,73
48,0	1498,720	1,74
50,0	1498,800	1,82
52,0	1498,720	1,74
54,0	1498,800	1,82
56,0	1498,910	1,93
58,0	1499,000	2,02
60,0	1498,910	1,93
62,0	1498,880	1,90
64,0	1498,900	1,92
66,0	1498,970	1,99
68,0	1499,010	2,03
70,0	1499,070	2,09
72,0	1499,130	2,15

74,0	1499,170	2,19
76,0	1499,110	2,13
78,0	1498,990	2,01
80,0	1499,080	2,10
82,0	1498,900	1,92
84,0	1499,030	2,05
86,0	1499,090	2,11
88,0	1498,980	2,00
90,0	1498,970	1,99
92,0	1498,860	1,88
94,0	1498,880	1,90
96,0	1498,970	1,99
98,0	1499,050	2,07
100,0	1499,080	2,10
102,0	1499,120	2,14
104,0	1498,890	1,91
106,0	1499,00	2,02
108,0	1499,10	2,12
110,0	1499,070	2,09
112,0	1498,980	2,00
114,0	1499,000	2,02

Estos datos son importados a MATLAB en donde se empleó la herramienta *System Identification Toolbox* (figura 4.2) para determinar el modelo aproximado más apropiado, mediante el método de filtros digitales auto regresivos (ARX).

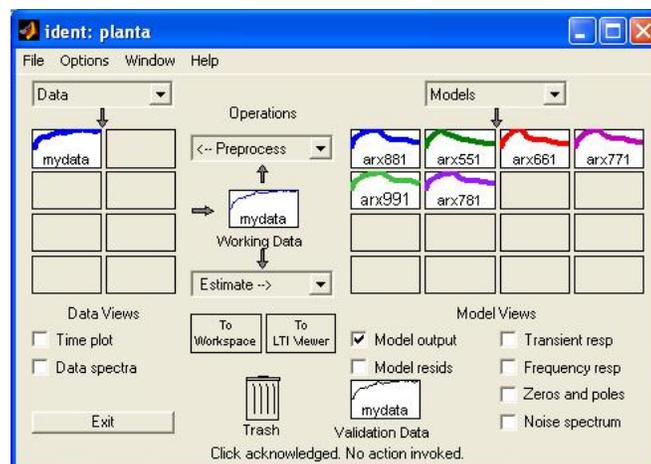


Figura 4.2. System Identification Toolbox

La figura 4.3a muestra todos los modelos de salida probados en escala descendente empezando por la mejor aproximación, de donde se escigió el modelo arx881 (los números son: grado del numerador, grado del denominador, tiempo muerto) que tiene una exactitud del 83.38% con respecto a la curva real del sistema (Figura 4.3b)

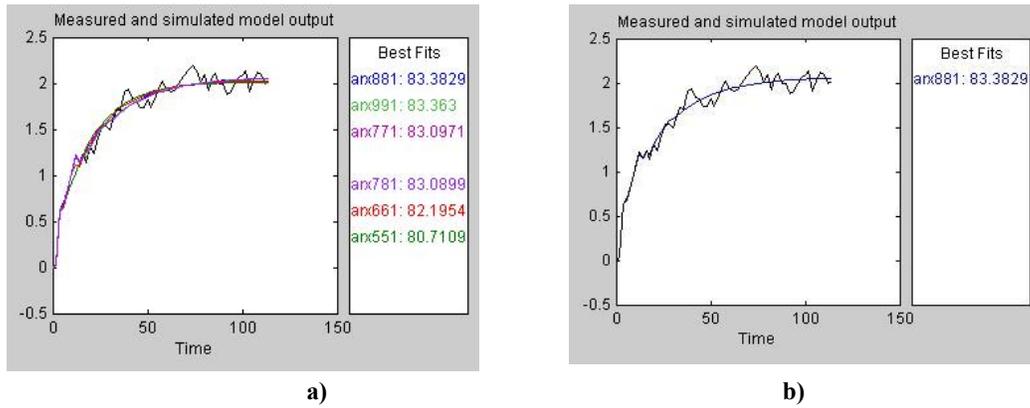


Figura 4.3. a) Aproximaciones de modelamiento, b) Modelamiento escogido

Se obtuvo la función de transferencia en lazo cerrado que se presenta a continuación

$$G_{LC}(z) = \frac{0.0274z^7 + 0.0274z^6 + 0.0274z^5 + 0.0274z^4 + 0.0274z^3 + 0.0274z^2 + 0.0274z + 0.0274}{z^8 - 0.588z^7 - 0.027z^6 - 0.0033z^5 + 0.057z^4 - 0.012z^3 - 0.1745z^2 + 0.1029z - 0.1438}$$

Aplicando la regla de diagramas de bloque de control para lazo cerrado, mostrado en la figura 4.4 se determino la función de transferencia en lazo abierto con la ecuación 4.2.

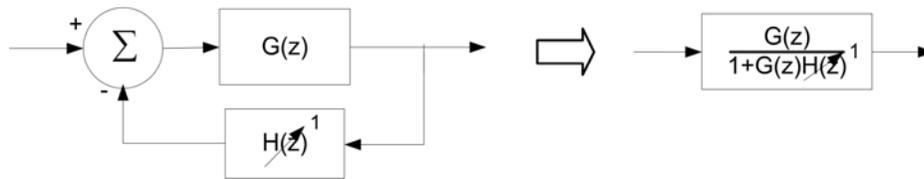


Figura 4.4. Regla lazo cerrado

$$G_{LC}(s) = \frac{G_{LA}(z)}{1 + G_{LA}(z)} \quad (\text{Ec. 4.1})$$

$$G_{LA}(z) = \frac{G_{LC}(z)}{1 - G_{LC}(z)} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

Donde:

GLC = Función de transferencia en lazo cerrado

GLA = Función de transferencia en lazo abierto

$$G_{LA}(z) = \frac{0.0274 z^{15} + 0.011 z^{14} + 0.011 z^{13} + 0.011 z^{12} + 0.012 z^{11} + 0.012 z^{10} + 0.007 z^9 + 0.0098 z^8}{z^{16} - 1.202 z^{15} + 0.28 z^{14} + 0.014 z^{13} + 0.11 z^{12} - 0.102 z^{11} - 0.35 z^{10} + 0.404 z^9 - 0.41 z^8} \\ - \frac{0.022 z^7 - 0.005 z^6 - 0.0047 z^5 - 0.00464 z^4 - 0.006 z^3 - 0.006 z^2 + 0.001 z + 0.004}{+ 0.185 z^7 - 0.007 z^6 + 0.02 z^5 + 0.016 z^4 - 0.026 z^3 + 0.066 z^2 - 0.0285 z + 0.024}$$

Con la función *zpk* se obtuvo la ecuación en función de ceros y polos.

$$G_{LA}(z) = \frac{0.0274 (z+1)(z+0.809)(z-0.9188)(z^2-1.196z+0.6516)(z^2+0.9607z+0.6419)}{(z+0.8136)(z+0.809)(z-0.9188)(z-1.002)(z^2-1.196+0.6516)(z^2-1.199z+0.6815)} \\ \frac{(z^2-0.24z+0.4625)(z^2+1.414z+1)(z^2-1.414z+1)(z^2+1)}{(z^2+0.9745z+0.6457)(z^2+0.96z+0.642)(z^2-0.24z+0.4625)(z^2-0.201z+0.4773)}$$

Simplificando:

$$G_{LA}(z) = \frac{0.0274 (z+1)(z^2+1.414z+1)(z^2-1.414z+1)(z^2+1)}{(z+0.8136)(z-1.002)(z^2-1.199z+0.6815)(z^2+0.9745+0.6457)(z^2-0.201z+0.4773)}$$

$$G_{LA}(z) = \frac{0.0274 z^7 + 0.0274 z^6 + 0.0274 z^5 + 0.0274 z^4 + 0.0274 z^3 + 0.0274 z^2 + 0.0274 z + 0.0274}{z^8 - 0.614 z^7 - 0.054 z^6 - 0.0306 z^5 + 0.0295 z^4 - 0.039 z^3 - 0.202 z^2 + 0.0754 z - 0.17}$$

Esta ecuación contiene al controlador PI y a la planta como se muestra en la figura 4.5, por tanto es necesario obtener $G_p(z)$ para realizar las simulaciones adecuadas.

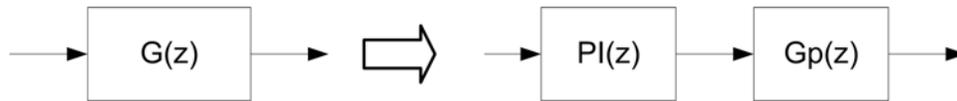


Figura 4.5. Función de la planta en lazo abierto

La función de transferencia de un controlador PI en tiempo continuo esta dada por la ecuación 4.3.

$$pi(s) = kp \left(1 + \frac{1}{Ti * s} \right) \quad (\text{Ec. 4.3})$$

Los parámetros del controlador PI en el sistema DeltaV son:

$$Kp = 1$$

$$Ti = 10s$$

Obteniendo así la correspondiente función de transferencia.

$$fpi(s) = \frac{s + 0.1}{s}$$

Mediante la función $d2c(fpi)$ se obtiene fpi en tiempo discreto

$$G_{pi}(z) = \frac{z - 0.8}{z + 1}$$

Finalmente, para obtener la ecuación de la planta se emplea la ecuación 4.4 que se obtiene de la figura 4.4

$$G_{LA}(z) = G_{planta}(z) * G_{PI}(z)$$

$$G_{planta}(z) = \frac{G_{LA}(z)}{G_{PI}(z)} \quad (\text{Ec. 4.4})$$

$$G_{Planta}(z) = \frac{0.0274 z^8 + 1.657e - 005z^6 - 1.657e - 005z^2 - 0.0274}{z^9 - 1.414z^8 + 0.437z^7 + 0.0125z^6 + 0.054z^5 - 0.063z^4 - 0.17z^3 + 0.237z^2 - 0.23z + 0.137}$$

4.1.2. Construcción del controlador difuso en MATLAB

Con la herramienta *Fuzzy Logic Toolbox* se desarrolló el controlador expuesto en el capítulo anterior FLC para la simulación, que consta de dos entradas, una salida (figura 4.6) y cuyos factores de escalamiento determinados en la tabla 3.2 corresponden a un cambio de setpoint de 2psi.

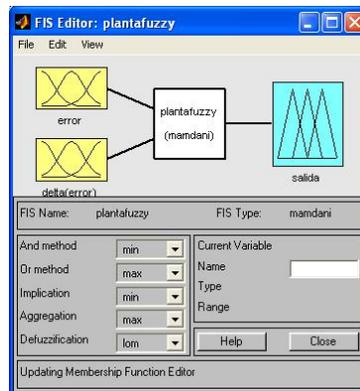
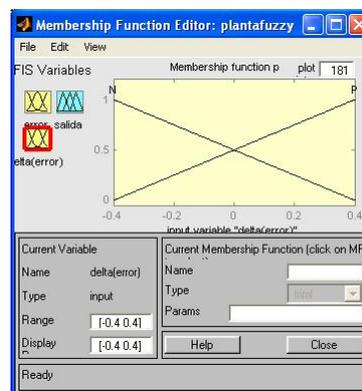
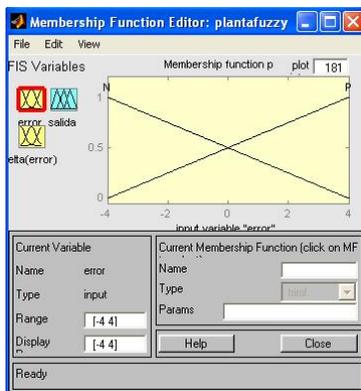


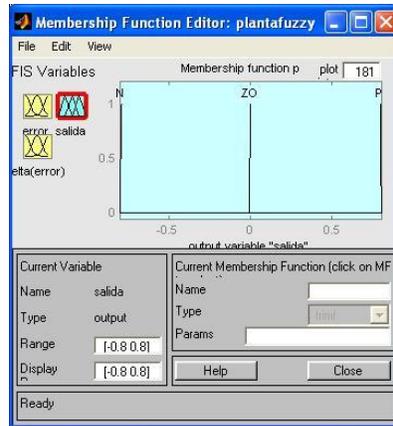
Figura 4.6. Fuzzy Logic Toolbox

Las funciones de membresía se muestran en la figura 4.7



a)

b)



c)

Figura 4.7. Funciones de membresía de a) error, b) variación de error y c) salida

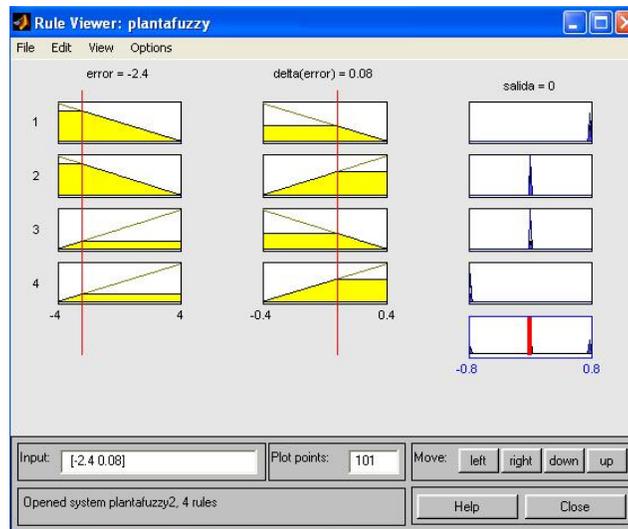


Figura 4.8. Modo de operación del controlador

En la figura 4.8 se muestra el desempeño del controlador difuso. Que se detalla a continuación el ejemplo de la tabla 4.2.

FACTORES	
Se	4
SΔe	0,4
SΔu	0,8

VALORES DE MEMBRESIA PARA LAS ENTRADAS		
	P	N
e	0,2	0,8
Δe	0,6	0,4

VALORES DE ENTRADA	
E	-2,4
Δe	0,08

INFERENCIA (Tabla 3.1)			
REGLA	μ_e	$\mu_{\Delta e}$	AND
1	0,8	0,4	0,4
2	0,8	0,6	0,6
3	0,2	0,4	0,2
4	0,2	0,6	0,2

Defusificación	0,6
Salida	0

Tabla. 4. 2. Ejemplo de la operación del FLC

4.1.3. Simulación.

Con la ayuda del SIMULINK de MATLAB se desplegó el proceso mostrado en la figura 4.9, donde se comparó el comportamiento de la planta bajo la acción de los controladores PI y difuso ante la excitación de una función escalón.

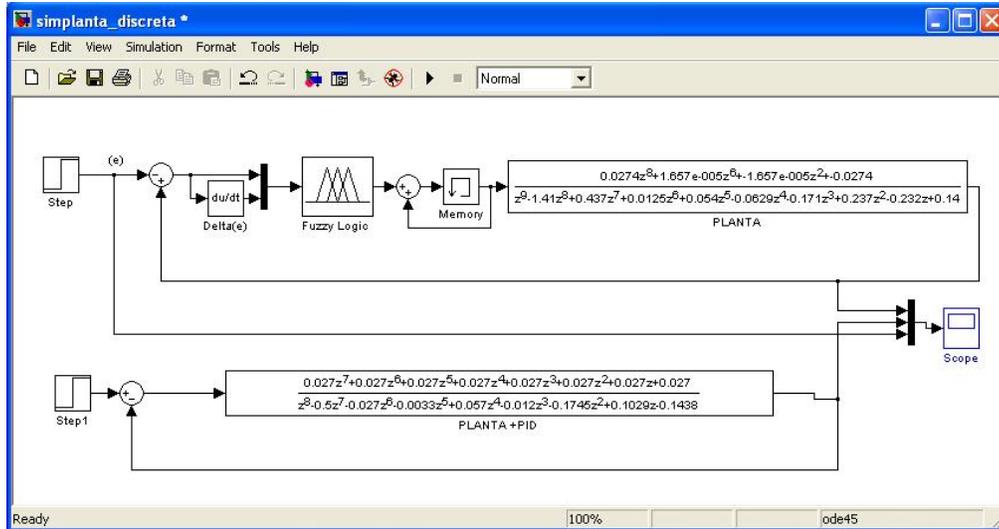


Figura 4.9. Simulación de la planta

En la figura 4.10 se aprecia claramente un tiempo de estabilización más rápido con el control difuso (señal de color amarillo). Presenta también un rizo constante de $\pm 0.2\text{RPM}$ debido a la falta de la acción derivativa y del filtro (véase figura 3.6), que no se han incluido debido a la falta de información de las mismas por parte del fabricante pero al hacerlo darán como resultado una señal superpuesta al setpoint a diferencia de la señal generada por el PID (color violeta) que presenta un error de estado estacionario. **En la práctica, esto contribuiría al bombeo de un mayor número de barriles de crudo.**

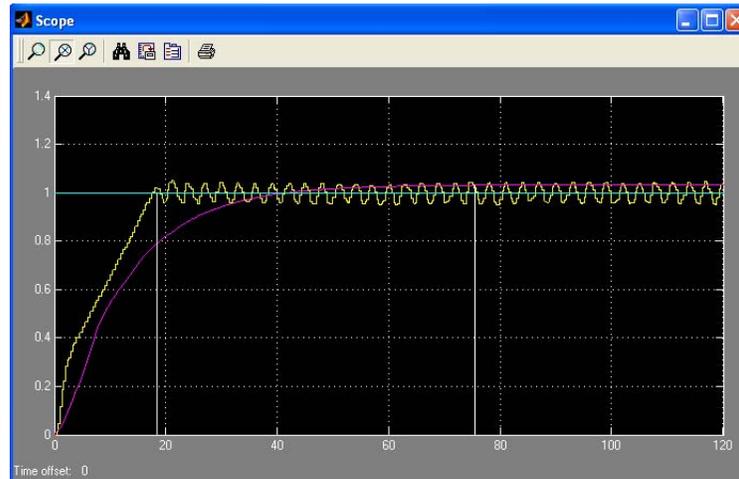


Figura 4.10. Control difuso versus PI

4.2. Reemplazo de la tarjeta 2301A por un FLC.

Una vez establecido el módulo de velocidad de la figura 3.12, se implementó el lazo de control de la figura 4.11 para la correspondiente simulación.

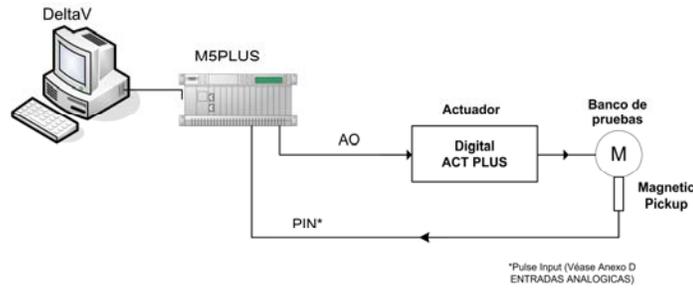


Figura 4.11. Lazo de simulación implementado

El banco de pruebas mostrado en la figura F13a del Anexo F, posee un motor que se encuentra en el armario, en la parte inferior, cuya velocidad es relativamente baja para poder comprobar el desempeño del actuador. Por tanto se incorporó un sistema de engranajes (figura F13b, Anexo F) para incrementar la velocidad.

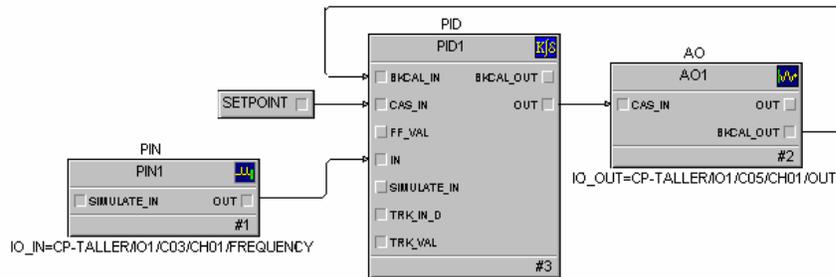


Figura 4.12. Módulo de pruebas con PID

Primeramente, en el sistema DeltaV, se realizó pruebas con el bloque de función PID y la respectiva auto-sintonización para el banco de pruebas con el módulo de la figura 4.12, dando como resultado las siguientes constantes:

Kp =	1,91
Ti =	3
B =	0,2

Que generó la tabla 4.3. Se recuerda que ΔY_{sp} es el cambio nominal de setpoint.

Tabla 4.3. Factores de escalamiento para FLC reemplazo de la tarjeta 2301A

Δsp	SΔe	Se	SΔu
1	0,2	0,6	0,8
2	0,4	1,2	1,5
3	0,6	1,8	2,3
4	0,8	2,4	3,1
5	1,0	3,0	3,8
10	2,0	6,0	7,6
20	4,0	12,0	15,3
30	6,0	18,0	22,9
40	8,0	24,0	30,6
50	10,0	30,0	38,2
60	12,0	36,0	45,8
70	14,0	42,0	53,5
80	16,0	48,0	61,1
90	18,0	54,0	68,8
100	20,0	60,0	76,4

Luego se desarrolló el módulo mostrado en la figura 4.13, que incluye el FLC en donde se representó el módulo de control de velocidad (Anexo E) cuya salida es el bloque de cálculo (CALC) denominado *11_SPEED_CONTROL*. La señal generada por el pickup es recogida por el bloque de función *Pulse Input* (PIN)

Es necesaria la presencia del bloque SCLR (escalador) debido a que el bloque que lo antecede proporciona 0 – 100% y se requiere tener un punto de control escalado de 670 – 1050RPM.

El modo de operación del bloque de función de control difuso es en *cascada* ya que el setpoint es calculado por otro bloque y llevado al FLC a través de la conexión *CAS_IN*.

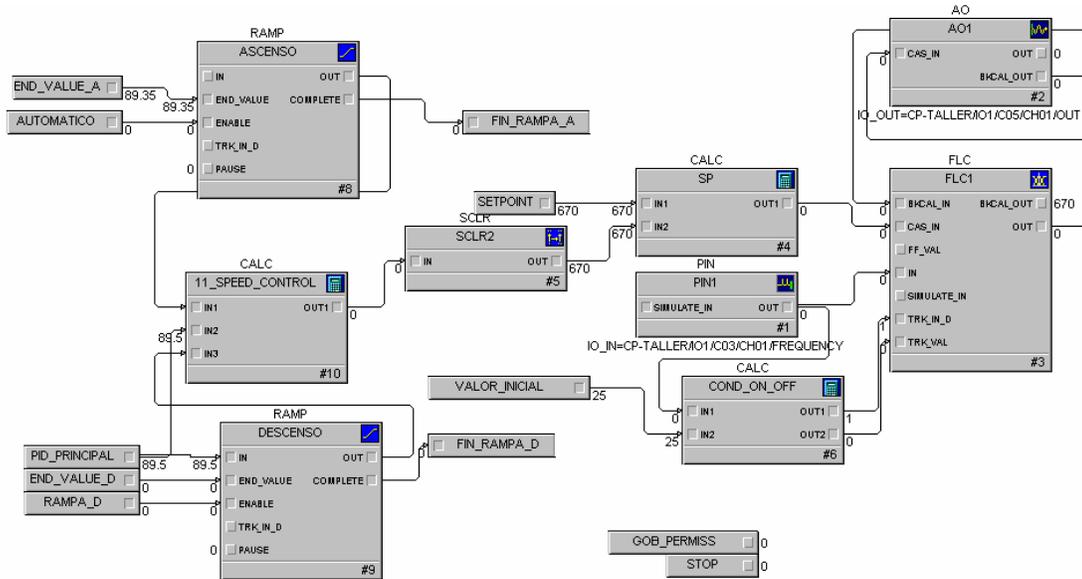


Figura 4.13. Módulo de simulación para reemplazo de la tarjeta 2301A

Las pruebas se las realizó con una sintonización inicial del controlador para un cambio de setpoint de 5RPM, mostrado en la tabla 4.2.

La figura 4.14 muestra el comportamiento del controlador en toda la secuencia del motor, véase figura 2.28. En el arranque, el motor llega aproximadamente a las 710 RPM (señal verde) lo que en el FLC genera una disminución del 10% en su salida (señal violeta) hasta que se igual al punto de control (señal azul). En las rampas de ascenso y descenso se emplea un 55% de la salida.

En la situación crítica en que el motor se quede en 530RPM el controlador emplea un 17% para llevarlo al ralenti. Por tanto, luego de algunas pruebas realizadas se determinó que la corriente de arranque debe ser 20%. Dando un margen de trabajo del 8% entre la velocidad en línea que en este caso, en particular fue 1005 RPM y la velocidad de trabajo máxima 1030 RPM.

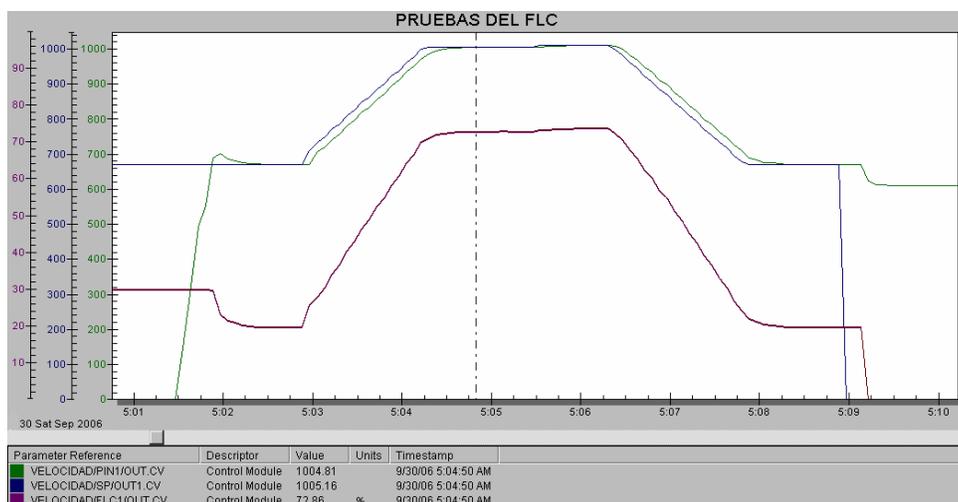
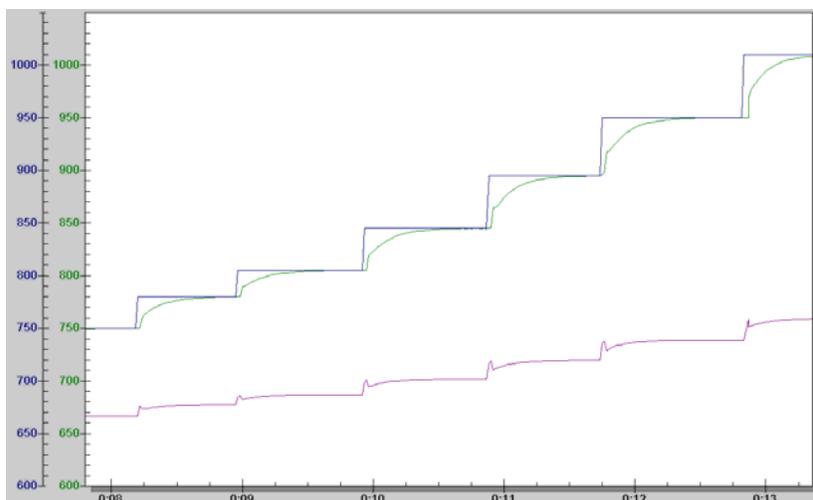
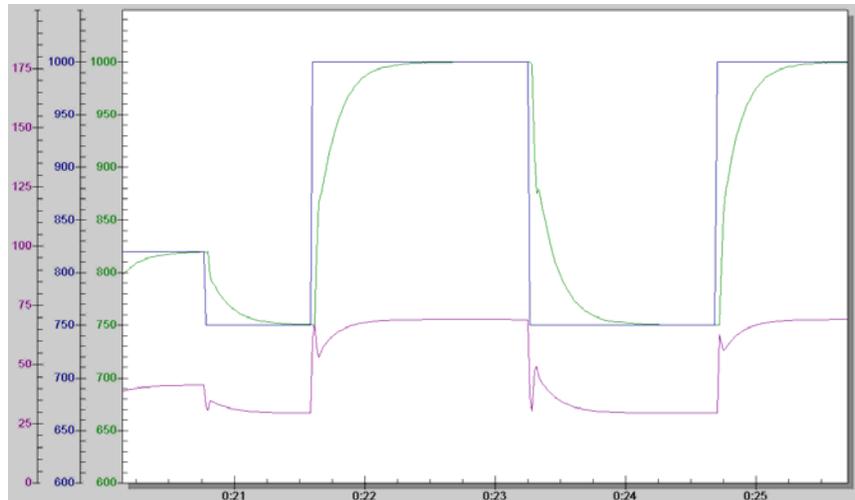


Figura 4.14. Prueba del FLC

También se realizaron pruebas del comportamiento del controlador ante diferentes cambio de setpoint (Véase figura 4.15) en donde se comprobó la estabilidad de dicho dispositivo.



a)



b)

Figura 4.15. Comportamiento del sistema ante a) cambios incrementales de setpoint de 5RPM y b) cambios de 250RPM

En cuanto a los tiempos de estabilización mostrados en la tabla 4.4, son los tomados en el banco de pruebas, **cuya inercia mecánica es diferente a la del motor ALCO**. Pero se los puede mejorar empleando la auto-sintonización con el *DeltaV Tune* en el que se determina las nuevas constantes de sintonización en función de la robustez y rapidez del sistema, se las evalúa y escoge de acuerdo a los requerimientos del usuario.

Tabla 4.4. Tiempos de estabilización del sistema en el banco de pruebas

ΔSP [RPM]	tiempo de estabilización [s]
5	25
10	30
15	35
20	39
25	42
30	45
35	48
40	50
50	50
55	46
60	51
250	47

CAPITULO 5

IMPLEMENTACION DEL CONTROLADOR DIFUSO EN LA ESTACION DE BOMBEO N°1. PRUEBAS Y RESULTADOS

5.1. Reemplazo del bloque de función PID en el lazo principal

5.1.1. Preliminares.

El procedimiento a seguir en esta implementación se describe a continuación:

1. Se requiere una PARA PLANIFICADA del bombeo en la Estación Lago Agrio.
Colaboración: Personal de Operaciones.
2. Reemplazar el bloque de función PID en el módulo de control (CP_01001/STATION_CTRL/PIC-01022) para la presión de descarga por el bloque de función FLC.
Colaboración: Personal de Instrumentación.
3. Sintonizar el controlador FLC, con las constantes ya determinadas. **Los parámetros actuales de: escalas, valores límites y alarmas del control PID se mantienen.**
Colaboración: Personal de Instrumentación.
4. Poner en marcha a la estación de manera secuencial hasta llegar a un número de seis unidades de bombeo. Se requiere aproximadamente cinco minutos para la puesta en línea de una nueva unidad de bombeo con el objetivo de verificar el comportamiento normal de la estación.

En caso de detectar un comportamiento errático o anormal se debe parar inmediatamente el bombeo de acuerdo a los procedimientos ya establecidos en la Estación, y se regresa al bloque de función PID

Colaboración: Personal de Operaciones.

5. Auto-sintonizar el controlador FLC con la herramienta *DeltaV Tune* del Sistema DeltaV, en valores de presión que este dentro del rango de trabajo. No trabajar en los valores límites.

Colaboración: Personal de Instrumentación.

5.1.1.1. Parámetros del bloque PID de descarga.

Los parámetros más importantes para la implementación del FLC, establecidos en el controlador PID de descarga (figura 5.1), se detallan en la tabla 5.1. La variable de proceso *DESCARGA – E* se la toma del transmisor de presión que está conectado a la línea de descarga, mostrado en el diagrama G3, Anexo G.

Los límites de salida del controlador fueron determinados por motivos de seguridad:

- El limite inferior (73,7% - 950RPM), para evitar el sobre calentamiento de la maquinaria.
- El límite superior (94,7% - 1030RPM), para la protección del oleoducto a una sobre-presión. Este valor está dado en función de la resistencia de los diferentes materiales componentes de la tubería.

Las alarmas LO_LIM y HI_LIM son alarmas preventivas, en tanto que LO_ LO_LIM y HI_ HI_LIM son alarmas de desactivación o parada de los equipos.

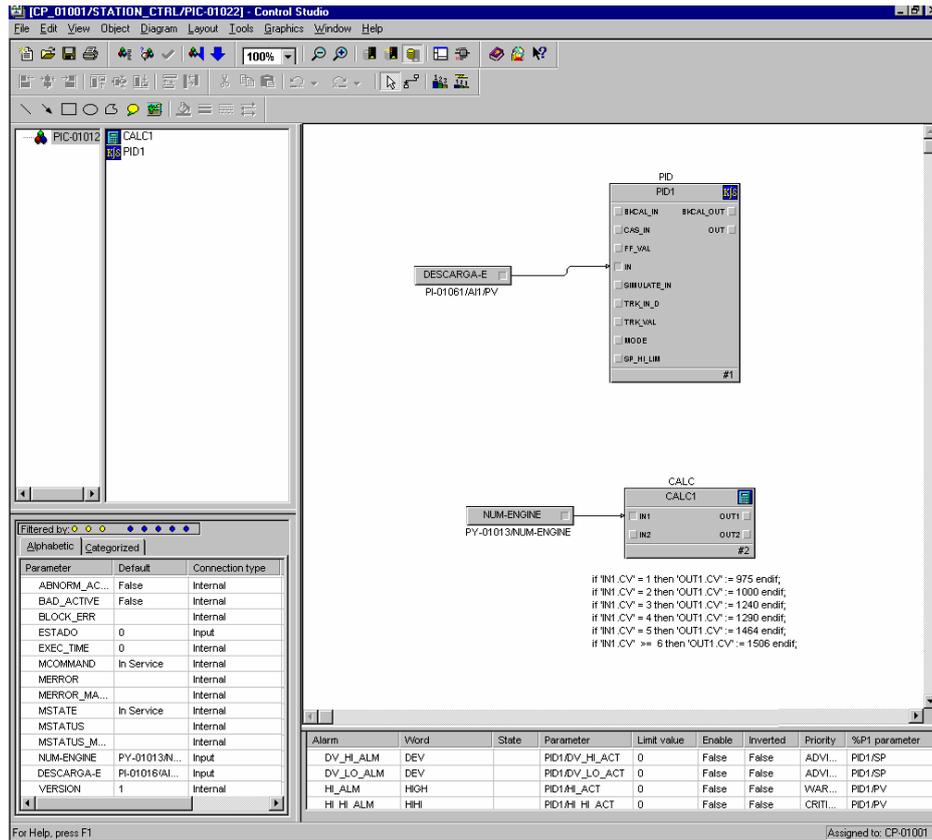


Figura.5.1. PID de descarga en el Sistema DeltaV

Tabla.5.1. Parámetros actuales del PID de descarga

PARAMETRO	VALOR
GAIN	1
HI_HI_LIM	1540
HI_LIM	1506
MODE	Auto
OUT_HI_LIM	94,736
OUT_LO_LIM	73,684
OUT_SCALE	0,0 to 100,0%
PV_SCALE	0,0 to 2000,0 psi
RATE	0
RESET	10
SP_HI_LIM	1506
SP_LO_LIM	0

STRUCTURE	PI action on error, D action on PV
CONTROL OPT	SP - PV track in Man
MODE	Auto

5.1.2. Programación del FLC y puesta en marcha.

Se implementó el controlador FLC mostrado en la figura 5.2.

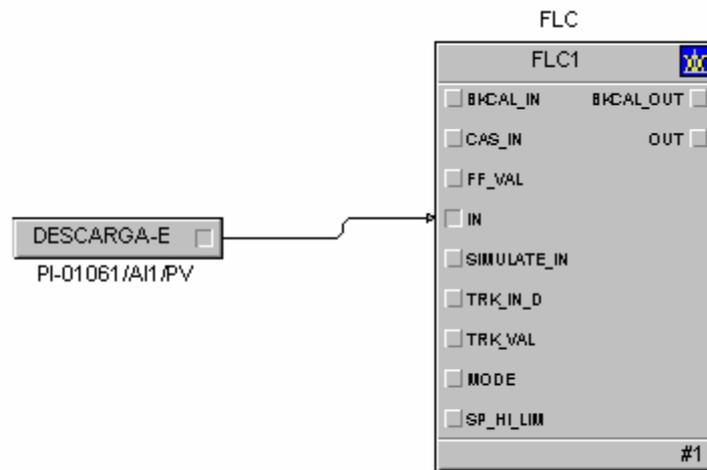


Figura.5.2. FLC implementado

Posteriormente, se lo sintonizó (factores de escalemiento) de acuerdo a la tabla 3.2 para un cambio nominal de setpoint de 5psi, y un tiempo de actualización de los datos (block scan rate) de 100ms.

Δsp	$S\Delta e$	Se	$S\Delta u$
	SF DELTERR	SF ERROR	SF OUTPUT
5	1,0	10,0	2,0

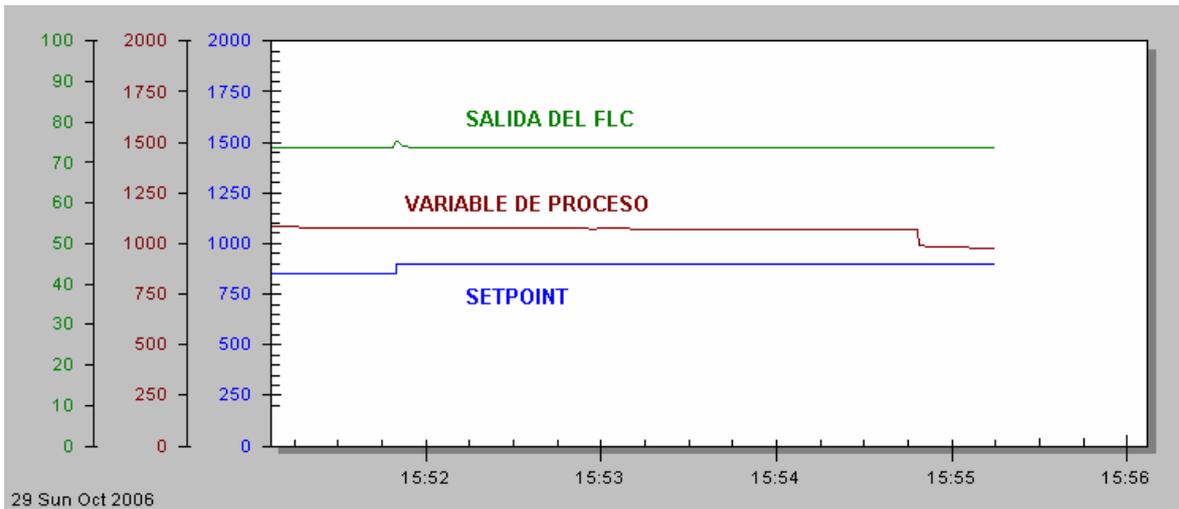
Los parámetros de control tales como: escalas, límites de operación del controlador, alarmas preventivas (HI_LIM) y de parada (HI_HI_LIM) se mantuvieron.

5.1.3. Pruebas

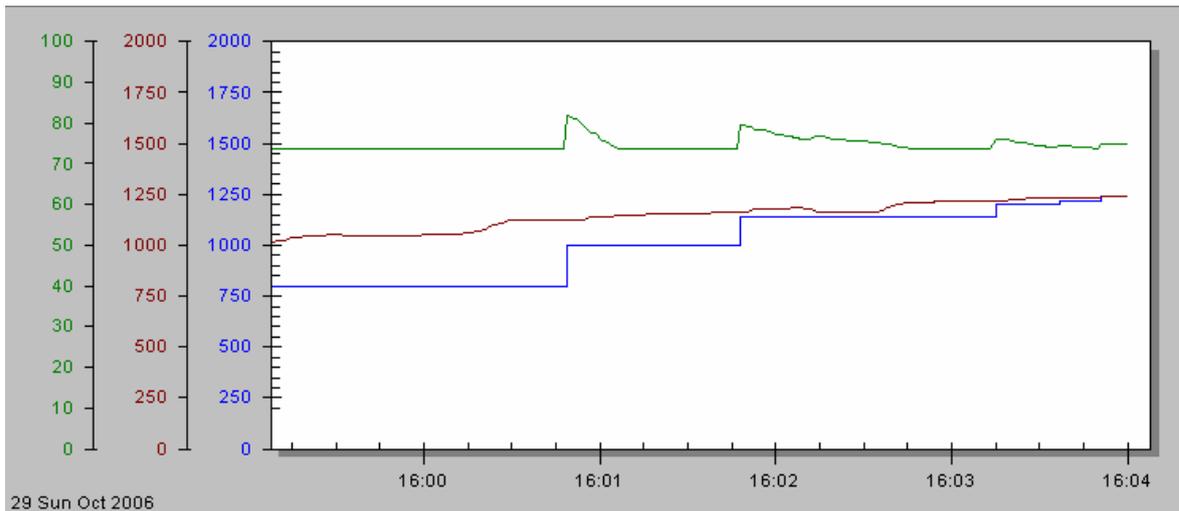
Se realizó la PARA DEL BOMBEO PLANIFICADA por un lapso de cuarenta y cinco minutos, tiempo en el cual se implementó dicho controlador en el módulo de control CP_01001/STATION_CTRL/PIC-01022. Una vez establecidas las condiciones de trabajo

se lo descargó en el controlador principal de la estación y se realizó las correspondientes actualizaciones en todo el sistema.

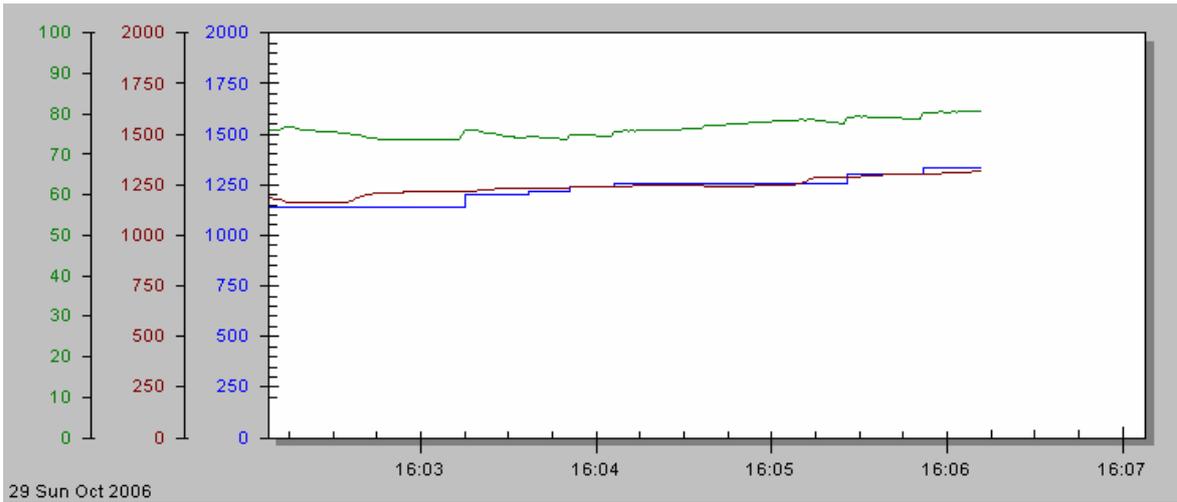
Se reinició el bombeo para verificar el comportamiento del FLC como se observa en la secuencia a continuación, desde que el sistema estaba con una unidad de bombeo (figura 5.3a) hasta cuando estaba con las seis unidades de bombeo (figura 5.3f)



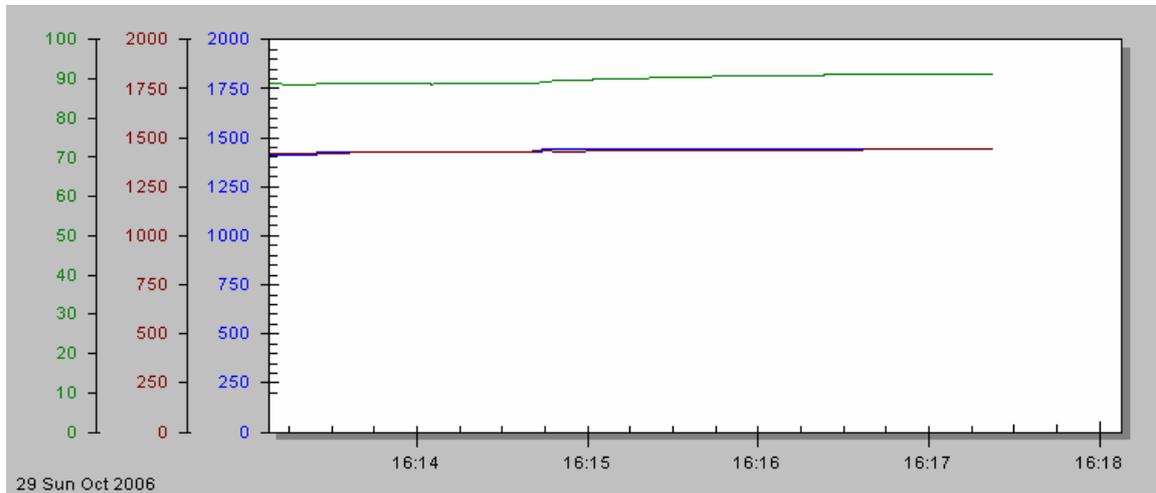
a)



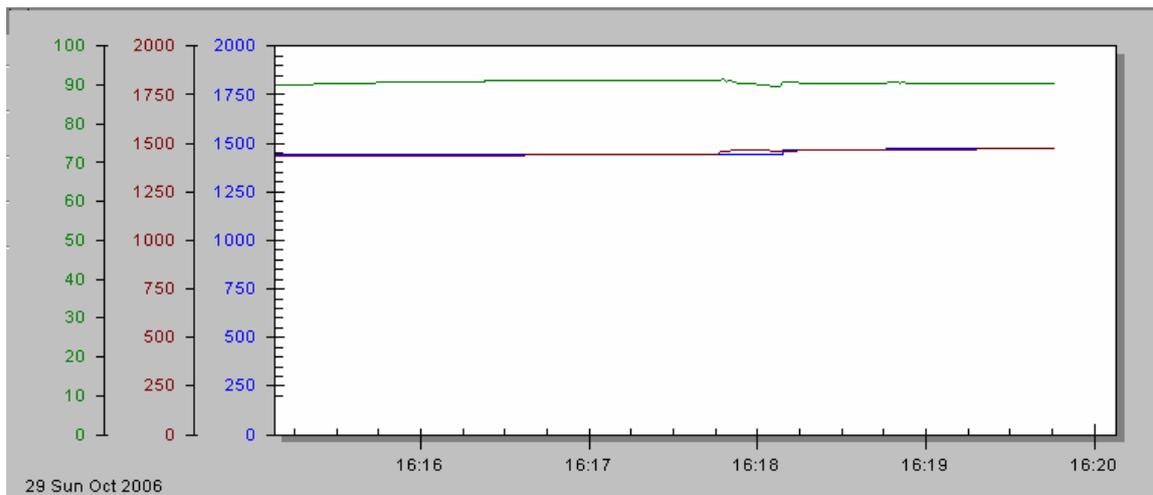
b)



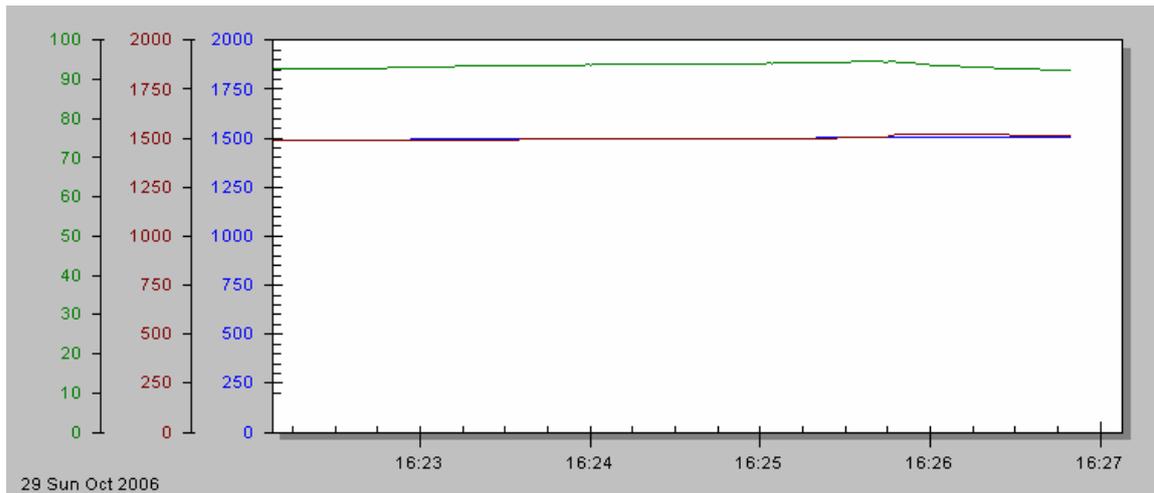
c)



d)



e)



f)

Figura 5.3. Proceso de reinicio de bombeo

Cuando la Estación se encontraba trabajando con cuatro unidades de bombeo a una presión aproximada de 1420psi, se realizó la auto-sintonización del controlador (figura 5.4), con la ayuda del *DeltaV Tune*, cuyo proceso consiste en la oscilación, por parte del sistema, de un 3% a la salida del controlador para comprobar el comportamiento de la planta ante esa perturbación luego de lo cual el *DeltaV* recomienda nuevas constantes en base a criterios de rapidez y robustez del proceso.

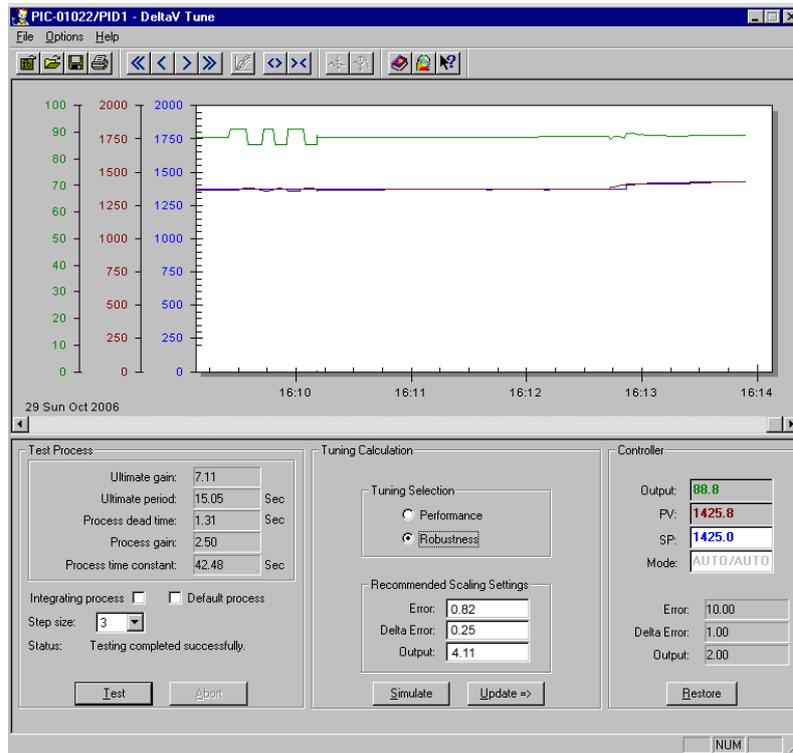


Figura 5.4. Auto-sintonización del FLC con la ayuda del *DeltaV Tune*

El sistema recomendó aumentar el scan rate, ya que el establecido era demasiado rápido. Se lo incrementó a 200ms. Los nuevos parámetros se las escogió basándose en la robustez del sistema.

SF_DELTERR	SF_ERROR	SF_OUTPUT
0.25	0.82	4.11

Posterior a esto se continuó con el proceso normal de reinicio del bombeo y desde entonces **el controlador con lógica difusa se encuentra en operación.**

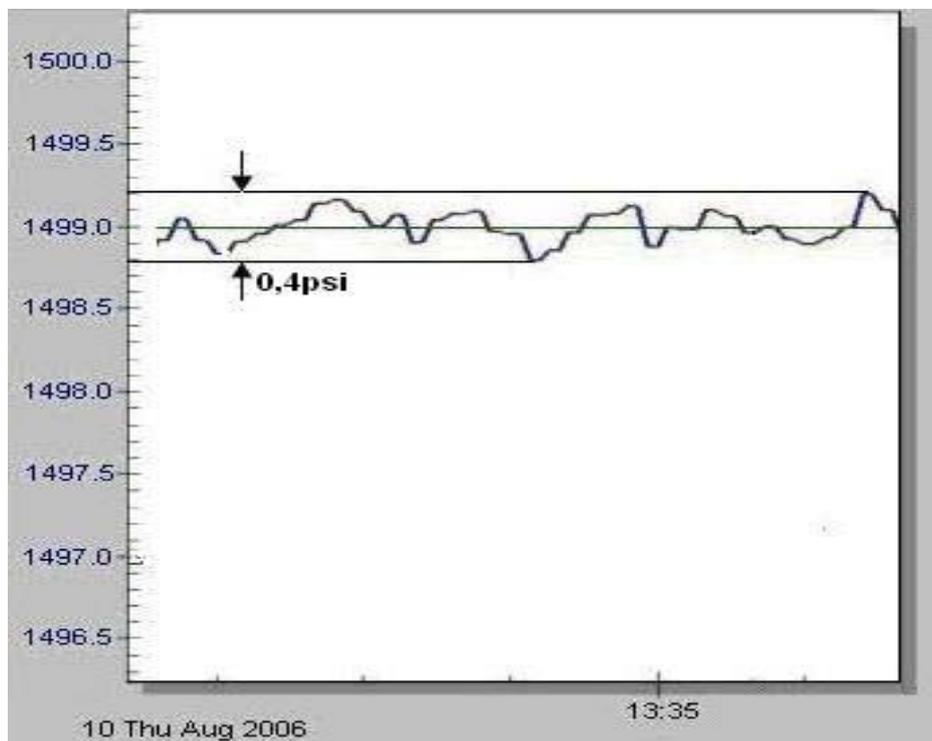
5.1.4. Resultados

Se comprobó una respuesta más rápida al reiniciar el sistema hasta cuando estaba con tres unidades de bombeo, y a medida que el sistema iba adquiriendo carga y por tanto

mayor inercia, la velocidad respuesta del FLC se iba reduciendo hasta igualar a la velocidad del controlador anterior.

En cambios de setpoint pequeños el sistema actuaba con mayor rapidez. Con cambios superiores a los 30psi el controlador daba una respuesta proporcional a esa magnitud (cambios más fuertes a la salida) lo que provocaba que el sistema se desestabilice; por tanto el operador debe tener más cuidado al dar este tipo de cambios en el sistema.

Además se comprobó un control más hermético por parte del FLC como se muestra en la figura 5.3, se redujo el margen de error en el sistema de 0.4psi a 0.2psi.



a)

- Un comportamiento más estable y robusto de la planta que constituye, a largo plazo, en un ahorro de mantenimiento de equipos, de horas de trabajo y horas hombre.

El proponer el incremento de bombeo como parámetro real de cuantificación, de manera directa, no es apropiado ya que este depende, además de la eficiencia del sistema de control implementado, de factores tales como:

- El tipo de crudo bombeado. La viscosidad del crudo influye directamente en la presión de bombeo.
- Varios lotes del crudo al día. En el día se envían dos o más lotes de crudo de diferente grado API. Además empresas privadas como AGIP y TECPEC inyectan su producto al oleoducto, a través de derivaciones. Esto influyen también en los parámetros de bombeo.
- Condiciones ambientales. La temperatura es directamente proporcional a la velocidad del fluido, en días calurosos existe un mayor flujo del crudo.

5.2. Reemplazo de la tarjeta 2301A

5.2.1. Preliminares.

Para el reemplazo de la tarjeta 2301A, primeramente se preparó a la maquinaria para las pruebas correspondientes mediante el siguiente procedimiento:

6. Desacoplar el matrimonio del motor ALCO con la bomba centrífuga.
Colaboración: Personal de Mantenimiento Mecánico.

7. Conectar directamente la salida de la tarjeta AO del controlador M5PLUS al actuador eléctrico ProAct Digital Plus.

Colaboración: Personal de Instrumentación.

8. Cambiar los jumpers del actuador. Actualmente, se encuentra en JPR1 (rango de 200mA). Ponerlo en JPR2 (rango 20mA)

Colaboración: Personal de Instrumentación.

9. Desactivar las alarmas que puedan interferir en las pruebas a criterio del instrumentista, con el objetivo de que se pueda trabajar con velocidades por debajo de 670RPM. Por ejemplo: En caso de ser necesario se requeriría desactivar la alarma de vibración de la bomba, recordando que la misma está desacoplada.

Colaboración: Personal de Instrumentación.

En el Sistema DeltaV

Colaboración y Supervisión: Personal de Instrumentación.

1. En caso de una parada del Oleoducto, durante el cual se realizará las pruebas correspondientes, simular las condiciones de presión de succión necesarias para que el sistema permita arrancar a la unidad asignada. El sistema DeltaV impide o interrumpe el funcionamiento de las unidades de bombeo cuando hay alarmas por baja presión de succión o alta presión de descarga.
2. Realizar pruebas de arranque del motor para determinar la corriente de pulso inicial y de sintonización del lazo de control con un bloque de función PID. El fabricante EMERSON recomienda que para la implementación de un bloque de control difuso se debe partir del reemplazo de un bloque PID ya que se requiere las constantes T_i y K_p para determinar los factores de escalamiento del FLC.

3. Sintonizar el bloque de función FLC que se encuentra en el módulo ya diseñado en el capítulo tres y que se lo presenta elaborado en el DELTAV en la figura 5.2, con la ayuda del *Delta V Tune*
4. Realizar las pruebas correspondientes con la secuencia del motor para comprobar el reemplazo integral de la tarjeta 2301A.

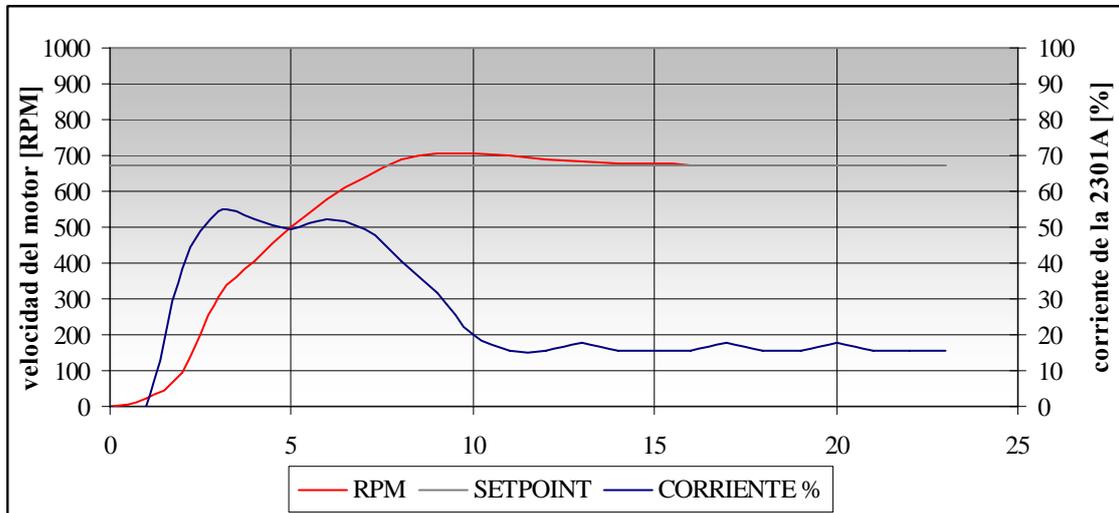
5.2.1.1. Respuesta de la tarjeta 2301A en el arranque de un motor.

Se determinó la respuesta de la tarjeta 2301A al arranque del motor ALCO, en la unidad de bombeo N°5, de donde se obtuvo los datos mostrados en la tabla 5.2.

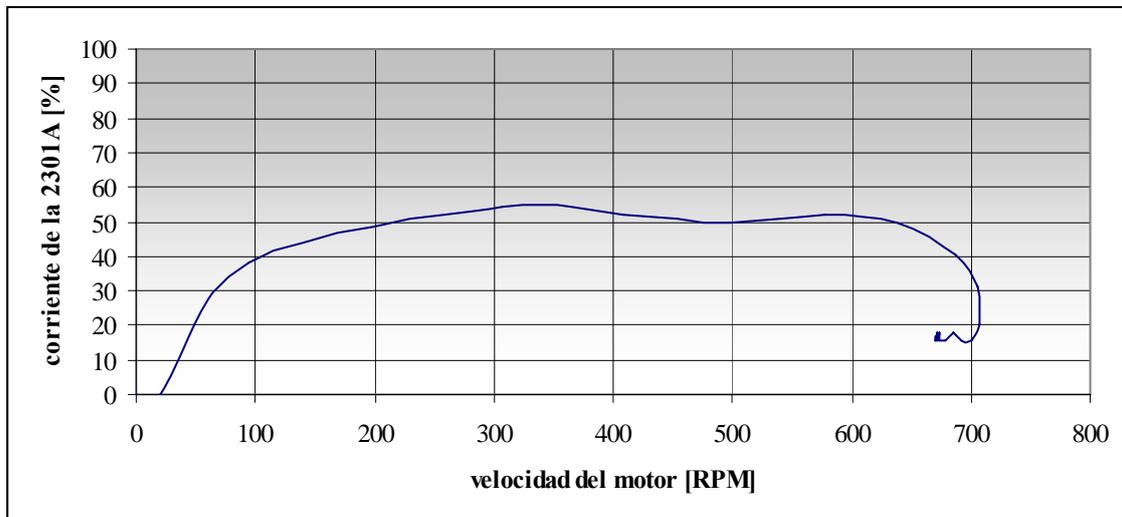
Tabla 5.2. Datos tomados del arranque del motor ALCO5

Tiempo [s]	velocidad del motor[RPM]	Corriente de la 2301A	
		mA	%
0	0,00	0,00	0,00
1	19,85	0,00	0,00
2	94,46	73,60	38,29
3	306,64	96,00	54,29
4	407,68	92,80	52,00
5	497,26	89,60	49,72
6	577,43	92,80	52,00
7	638,75	89,60	49,72
8	687,31	76,80	40,57
9	705,94	64,00	31,43
10	706,64	48,00	20,00
11	699,95	41,60	15,43
12	691,48	41,60	15,43
13	684,54	44,80	17,71
14	679,24	41,60	15,43
15	675,89	41,60	15,43
16	673,72	41,60	15,43
17	673,72	44,80	17,71
18	671,57	41,60	15,43
19	671,49	41,60	15,43
20	670,92	44,80	17,71
21	670,69	41,60	15,43
22	670,13	41,60	15,43
23	670,05	41,60	15,43

En la figura 5.6 se muestra gráficamente dicho comportamiento. Cabe recalcar que se debe realizar pruebas de manera independiente para cada unidad de bombeo, debido a que por agentes externos al control, todas las unidades tienen un desempeño diferente.



a)



b)

Figura 5.6. a) Arranque del motor en función del tiempo y b) Porcentaje de corriente versus RPM con la tarjeta 2301A

Se aprecia en la figura 5.6a que cuando la unidad alcanza una velocidad de 10RPM¹ la tarjeta 2301A entra en funcionamiento generando un pulso de corriente al actuador de

¹ Condición establecida en los diagramas de flujo secuencial para arranque de una unidad de bombeo

92mA (52%); espera en este nivel hasta que la unidad llegue a la velocidad 670RPM, cuando esta es superada la tarjeta disminuye su salida hasta que el motor retorne y se estabilice en el punto de control.

Partiendo de esta premisa se debe definir la corriente de arranque para el módulo de la figura 5.3.

5.2.2. Programación del módulo de velocidad a implementar el mismo que contiene al FLC.

En la figura 5.7 se muestra el módulo que se desarrollo en el sistema DeltaV, establecido ya en la figura 3.11. En los bloques *CALC* se plantean las siguientes expresiones:

CALC – SP

```
IF '//SI-01138B/RPM-1.CV' >= 669.5 AND '//11_START-SFC/AUTO.CV' = 1 THEN
  'OUT1.CV' := 'IN2.CV'
ELSE
  'OUT1.CV' := 'IN1.CV'
ENDIF;
IF '//11_START-SFC/GOB-PERMISS.CV' = 0 THEN
  'OUT1.CV' := 0;
ENDIF
```

CALC – COND_ON_OFF

```
IF '//11_START-SFC/GOB-PERMISS.CV' = 0 OR 'IN1.CV' <= 10 THEN
  'OUT1.CV' := 1;
  'OUT2.CV' := 0;
  ELSE
  IF 'IN1.CV' < 530 THEN
    'OUT1.CV' := 1;
    'OUT2.CV' := 'IN2.CV';
  ELSE
    'OUT1.CV' := 0
  ENDIF;
ENDIF
```

Donde:

en corriente el motor no alcanzó la velocidad mínima de arranque. Luego se subió al 15% y la máquina se cayó por sobre-velocidad.

Cuando se impuso como valor inicial 12% de corriente, arrancó pero después de la segunda oscilación se apagó porque la velocidad descendía a niveles en los cuales se activaban las alarmas de la bomba de aceite. Por lo tanto se decidió limitar el nivel inferior de salida a un 10% con lo que se logró obtener un comportamiento oscilatorio de un pico promedio de 200RPM como se muestra en la figura 5.8.

Con este comportamiento se intentó auto-sintonizar al proceso pero el poner el límite inferior de salida fue un impedimento para alcanzar este objetivo, ya que el *DeltaV Tune* hace que el sistema oscile con una salida pico de $\pm 3\%$

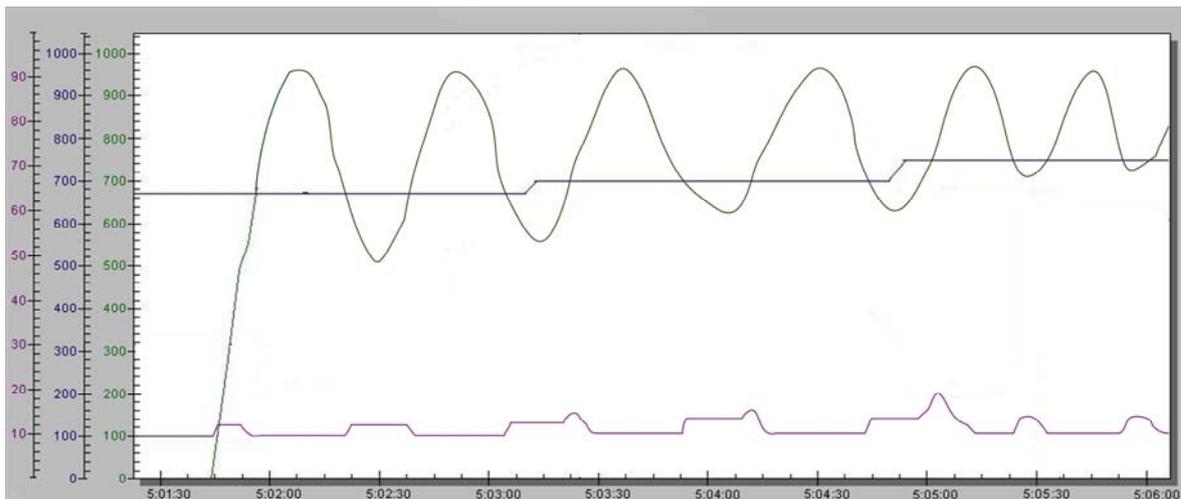


Figura 5.8. Pruebas de sintonización del controlador PID para reemplazo de la 2301A

5.2.4. Resultados

El sistema es de alta inercia mecánica por tanto no se pudo determinar la corriente de arranque, que impidió la posterior sintonización del controlador, con esto se comprobó que la tarjeta 2301A es un dispositivo robusto.

Se debe realizar pruebas para determinar la corriente de arranque entre el 10 - 13% del porcentaje de salida del controlador, en la unidad de bombeo N°1

CAPITULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

El control con lógica difusa es una técnica fácil de diseñar e implementar, codifica con mayor sencillez un sistema no lineal mejorando la ausencia de sobreimpulso y los tiempos de respuesta del sistema. No requiere de un análisis matemático para su elaboración, esto contribuye a una mejor comprensión del algoritmo de control establecido por parte del usuario.

El FLC, al ser un bloque de función SISO (una entrada – una salida) predefinido por el fabricante, limita un diseño más eficiente del controlador con lógica difusa. Un solo FLC no pudo reemplazar como se preveía inicialmente (analizando el control difuso abierto) a los dos bloques de función PID (succión y descarga) conjuntamente con control selector. Se debió reemplazar cada controlador PID por su correspondiente FLC y el selector se mantiene.

El FLC toma como punto inicial para su sintonización las constante K_p y T_i . Por tanto en la implementación de este bloque de función debe ser en reemplazo del bloque de función PID. Pero si se lo desea implementar sin referencia anterior, se debe recurrir a métodos de sintonización PID como el de Ziegler - Nichols para obtener las constantes requeridas.

El FLC hace un control más intuitivo, semejante al razonamiento humano y por tanto más flexible sin dejar de ser eficiente. El sistema recalcula las constantes para un control

más adaptativo y hermético. Al considerar la variación del error como variable de control, ayuda a predecir el comportamiento de la planta a la que esta controlando y consecuentemente reduce la oscilación del sistema.

Cuando se realice el auto-sintonización con el *DeltaV Tune* en el recálculo de las constantes se debe preferir aquellas que determinen la robustez del sistema, ya que aquellas que determinan la rapidez del mismo generan sobreimpulso en cambios pequeños del punto de control.

Con el FLC se comprobó una respuesta más rápida del sistema. Por tanto, en operación normal, el operador debe tener más cuidado al dar cambios de punto de control muy grandes en el sistema. Se verificó también un control más hermético por parte del FLC reduciendo el margen de error en el sistema de 0.4psi a 0.2psi. Estos contribuyen a una mayor celeridad en la operación, evitar que las unidades se apaguen en situaciones críticas tales como cambio de generador, la caída de presión debido a factores externos. Se logra además un comportamiento más estable y robusto de la planta que constituye, a largo plazo, en un ahorro de mantenimiento de equipos, de horas de trabajo y horas hombre.

El cuantificar el incremento de bombeo, de manera directa, con la implementación de este controlador no es apropiado ya que esto depende, además de la eficiencia del sistema de control, de otros factores tales como: varios lotes del crudo (de diferente grado API) bombeado al día y condiciones ambientales.

La tarjeta 2301A es un dispositivo altamente robusto, cuyo reemplazo por un software de control requiere un análisis y diseño más minucioso. Pero de llegar a cumplir dicho objetivo se elimina un punto de diagnóstico al existir una falla. Además se ahorra tiempo de trabajo, que actualmente se lo emplea para la calibración. Las calibraciones y diagnóstico de este equipo solo se la realiza en la estación de Lago Agrio, donde existe los instrumentos adecuados para tal efecto.

La implementación del controlador difuso se constituye en una base para futuros proyectos, ya que se demostró que se pueden realizar investigaciones y modificaciones

para establecer otras técnicas de control que contribuyan al mejor desempeño de la planta, y por tanto a la mayor competitividad del sistema.

6.2. Recomendaciones

Probar este controlador en otras estaciones de bombeo, en donde las presiones de succión y descarga se ven afectadas por factores geográficos. En la Estación de Lago Agrio estas variables son relativamente más estables que en el resto; la presión de succión es generada por las bombas booster.

Para la determinación de la corriente de arranque y condiciones de trabajo, se debe realizar pruebas de campo de manera independiente en cada unidad de bombeo, aun cuando el comportamiento dentro del lazo de control sea similar el desempeño mecánico es diferente.

Unificar los tiempos de ejecución de módulos de control y de ser posible que la entrada, salida y algoritmo de control estén en el mismo módulo para que la tarea en curso tenga una actualización de datos más real.

Si se desea reemplazar la tarjeta 2301A en un futuro, se recomienda establecer claramente el funcionamiento de dicho dispositivo, determinando su circuito para analizar su configuración y luego verificar mediante varias pruebas su comportamiento. Una vez fijado esto se la puede reemplazar, para lo cual se brinda como material de apoyo el modulo de control diseñado para el control de la secuencia del motor.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- WANG Lin-Xi, **A Course in Fuzzy Systems and Control**, Sin edición, Prentice Hall, Estados Unidos 1997, 1 – 116.
- DEL BRIO Martín, SAENZ Alfredo, **Redes Neuronales y Sistemas Difusos**, Segunda edición, Alfaomega Grupo Editor S.A., México DF 2002, 243 – 276.
- HILERA José, MARTINEZ Víctor, **Redes Neuronales Artificiales: Fundamentos, Modelos y Aplicaciones**, Sin edición, Alfaomega Grupo Editor S.A., México DF 2000, 337 – 349.
- REZNIK Leonid, **Fuzzy Controllers**, Primera Edición, Biddles Ltd, Inglaterra 1997, 1 – 64.
- OJEDA Francisco, **Aplicaciones de la Lógica Difusa**, Tesis ESPE, Quito 1998, 1 – 103.
- FISHER – ROSEMOUNT System, **Product Information PLANTWEB CD**, 1999.
- GUERRERO José, **Instrumentation “SOTE FASE II” Lago Agrio Station**, Sin edición, Ecuador 2002.
- Gerencia de Oleoducto – Petroecuador, **Manual de Operaciones**, Sin edición, sin editorial, Ecuador 2001
- Software DELTAV.
- <http://www.aptronix.com/fide/whyfuzzy.htm>
- <http://www.emersonprocess.com>

ANEXO A

LOGICA DIFUSA

Algunas Clases De Complemento, Unión E Intersección De Conjuntos Difusos

Las clases que a continuación se presentan cumplen con los postulados respectivos. a y b representan la función de membresía de algún conjunto difuso donde $a = \mu_A(x)$ y $b = \mu_B(x)$

Referencia	Complemento Difuso	Unión Difusa	Intersección Difusa	Rango del Parámetro
	$1 - a$	$\max(a, b)$	$\min(a, b)$	
Algebraico		$a + b - ab$	ab	
Schweizer y Sklar [1961]		$1 - \max[0, (1 - a)^{-p} + (1 + b)^{-p} - 1]^{1/p}$	$\max(0, a^{-p} + b^{-p} - 1)^{-1/p}$	$p \in (-\infty, \infty)$
Sugeno [1970]	$\frac{1 - a}{1 + \lambda a}$			$\lambda \in (-1, \infty)$
Harnacher [1978]		$\frac{(a + b - (2 - g)ab)}{(1 - (1 - g)ab)}$	$\frac{ab}{(g + (1 - g)(a + b - ab))}$	$g \in (0, \infty)$
Yager [1980]	$(1 - a^w)^{1/w}$	$\min[1, (a^w + b^w)^{1/w}]$	$1 - \min[1, ((1 - a)^w + (1 - b)^w)^{1/w}]$	$w \in (0, \infty)$
Dubois y Prade [1980]		$\frac{a + b - ab - \min(a, b, 1 - \alpha)}{\max(1 - a, 1 - b, \alpha)}$	$\frac{ab}{\max(a, b, \alpha)}$	$\alpha \in (0, 1)$
Dubois [1982]		$\frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1}{a} - 1 \right)^{-\lambda} + \left(\frac{1}{b} - 1 \right)^{-\lambda} \right]^{-1/\lambda}}$	$\frac{1}{1 + \left[\left(\frac{1}{a} - 1 \right)^{-\lambda} + \left(\frac{1}{b} - 1 \right)^{-\lambda} \right]^{1/\lambda}}$	$\lambda \in (0, \infty)$
Einstein		$\frac{a + b}{a + ab}$	$\frac{ab}{2 - (a + b - ab)}$	

Tabla A1. Clases de complemento, unión e intersección difusas

Interpretación de las reglas IF-THEN difusas

En el cálculo proposicional clásico, la expresión SI p ENTONCES q , se escribe como $p \rightarrow q$, donde p y q son variables proposicionales que pueden tomar como valores: *verdadero* (V) o *falso* (F). Esta expresión es equivalente a

$$\bar{p} \vee q \quad (\text{A.1})$$

y

$$(p \wedge q) \vee \bar{p} \quad (\text{A.2})$$

de acuerdo a la tabla A2

p	q	\bar{p}	$(p \wedge q)$	$p \rightarrow q$	$\bar{p} \vee q$	$(p \wedge q) \vee \bar{p}$
F	F	V	F	V	V	V
F	V	V	F	V	V	V
V	F	F	F	F	F	F
V	V	F	V	V	V	V

Tabla A2. Tabla de verdad $p \rightarrow q$

Se puede reemplazar la expresión p y q por proposiciones difusas A y B con sus respectivas funciones de membresía $\mu_A(x)$ y $\mu_B(y)$ y los operadores \wedge , \vee , $\bar{}$ con unión difusa, intersección difusa y complemento difuso. A partir de esto, se han propuesto interpretaciones de las reglas IF-THEN difusas ($A \rightarrow B$) en la literatura. A continuación se listan algunas.

- *Implicación Dienes –Rescher*. Conocida también como implicación por la regla booleana. Se la obtiene si se reemplaza en la expresión A1.

$$\mu_{Q_D}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]$$

- *Implicación Lukasiewick*. Conocida también como implicación difusa por la regla aritmética.

$$\mu_{Q_L}(x, y) = \min[1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

- *Implicación Zadeh.* Conocida también como implicación por la regla Max-min. Es obtenida de la expresión A2

$$\mu_{Q_Z}(x, y) = \max[\min(\mu_A(x), \mu_B(y)), 1 - \mu_A(x)]$$

- *Implicaciones Mamdani.* Son las más ampliamente utilizadas en sistemas difusos y control difuso.

- *Implicación por la regla del mínimo*

$$\mu_{Q_{MM}}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

- *Implicación por la regla del producto.*

$$\mu_{Q_{MP}}(x, y) = \mu_A(x) * \mu_B(y)$$

Como ya se ha manifestado, diferentes personas tienen diferentes interpretaciones; por tanto distintas implicaciones son necesitadas para cubrir con los diferentes criterios.

ANEXO B

RAID (Redundant Array of Independent Disks)

RAID. Tecnología desarrollada por INTEL. Se refiere a discos duros múltiples independientes combinados a manera de una sola matriz o conjunto lógico. Los datos son almacenados en esta matriz de discos con una información de redundancia adicional.

La información redundante puede ser: los mismos datos (espejo), o información de paridad calculada fuera de los diferentes bloques de datos (RAID 4, o RAID 5).

Con el RAID en orden, el sistema operativo (Windows, NetWare, o Unix) no se reparten en discos individuales, pero en cambio trabaja con un matriz de discos como un disco lógico.

El principal objetivo de RAID es mejorar la disponibilidad y seguridad de los datos. RAID previene tiempo perdido en los eventos de una falla del disco duro, no obstante no puede recuperar datos que han sido borrados por el usuario o han sido destruidos por evento mayor tal como robo o incendio.

Hay dos vías para implementar una solución RAID. Un hardware controlador RAID es inteligente y procesa toda la información RAID de si mismo. Con este tipo de sistema instalado, todo el control de la matriz RAID, propio de un sistema, es desplazado del computador y es controlado totalmente por el controlador RAID.

Otra alternativa es implementar RAID con un simple adaptador y un disco RAID. En este tipo de sistema, el disco es integrado a la operación del sistema, por ejemplo: Windows NT. En este caso, el desempeño del sistema RAID es completamente dependiente de la carga del proceso ubicada en el CPU; que puede, potencialmente, llegar a ser un problema durante la fase de reconstrucción del arreglo, después de la falla de disco.

Algunos aspectos a considerar en un hardware controlador RAID son:

- Facilidad en la instalación y mantenimiento.
- Las capacidades del software de administración y la experiencia de los fabricantes en el desarrollo de los componentes RAID.
- Un controlador RAID debe soportar los niveles mas importantes (0, 1, 4, 5, 10), y debe ser capaz de manejar simultáneamente matrices múltiples con niveles diferentes de RAID a través de de múltiples canales.

Niveles RAID – Como son organizados los discos

Cada nivel de RAID expande los datos a través de los discos de la matriz en diferentes formas es optimizado para situaciones específicas. Para el propósito, se concentra la atención en los niveles RAID más comúnmente utilizados.

RAID 0

Este nivel RAID usa las capacidades de lectura/escritura de dos o más discos duros, trabajando al unísono para maximizar el trabajo de almacenamiento del sistema, de manera que los datos (ABCD... en los depósitos amarillos, figura B1) llegan desde el usuario y se cortan en bloques administrables.

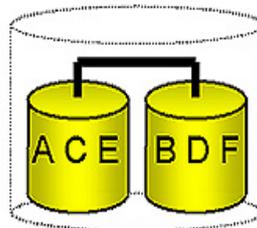


Figura B1. RIAD O

Sin embargo, información de redundancia no es almacenada en una matriz RAID 0, lo que significa que si falla un disco duro, se pierden todos los datos. Esta falta de

redundancia es también especificada en el número 0, que indica no redundancia. Se emplea este nivel en servidores donde la seguridad esta certificada.

Los datos pueden ser almacenados entre los diferentes discos, donde la lectura y escritura puede ser ejecutada en paralelo. Esta técnica, conocida como “desmantelamiento o división”, es la más rápido de todos los niveles RAID, especialmente para lectura y escritura de archivos secuenciales grandes; aplicaciones como: edición de imagen, almacenamiento de archivos de películas, creación de imágenes CD o DVD.

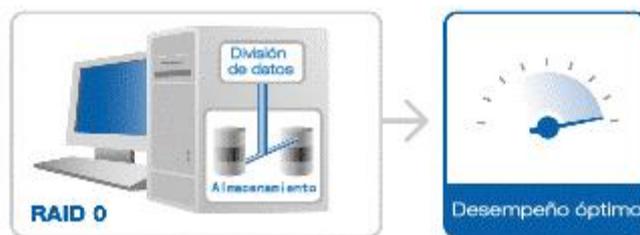


Figura B2. Desmantelamiento o división de datos

Los discos duros en un RAID 0 son combinados de manera que aparece como un solo disco en el sistema operativo. Por ejemplo: dos discos de 400 GB en RAID 0 aparecen como un disco individual de 800 GB en el sistema operativo.

Ventaja: Alta velocidad de transferencia.

Desventaja: No redundancia.

Aplicación: Típicamente usado en estaciones de trabajo para datos temporales y alta velocidad de entrada/salida.

RAID 1

Las matrices RAID 1 contienen dos unidades de disco duro en las cuales se duplican los datos entre las dos en tiempo real (100% redundante). Debido a que todos los

datos están duplicados, el sistema operativo considera el espacio utilizable de la matriz RAID 1 como el tamaño máximo de una unidad de disco duro de la matriz. Por ejemplo, dos unidades de disco duro de 400 GB en una matriz RAID 1 aparecen como una unidad de disco duro individual de 400 GB ante el sistema operativo.

El beneficio principal de la duplicación RAID 1 es que proporciona fiabilidad de datos robusta en caso de un fallo en uno de los discos. Si falla una de las unidades de disco duro, todos los datos se encuentran disponibles inmediatamente en el otro disco sin tener impacto en la integridad de los datos. En caso de que se produzca un fallo de disco, el sistema informático permanece en funcionamiento total para garantizar la máxima productividad.

El rendimiento de una matriz RAID 1 es superior al de una sola unidad debido a que los datos se pueden leer desde varios discos (el original y el duplicado) simultáneamente. Las escrituras en el disco no producen el mismo beneficio debido a que los datos primero deben escribirse en una unidad, luego ser duplicados en el otro.

Se puede conectar cada disco por separado, esto se refiere a discos a “discos duplicados” (véase figura B3) que constituye una seguridad adicional.

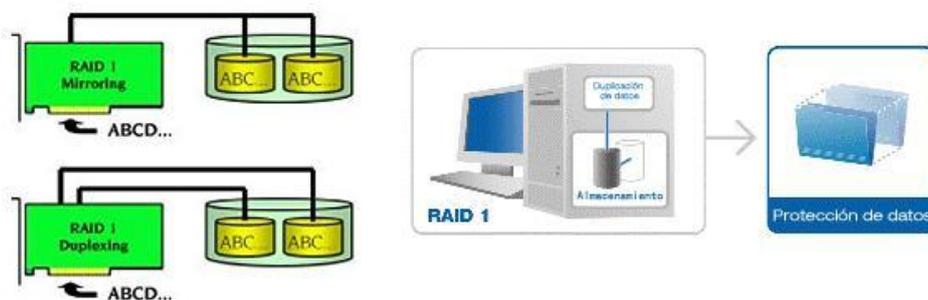


Figura B3. RAID 1

Ventaja: Alta disponibilidad, un disco puede fallar, pero el disco lógico mantiene todavía disponible la información.

Desventaja: Requiere dos discos pero solo uno de ellos almacena.

Aplicación: Típicamente usado en pequeños sistemas donde la capacidad de un disco es suficiente.

RAID 4

RAID 4 es muy similar a RAID 0. Los datos se dividen a través de las unidades de disco. Además, el controlador RAID también calcula la redundancia (información de paridad), la cual se almacena en otra unidad de disco (P1, P2...).

Aunque falle un disco, todos los datos aún están disponibles. Se accede a los datos que faltan mediante el cálculo a partir de los datos que permanecen disponibles y de la información de paridad. A diferencia de RAID 1, se necesita solamente la capacidad de un disco para la redundancia. Por ejemplo, si consideramos una matriz de discos RAID 4 con 5 unidades de disco, un 80% de la capacidad de unidad de disco instalada está disponible en calidad de capacidad de usuario y solamente se utiliza un 20% para la redundancia.

En situaciones con varios bloques de datos pequeños, la unidad de disco de paridad se convierte en un cuello de botella. Con bloques de datos de gran tamaño, RAID 4 presenta un desempeño considerablemente superior.

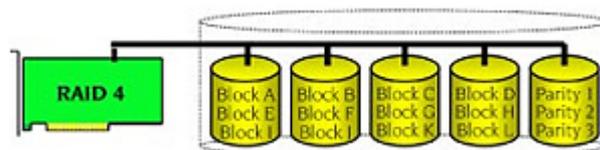


Figura B4. RAID 4

Ventaja: Alta disponibilidad, aunque falle un disco, la unidad lógica que contiene los datos aún está disponible.

Ofrece un buen uso de la capacidad de disco (matriz de n discos, n-1 se utiliza para el almacenamiento de datos)

Desventaja: Se tiene que calcular la información de redundancia, lo cual limita el desempeño de la escritura

Aplicación: Por lo general se utiliza en sistemas más grandes para el almacenamiento de datos debido a una relación eficaz entre la capacidad instalada y la capacidad disponible real

RAID 5

A diferencia de RAID 4, los datos de paridad de la matriz de disco RAID 5 se dividen a través de todas las unidades de disco.

Una matriz RAID 5 contiene tres o más discos duros donde los datos se dividen en bloques manejables llamadas divisiones, ofrece un desempeño más equilibrado. Aún con bloques de datos pequeños, los cuales son muy comunes en entornos de multitarea y multiusuario, el tiempo de respuesta es excelente. RAID 5 ofrece el mismo nivel de seguridad que RAID 4: aunque falle un disco, todos los datos aún están disponibles. Los datos perdidos se recalculan a partir de los datos que permanecen disponibles y de la información de paridad.



Figura B1. Raid 5

Ventaja: Alta disponibilidad, aunque falle un disco, la unidad lógica que contiene los datos aún está disponible.

Ofrece un buen uso de la capacidad de disco (matriz de n discos, $n-1$ se utiliza para el almacenamiento de datos). Por ejemplo, tres discos duros de 400 GB en un conjunto RAID 5 aparecerán como solo 800 GB al sistema operativo.

Desventaja: Se tiene que calcular la información de redundancia, lo cual limita el desempeño de la escritura.

Aplicación: Por lo general se utiliza en sistemas más grandes para el almacenamiento de datos debido a una relación eficaz entre la capacidad instalada y la capacidad disponible real.

RAID 10

RAID 10 es una combinación de RAID 0 (desempeño) y RAID 1 (seguridad de datos). A diferencia de RAID 4 y RAID 5, no es necesario calcular la información de paridad. Las matrices de discos RAID 10 ofrecen excelente desempeño y seguridad de los datos. Similar a RAID 0, un desempeño óptimo se obtiene en situaciones de carga de alto grado de secuencia. Al igual que RAID 1, se pierde un 50% de la capacidad instalada debido a la redundancia.

Ventaja: Alta disponibilidad, aunque falle un disco, la unidad lógica que contiene los datos aún está disponible.

Ofrece un buen desempeño de escritura.

Desventaja: Requiere una cantidad par de discos con un mínimo de 4 y solamente se utiliza la mitad de la capacidad de disco.

Aplicación: Por lo general se utiliza en situaciones en las cuales se requiere un desempeño de escritura altamente en secuencia.

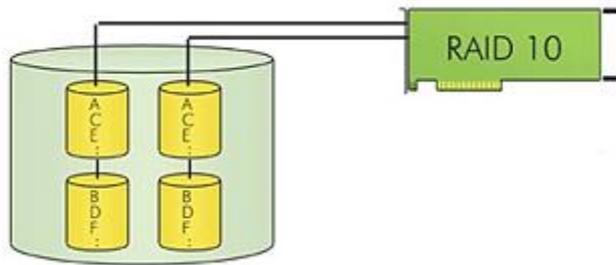


Figura B6. Raid 10

ANEXO C

BUSES DE CAMPO EMPLEADOS EN EL SOTE

Foundation Fieldbus

Es una organización registrada líder mundial dedicada a establecer una tecnología Fieldbus. Esta conformada por fabricantes y usuarios finales líderes en el suministro y utilización de sistemas de control e instrumentación. Siendo una de sus primeras metas la interoperabilidad entre diferentes fabricantes.



El dispositivo de cualquier fabricante que cumple con los estándares de esta organización trabajará adecuadamente con otros dispositivos certificados, sin embargo la certificación esta fijada para cumplir únicamente con la mínima funcionalidad, por ejemplo: un transmisor de temperatura producirá una señal fieldbus de temperatura y no garantiza funciones adicionales tales como auto-calibración, procesos de calibración, etc.

Fieldbus esta diseñado para permitir comunicaciones en dos velocidades. Baja velocidad, o fieldbus H1, es actualmente usada en la industria. Alta velocidad, o fieldbus HSE, esta siendo desarrollada para permitir una integración con las redes de comunicación ya existentes.

Fieldbus H1

Es un protocolo de comunicación digital, serial y bi-direccional que reemplazaría al estándar 4-20 mA. Transmite los datos a una velocidad baja y es usado para interconectar dispositivos de campo tales como actuadores, sensores, dispositivos discretos y controladores.

Es una red de área local (LAN) para instrumentos que permite control básico y entradas/salidas a ser manipuladas por los dispositivos de campo, usado para procesos de automatización y fabricación

Las especificaciones del bus H1 de FF se base en tres elementos fundamentales:

1) Capa física, 2) Pila de comunicaciones y 3) Aplicación de usuario

Esta especificación esta basada en el modelo ISO/OSI para redes de comunicación como muestra la figura C1.

MODELO FOUNDATION			
MODELO OSI		APLICACIÓN USUARIO	APLICACIÓN USUARIO
7	Aplicación	ESPECIFICACION DE MENSAJES EN EL BUS (FMS)	PILA DE COMUNICACIÓN
		SUBCAPA DE ACCESO AL BUS (FAS)	
6	Presentación		
5	Sesión		
4	Transferencia		
3	Red		
2	Enlace	CAPA DE ENLACE DE DATOS (DLL)	
1	Física	CAPA FISICA	CAPA FISICA

Figura C1. FF según modelo OSI

Capa Física

Esta definida según la IEC 1158-2 (Comisión Electrotécnica Internacional). Define las técnicas de interconexión de los instrumentos: cableado a los dispositivos de campo y los componentes que realizan el interfase con el proceso, por ejemplo: transmisor de presión.

Esta capa recibe mensajes codificados de las capas superiores y los convierte en señales físicas para la transmisión en los segmentos fieldbus.

La **velocidad de transmisión es 31.25 Kbps**. Soporta también el modo IS (seguridad intrínseca) para zonas peligrosas.

Solamente dos líneas conectan los dispositivos al bus. Estas líneas permiten el flujo de información y pueden ser empleadas para la alimentación de los dispositivos al mismo tiempo.

Se puede conectar un número máximo de 32 dispositivos por segmento en el bus.

Con un solo puerto en una tarjeta de interfase, se puede tener como máximo 5 segmentos si usa repetidores para conectar los dispositivos.

Capa de Comunicación

Realiza los trabajos necesarios para unir la capa de usuario con la física. Trata la comunicación digital entre los equipos, y esta constituida por tres subcapas.

- *Capa de enlace (DLL).* Gestiona el acceso al bus a través de un programador de bus centralizado y determinístico llamado Link Active Scheduler (LAS).
- *Subcapa de acceso fieldbus (FAS).*
- *Especificación de mensajes fieldbus (MSF).*

Capa de aplicación de usuario

Aplicaciones DeltaV, tales como Control Studio y Explorador.

Fieldbus HSE

Fieldbus de alta velocidad esta siendo desarrollada y será usada HSE (High Speed Ethernet) a una velocidad de 100 Mbps.

Dispositivos de enlace están siendo desarrollados para puentear segmentos fieldbus de alta velocidad y baja velocidad.

Además de los beneficios de fieldbus H1, HSE provee estructura de control de base que integra todos los datos de la planta. Además, diagnostico y manejo de redundancia.

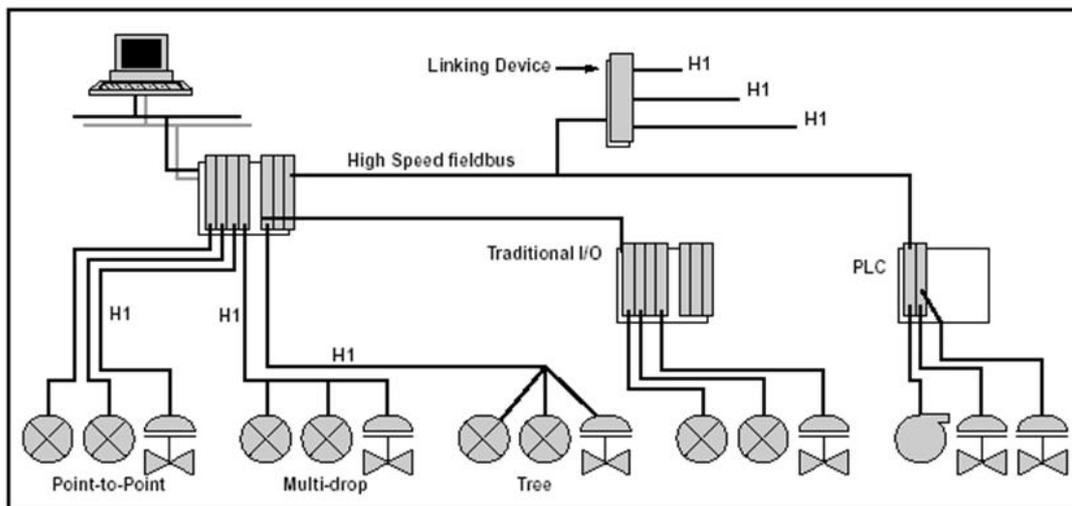


Figura C2. Red Fieldbus

Dispositivos Fieldbus

Los dispositivos Fieldbus son instrumentos de campo, tales como transmisores y válvulas, con procesadores que monitorean el desempeño y estado del dispositivo. Emplean una comunicación digital a los sistemas tales como DeltaV.

Algunas compañías pueden tener características especiales en sus dispositivos que los hace únicos. Manufactureros pueden hacer estos datos disponibles al sistema por la definición de una librería de software llamada Servicio de Descripción del Dispositivo

(DDS). El sistema puede leer estos datos especiales, sin el uso de una programación especial, con la cual el usuario puede interactuar con los dispositivos.

Cada dispositivo fieldbus incluye tres tipos de bloques:

- Bloque de recursos. Describe las características de los dispositivos como nombre del fabricante, modelo, material de construcción.
- Bloque transductor. Interfase a los sensores usados para medir temperatura, presión, etc. Este bloque incluye calibración y otros datos.
- Bloque función. (Actualmente entradas y salidas analógicas, control PID) que le permiten al mismo ejecutar control en el campo. Notifica al sistema de control de los parámetros de operación estándar, tiene auto-diagnóstico y son capaces de reportar problemas tales como instrumentos fuera de calibración.

Se permite realizar, en cada dispositivo, un número máximo de 25 enlaces de entrada y salida, conocidos como VCRs (Virtual Communication Relationship) entre los bloques de función. Por ejemplo: un VCR puede ser una señal de alarma.

Cada dispositivo debe tener una única identificación física (tag) y también una dirección de red que le permita trabajar adecuadamente.

De acuerdo a la función que cumplen en el segmento de red existen tres tipos de dispositivos:

- *Básico*. Envía y recibe mensajes sobre el bus pero no puede tomar el control cuando otros dispositivos han accedido a la red.

- *Maestro (Link Master)*. Controla cuando dispositivos ingresan a la red y ejecuta enlaces programados. Es capaz de trabajar como LAS. La reserva del Link master debe usar 20 direcciones.
- *Bridge*. Enlaza múltiples segmentos de red.

HART (Highway Adressable Remote Transducer)

El protocolo de comunicaciones de campo es ampliamente reconocido como un estándar industrial para el mejoramiento digital de las comunicaciones 4-20 mA de instrumentos inteligentes

El protocolo HART permite la comunicación digital bi-direccional, emplea la tecnología Bell 202 (FSK Codificación por cambio de frecuencia), señal que se superpone a la señal analógica de 4-20 mA.

La información binaria es representada mediante una señal de dos frecuencias distintas (1 lógico = 1200Hz y 0 lógico = 2200Hz). Estos tonos se superponen a la señal continua, y como la señal AC tiene valor promedio cero, la señal analógica (4-20mA) no es afectada. Por tanto ambas señales la y la digital HART pueden ser transmitidas por el mismo cable.

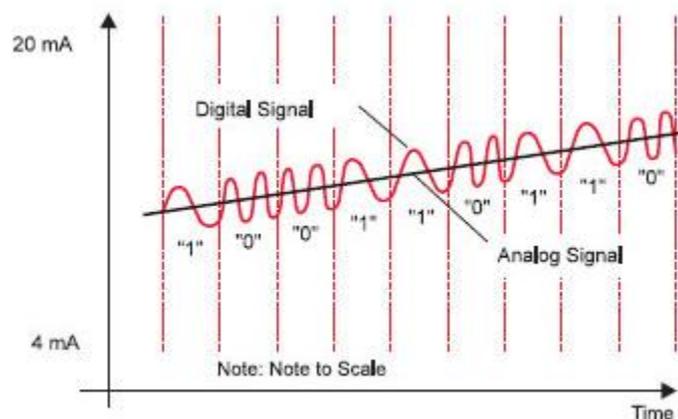


Figura C3. Señal HART superpuesta a la señal de 4-20mA

La variable de proceso es portada por la señal analógica mientras que mediante la comunicación digital se accede a medidas adicionales, parámetros de proceso, configuración de instrumentos, calibración e información de diagnóstico.

HART es principalmente un protocolo maestro/esclavo lo que significa que el dispositivo de campo (esclavo) habla solo cuando es preguntado por el maestro.

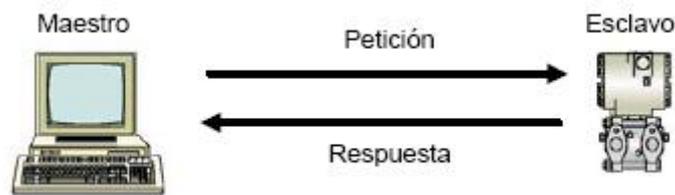


Figura C4. Configuración HART maestro/esclavo

Dos maestros (primario y secundario) pueden comunicarse con dispositivos esclavos en una red HART. Maestro secundario, como un comunicador portátil (véase figura C2), puede ser conectado en cualquier parte de la red y comunicarse con el campo sin distorsionar la información con el maestro primario. Un maestro primario puede ser típicamente un DCS (Sistema Distribuido de Control), PLC o un computador.

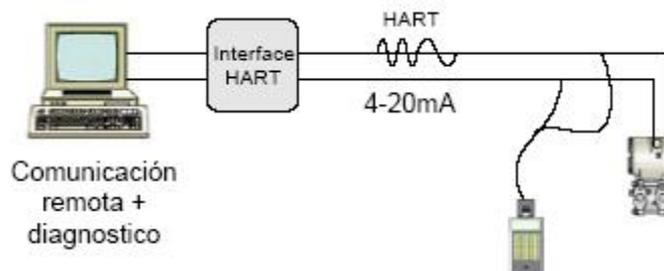


Figura C5. Configuración HART con 2 maestros

Otro modo de comunicación opcional es el modo "Burst" mostrado en la figura C5, que permite que un único dispositivo esclavo emita continuamente mensaje HART de respuesta estándar.

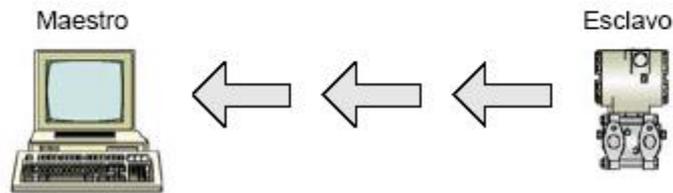


Figura C6. Configuración "Burst"

El protocolo HART también tiene la capacidad de conectar múltiples dispositivos de campo sobre el mismo par de hilos es un configuración multipunto. En esta configuración la comunicación esta limitada a la comunicación maestro/esclavo. La corriente a través de cada dispositivo esclavo se fija al mínimo valor para alimentar al dispositivo y no tiene ningún significado en el proceso.

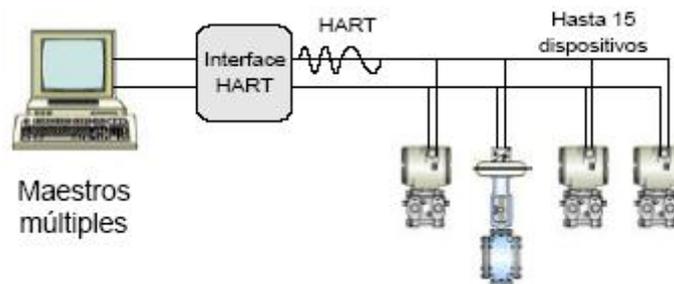


Figura C7. Configuración HART multipunto

ANEXO D

LIBRERIAS DELTAV

CONTROL AVANZADO



Fuzzy Logic
Control

FLC provee toda la lógica de ejecución del control PID estándar y además los beneficios usando la lógica difusa: posee un control más rápido y hermético, minimiza el sobreimpulso, optimiza el rechazo a las perturbaciones trabajando con DeltaV Tune, y adaptándose a los parámetros de sintonización.



INSPECT

INSPECT hace las estadísticas de desempeño calculadas por el servidor de inspección, disponibles para vista, impresión y agregado a históricos. El bloque reporta estadísticas por parte del sistema de control especificado por el parámetro AREA. AREA puede ser el sistema DeltaV o cualquier planta, celda de procesos.



Lab Entry

LE provee el análisis fuera de línea para las entradas del operador. Por ejemplo, en un modulo re redes neuronales. El usuario define todos los parámetros en el bloque LE usando Control Studio.



MPC

Model predictive control permite interactuar con procesos a ser controlados en limitaciones operables que pueden ser medidas mientras interactúa con el proceso y perturbaciones que pueden ser medidas. El bloque MPC es la base del control multivariable en el sistema DeltaV. Se lo puede definir como control anticipativo.



MPC Input
Reference

MPC_INREF es usado para registrar datos relevantes MPC desde un bloque de función de entrada que puede ser un bloque de función AI, PID, FLC



MPC Output
Reference

MPC_OUTREF es usado para registrar datos relevantes MPC desde un bloque de función de entrada que puede ser un bloque de función AO, PID, FLC



MPC Process
Simulator

MPC_SIM simula procesos con control predictivo



NN

NN es la base para implementar redes neuronales en el sistema deltaV.

CONTROL ANALOGICO



Bias/Gain

BG provee la capacidad de ganancia ajustable por manejo de los valores de salida desde un SETPOINT y una entrada. Este bloque esta diseñado para usarlo como un elemento en rutas de control paralelo.



Calc/Logic

CALC permite especificar una expresión que determine la salida del bloque. Funciones matemáticas, operadores lógicos, constantes, y referencias de entrada/salida pueden ser usadas en la expresión. No hay modos o estándares de detección de alarma en este bloque.

Evalúa una expresión singular cuando la entrada al bloque es iniciada. El bloque puede usar como máximo 16 entradas y 16 salidas para evaluar la expresión contenida. Adicionalmente el evaluador de la expresión usa constantes y referencias externas que el usuario puede especificar.



Control Selector

CTLSEL selecciona una de las tres señales de control para ejecutar el control selector a un bloque de función PID. Las salidas son calculadas basándose en el modo de operación actual que esta determinado por parámetros



Deadtime

DT introduce un retraso de tiempo puro en el valor usado en la ruta de señal entre dos bloques de función.



Fieldbus Input Selector Ext...

ISELX es un bloque de cálculo matemático y lógico de la entrada. El bloque escoge una salida basada en 8 entradas.



Filter

FLTR aplica una ecuación para filtrar los cambios en la entrada y generar una suave señal de salida.



Input Selector

ISEL es un bloque de cálculo de entrada lógico y matemático. Escoge una salida basado en 4 entradas.

Los métodos de selección en la salida son los siguientes:

MAX escoge el valor más grande, **MIN** escoge el valor más pequeño, **MID** escoge el valor intermedio de las entradas, **FIRST_GOOD** selecciona la primera entrada no mala y no deshabilitada, empezando desde **IN_1**, **AVG** Determina un valor promedio de entre las entradas no deshabilitadas



Lead/Lag

LL provee una compensación dinámica a los valores de entrada. El bloque puede aplicar una función de tiempo de adelanto, una función de tiempo de retraso o una combinación de las dos. Una ganancia específica es aplicada al valor compensado.



Limit

LIM limita el valor de entrada entre dos valores de referencia



Manual Loader

MANLD permite que la salida del bloque sea operada por el usuario. Se conecta otro bloque de función cuya salida se requiere sea operada manualmente.



PID

PID combina toda la lógica necesaria para el desempeño: procesamiento de canal de entradas analógicas, control proporcional integral derivativo con la opcional para el control no lineal y procesamiento del canal de salidas analógicas.



Ramp

RAMP crea una salida rampa para incrementar o decrementar una variable hacia un valor específico. El usuario define el tiempo de duración o la proporción de cambio de la rampa y el punto final.



Rate Limit

RTL limita el porcentaje de cambio del valor de salida a límites específicos.



Ratio

RTO aplica un **SETPOINT** proporcional ajustable para alcanzar una relación entrada salida deseada. El bloque genera una salida usando la proporción, un valor de entrada analógica requerido, y un valor de entrada opcional.



Scaler

SCLR provee una consistencia dimensional y escalable entre valores de diferentes unidades de ingeniería. El bloque convierte el valor de entrada a la escala especificada y genera un valor de salida.

Signal
Characterizer

SGCR caracteriza o aproxima cualquier función que define una relación entrada/salida. La función está definida por veinte coordenadas. El bloque interpola un valor de salida por un valor de entrada dado usando la curva definida por las coordenadas configuradas. Dos señales de entrada analógica separadas pueden ser procesadas simultáneamente a sus correspondientes señales de salida usando la misma curva definida

Signal
Generator

SGGN produce una señal de salida que simula una señal de proceso. El bloque usa una combinación específica de una onda sinusoidal, una onda cuadrada, un valor bias, y un valor randomico para generar la señal de salida.



Signal Selector

SGSL selecciona el valor máximo, mínimo o promedio de entre 16 valores de entrada y lo coloca en la salida. Típicamente es empleado en aplicaciones de control selector donde las entradas del bloque son las salidas de otro lazo. Por ejemplo, el bloque calcula la temperatura promedio de cuatro entradas; este valor es entonces enviado al bloque PID para controlar un proceso de calentador de agua.



Splitter

SPLTR toma una sola entrada y calcula dos salidas basadas en valores coordinados específicos.

ENTRADAS-SALIDAS

Alarm
Detection

ALM provee la capacidad de especificar los parámetros para alarmas fácilmente que son obtenidos desde E/S o desde el resultado de los cálculos de otras funciones. Este bloque toma las entradas especificadas por el usuario y hace detección de alarmas alta, baja y desviación. Los parámetros generados por este bloque pueden ser usados para generar una alarma para los operadores.



Analog Input

AI accede a un solo valor y estado de medición analoga desde un canal E/S. Se puede configurar el tipo de canal E/S para señal de transmisores 4 - 20 mA o para transmisores HART.



Analog Output

AO asigna un valor de salida a los dispositivos de campo a través de un canal específico. El bloque puede correr en el controlador DeltaV o ejecutarse en los dispositivos de campo.



Discrete Input

DI accede a un solo valor de entrada discreta desde un dispositivo de campo de dos estados y procesa la entrada física disponible a otro bloque de función. Se puede configurar inversión y detección de alarma sobre este valor de entrada.

Discret
Output

DO toma un setpoint binario y escribe en un canal E/S específico para producir una señal de salida.

Fieldbus Multiplexed
Discret Input

FFMDI combina los 8 canales de una tarjeta de entradas discretas y las hace disponibles como una entrada de 8 bits para otro bloque de función.

Fieldbus Multiplexed
Discret Output

FFMDO toma un setpoint de 8 bits y lo escribe en los canales de una tarjeta de salidas discretas sobre un dispositivo H1.

Fieldbus Multiplexed
Analog Input

MAI conecta transmisores de alta densidad a segmentos Fieldbus. El bloque coexiste con los bloques estándar AI. Se usa este bloque cuando los tipos de sensores y la funcionalidad de cada canal son los mismos.



Pulse Input

PIN es usado para proveer valores de entradas analógicas desde canales *Pulse Input* en una tarjeta multifunción.

LOGICAS



Action

ACT evalúa una sola línea de expresión basada en el valor de entrada. Función matemática, operación lógica y constantes pueden ser usados como expresión.



And

AND genera una salida discreta basada en la operación lógica AND de 2 hasta 16 entradas discretas

Bi Directional
Edge Trigger

BDE genera un salida de pulso discreta (1) cuando la entrada discreta hace una transición positiva (FALSO a VERDADERO) o negativa (VERDADERO a FALSO) desde la ultima ejecución del bloque. Si no ha existido ninguna transición en el bloque, la salida es FALSO (0)

Boolean Fan
Out

BFO decodifica una entrada binaria a bits individuales y genera un valor de salida discreta para cada bit.



Condition

CND evalúa una expresión de varias líneas y genera un valor de salida discreta cuando la expresión es evaluada verdadera (1) por periodo de tiempo más grande que el especificado



Device Control

DC provee control de setpoint para dispositivos discretos multi-estado tal como motores, bombas, y válvulas. El bloque compara el estado requerido (setpoint) al estado actual reportado desde el dispositivo, permitiendo a su vez que el dispositivo cambie de estado, detecte límites de alarma sobre cualquier error.

El setpoint requerido por el dispositivo soporta tres estados: pasivo, activo 1 y activo 2 (opcional)



Multiplexer

MLTX selecciona un valor de entrada a partir de los 16 posibles y lo ubica a la salida.

Negative Edge
Trigger

NDE genera un salida de pulso discreta (1) cuando la entrada discreta hace una transición negativa (VERDADERO a FALSO) desde la ultima ejecución del bloque. Si no ha existido ninguna transición en el bloque, la salida es FALSO (0)



Not

NOT invierte lógicamente una señal de entrada discreta y genera una salida discreta.



Or

OR genera una salida discreta basada en la operación lógica OR de 2 hasta 16 entradas discretas

Positive Edge
Trigger

PDE genera un salida de pulso discreta (1) cuando la entrada discreta hace una transición positiva (FALSO a VERDADERO) desde la ultima ejecución del bloque. Si no ha existido ninguna transición en el bloque, la salida es FALSO (0)



RS Flip-Flop

RS (Reset/Set) genera un valor de salida discreta basado en el NOR lógico de las entradas set y reset

- Cuando la entrada reset es FALSO (0) y set es VERDADERO (1), la salida es VERDADERO. La salida se mantiene VERDADERO hasta que la entrada reset sea VERDADERO y set FALSO.
- Cuando reset es VERDADERO, la salida es igual al valor de set de la entrada.
- Cuando ambos son VERDADERO, la salida es VERDADERO.
- Cuando ambos son FALSO, la salida se mantiene en su último estado y puede ser VERDADERO o FALSO.



SR Flip-Flop

SR (Set/Reset) genera un valor de salida discreta basado en el NAND lógico de las entradas set y reset.

Cuando el reset es FALSO (0) y set es VERDADERO (1), la salida es VERDADERO. La salida se mantiene VERDADERO hasta que reset sea VERDADERO y set FALSO.



Transfer

Transfer. XFR selecciona una de dos entradas analógicas y la transfiere a la salida después de un tiempo especificado. La transferencia desde una entrada a otra es suave con una rampa lineal.

MATEMATICAS



Absolute Value

ABS provee el valor absoluto de un valor de entrada entero o flotante



Add

ADD suma los valores de 2 a 16 entradas y genera un valor de salida.



Arithmetic

ARTHM provee la capacidad para configurar una función extensión para una entrada principal y aplica nueve diferentes tipos como compensación o aumento del rango de entrada. Todas las operaciones son seleccionadas por parámetros y conexión en la entrada.

Las nueve funciones aritméticas son: compensación lineal, raíz cuadrada, compensación aproximada, Btu, multiplicación y división tradicional, promedio, sumadora, polinomial de cuarto orden y nivel compensado HTG simple.



Comparator

CMP permite comparar dos valores y saca una salida booleana basada en la comparación LT (menor que), GT (mayor que), EQ (igual a), NEQ (no igual).



Divide

DIV divide un valor de entrada para otro valor de entrada y genera una salida.



Integrator

INT integra una variable o la suma o diferencia entre dos variables sobre el tiempo. El bloque compara el valor integrado o acumulado a límites preestablecidos (pre-trip y trip del bloque de función) y genera una señal de salida discreta cuando los límites son alcanzados. Puede ser usado también como totalizador.



Multiply

MLTY multiplica un valor de entrada para otro valor de entrada y genera una salida. Se lo emplea también para aplicar un valor de ganancia a la señal.



Substract

SUB realiza la sustracción de la entrada 2 a la entrada 1. ($OUT1 = IN1 - IN2$)

ARTICULOS ESPECIALES



Custom Block

Permite crear bloques personalizados a partir de estrategias de control (módulos) definidas.



Input
Parameter

Variable publica de lectura.



Internal Read
Parameter

Variable privada de lectura.



Internal Write
Parameter

Variable privada de escritura.



Output
Parameter

Variable publica de escritura.



Physical Block

Permite crear bloques personalizados a partir de un conjunto de DST's definidas.

Variable pública. Cualquier otro modulo dentro del sistema DeltaV puede leer/escribir los valores de este parámetro. No se puede repetir, es única.

Variable privada. Los valores de este parámetro solo pueden ser escritos/leídos por el modulo en el que se encuentran, por tanto se puede repetir esta variable debido a que es interna.

CONTADORES TEMPORIZADORES



Counter

CTR genera un valor de salida discreta de verdad (1) cuando el conteo alcanza el valor establecido. El bloque puede ser de conteo incremental o decremental.

Off-Delay
Timer

OFFD retrasa la transferencia de un valor de entrada discreta FALSO (0) a la salida por un periodo de tiempo especificado.

On-Delay
Timer

OND retrasa la transferencia de un valor de entrada discreta VERDADERO (1) a la salida por un periodo de tiempo especificado.

Retentive
Timer

RET genera una salida discreta VERDADERO (1) después de que la entrada ha sido VERDADERO por un periodo de tiempo especificado. El tiempo transcurrido la entrada ha sido VERDADERO y el valor de la salida, son reiniciados por una entrada discreta.



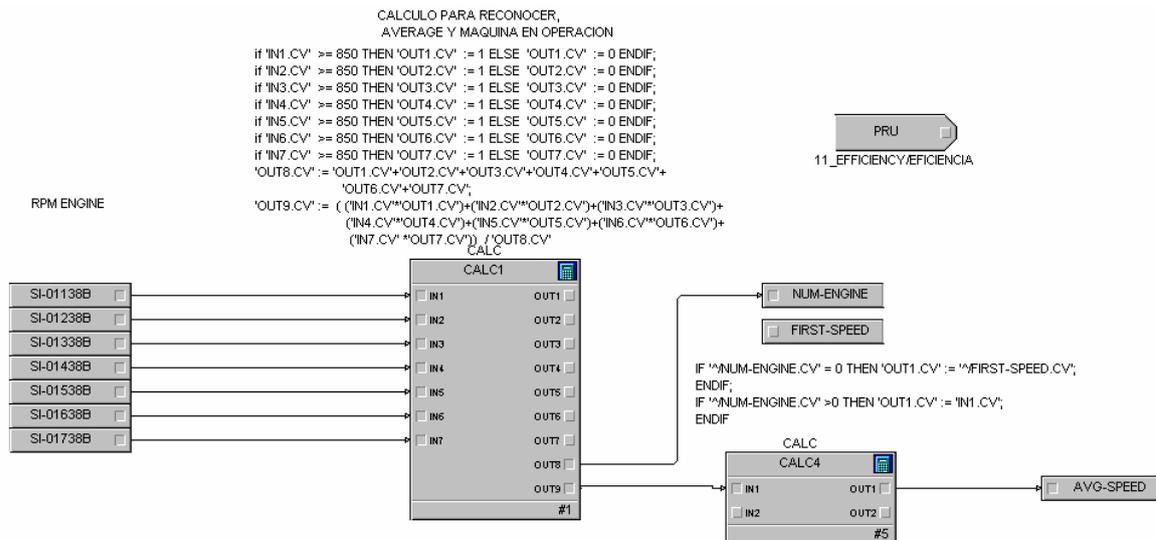
Timed Pulse

TP genera una salida discreta VERDADERO (1) por un periodo de tiempo especificado. Luego del tiempo transcurrido la señal de salida retorna a FALSO (0). La salida se mantiene en VERDADERO a pesar de que la señal de entrada haya retornado al valor original FALSO. Cualquier transición positiva puede causar un reinicio del temporizador.

ANEXO E

MODULO DE CONTROL DE VELOCIDAD

Una vez que el motor está en ralentí y el operador acciona el modo automático del sistemas (condiciones de operación necesarias) se inicia la rampa de ascenso (*RAMP 1*, en la figura E2) desde los 670RPM hasta la velocidad promedio, calculada por el módulo de la figura E1.



Cuando la máquina esta en línea, el punto de control pasa a ser determinado por la señal generada en el bloque selector de la estación. Cuando se decida apagar la maquina, el operador al presionar el botón STOP da inicio a la rampa de descenso (*RAMP 2*) que al concluir se da paso nuevamente al ralentí.

En ralentí se activa un temporizador de tres minutos de tiempo que el operador puede reiniciarlo cuando lo desee, pero existe un temporizador general (15 minutos) que no tiene opción de reinicio, gobierna al antes mencionado. Al concluir cualquiera de estos dos temporizadores la maquina se apague automáticamente.

En modo automático se maneja la escala de salida

0% – 670RPM

100% – 1050RPM

En la figura E2, el bloque *CALC1* gobierna todas las acciones del módulo de control mediante la expresión que se muestra junto al mismo y el bloque *CALC4* hace la conversión de la velocidad promedio a la escala antes mencionada.

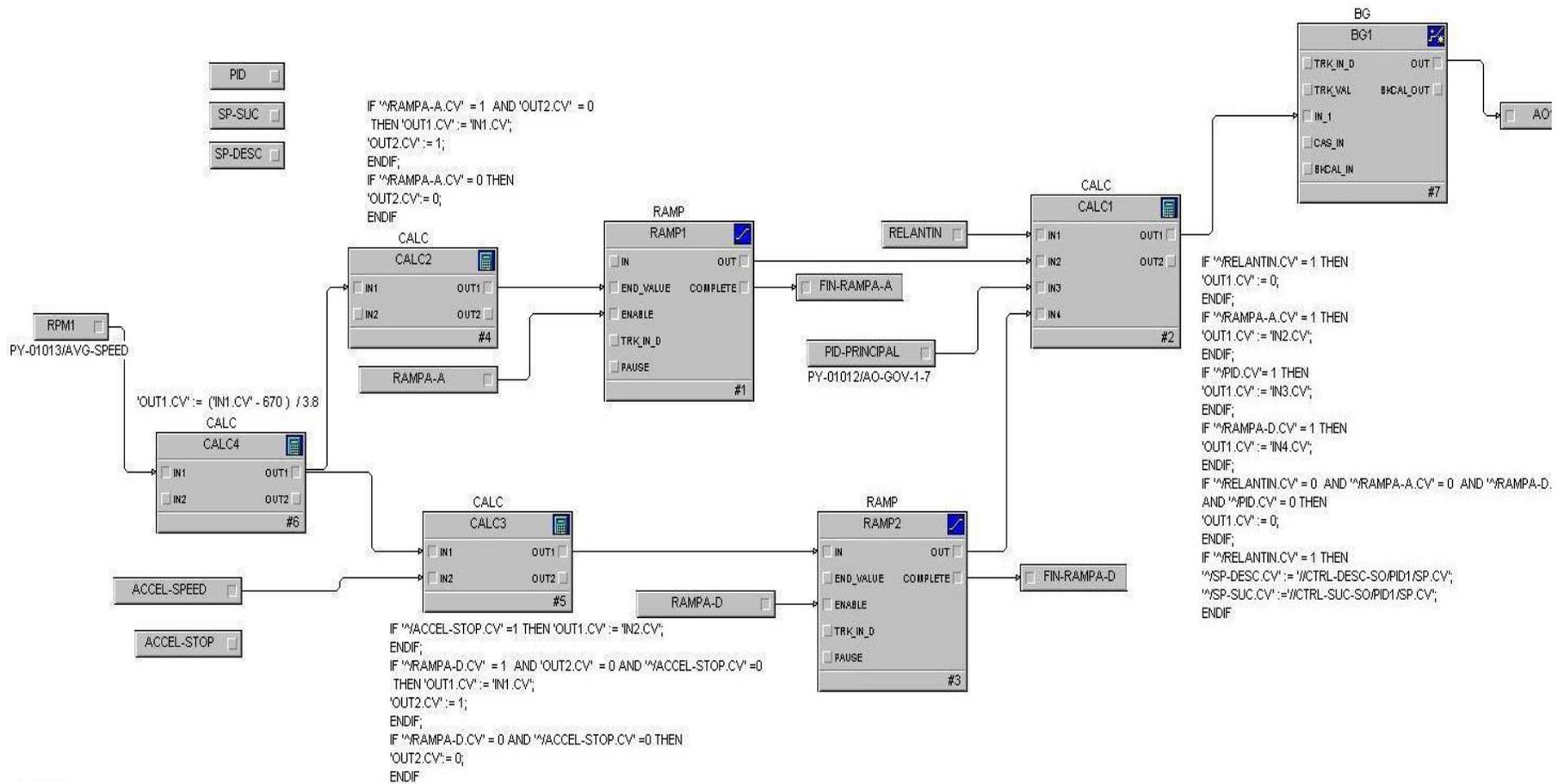


Figura E2. Módulo de control de velocidad 11_SPEED_CONTROL

ANEXO F

**FOTOGRAFIAS DE LA ESTACION DE BOMBEO N°1
LAGO AGRIO**



a)



b)



c)

Figura F1. a) Entrada, b) Vista frontal, c) Vista posterior de la Estación Lago Agrio



a)



b)



c)



d)

Figura F2. a) Vista colectiva, b) Vista individual, c) techo flotante, d) agitador de los tanques de almacenamiento



a)



b)

**Figura F3. a) Manifold , b) Derecha, tubería de entrada de los campo de producción
Izquierda, tubería de salida al proceso de bombeo**



a)



b)

Figura F4. a) Vista Frontal y b) Vista lateral de la sala de elevadoras de presión



a)



b)

Figura F6. a) Vista frontal y b) vista lateral de la sala de medidores



a)



b)

Figura F6. a) Vista frontal y b) vista lateral de los intercambiador de calor



a)



b)



c)

Figura F7. a) Vista frontal, b) vista lateral y c) interior de la sala de máquinas



a)



b)

Figura F8. a) Exterior y b) interior de la Sala de control



Figura F9. Unidad de bombeo



Figura F10. Armario de control

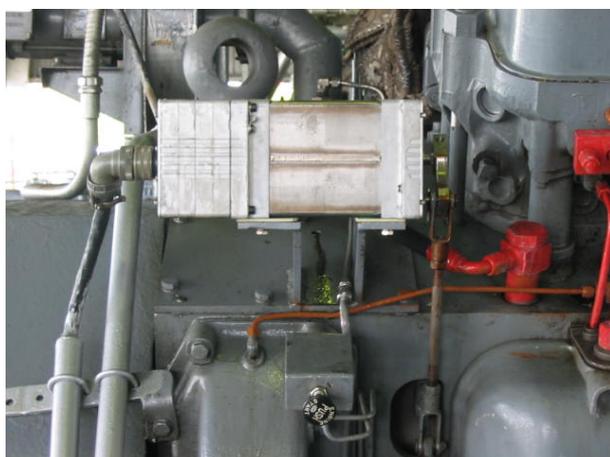


Figura F11. Actuador eléctrico



a)



b)

Figura F12. a) Vista frontal y b) vista lateral de la bomba centrífuga



a)



b)

Figura F13. a) Banco de pruebas, b) Sistema de engranajes junto al actuador

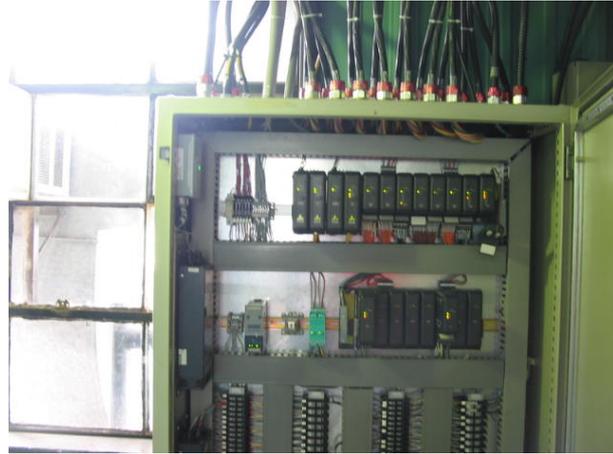


Figura F14. Controlador principal de la Estación ubicado en la sala de control

ANEXO G

DIAGRAMAS AUTOCAD

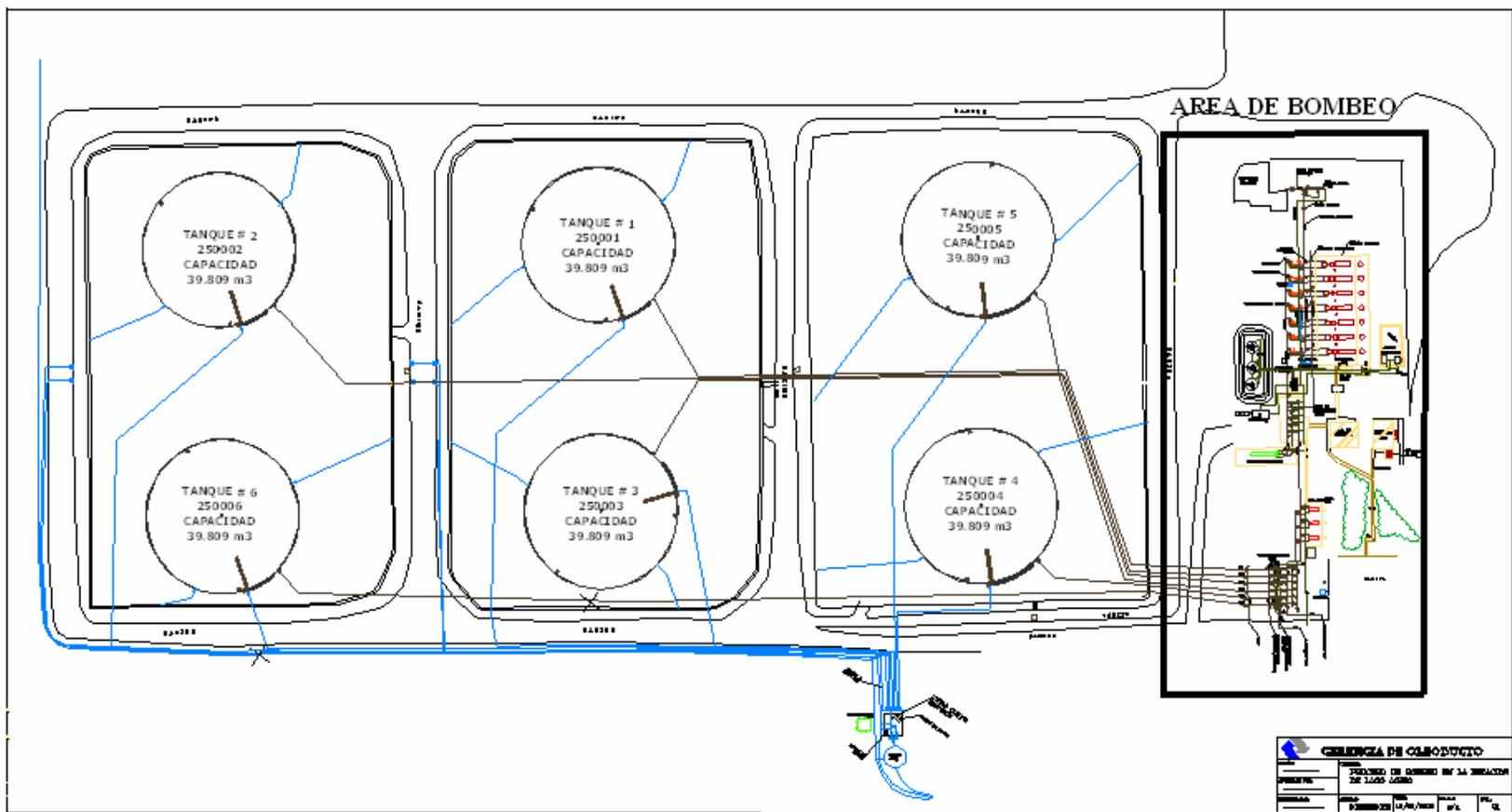


Figura G1. Estación Lago Agrio

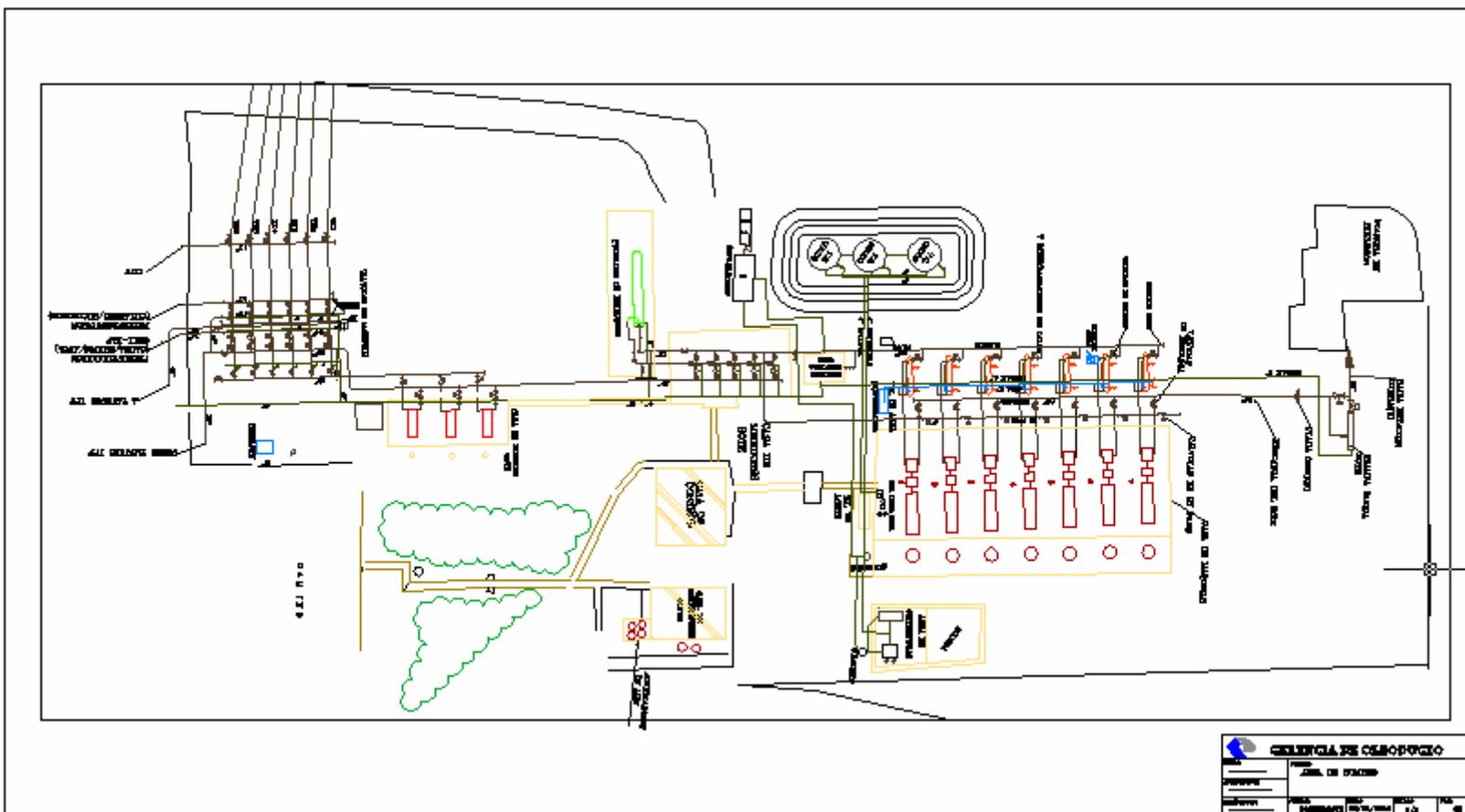


Figura G2. Área de Bombeo

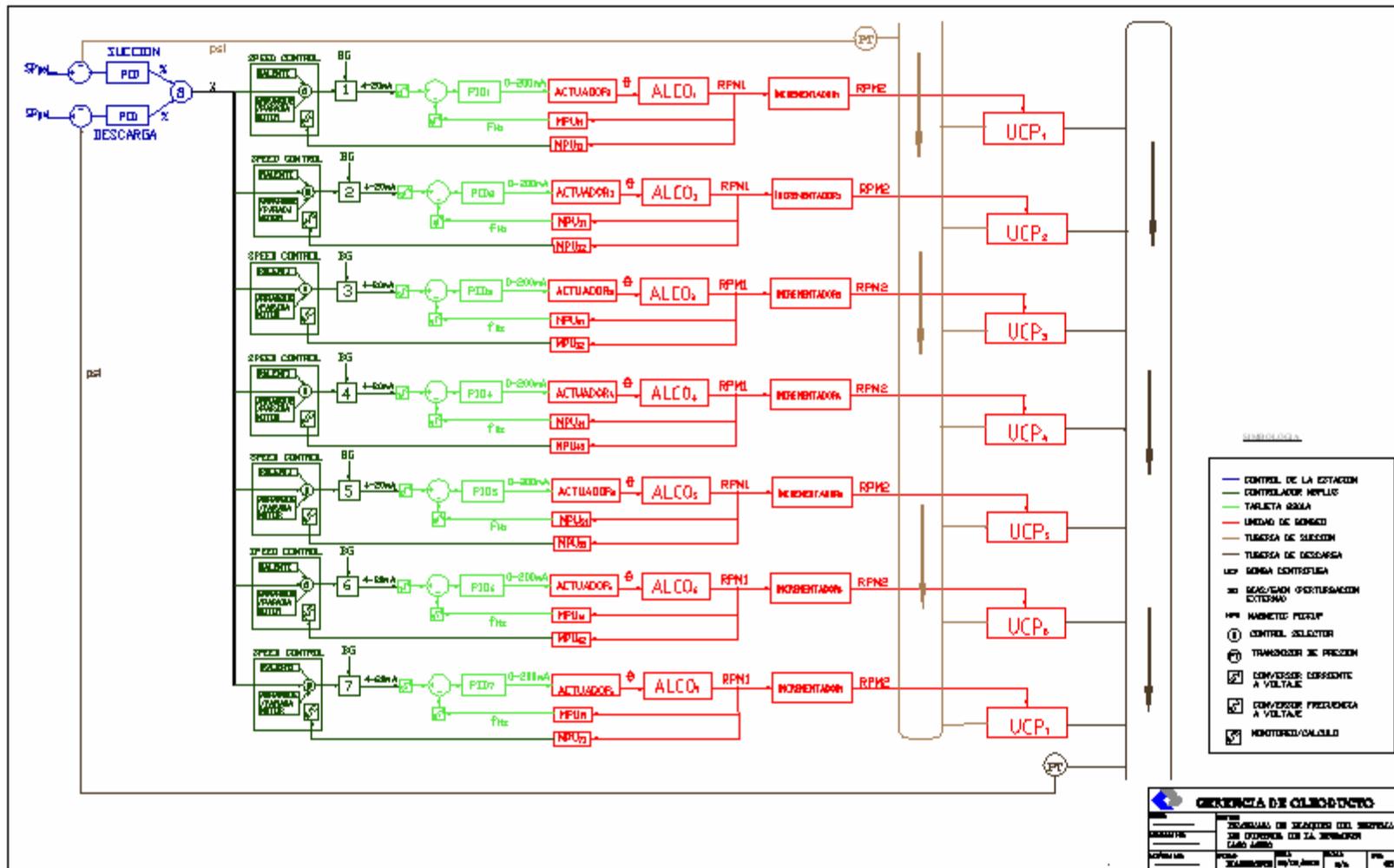


Figura G1. Diagrama de bloques del sistema de control de la Estación Lago Agrio

HOJA DE RECEPCION

Sangolquí, _____

ELABORADO POR:

Juan Carlos Casañas Fuentes

AUTORIDADES:

Sr. Ing. Victor Proaño
Coordinador de la Carrera de Ingeniería Electrónica
Automatización y Control

Sr. Dr. Jorge Carvajal
Secretario Académico