

Universidad Católica de Santa María
Facultad de Ciencias e Ingenierías Físicas y Formales
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



**“IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMAS DE CONTROL AVANZADO PARA
MEJORAR LA CALIDAD EN LA PRODUCCIÓN DE ARENAS DE LA PLANTA
DE PROCESAMIENTO DE RELAVE DE LA MINA TOQUEPALA SOUTHERN”**

Tesis presentada por el Bachiller:

Barriga Marcapura, Christian Néstor.

Para optar el Título Profesional de:

Ingeniero Electrónico.

Con especialidad en:

Automatización y Control.

Asesora:

Mg. Valdivieso Herrera, Diana Isabel.

Arequipa – Perú

2020



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

INFORME DICTAMEN DE BORRADOR DE TESIS

Los que suscriben:

Ing. Henry Christian Zegarra Jago
Ing. Diana Valdivieso Herrera

Dictaminadores del Borrador de Tesis titulado:

" Implementación de Sistemas de Control
Avanzado para mejorar la calidad en la Producción de
Arenas de la Planta de Procesamiento de Relave de la
Mina Toquepala Southern "

Nombrados con Decreto Nro.: 004 - DEPIE-2019, de fecha: 31/10/2019

Presentado por el (la) los Bachiller (es):

2. Barriga Marcapura Christian Nestor
3. _____

Cumplen con emitir su Dictamen:

- No registra observaciones, es procedente (X)
- Registra observaciones que deben ser subsanadas (ver hoja adjunta) ()

Arequipa, 18/12/2019

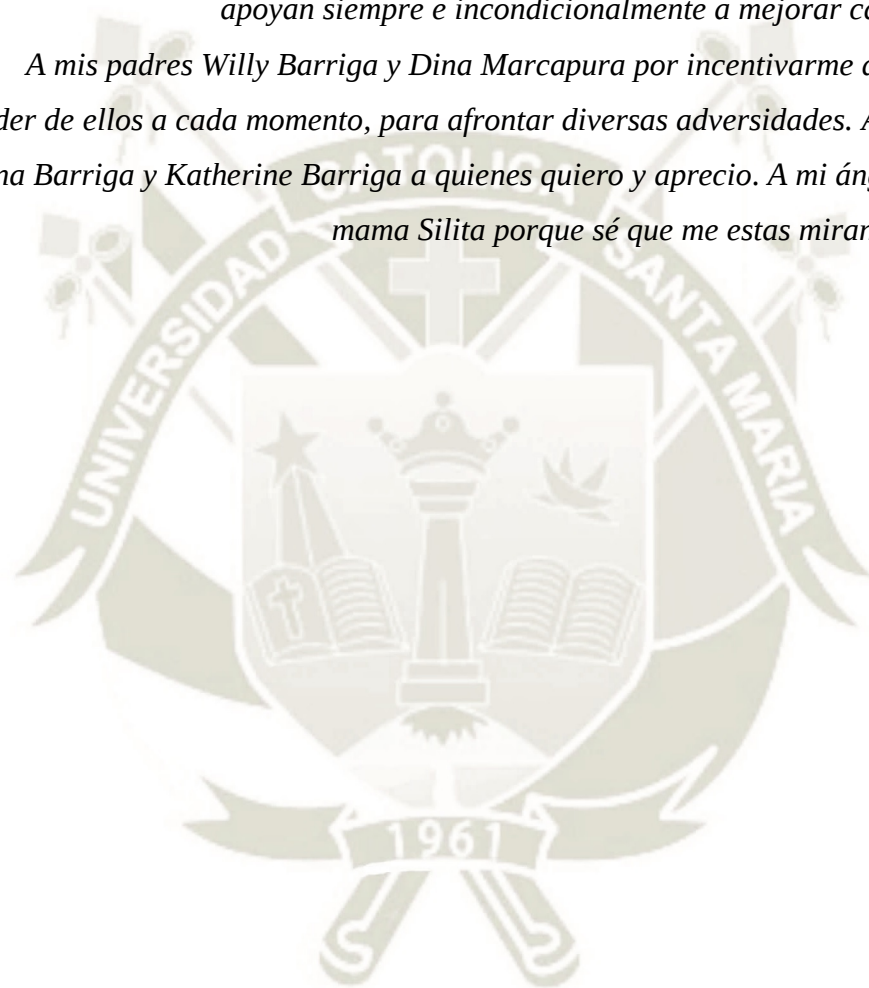
Henry Zegarra Jago
Ing. Henry Zegarra Jago

Diana Valdivieso H.
Ing. Diana Valdivieso H.

Dedicatoria

Mi trabajo de Tesis está dedicado a Dios, que ha sido un pilar en mi formación durante todas las etapas de mi vida. A mi esposa Melanie Valcárcel y mi hijo Christian Stephano, mis dos grandes amores y mis más grandes tesoros, quienes están siempre conmigo y me apoyan siempre e incondicionalmente a mejorar cada día, los amo.

A mis padres Willy Barriga y Dina Marcapura por incentivarme a salir adelante y aprender de ellos a cada momento, para afrontar diversas adversidades. A mis hermanitas Ximena Barriga y Katherine Barriga a quienes quiero y aprecio. A mi ángel de la guarda, mama Silita porque sé que me estas mirando desde arriba.



Agradecimiento



*Agradezco a todos los docentes de la
Escuela Profesional de Ingeniería
Electrónica por poder compartir sus
experiencias e incentivar me a crecer cada
día más y en especial a la Ingeniera
Diana Valdivieso, por todo su apoyo
incondicional, consejos, paciencia y
buena disposición para poder culminar
mi trabajo de tesis.*

RESUMEN

Teniendo como principal objetivo, la implementación de sistemas de control avanzados para mejorar la calidad en la producción de arenas, se ha implementado un sistema experto basado en lógica difusa para poder controlar la planta de procesamiento de relave, se verificó que los parámetros adecuados a ser controlados son el porcentaje de sólidos y porcentaje de malla, al tener un control de ambos parámetros se asegura una buena calidad de material para poder posteriormente construir el dique de contención de relaves.

Para obtener el porcentaje de malla se tuvo que realizar una red neuronal en base a variables de la planta que afectan directamente en este parámetro para luego ser comparado con los valores obtenidos por laboratorio.

Para la implementación de la lógica difusa se tuvo que modificar la librería difusa del Sistema Control Distribuido System800xA para poder adecuarlo a las entradas y salidas a controlar, obteniendo un sistema multivariable.

Palabras Clave:

Sistema experto, control difuso, redes neuronales, sistema de control avanzado, control multivariable.

ABSTRACT

Having as main objective, the implementation of control systems advanced to improve the quality of sand production, has been implemented an expert system based on fuzzy logic to control the plant tailings processing, it is verified that the appropriate parameters to be controlled are the percentage of solids and percentage of mesh, having a control of both parameters ensure a good quality of material to be able to later build the tailings containment dam.

To obtain the mesh percentage, a neural network had to be made based on plant variables that directly affect this parameter and then be compared to the values obtained by laboratory. For the implementation of fuzzy logic, the fuzzy library of the Distributed Control System System 800xA to be able to adapt it to the inputs and outputs to control, obtaining a multivariable system.

Keywords:

Expert system, fuzzy control, neural networks, advanced control system, multivariable control.

ÍNDICE GENERAL

DICTAMEN APROBATORIO	
DEDICATORIA	
AGRADECIMIENTO	
RESUMEN	
ABSTRACT	
CAPITULO I	2
1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO	2
1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.2. OBJETIVOS	2
OBJETIVO PRINCIPAL:	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS:	2
1.3. ALCANCES	3
1.4. VARIABLES	3
CAPITULO II	5
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1. PROCESO DE CONCENTRADO	5
2.1.1. Chancado o Trituración	5
2.1.2. Molienda	6
2.1.3. Flotación	7
2.1.4. Filtrado y secado	8
2.2. PROCESO DE RELAVE	8
2.2.1. Granulometría - porcentaje de malla	8
2.2.2. HidroCiclones	9
2.3. SISTEMAS EXPERTOS	10
2.3.1. Sistema Experto SGS – Gensym	11
2.3.2. Lógica Difusa aplicada	12
2.3.3. Librería Lógica Difusa System800xA	25
2.4. REDES NEURONALES	28
2.4.1 Red Neuronal con una capa oculta	29
2.4.3 NeurOn Line Studio (NOL Studio)	31
2.5. OPC (OLE for Process Control)	32
CAPITULO III	36
3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL	36
3.1. PROCESO	36
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO	41

3.3. ELABORACIÓN DE LA RED NEURONAL	43
3.3.1 Red Neuronal de una capa oculta	44
3.3.2 Red Neuronal de tres capas ocultas	52
3.2.3 Integración con el DCS System800xA	62
3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO.....	68
3.4.1. Simulación del Sistema Experto:	73
3.4.2. Adaptación de la librería Fuzzy System800xA:	76
3.4.3. Sistema Experto System800xA.....	79
CAPITULO IV	85
RESULTADOS.....	85
CAPITULO V.....	106
COSTO Y PRESUPUESTO	106
CONCLUSIONES.....	110
RECOMENDACIONES	112
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113
ANEXOS	115

FIGURAS

Figura 1 Corte de chancadora giratoria - Fuente (CONSULTANCY, 2016).....	6
Figura 2 Eficiencia de los Tipos de Molienda - Fuente (CONSULTANCY, 2016)	7
Figura 3 Proceso de flotación - Fuente (CONSULTANCY, 2016)	7
Figura 4 Tipos de Flotación – Fuente (CONSULTANCY, 2016)	8
Figura 5 Partes del Hidrociclón – Fuente (ALNICOLSA, 2018).....	10
Figura 6 Estructura del Sistema SGS - Gensym. Fuente (SGS Mineral Services, 2017)....	11
Figura 7 Clasificación de temperaturas – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	13
Figura 8 Funciones de membresía para temperaturas – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	14
Figura 9 Grados de pertenencia de $T=29^{\circ}\text{C}$ – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	14
Figura 10 Función de membresía de salida – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	15
Figura 11 Conclusión por método de truncamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).16	
Figura 12 Conclusión por Método de escalamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	17
Figura 13 Conclusión inferida final método de truncamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).....	17
Figura 14 Conclusión inferida final método de escalamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).....	18
Figura 15 Defusificación – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	18
Figura 16 Diagrama a bloques de un controlador difuso genérico. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).....	19
Figura 17 Función de membresía de $E(t)$ y $dE(t)$ – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)....	19

Figura 18 Función de membresía de salida. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	20
Figura 19 Significado del error y variación del error – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	21
Figura 20 Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	22
Figura 21 Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	22
Figura 22 Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	24
Figura 23 Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	24
Figura 24 Ventana del controlador Fuzzy – Fuente (ABB S.A., 2014)	25
Figura 25 Condicionales Fuzzy – Fuente (ABB S.A., 2014)	27
Figura 26 Modelo de neurona de McCulloch y Pitts - Fuente (Gestal Pose, 2009)	28
Figura 27 Representación matemática de una neurona – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)	29
Figura 28 Función Sigmoide – Fuente (Gestal Pose, 2009)	29
Figura 29 El error es definido como la distancia – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)	30
Figura 30 Esquema general Topología – Fuente (Pérez, 2006)	33
Figura 31 Arquitectura OPC – Fuente (Pérez, 2006)	34
Figura 32 Ubicación Geográfica – Fuente (Google LLC, s.f.)	36
Figura 33 Ubicación del Zona de Dilución, Planta 1700 y Planta 1701 - Fuente (Google LLC, s.f.)	37
Figura 34 Diagrama P&ID de Proceso – Elaboración propia	39
Figura 35 Diagrama P&ID de Proceso con el sistema experto implementado – Elaboración propia	40
Figura 36 Diagrama de Control de Lazo cerrado – Elaboración propia	43
Figura 37 Modelo Neuronal con una capa oculta – Elaboración propia	45
Figura 38 Red Neuronal – Elaboración propia	45
Figura 39 Importación de la base de datos – Elaboración propia	47
Figura 40 Asignación de Entradas y Salidas – Elaboración propia	48
Figura 41 Estructura de la Red Neuronal – Elaboración propia	48
Figura 42 Red Neuronal Vs Valor Real 1 capa oculta Malla 200_1 – Elaboración propia	49
Figura 43 Error de la Red Neuronal Malla 200_1 – Elaboración propia	50
Figura 44 Error de la Red Neuronal Malla 200_2 – Elaboración propia	50
Figura 45 Coeficiente de Correlación Malla 200_1 una capa oculta– Elaboración propia	51
Figura 46 Coeficiente de Correlación Malla 200_2 una capa oculta – Elaboración propia	51
Figura 47 Entradas y sus Delay a usar de la Malla 200_1 - Elaboración propia	52
Figura 48 Entradas y sus Delay a usar de la Malla 200_2 - Elaboración propia	53
Figura 49 Modelo Neuronal con tres capas ocultas Malla 200_1 – Elaboración propia	54
Figura 50 Modelo Neuronal con tres capas ocultas Malla 200_2 – Elaboración propia	55
Figura 51 Red Neuronal – Elaboración propia	56
Figura 52 Estructura de la Red Neuronal 2 capas – Elaboración propia	58

Figura 53 Red Neuronal Vs Valor Real 3 capas ocultas Malla 200_1 – Elaboración propia	58
Figura 54 Red Neuronal Vs Valor Real 3 capas ocultas Malla 200_2 – Elaboración propia	59
Figura 55 Estadística de la Malla 200_1 con tres capas ocultas – Elaboración propia	59
Figura 56 Estadística de la Malla 200_2 con tres capas ocultas – Elaboración propia	59
Figura 57 Comparación entre Redes de una y tres capas Malla 200_1 – Elaboración propia	60
Figura 58 Comparación entre Redes de una y tres capas Malla 200_2 – Elaboración propia	61
Figura 59 Contenido del archivo .bpn generado a partir del entrenamiento de la Red Neuronal – Elaboración propia.....	62
Figura 60 Modelo de Red Neuronal Malla 200_1, con los datos reales de entrada y salida – Elaboración propia.....	64
Figura 61 Modelo de Red Neuronal Malla 200_2, con los datos reales de entrada y salida – Elaboración propia.....	65
Figura 62 Tabla de configuración de la variable para enviar el dato de la Malla 200_1 hacia el DCS – Elaboración propia.....	66
Figura 63 Tabla de configuración de la variable para enviar el dato de la Malla 200_2 hacia el DCS – Elaboración propia.....	66
Figura 64 Bloque de funciones de la Malla 200_1 – Elaboración propia	67
Figura 65 Bloque de funciones de la Malla 200_2 – Elaboración propia	67
Figura 66 Faceplate de la Malla 200 1 y 2 - Elaboración propia.....	67
Figura 67 Clasificación de Error de Porcentaje de Sólidos – Elaboración propia	69
Figura 68 Clasificación de Error de Porcentaje de Malla – Elaboración propia	69
Figura 69 Grados de Membresía del Porcentaje de sólidos – Elaboración propia	70
Figura 70 Grados de Membresía del Porcentaje de malla – Elaboración propia	70
Figura 71 Grado de Membresía de la Bomba PP001 y PP002 – Elaboración propia	71
Figura 72 Grado de Membresía de la Bomba PP003 y Bomba PP004 – Elaboración propia	71
Figura 73 Grado de Membresía de la Bomba PP005 y Bomba PP004 – Elaboración propia	71
Figura 74 Entradas y Salidas Fuzzy – Elaboración propia.....	73
Figura 75 Conjunto de reglas difusas en Matlab – Elaboración propia.....	74
Figura 76 Comportamiento de la PP001 en función a los Sólidos y Malla – Elaboración propia.....	75
Figura 77 Comportamiento de la PP003 en función de los Sólidos y Malla – Elaboración propia.....	75
Figura 78 Librería Fuzzy por Defecto – Elaboración propia.....	76
Figura 79 Librería Fuzzy modificada para un Control de tres entradas dos salidas – Elaboración propia.....	77
Figura 80 Parámetros de entrada y salida del sistema - Elaboración propia	77
Figura 81 Variables internas del sistema – Elaboración propia	78
Figura 82 Parámetros de entrada de las Líneas 1 y 2 - Elaboración propia	79
Figura 83 Bloque de funciones de la Línea 1 y envío de salida para el control de la bomba PP-001 - Elaboración propia.....	80

Figura 84 Configuración de los grados de Membresía de las entradas y salidas - Elaboración propia.....	81
Figura 85 Condicionales del Sistema – Elaboración propia.....	81
Figura 86 Reglas del sistema, cada grado de membresía tiene su Regla - Elaboración propia.....	82
Figura 87 Sistema en General para ambas líneas - Elaboración propia	82
Figura 88 Faceplate del Sistema Experto para ambas líneas - Elaboración propia.....	83
Figura 89 Comparación entre Laboratorio VS Red Neuronal de la Malla 1 – Elaboración propia.....	88
Figura 90 Comparación entre Laboratorio VS Red Neuronal de la Malla 2 - Elaboración propia.....	89
Figura 91 Caso 1, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 1 - Elaboración propia.....	90
Figura 92 Caso 1, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 2 - Elaboración propia.....	91
Figura 93 Caso 2, tendencias con el Sistema de Experto desactivado para la línea 1 en un mismo periodo de tiempo - Elaboración propia	92
Figura 94 Caso 2, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 2 en un mismo periodo de tiempo - Elaboración propia	93
Figura 95 Caso 1, Consumo de agua de cuando ambas líneas tiene el Sistema Experto en línea – Elaboración propia.....	96
Figura 96 Caso 2, Consumo de agua cuando la línea 1 se encuentra sin experto y la línea 2 con experto - Elaboración propia.....	97
Figura 97 Tendencia de Consumo de agua de la Línea 1 con y sin el Sistema Experto - Elaboración propia.....	98
Figura 98 Tendencia de Consumo de agua de la Línea 2 con y sin el Sistema Experto - Elaboración propia.....	99
Figura 99 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de relave en la línea 1 - Elaboración propia.....	100
Figura 100 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de agua en la línea 1 - Elaboración propia.....	101
Figura 101 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de relave en la línea 2 - Elaboración propia.....	102
Figura 102 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de agua en la línea 2 - Elaboración propia.....	103

TABLAS

Tabla 1 - Tabla de Numeración y abertura de tamices - Fuente (PUCV, 2006)	9
Tabla 2 REGLAS DE LÓGICA DIFUSA – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).....	16
Tabla 3 NOTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA DEL ERROR. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).....	20
Tabla 4 CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA MAMDANI. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)	21
Tabla 5 CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA TSK – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).	23

Tabla 6 Clasificación de algoritmos de aprendizaje – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998).....	29
Tabla 7 Secuencia de Implementación del Sistema Experto - Elaboración propia	41
Tabla 8 ENTRADAS Y SALIDAS – Elaboración propia	44
Tabla 9 SPAN de variables – Elaboración propia	68
Tabla 10 Límites de trabajo de las bombas en la operación – Elaboración propia	68
Tabla 11 Límites de error de variables – Elaboración propia.....	68
Tabla 12 Reglas difusas del Sistema Experto Línea 1 y Línea 2 – Elaboración propia	72
Tabla 13 Reglas Difusas Control de Nivel – Elaboración propia.....	72
Tabla 14 Presupuesto de implementación del Sistema Experto - Elaboración propia	106
Tabla 15 Ahorro en soles de las bombas de agua – Elaboración propia	108
Tabla 16 Horas hombre expresadas en soles – Elaboración propia	108





CAPITULO I

PLANTEAMIENTO TEÓRICO

CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO TEÓRICO

1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Para la extracción del mineral de cobre por concentración, se requiere tratar la materia enviada desde mina, la cual pasa por tres procesos de chancado: primario, secundario, y terciario; seguidamente por un proceso de molienda donde se reduce a nivel molecular, pasando luego al proceso de flotación Rougher con la premisa de todo aquello que flota es considerado *pulpa* siendo tratado y obteniendo del concentrado Bulk igualmente todo lo que no llegue a flotar es considerado relave y enviado a los espesadores para la recuperación de agua por sedimentación. El relave es enviado desde la planta para ser almacenado; existen plantas de procesamiento y filtración de relave que permiten separar el relave más grueso llamadas *arenas*, y que sirven para la construcción de los diques que contengan el relave; y el *relave* más fino que es empleado en una laguna. Para realizar la correcta filtración del relave se requiere de un adecuado uso de *agua* la cual es limitada y es uno de los problemas detectados. El operador para el control de su planta determina de acuerdo a las variables de relave y agua la velocidad de las bombas siendo modificada manualmente esta proposición es identificada como el problema principal. La planta trabaja manteniendo un control del porcentaje de sólidos como producto final, que es controlado por el operador mediante lazos abiertos de control. El laboratorio extrae muestras granulométricas diarias para obtener el valor del porcentaje de sólidos; no obstante, existe un desfase de tiempo, debido a que los reportes de la granulometría son reportados al día siguiente, no siendo un dato representativo para el control de la planta siendo un problema complementario. El control del porcentaje de sólidos como el control del porcentaje de malla (granulometría) aseguran una buena calidad en la producción de arenas.

1.2. OBJETIVOS

OBJETIVO PRINCIPAL:

- Implementar un sistema de control experto para mejorar la producción de arenas mediante el control de las variables de porcentaje de sólidos y porcentaje de malla.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Obtener a partir Redes Neuronales de tipo Backpropagation un valor estimado del Porcentaje de Malla.
- Controlar el consumo de agua mediante el sistema experto como parte de la mejora de la producción de arenas.

- Disminuir el tiempo utilizado para controlar la planta de relaves por parte del operador.
- Modificar y adecuar la librería de lógica difusa del DCS System800xA de ABB.

1.3. ALCANCES

- Al implementar un sistema de control experto, permitirá mejorar la calidad del producto que se enviará al dique, este material es depositado por tubería en un solo punto de cada cancha activa y esparcido por maquinaria pesada (Bulldozer's), para luego ser compactado; asegurando que el producto para el dique es el adecuado, así se evitará posibles encallamientos, teniendo en cuenta que un encallamiento de alguna maquinaria implicaría la pérdida de producción de arenas para el dique, ya que se requiere alta disponibilidad en toda la flota de maquinaria pesada.
- Obteniendo un estimado del porcentaje de malla mediante redes neuronales por Backpropagation, se visualizará el valor en línea, considerando que actualmente el dato solo se obtiene mediante un reporte de laboratorio con un día de retraso, actualmente en el mercado existen equipos en línea que pueden medir el valor de porcentaje de malla, sin embargo, el alto costo y mantenimiento no justifica su operación en estas áreas.
- Se optimizará el consumo de agua al controlar el set point velocidad de bombeo, variando según se requiera mayor o menor cantidad de agua.
- Se reducirá el tiempo que dedica el operador para controlar la planta de procesamiento de relave pudiendo realizar otras tareas que requieran mayor control.
- Se modificará la librería de lógica difusa adecuando a un sistema multivariable de acuerdo al número de entradas y salidas consideradas.

1.4. VARIABLES

VARIABLES INDEPENDIENTES:

El agua, y relave son las variables independientes.

VARIABLES DEPENDIENTES:

Flujo de relave, flujo de agua, presión de relave, presión de agua, porcentaje de sólidos, porcentaje de malla 200 y nivel de relave.



CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

CAPITULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1. PROCESO DE CONCENTRADO

2.1.1. Chancado o Trituración

- Trituración primaria: Trata el material que viene de la mina, con trozos máximos de hasta 150 cm (60 pulgadas) y entrega un producto de 15 a 20 cm. (6 a 8 pulgadas).
- Trituración secundaria: Toma el producto de la trituradora primaria y lo reduce a un producto de 5 a 8 cm. (2 a 3 pulgadas).
- Trituración terciaria: Toma el producto de la trituración secundaria y lo reduce a un producto de 1 a 1,5 cm. (3/8 a 1/2 pulgada) que puede ir a una etapa de molienda (en el caso de sulfuros de cobre) o al proceso de lixiviación (en el caso de óxidos). Las etapas de un proceso de reducción de tamaño se definen de acuerdo al proceso posterior al que será sometido el mineral.

Si el mineral requiere una reducción fina, se identifican:

- Circuito de molienda convencional (tres etapas de chancado y dos de molienda).
- Circuito de molienda unitario (tres etapas de chancado y uno de molienda).
- Circuito de molienda semiautógenos (una etapa de chancado y dos de molienda).
- Si el mineral requiere una reducción gruesa, sólo se trabaja con etapas de chancado.

Chancadora Giratoria: El movimiento máximo de la cabeza ocurre en la descarga evitando los problemas de hinchamiento del material. Debido a que chanca durante el ciclo completo, tiene más capacidad que una chancadora de mandíbulas del mismo tamaño (boca), por lo que se le prefiere en plantas que tratan altos flujos de material (CONSULTANCY, 2016, pág. 10). En la Fig. 1 se muestra el corte vertical de la chancadora giratoria, en el cual se puede apreciar sus partes principales: Árbol, araña, manto y cono.

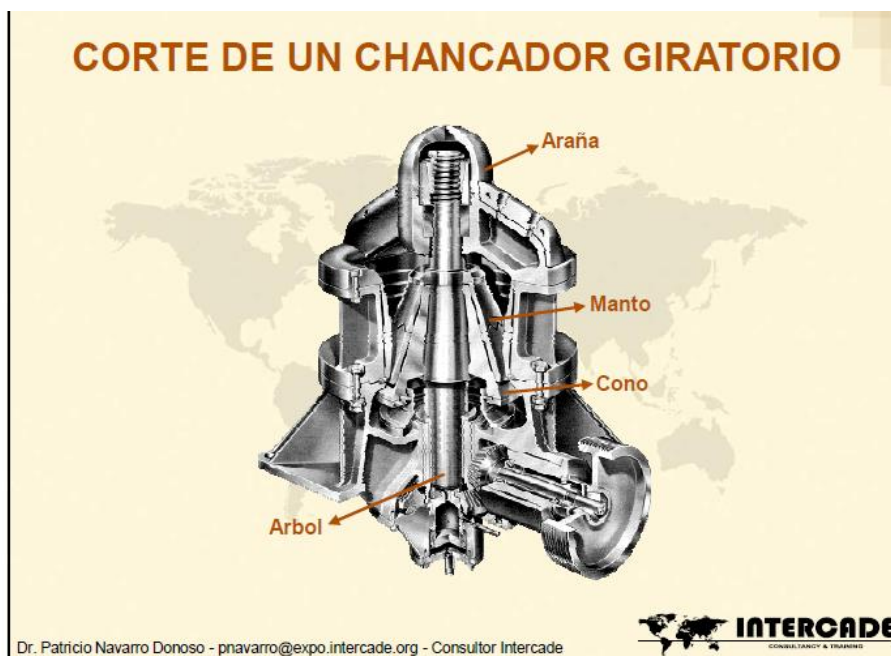


Figura 1 Corte de chancadora giratoria - Fuente (CONSULTANCY, 2016)

2.1.2. Molienda

Los procesos de reducción de tamaño de minerales, tienen por objetivo liberar aquellas especies minerales útiles que se encuentran dispersos en una gran masa, la que generalmente carece de valor comercial.

Para la reducción fina de minerales los medios de molienda pueden ser:

- El propio mineral (molinos autógenos).
- Medio no metálico, natural o fabricado (molinos de pebbles).
- Medio metálico (molinos de barras o de bolas de acero).

Los medios de molienda son dos: molinos de barras y molinos rotatorios, el primero consiste en barras de acero donde el cilindro posee una relación largo/diámetro de 1,5/1 o mayor, el segundo utiliza bolas de acero o de hierro fundido con una relación largo/diámetro de 1,5/1 o mayor (CONSULTANCY, 2016, pág. 18).

Dentro de los molinos rotatorios tenemos una clasificación:

- Molinos de barras.
- Molinos de bolas.
- Molinos semiautógenos (SAG).

En la Fig. 2 se observa la eficiencia de los tipos de molienda, cada molino refleja la capacidad trabajo que se obtendrá según el material que va a procesar.

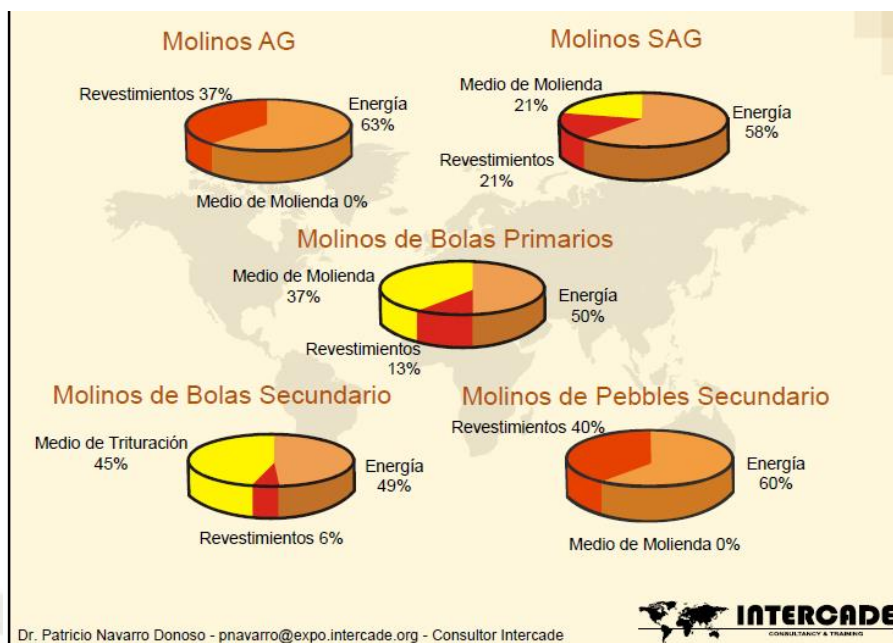


Figura 2 Eficiencia de los Tipos de Molienda - Fuente (CONSULTANCY, 2016)

2.1.3. Flotación

El proceso de flotación consiste en la separación selectiva de las partículas útiles de la pulpa (ganga), aprovechando las propiedades hidrófilas (afinidad con el agua) e hidrófobas (no es miscible con el agua) de las materias sólidas a separar, como muestra la Fig. 3, se trata fundamentalmente de un fenómeno de comportamiento de sólidos frente al agua, es decir, de mojabilidad de los minerales (CONSULTANCY, 2016, pág. 34).

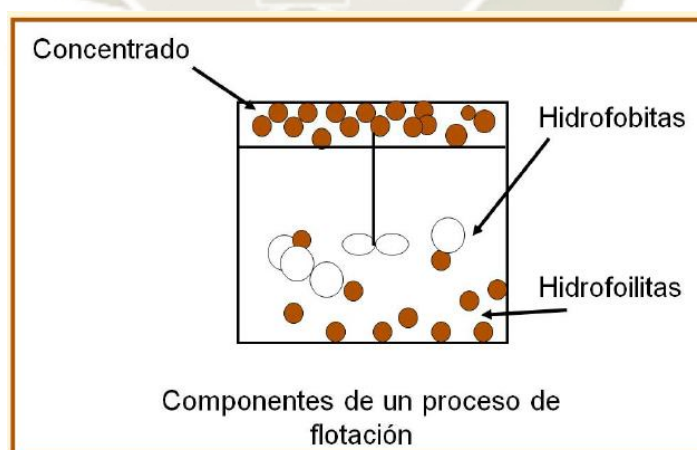


Figura 3 Proceso de flotación - Fuente (CONSULTANCY, 2016)

En la Fig. 4 se muestra todos los tipos de flotación que se emplean en este proceso, teniendo el mismo principio del comportamiento de sólidos frente al agua.

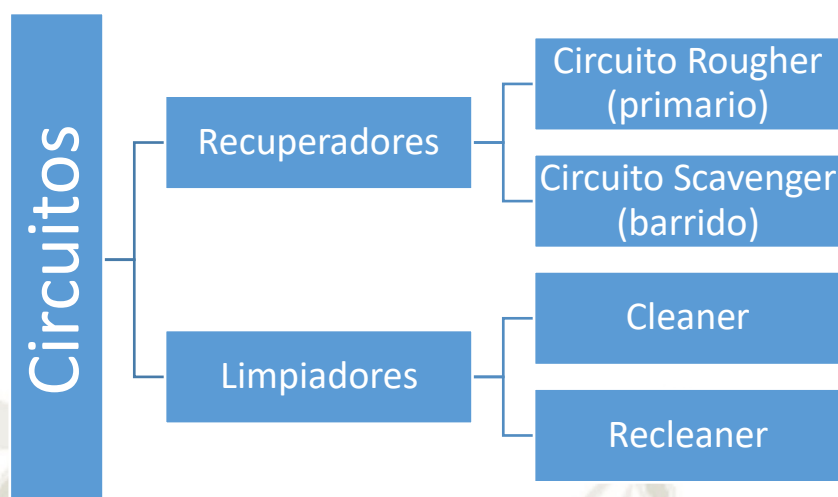


Figura 4 Tipos de Flotación – Fuente (CONSULTANCY, 2016)

2.1.4. Filtrado y secado

El concentrado de cobre es deshidratado mediante filtros de alta presión, aquí culmina la operación minera. El concentrado obtenido debe ser trasladado a la fundición para su posterior procesamiento (CONSULTANCY, 2016, pág. 40).

2.2. PROCESO DE RELAVE

Los relaves son primero espesados y luego filtrados, de tal manera se obtiene la cantidad de agua adecuada para su disposición. Por razones de estabilidad, los relaves filtrados requieren ser compactados, en este caso, se requiere la desecación de relaves in-situ. La producción de relaves, la pluviosidad, evaporación del sitio, el tiempo, áreas de desecación y la flexibilidad operacional puede limitar la aplicación de los relaves filtrados.

Perú es un país altamente sísmico con una topografía accidentada, de manera que, si se requiere zonas de depósito de relaves con comportamiento estructural para minimizar las dimensiones de una presa de relaves, entonces se requiere relaves filtrados compactados.

Los relaves filtrados compactados tienen limitaciones operativas de aplicación durante los periodos de moderada a alta precipitación (>50 mm de la precipitación total mensual) (Lara, 2013, pág. 36).

2.2.1. Granulometría - porcentaje de malla

La granulometría es la medición de los granos de una formación sedimentaria y el cálculo de cada uno de los tamaños previstos por una escala granulométrica con fines de análisis tanto de su origen como de sus propiedades (Ecured, s.f.).

Para separar por tamaños se utilizan las mallas de diferentes aberturas, las cuales proporcionan el tamaño máximo de agregado en cada una de ellas. En la práctica los pesos de cada tamaño se expresan como porcentajes retenidos en cada malla con respecto al total de la muestra. Estos porcentajes retenidos se calculan tanto parciales como acumulados, en cada malla, ya que con estos últimos se procede a trazar la gráfica de valores de material (Cañas, s.f.). (ver tabla 1)

Tabla 1 - Tabla de Numeración y abertura de tamices - Fuente (PUCV, 2006)

Tamiz (ASTM)	Tamiz (Nch) (mm)	Abertura real (mm)	Tipo de suelo
3"	80	76.12	GRAVA
2"	50	50.8	
1 ½"	40	38.1	
1"	25	25.4	
¾"	20	19.05	
⅜"	10	9.52	
Nº 4	5	4.76	ARENA GRUESA
Nº 10	2	2	ARENA MEDIA
Nº 20	0.9	0.84	
Nº 40	0.5	0.42	
Nº 60	0.3	0.25	ARENA FINA
Nº 140	0.1	0.105	
Nº 200	0.08	0.074	

2.2.2. HidroCiclones

Los hidrociclones conocidos también como ciclones, forman una clase importante de equipos destinados principalmente a la separación de suspensiones sólido – líquido. El hidrociclón consiste de una parte cónica seguida por una cámara cilíndrica, en la cual existe una entrada tangencial para la suspensión de la alimentación (Feed). La parte superior del hidrociclón presenta un tubo para la salida de la suspensión diluida (overflow) y en la parte inferior existe un orificio de salida de la suspensión concentrada (underflow) (ALNICOLSA, 2018, págs. 1-3). El ducto de alimentación se denomina Inlet, el tubo de salida de la suspensión diluida se denomina vortéx, y el orificio de salida del concentrado se denomina ápex ver Fig. 5.

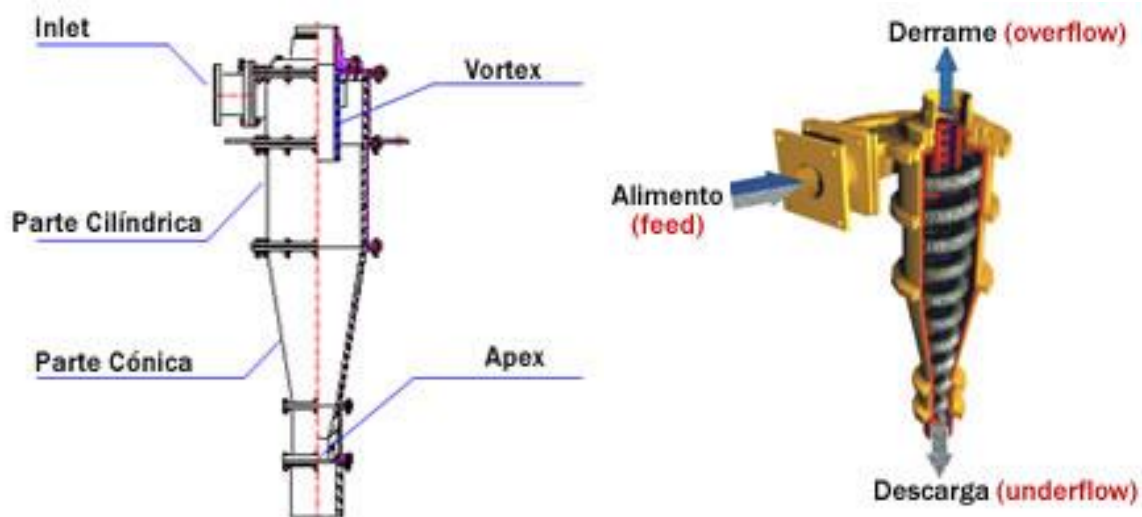


Figura 5 Partes del Hidrociclón – Fuente (ALNICOLSA, 2018)

Para el funcionamiento del ciclón se requiere que la materia que ingrese, lo haga a una determinada presión que es modelada metalúrgicamente, la fuerza tangencial de ingreso genera internamente dos fuerzas: la fuerza centrípeta y tangencial, ocasionando que las partículas más finas sean expulsadas por el overflow y las partículas más gruesas por el underflow. Evidentemente el porcentaje tanto fino como grueso depende de las configuraciones (diámetros) de los vórtice y ápex al igual que su desgaste.

2.3. SISTEMAS EXPERTOS

El mejor exponente de este tipo de control por el grado de aceptación que ha tenido a nivel industrial es el control Borroso, Difuso o Lógica Difusa (“Fuzzy Logic Control”). Este tipo de control se basa en la aplicación de un álgebra difusa planteada por Lofti Zadeh, al tratar de representar el pensamiento lógico humano. Para utilizar esta lógica, las variables controladas y observadas que provienen de los distintos sensores presentes en el proceso, cuya información será utilizada por el sistema de control, debe pasarse al mundo difuso a través de un procedimiento conocido como emborronado o fusificación (fuzzification), teniendo en cuenta el grado de pertenencia que tiene cada variable a los conjuntos difusos en que se subdivide el rango de aplicación a través de la definición de funciones de membresía asignadas a las mismas. Cuando las variables están ya definidas en forma difusa, se contrasta la información del sistema con la base de conocimiento disponible del proceso y mediante aplicación de álgebra difusa, se determina la acción de control requerida para el sistema, pero con carácter “difuso”. Para entregar esta información al mundo real, la acción de control debe ser desemborronada o defusificada (defuzzification), entonces estará disponible para ser aplicada a los actuadores del proceso. Entre las principales ventajas de

esta técnica puede destacarse la simpleza de su implantación, la extensión directa que tiene para aplicarse tanto a sistemas SISO como MIMO y en este último caso, sin requerir un mismo número de entradas que de salidas. Además, como se basa en una estructura de información similar a la del pensamiento humano, la forma de proceder tiene muy buena aceptación por parte de los operadores del sistema (Fernández, s.f., págs. 2-3).

2.3.1. Sistema Experto SGS – Gensym

El Sistema Experto SGS – Gensym es un sistema híbrido entre las empresas SGS (Société Générale des Surveillances) y Gensym dedicadas en parte al rubro de la minería, han desarrollado un sistema el cual permite implementar sistemas de control avanzado y optimizar procesos; se debe tener en cuenta que existen niveles en todo este sistema, el cual va desde la plataforma G2 que se considera un business rules engine (BRE), parte de Gensym, que transforma data de procesos en decisiones rápidas y acciones automatizadas. Por parte de SGS, nos proporciona una librería basada en el software G2, llamado MET, el cual proporciona funcionalidades específicas en el desarrollo de sistemas de control en tiempo real con lógica difusa y redes neuronales; al igual que la librería MET, SGS proporciona una caja de herramientas especializadas llamada MEC desarrollado por Advanced Systems Group de SGS Minerals Services para desarrollar e implementar control avanzado para procesos de minería.

Como último nivel tenemos las aplicaciones creadas por el usuario (KB) en donde se interactúa con los valores de planta para luego ingresar a las condicionales del sistema (SGS Mineral Services, 2017). Ver Fig. 6.

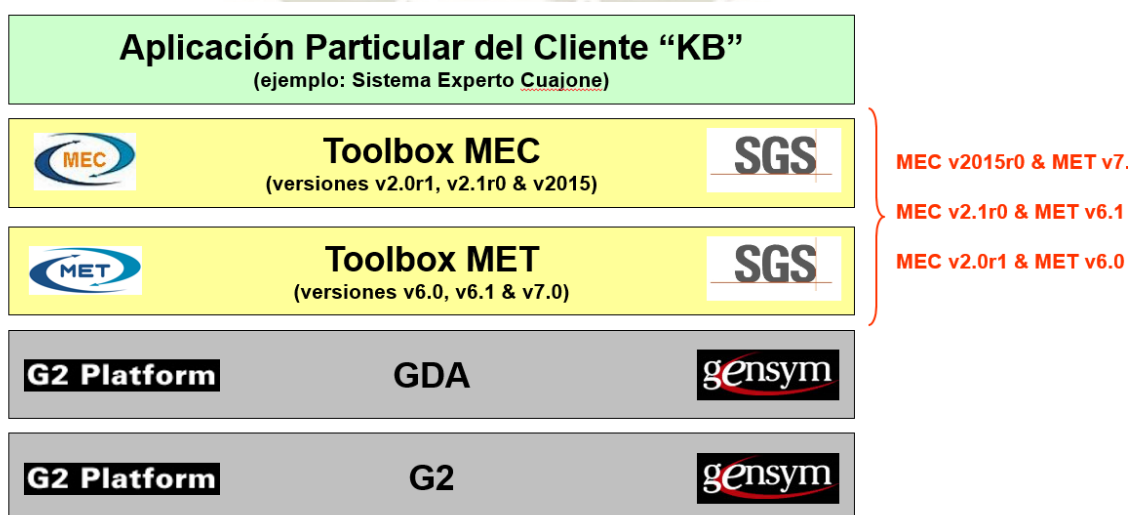


Figura 6 Estructura del Sistema SGS - Gensym. Fuente (SGS Mineral Services, 2017)

2.3.2. Lógica Difusa aplicada

Para entender cómo se implementa una lógica difusa se realizará un ejemplo que permitirá obtener resultados aplicables a sistemas reales a partir del planteamiento del problema. Se tiene que realizar un control de temperatura de un invernadero, actualmente el control de temperatura lo lleva a cabo el operador de forma manual y lo hace cerrando y abriendo una válvula que permite el paso de aire caliente, manteniendo una temperatura aproximada de 23 °C. El objetivo es automatizar el proceso, utilizando la experiencia del operador y mediante la aplicación de los conceptos de la lógica difusa.

Como primer paso de la solución del problema se clasificarán las posibles temperaturas que puede haber en el proceso, por ejemplo: CALIENTE, TIBIO y FRÍO.

En lógica difusa se parte del hecho de que conceptos como alto, bajo, ruidoso, dulce, caro, amargo, barato, delgado, etc. son percibidos de manera diferente por cada persona. Por ejemplo, para una persona de Alaska el concepto de caliente puede ser superior a los 10 °C, mientras que para un mexicano caliente es superior a los 30 °C o en un proceso de fundición caliente es por encima de los 300°C. Por esta razón los conjuntos CALIENTE, TIBIO y FRÍO son llamados *conjuntos difusos*. Un conjunto difuso es un conjunto con límites borrosos o “no muy bien” definidos.

Una vez clasificadas las temperaturas del invernadero en conjuntos difusos, se les asignarán valores, los valores que se asociarán a cada conjunto difuso tienen necesariamente que ver con el contexto del problema, en este caso el invernadero. Esto se hace tomando en cuenta la experiencia del operador, quien define los siguientes rangos de temperatura (T), para cada conjunto:

Supongamos que se mide en el invernadero la temperatura y la medición es de 29,9 °C, la temperatura pertenece al conjunto TIBIO, pero está únicamente a 0,1 grados para ser caliente, podemos decir que la temperatura es *prácticamente, o casi* caliente, pero para la clasificación de la Fig. 7 se dice que está TIBIO, de este razonamiento surge la necesidad de definir un rango donde 29,9 °C esté incluido también dentro del conjunto CALIENTE.

Lógica difusa lo hace asignándole a la medición un porcentaje de pertenencia al conjunto debido a que está numéricamente cerca del mismo, por ejemplo 29.9 °C es 98 por ciento perteneciente a CALIENTE.

Este concepto en lógica difusa es llamado *grado de membresía*, que puede tomar valores de 0 a 1, donde el 1 representa pertenencia total al conjunto y 0 ninguna pertenencia al conjunto. De esta manera, al igual como razonamos los humanos podemos incluir en los conjuntos

conceptos como: “*está poco menos que caliente*”, “*está demasiado frío*” o “*está medio tibio*” (Guzmán & Castaño, 2006, págs. 88-89).

$$\begin{array}{l} \text{Frio} \\ \text{Tibio} \\ \text{Caliente} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} T < 18 \\ 18 < T < 30 \\ T \geq 30 \end{array} \right.$$

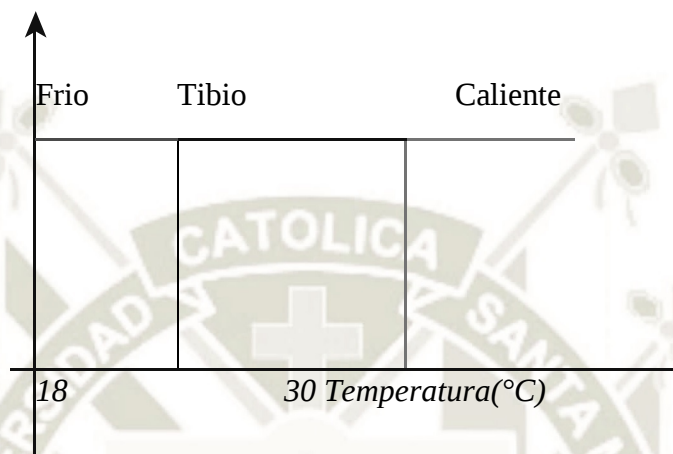


Figura 7 Clasificación de temperaturas – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Se definen entonces los nuevos intervalos de los conjuntos difusos como se muestran en la Fig. 8, la cual es llamada *función de membresía* (μ). La forma de los intervalos se elige tomando en cuenta la experiencia del operador del invernadero. A esta traducción de los valores del mundo real a lógica difusa, a través de funciones de membresía, se le llama *fusificación*.

En la figura 8 se pueden apreciar los siguientes elementos:

El eje Y es el grado de membresía, que describe cuantitativamente la función de membresía.

El eje X es la temperatura.

El nombre asociado (caliente, tibio y frío) es llamado significancia lingüística y describe cualitativamente la función de membresía.

La forma de la función de membresía se debe elegir de acuerdo al problema que se desea resolver. Existen muchas formas diferentes entre ellas: triangular, gaussiana, trapezoidal, sigmoidea, etc.

Se puede observar que, para una medición de temperatura, por ejemplo 29 °C, se le asocia un grado de membresía tanto en CALIENTE como en TIBIO como se muestra en la Fig. 9.

Lo que puede interpretarse como: 29°C es una temperatura mucho más que tibia o 29°C es prácticamente caliente.

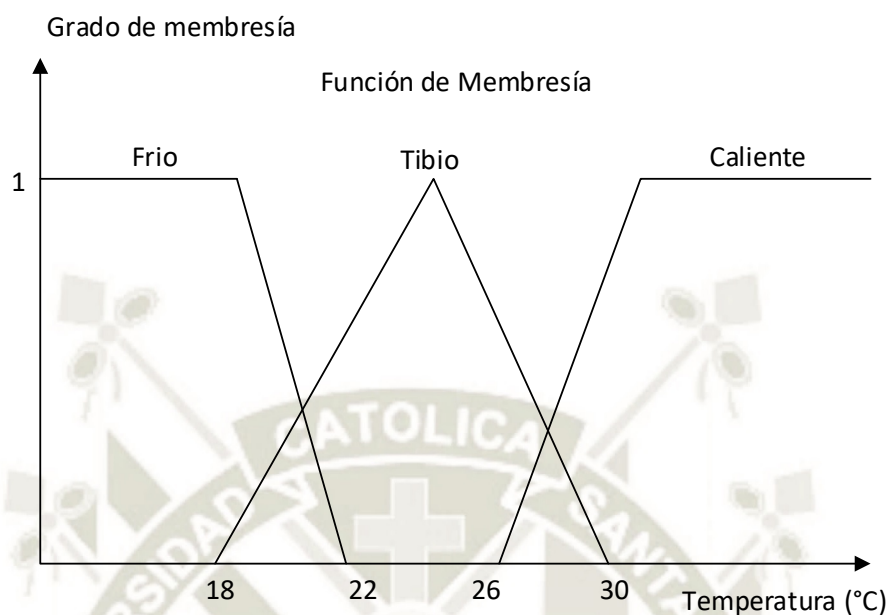


Figura 8 Funciones de membresía para temperaturas – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

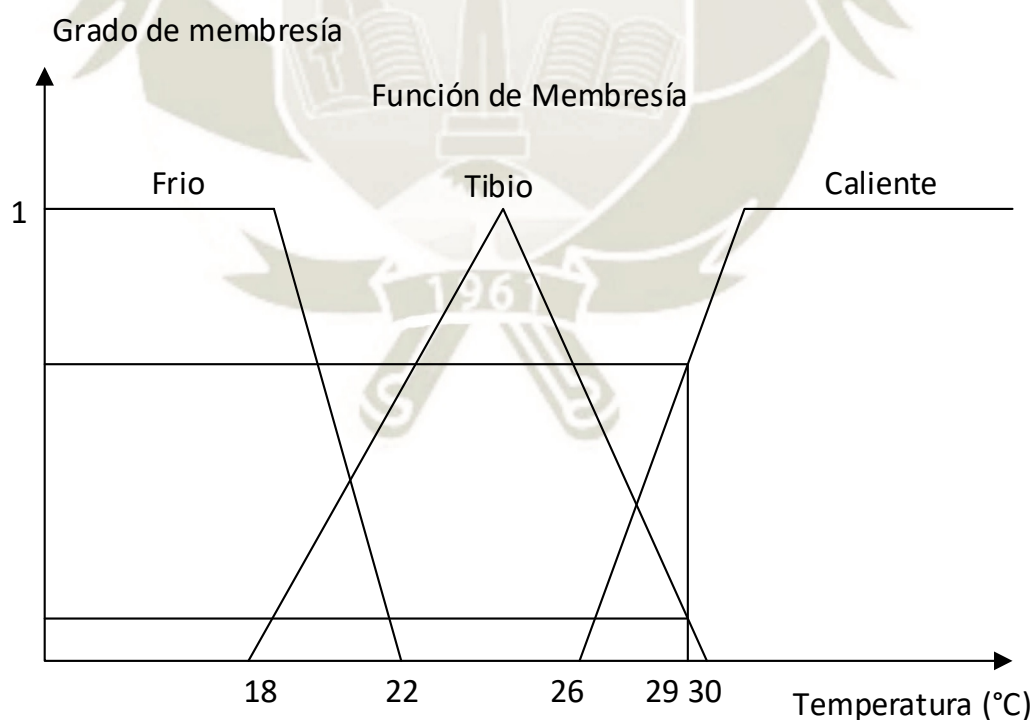


Figura 9 Grados de pertenencia de $T=29^{\circ}\text{C}$ – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

El grado de membresía asociado a su función, es llamado *grado de pertenencia* (GP) y se representa de la siguiente manera:

$$GP (29^{\circ}C, CALIENTE) = 0,82$$

$$GP (29^{\circ}C, TIBIO) = 0,22$$

$$GP (29^{\circ}C, FRÍO) = 0$$

A partir de la información de la Fig. 9 se desea tomar la decisión de abrir o cerrar la válvula, que permitirá el paso del aire caliente para controlar la temperatura y mantener el invernadero siempre a $23^{\circ}C$, a este paso en lógica difusa se le llama *inferencia*.

El operador del invernadero hace esta misma función siguiendo su lógica y experiencia. Por ejemplo, él sabe que para una temperatura de $10^{\circ}C$ es necesario abrir $\frac{3}{4}$ partes la válvula y para una temperatura de $40^{\circ}C$ hay que cerrar totalmente la válvula. Esta información será plasmada en la Tabla 2 y en la función de membresía de salida de la Fig. 10.

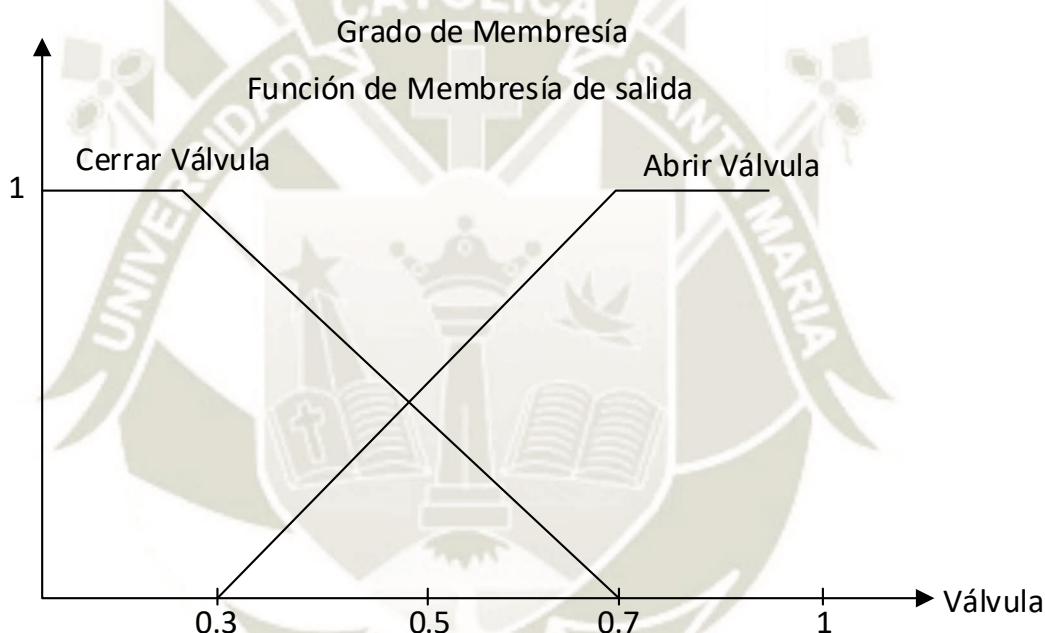


Figura 10 Función de membresía de salida – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Al conjunto de reglas de la Tabla 2 se le llama *reglas difusas* y pueden ser escritas de la forma SI... ENTONCES, por ejemplo:

SI	FRÍO	ENTONCES ABRE VÁLVULA
SI	TIBIO	ENTONCES ABRE Y CIERRA
SI	CALIENTE	ENTONCES CIERRA VÁLVULA

Tabla 2 REGLAS DE LÓGICA DIFUSA – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Temperatura	Descripción
FRIO	Abrir válvula de aire caliente
TIBIO	Entre abrir la válvula
CALIENTE	Cerrar válvula de aire caliente

En el eje X se presenta el rango de operación de la válvula, donde 1 representa una válvula totalmente abierta y 0 una válvula totalmente cerrada, 0.3 representaría abrir la válvula al 30 por ciento.

A partir de las funciones de membresía de entrada y de salida se aplica la siguiente metodología:

Proceso de inferencia: Para cada grado de pertenencia asociados a la medición de temperatura se generan conclusiones (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 92). Por ejemplo, para los grados de pertenencia asociados a la medición de 29 °C se debe concluir la acción que se realizará y existen diversos métodos, entre ellos:

Método de truncamiento que consiste en cortar la función de membresía de salida, de tal forma que los valores mayores al grado de pertenencia asociado desaparezcan (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 93). Como se muestra en la Fig. 11.

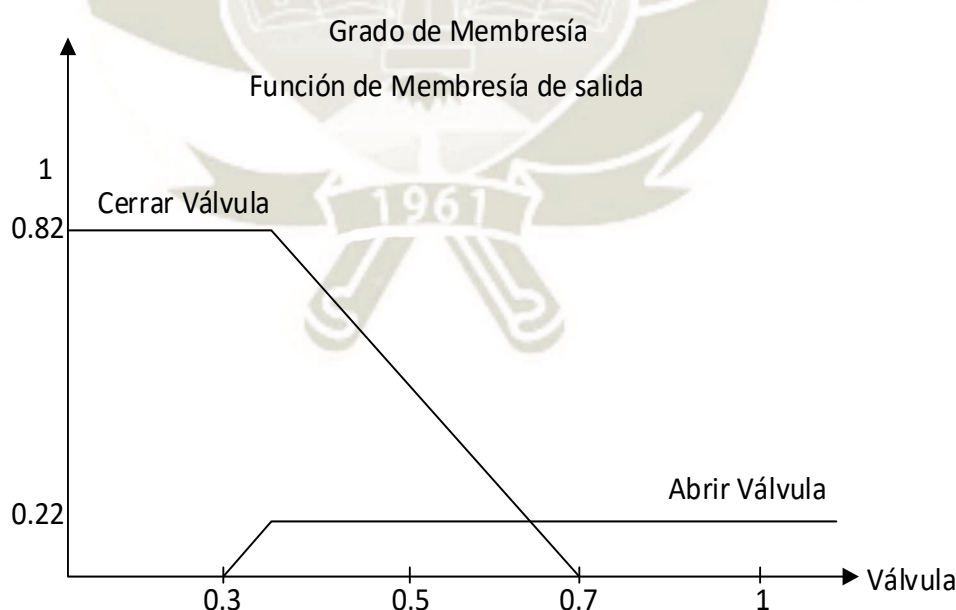


Figura 11 Conclusión por método de truncamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Método de escalamiento, consiste en escalar la función de membresía en proporción con el grado de pertenencia (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 93). Véase la Fig. 12.

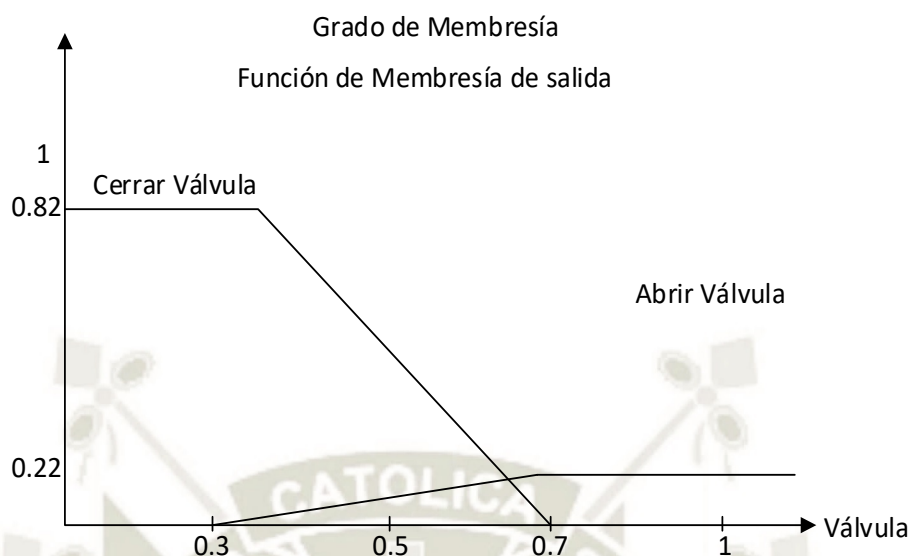


Figura 12 Conclusión por Método de escalamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Se genera una suma de los gráficos de acuerdo a las conclusiones difusas como se muestra en las Fig. 13 y 14.

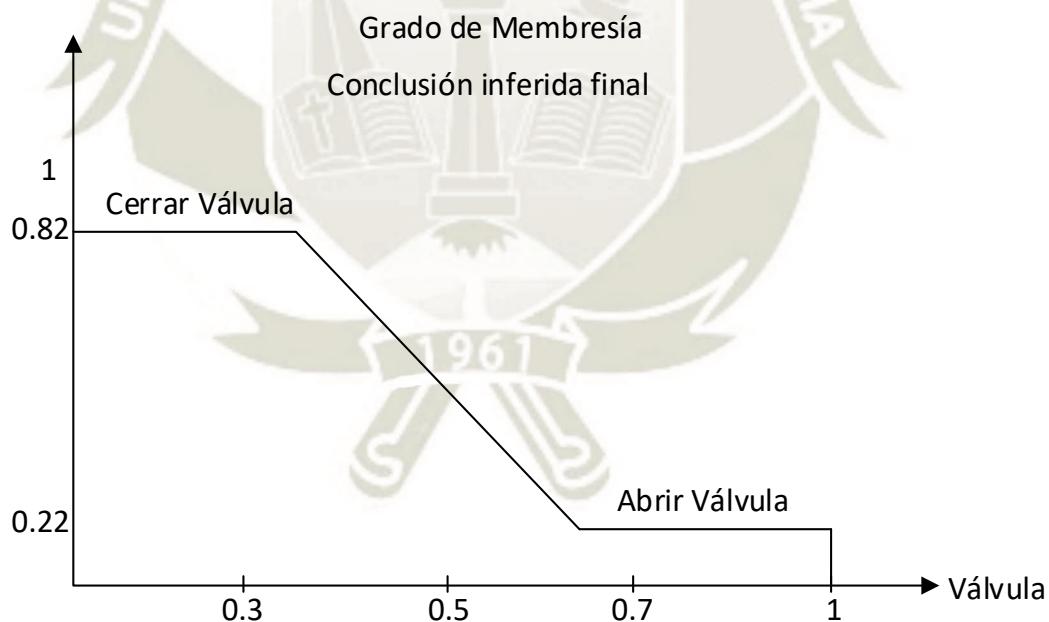


Figura 13 Conclusión inferida final método de truncamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

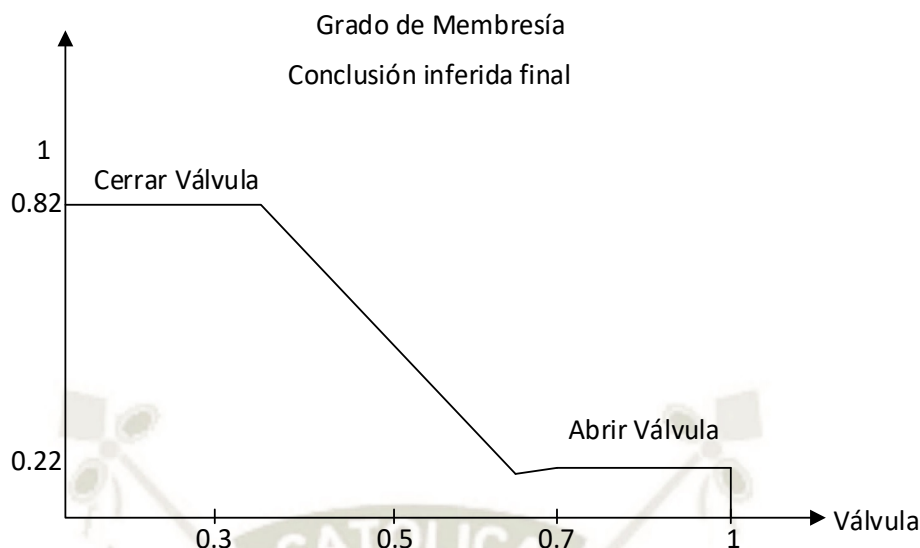


Figura 14 Conclusión inferida final método de escalamiento – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Finalmente, la conclusión final se defusifica, es decir, se lleva nuevamente al mundo real, esta información indica cuánto se debe abrir la válvula. Para ello existen diversas técnicas de defusificación, entre ellas:

- Promedio de máximos, que consiste en calcular el promedio de todas las variables que tienen el mayor valor de grado de membresía. Para el método de truncamiento se obtiene 0.195 es decir la válvula se abrirá 19.5% (Ver Fig. 15).
- Método de centroide, que consiste en calcular el promedio ponderado de la salida. Para el método de truncamiento se obtiene 0.346 es decir la válvula se abrirá 34.6% (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 94), como se muestra en la Fig. 15.

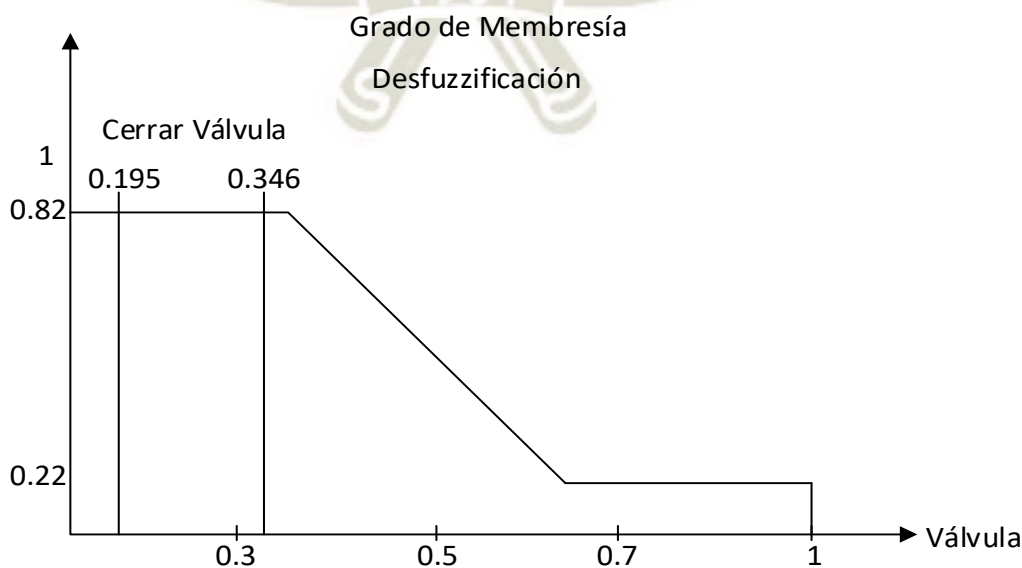


Figura 15 Defusificación – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

El controlador difuso genérico se presenta en el diagrama de bloques de la Fig. 16. Es común el diseño de controladores difusos genéricos debido a que generalmente tienen la misma forma de diseño, independientemente del proceso que se desee controlar. La diferencia es la sintonización de las reglas del controlador difuso y esto se hará de acuerdo, a la experiencia del operador humano.

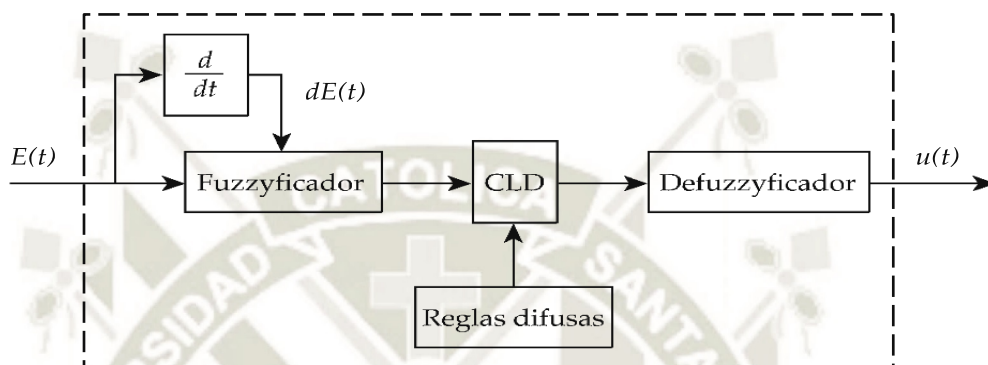


Figura 16 Diagrama a bloques de un controlador difuso genérico. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)

Sus funciones de membresía se definen como se muestra en la Fig. 17. El error y la variación del error en el caso del ejemplo tomarán valores de -20 a 20 Vcd.

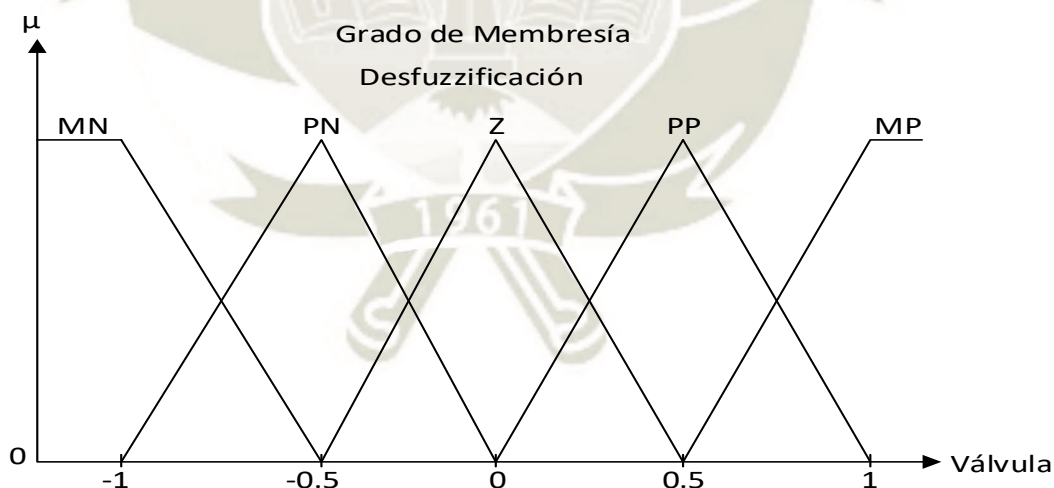


Figura 17 Función de membresía de $E(t)$ y $dE(t)$ – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)

Donde en la tabla 4 se muestra la notación de cada grado de membresía.

Tabla 3 NOTACIÓN DE LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA DEL ERROR. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)

Notación	Descripción
MN	Muy negativo
PN	Poco negativo
Z	Cero
PP	Poco positivo
MP	Muy positivo

La salida del control difuso que controlará la válvula de paso del aire caliente, tiene la función de membresía de la Fig. 18. Se modificó la función de salida de la Fig. 15 para tener un mejor desempeño del controlador:

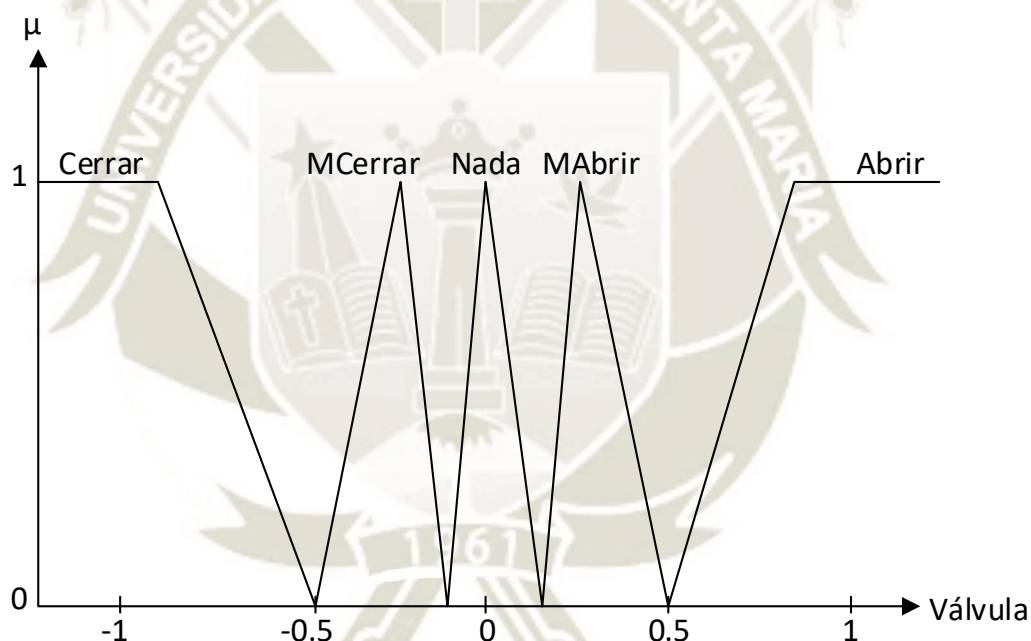


Figura 18 Función de membresía de salida. – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Donde -1 indica totalmente cerrada, 1 totalmente abierta y 0 indica que no se mueve de la posición donde se encuentra.

Para cuestiones de simulación del controlador de la planta se define como un sistema de primer orden ecuación 1:

$$Gp(s) = \frac{k}{\tau s + 1}$$

Ecuación 1 Ecuación de primer orden – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Donde k es la ganancia del sistema y τ es la constante de tiempo, a continuación, se generarán las reglas del control difuso siguiendo una arquitectura Mamdani (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 98).

Arquitectura Mamdani: Consiste en una serie de reglas si-entonces de la forma;

Si X es frío entonces Z es abrir.

Donde tanto FRÍO como ABRIR son conjuntos difusos, X son los atributos observables o medibles del sistema (temperatura) y Z son los atributos controlables del sistema (válvula). De las siguientes expresiones se derivan las reglas difusas que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA MAMDANI.
– Fuente (Guzmán & Castaño, 2006)

	MN	PM	Z	PP	MP
MN	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar	Cerrar
PN	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar	MCerrar
Z	Cerrar	MCerrar	MCerrar	Nada	MAbrir
PP	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir	MAbrir
MP	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir	Abrir

En la Fig. 19 se muestra el comportamiento del controlador, frente a un Set Point determinado y el tiempo estacionario.

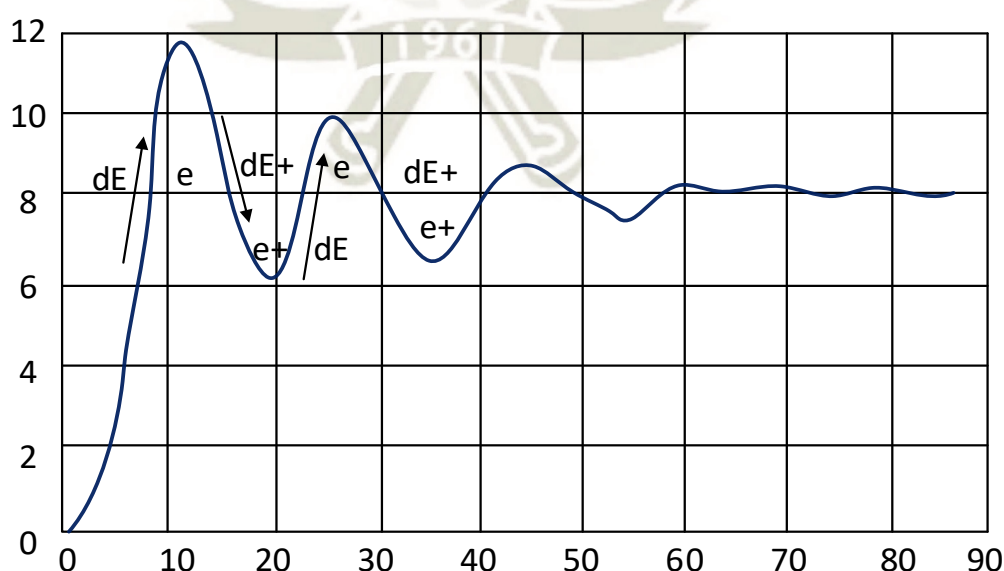


Figura 19 Significado del error y variación del error – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

Como se puede observar en la Fig. 20 la referencia es alcanzada por el sistema en aproximadamente 40 segundos, con un error de estado estacionario de 0.1 segundos aproximadamente debido a la forma de las funciones de membresía.

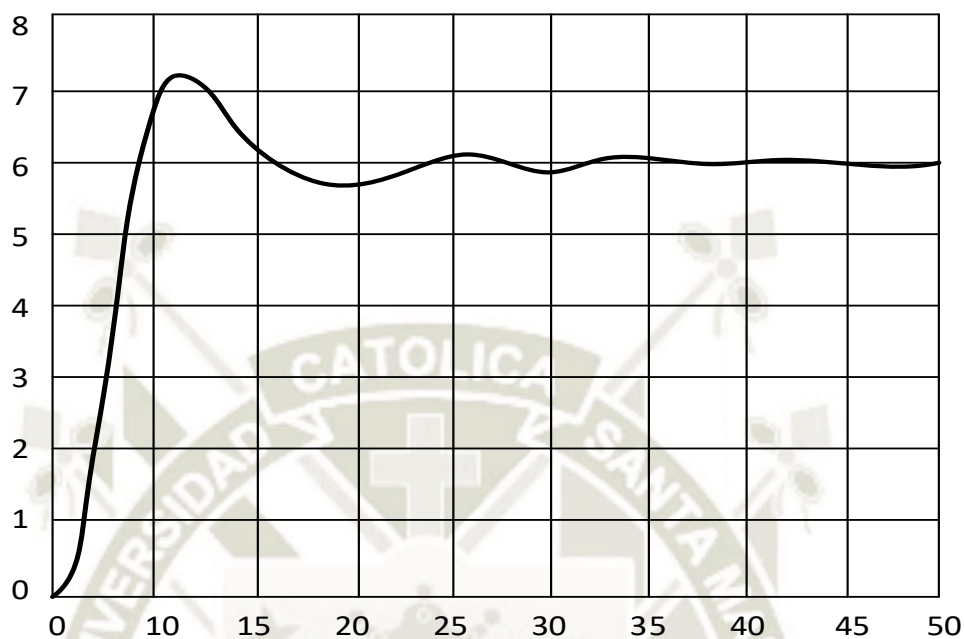


Figura 20 Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

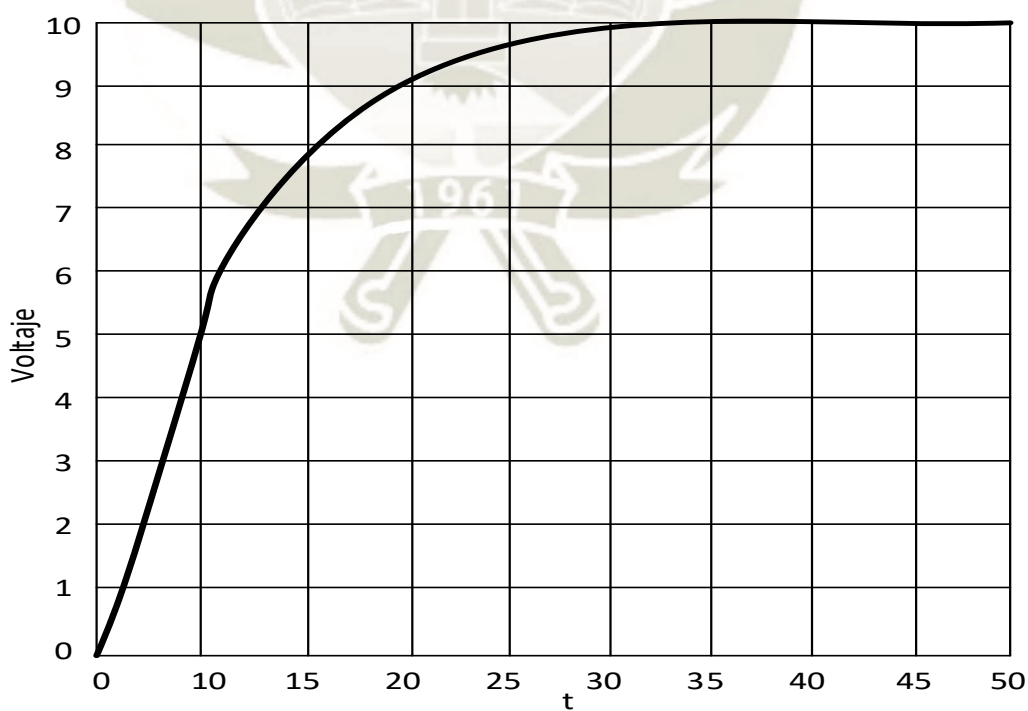


Figura 21 Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

De las figuras 20 y 21 se puede observar que la referencia es alcanzada por el sistema, como se puede ver el diseño de un controlador difuso es muy sencillo, sin embargo, si se desea reducir el tiempo de estabilización, sobretiro o que la respuesta de salida se comporte de cierta manera, es necesario definir nuevamente las reglas difusas: funciones de membresía de entrada y salida, el método de inferencia y defusificación de la Tabla 5. Dichos cambios son bajo la apreciación empírica del experto en el proceso.

Arquitectura Takagi-Sugeno-Kang (TSK): consiste en una serie de reglas si-entonces de la forma:

Regla i

$$\text{si } X(t) \text{ es } a \text{ entonces } Z \text{ es } y = k_{i0} + k_{i1}X(t)$$

Donde a es un conjunto difuso, “ X ” son los atributos observables o medibles del sistema, “ Z ” son los atributos controlables del sistema y “ Y ” es una ecuación de salida lineal (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 101).

Para la solución del problema invernadero las ecuaciones de salida tendrán la siguiente forma:

Regla i

$$\text{Si } e(t) \text{ es } A \text{ y } de(t) \text{ es } B \text{ entonces } u(t) = k_{i0} + k_{i1}e(t) + k_{i2}de(t)$$

Se analizará el caso más sencillo donde k_{i1} y k_{i2} son cero y la salida $u(t)$ es únicamente una constante, cuyos valores se elegirán de acuerdo a la experiencia del experto en el proceso que se muestra en la Tabla 5.

*Tabla 5 CONJUNTO DE REGLAS DIFUSAS PARA UNA ARQUITECTURA TSK –
Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).*

$$dE(t) = E(t) - E(t-T)$$

	MN	PN	Z	PP	MP
MN			-1		
PN			-0.5		
Z	-1	-0.5	0	0.5	1
PP			0.5		
MP			1		

Los resultados de las simulaciones se muestran en las Figuras 22 y 23.

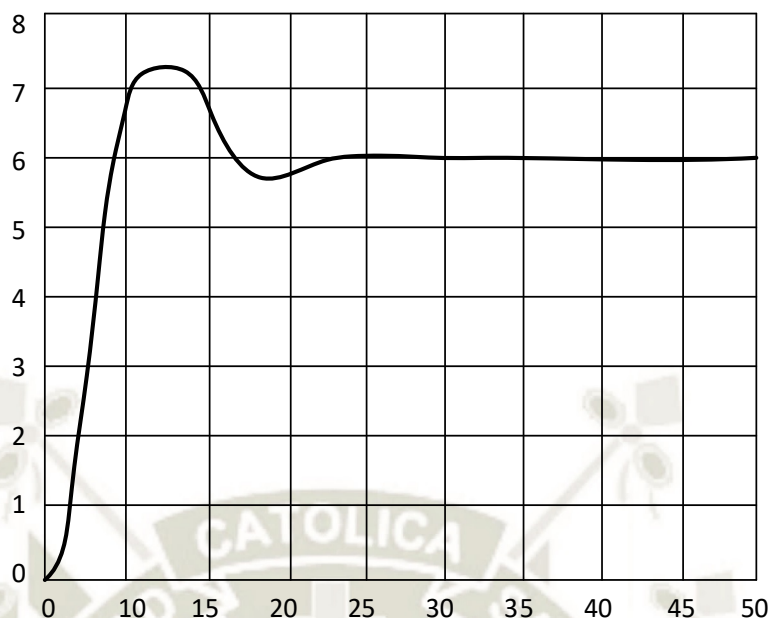


Figura 22 Respuesta para una señal de referencia de 6V (30°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

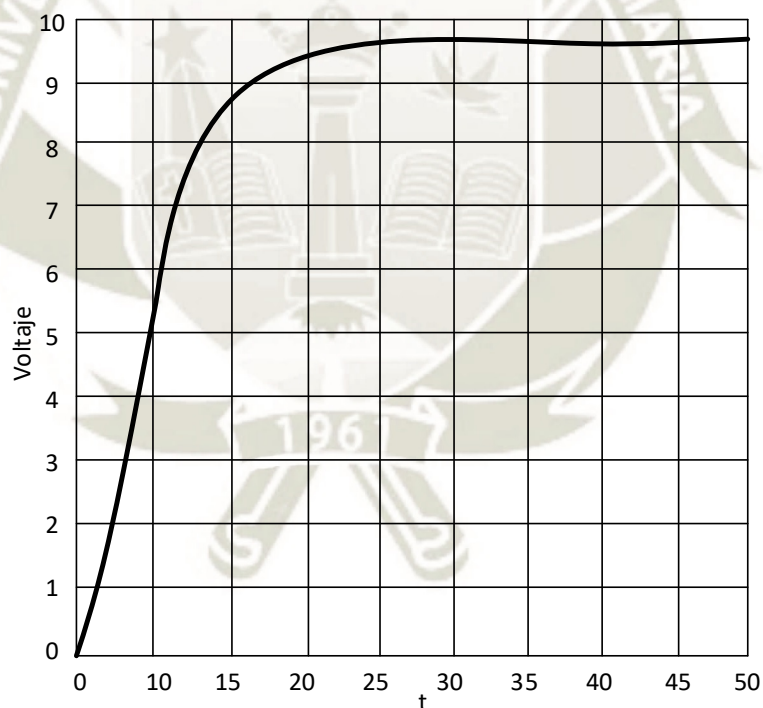


Figura 23 Respuesta para una señal de referencia de 10V (50°C). – Fuente (Guzmán & Castaño, 2006).

De las Figuras 22 y 23 se aprecia que el sistema alcanza el valor de referencia alrededor de los 40 segundos. Las salidas son muy similares a las mostradas en las Figuras 20 y 21 de la arquitectura Mamdani, pero con la diferencia de que en el caso TSK el error en estado estacionario es cero. En cuestión de implementación en un microcontrolador es mucho más

sencilla la arquitectura TSK ya que las salidas son constantes (Guzmán & Castaño, 2006, pág. 103).

2.3.3. Librería Lógica Difusa System800xA

Un controlador Fuzzy está basado en la lógica difusa, que es una generalización de la lógica booleana Fig. 24.

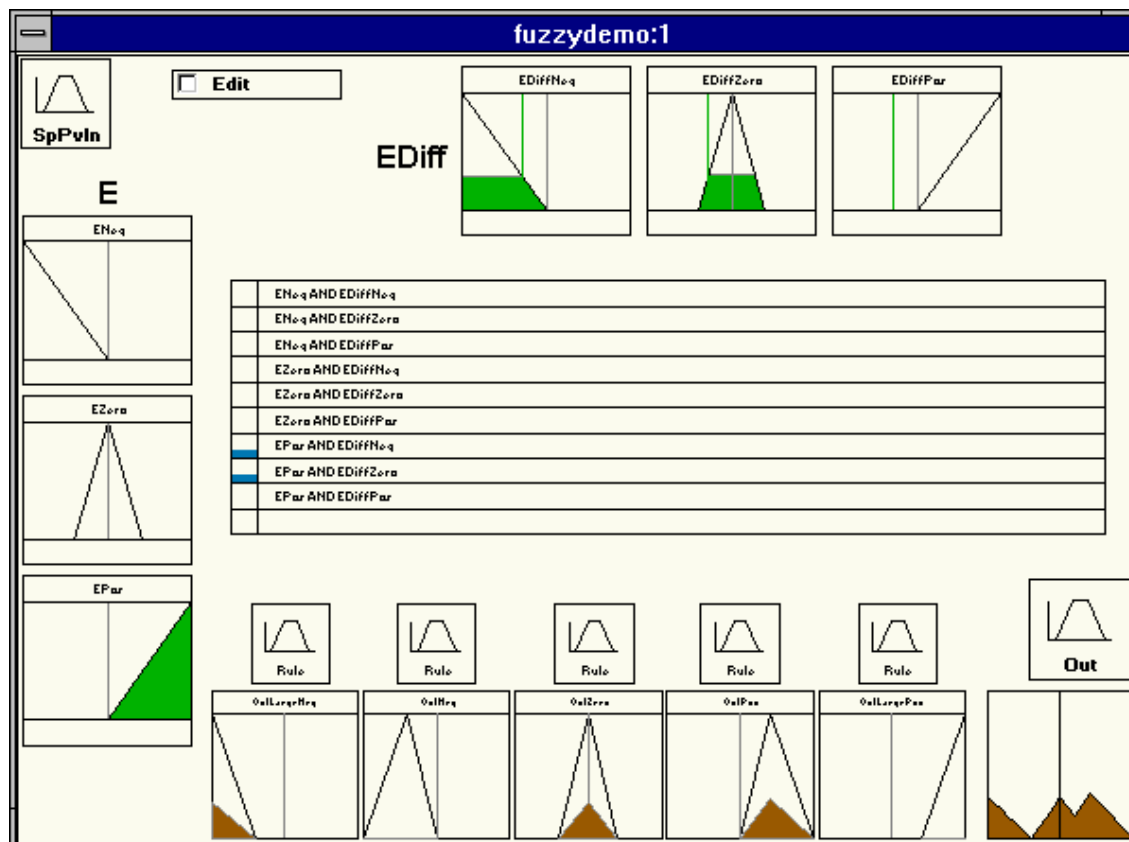


Figura 24 Ventana del controlador Fuzzy – Fuente (ABB S.A., 2014)

Un controlador difuso consiste en una parte lineal y una parte lógica difusa. La parte lineal tiene muchas de las funciones del controlador PID, por ejemplo:

- Cálculo de la desviación de control o el error (ϵ):

$$\epsilon = \text{Set Point}(t) - \text{Variable del proceso}(t)$$

Ecuación 2 Error del Sistema de Control – Fuente (ABB S.A., 2014)

- Cálculo de la derivada del valor del proceso $u(t)$.
- Filtro paso bajo para la derivada del valor de proceso y la desviación de control.
- Set point externo e interno.
- Manejo de alarmas absolutas y relativas.

- Un integrador con función de finalización anti integrador.
- Salida manual y automática.
- Función de seguimiento para la salida.
- Una función de avance.

La parte de lógica difusa del controlador contiene las funciones que definen las reglas para control del proceso, por ejemplo:

- Cálculo de los grados de pertenencia de una serie de señales a una serie de conjuntos difusos.
- Cálculo de condiciones borrosas.
- Cálculo de reglas difusas.
- Cálculo de las funciones de membresía de salida para una serie de salidas de controlador.
- Defusificación de las funciones de membresía de salida (ABB S.A., 2014, págs. 149-150).

El controlador difuso funciona de la siguiente manera:

- Uno o más valores de proceso y posiblemente también puntos de ajuste externos, ingresan en la parte lineal del controlador. Los valores del proceso pueden ser filtros paso bajo. Si no se utiliza ningún punto de ajuste, se calcula la primera derivada de cada valor de proceso. El resultado está disponible para la parte de lógica difusa del controlador.
- Si se utilizan puntos de ajuste, las desviaciones de control o errores: ecuación 2, y sus dos primeras derivadas se computan para cada valor de proceso. Estos dos resultados también están disponibles para la parte lógica fuzzy del controlador.
- La parte de lógica difusa del controlador recibe una o más señales de la parte lineal. Puede recibir la desviación de control, el valor del proceso o sus derivadas de la parte lineal. Cada una de estas señales se ingresa en una serie de funciones de membresía de entrada. La salida de una función de membresía de entrada es una señal, que asume valores entre 0 y 1. Este valor indica el grado de pertenencia de la señal desde la parte lineal a esta función de membresía particular.
- Las salidas de las funciones de membresía de entrada se combinan en condiciones difusas utilizando los operadores difusos NOT y AND. El operador difuso NOT se define como $NOT\ X = 1 - X$. El operador difuso Y se define como ecuación 3:

$$X\ AND\ Y = Min\ (X, Y)$$

Ecuación 3 Definición del operador difuso "Y"

El resultado tiene un valor entre 0 y 1.

Las condiciones difusas Fig. 25 pueden combinarse en reglas usando los operadores difusos NOT y OR. El operador difuso O se define como ecuación 4. El resultado de una regla difusa también tiene un valor entre 0 y 1 y se llama grado de satisfacción de la regla (ABB S.A., 2014, págs. 150-151).

$$X \text{ o } Y = \text{Máx}(X, Y)$$

Ecuación 4 Definición del operador difuso "O"

Temp	
IF	ENeg AND EDiffPos
OR	EZero AND EDiffZero
OR	EPos AND EDiffNeg
THEN	OutZero

Figura 25 Condicionales Fuzzy – Fuente (ABB S.A., 2014)

- El grado de satisfacción de cada regla difusa se utiliza para calcular la función de membresía de salida actual para la regla.
- Puede haber varias funciones de membresía de salida asociadas con cada salida del controlador. Todas las funciones de membresía de salida asociadas con la misma salida del controlador se combinan en una función de membresía de salida. Esto se hace calculando el valor máximo de todas las funciones en cada punto, de todas las funciones de membresía.
- La función de membresía resultante para una determinada salida del controlador se usa para calcular el valor de la salida. Esto se denomina defuzzyficación y se realiza calculando el centro de gravedad de la función de membresía de salida.
- Las salidas defuzzyficadas de la lógica difusa del controlador se introducen en la parte lineal del controlador.
- Cada salida puede integrarse y está limitada por una función de finalización anti integrador.
- También hay funciones para avance, seguimiento de salida y modo manual.

El controlador difuso también tiene una función de simulación. Los valores del control de desviación, el valor del proceso y sus derivados pueden simularse. La simulación puede ser utilizada para evaluar el comportamiento de la lógica difusa del controlador (ABB S.A., 2014, pág. 152).

2.4. REDES NEURONALES

Las redes neuronales son modelos artificiales de las redes neuronales biológicas. Están constituidas por innumerables unidades procesadoras llamadas neuronas, las cuales se interconectan a través de conexiones.

El Modelo de neurona binaria propuesto por McCulloch y Pitts en 1943 Fig. 26, calcula la suma ponderada de sus entradas producidas por otras unidades y da como salida un uno (1) si ésta se encuentra por encima de un valor denominado umbral, o un cero (0) si está por debajo (Gestal Pose, 2009, págs. 5-6).

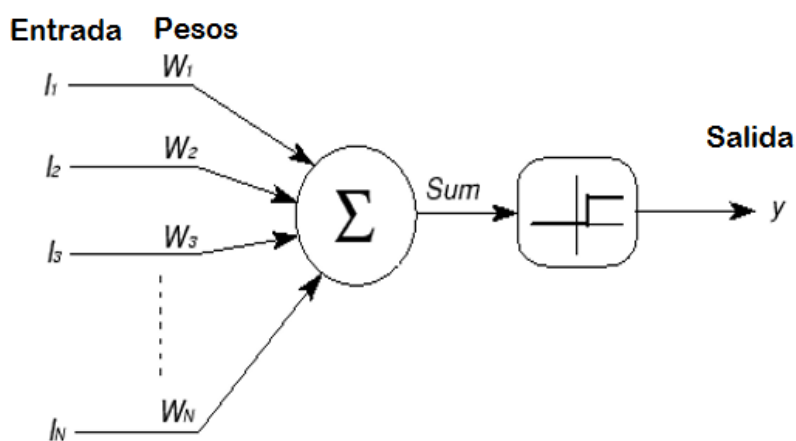


Figura 26 Modelo de neurona de McCulloch y Pitts - Fuente (Gestal Pose, 2009)

Tipos de aprendizaje

Existen tres formas por las cuales una red neuronal puede aprender: supervisado, no supervisado y por refuerzo Tabla 6.

Aprendizaje supervisado. Este tipo de algoritmo utiliza un conjunto de ejemplos (entrada-salida) que la red debe aprender. El entrenamiento se lleva a cabo mediante un proceso iterativo de adaptación de la red neuronal de manera que sus salidas se acerquen cada vez más a las salidas deseadas especificadas en los ejemplos.

Aprendizaje no supervisado. En este tipo de algoritmos no se especifican salidas deseadas, el algoritmo trata de encontrar de manera autónoma regularidades en los datos de entrada creando categorías que agrupen a los datos más similares.

Aprendizaje con refuerzo. La red aprende a través de un proceso de ensayo y error que maximiza el índice de desempeño denominado señal de error (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998, pág. 19).

Tabla 6 Clasificación de algoritmos de aprendizaje – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

Tipo de aprendizaje	Regla de Aprendizaje	Algoritmo más usado
Supervisado	Corrección de error, Boltzmann, Hebbian, Competitivo	Backpropagation Adaline y Madaline
No supervisado	Corrección de error, Hebbian, Competitivo	Aprendizaje con memoria asociativa
Con refuerzo	Corrección de error y competitivo	Algoritmo de aprendizaje RBF

2.4.1 Red Neuronal con una capa oculta

Teniendo en cuenta como está compuesta una neurona, se puede expresar matemáticamente Fig. 27.

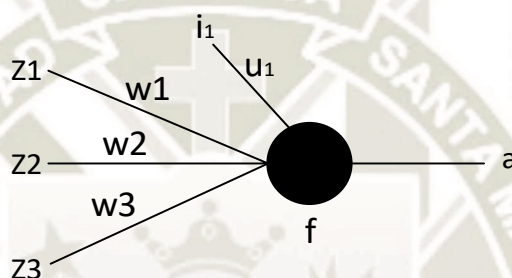


Figura 27 Representación matemática de una neurona – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

Observando la figura obtenemos la siguiente expresión matemática ecuación 5:

$$a = f(u_1 + w_1z_1 + w_2z_2 + w_3z_3)$$

Ecuación 5 Expresión matemática de una Neurona

De igual forma se debe tener una función de activación, entre las más utilizadas tenemos la función Sigmoidea Fig. 28.

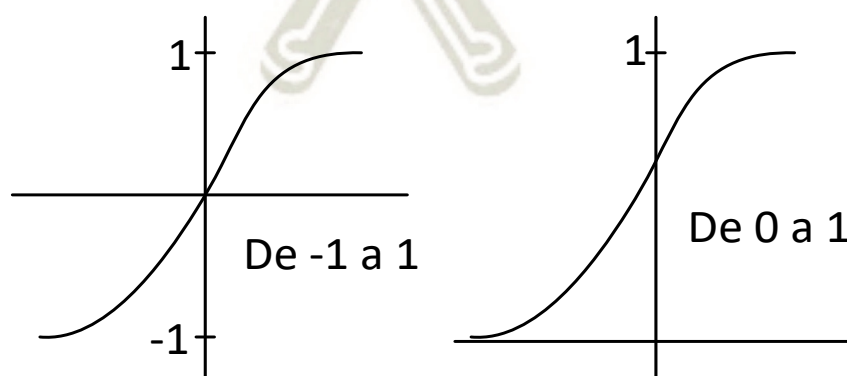


Figura 28 Función Sigmoide – Fuente (Gestal Pose, 2009)

La expresión matemática de la Fig. 28 es la ecuación 6:

$$f(x) = (1 + e^{-x})^{-1}$$

Ecuación 6 Función Sigmoide – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

Al derivar la función de la ecuación 6 se obtiene la ecuación 7:

$$f'(x) = (1 + e^{-x})^{-2} e^{-x}$$

$$f'(x) = f(x)(1 - f(x))$$

Ecuación 7 Derivada de la Función Sigmoidea

Para la red neuronal con una capa oculta se considera en primera instancia la ecuación 8.

$$h = \sqrt{(m * n)}$$

Ecuación 8 Cálculo de Número de Neuronas en la capa oculta – (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

Donde:

h= número inicial de neuronas de capa oculta.

n=Neuronas de entrada.

m=Neuronas de salida

Para el caso del error, definimos como la distancia entre el valor real y el valor hallado Fig. 29.

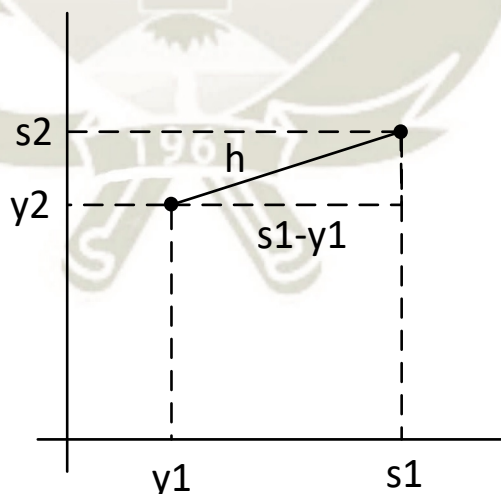


Figura 29 El error es definido como la distancia – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

Por consecuencia obtenemos la siguiente ecuación 9.

$$h = \sqrt{(s1 - y1)^2 + (s2 - y2)^2}$$

Ecuación 9 Distancia entre dos puntos – Fuente (Gómez & Gonzáles Osorio, 1998)

2.4.3 NeurOn Line Studio (NOL Studio)

G2 Neural Network Engine (GNNE) es un módulo de complemento basado en Interfaz de Programación de Aplicaciones (API), que funciona en conjunto con otros productos Gensym para desarrollar aplicaciones que monitorean y controlan los procesos en tiempo real. Es la opción preferida para productos G2 Neural Network. Se compone de un conjunto de objetos centrales que puedes clonar desde paletas GNNE, y un conjunto de procedimientos API para expresar un flujo de datos y realizar cálculos de redes neuronales. Una aplicación que usa GNNE generalmente realiza los siguientes pasos:

- Adquiere datos de procesos en tiempo real.
- Hace inferencias basadas en los datos.
- Toma acciones basadas en los valores de inferencia, como levantar alarmas, enviar mensajes a los operadores, o la conclusión de nuevos puntos de ajuste.

Las paletas GNNE están divididas en estas categorías:

- Objetos de datos, que almacenan datos numéricos.
- Controles de datos, que incluyen filtros de datos.
- Objetos de red neuronal, que almacenan parámetros de red.
- Objetos de modelo estadístico, que almacenan los parámetros del modelo estadístico.

Por lo general, clona los objetos del modelo y los objetos del conjunto de datos de las paletas GNNE los coloca en su carpeta de trabajo. Para luego configurar los atributos de los objetos a través de llamadas API para controlar su comportamiento. Un espacio de trabajo típico de GNNE consta de objetos GNNE definidos por el usuario, que procesan datos, analizan los resultados y pasan los resultados de su aplicación para monitoreo y análisis (Gensym, 2007, págs. 6-7). Este conjunto de objetos y procedimientos hace lo siguiente:

- Adquiere, filtra y realiza operaciones en datos, como operaciones aritméticas. Esta parte de la aplicación usa elementos de datos y API asociadas.
- Hace inferencias sobre los datos y realiza operaciones lógicas en valores de inferencia. Esta parte de la aplicación utiliza elementos de redes neuronales y sus API.
- Realiza acciones basadas en los valores de inferencia. Esta parte de la aplicación usa procedimientos definidos por el usuario.

Los objetos de la red neuronal son la parte clave de GNNE:

- Backpropagation Net es una red feed-forward con múltiples capas.
- Autoassociative Net es una red feed-forward con múltiples capas, con arquitectura específica que es especialmente buena para manejar ciertos tipos de problemas, incluida la validación del sensor.
- Radial Basic Function Net es una red de avance de 3 capas, cuyo centro de las capas usan una función gaussiana multivariante.
- Rho Net es un tipo de red de función de base radial. La diferencia es la red de salida, que es un número entre 0.0 y 1.0 que representa la probabilidad que el valor de entrada está en una clase particular de red de feed-forward con capas múltiples.
- Ensemble Network es un conjunto de redes Backpropagation, que se han entrenado en NOL Studio. Tiene una arquitectura específica, que le da precisión y robustez.

El modelo predictivo es un modelo basado en la red Ensemble, además de la red neuronal, maneja variables de información, como nombre y retrasos. Este modelo está entrenado en NOL Studio y se puede volver a entrenar dentro de GNNE (Gensym, 2007, págs. 9-10).

2.5. OPC (OLE for Process Control)

OPC (OLE for Process Control) corresponde a un conjunto de especificaciones basadas en los estándares de Microsoft que cubren los requerimientos de comunicación industrial entre aplicaciones y dispositivos.

Es un estándar que especifica la comunicación de datos de planta en tiempo real para dispositivos de control de diferentes fabricantes.

OPC es un mecanismo uniforme para comunicar a numerosas fuentes de datos, dispositivos o una base de datos (Pérez, 2006, pág. 3). La arquitectura de la información para la Industria del Proceso se muestra en la Fig. 30.

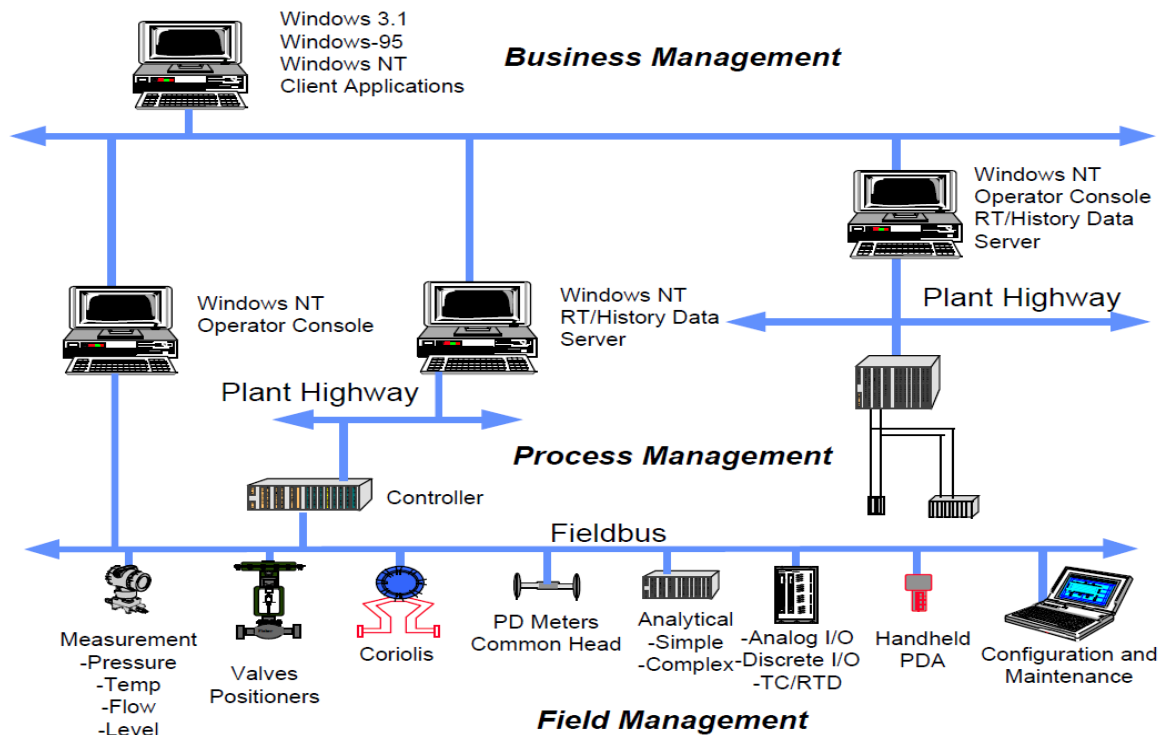


Figura 30 Esquema general Topología – Fuente (Pérez, 2006)

A continuación, se detalla cada nivel de la arquitectura:

- **Administración de Campo.** Con la llegada de dispositivos inteligentes, se puede proporcionar una riqueza de información sobre dispositivos de campo que no estaban previamente disponibles. Esta información proporciona datos y sus parámetros de configuración, etc. Toda esta información debe ser presentada al usuario y a cualquier aplicación que la use.
- **Proceso de Administración.** La instalación de Sistemas Distribuidos de Control (DCS) y sistemas SCADA sirven para supervisar y controlar datos del proceso de fabricación, que fueron recopilados manualmente.
- **Administración del negocio.** Los beneficios pueden ser obtenidos instalando sistemas de control. Esto se consigue integrando la información recogida del proceso en los sistemas de negocio (Pérez, 2006, pág. 4).

Arquitectura OPC (OLE Process Control)

Lo que se necesita para las aplicaciones es una manera común de acceder a todas las variables de cualquier fuente, como un dispositivo o una base de datos.

El servidor OPC en la Fig. 31 muestra cómo se envía un valor de una Aplicación X pasando por algún servidor OPC hacia una Aplicación Y, siendo también usado de forma inversa (Pérez, 2006, págs. 4-5).

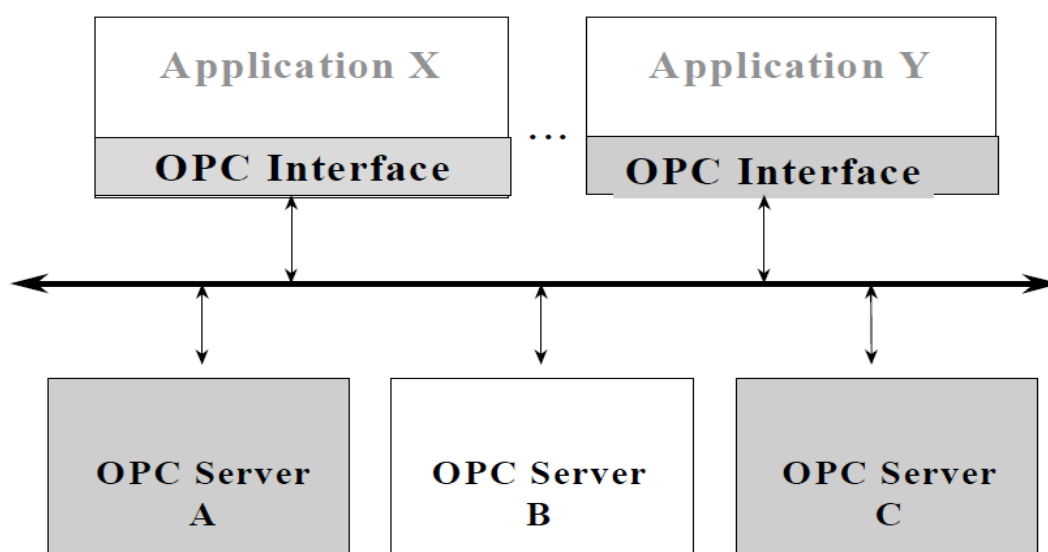


Figura 31 Arquitectura OPC – Fuente (Pérez, 2006)



CAPITULO III

DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

CAPITULO III

3. DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL

3.1. PROCESO

El proceso de construcción de los diques nace desde las plantas de concentrado de Toquepala y Cuajone. En cada planta los relaves entran a los Espesadores para la recuperación de agua, el resto es enviado por gravedad a un área llamada Quebrada Honda, ubicado geográficamente en el departamento de Tacna provincia de Jorge Basadre Fig. 32.



Figura 32 Ubicación Geográfica – Fuente (Google LLC, s.f.)

El relave que llega a Quebrada Honda son derivadas aproximadamente el 60% para el Dique Principal y el resto para el Dique Lateral; para ambos Diques se realiza el mismo proceso para obtener arenas gruesas, sin embargo para el Dique Principal existen dos Plantas de procesamiento del relave (Planta 1700 y Planta 1701), el relave llega a una primera Etapa a una área llamada *Zona de Dilución* es allí donde el relave con un porcentaje de sólidos de entre 54% y 56% se mezcla con agua recuperada, para poder reducir el porcentaje de sólidos entre 42% a 45%, para un tratamiento eficiente posterior en la planta de ciclones, luego de diluirse es almacenado en el Cajón 1 el cual deriva carga para enviar a la Planta 1700 y 1701 en el Cajón 2.

Es enviado por gravedad a la Planta 1701 que se encuentra a 6 Km de distancia desde la Zona de dilución Fig. 33.

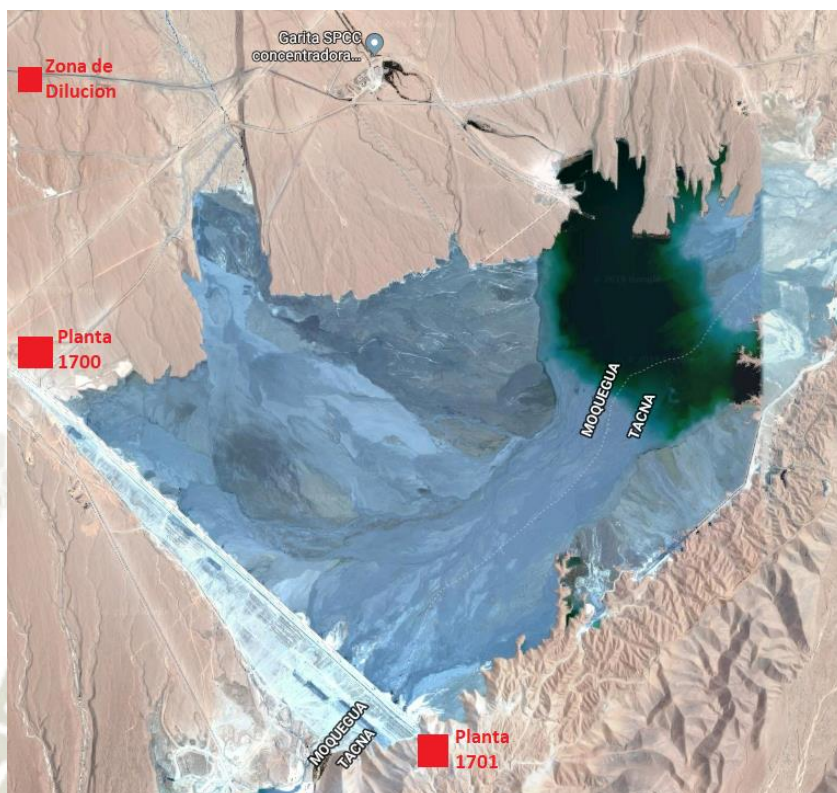


Figura 33 Ubicación del Zona de Dilución, Planta 1700 y Planta 1701 - Fuente (Google LLC, s.f.)

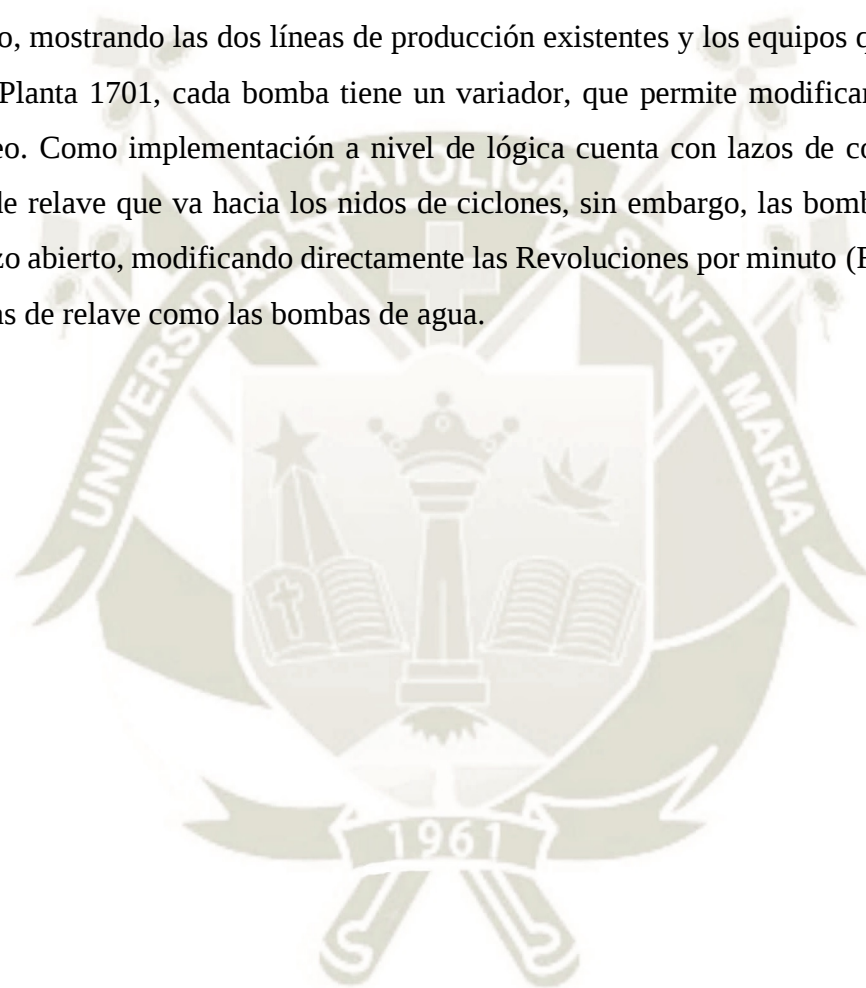
En la Planta 1701 el relave es almacenado en el Cajón 1 de esa planta; el cajón tiene dos líneas de salida, cada una con su correspondiente bomba, los cuales bombean el relave a sus respectivos nidos de ciclones independientes entre sí, teniendo en cuenta tanto la presión y flujo de relave que se envía, el relave es tratado en ambos nidos de ciclones donde a la salida underflow obtenemos arenas gruesas con las que son contruidos los diques con una concentración de sólidos de 70% a 72%; en cada nido de ciclones se tiene de igual forma líneas de ingreso de agua bombeadas por bombas independientes, donde de la misma forma se controla la presión y flujo de agua; al combinar el agua y el relave en el Ciclón se obtiene una mejor eficiencia en la filtración que se requiere. Las arenas gruesas son almacenadas en el Tanque de Arenas 04 donde se tiene tres líneas móviles de descarga por gravedad, cada línea es independiente y envía las arenas al dique hacia cada cancha que se encuentre activa y lista para llenar; para la construcción de ambos diques se utiliza el método de Paddock, donde el relave es enviado a las “canchas”, las cuales son áreas rectangulares con bordes de

arenas gruesas secas levantadas para poder almacenar las arenas gruesas húmedas que son enviadas desde planta, las arenas que vienen de planta son esparcidas de forma uniforme por medio de tractores (Bulldozers), logrando el drenado del agua por tuberías móviles que descargan fuera de la cancha.

El Dique Principal tiene un diseño de construcción “Aguas Abajo” con una altura aproximada de 130m y Longitud de 4.1 Km.

En la Fig. 34 se tiene el diagrama P&ID de la planta 1701 antes de implementar el sistema experto, mostrando las dos líneas de producción existentes y los equipos que lo componen.

En la Planta 1701, cada bomba tiene un variador, que permite modificar la velocidad de bombeo. Como implementación a nivel de lógica cuenta con lazos de control cerrado de flujo de relave que va hacia los nidos de ciclones, sin embargo, las bombas se manipulan por lazo abierto, modificando directamente las Revoluciones por minuto (RPM) tanto de las bombas de relave como las bombas de agua.



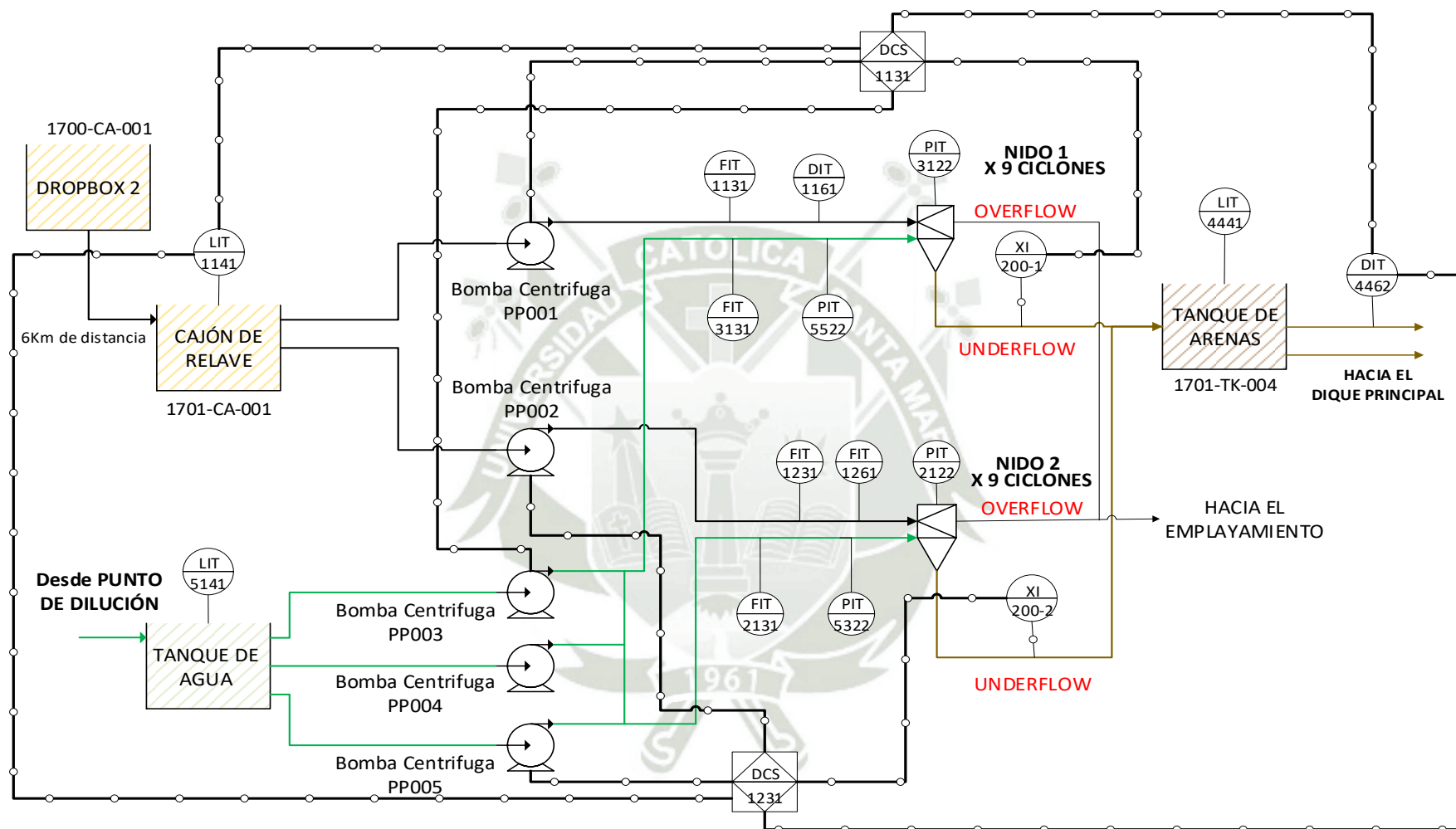


Figura 35 Diagrama P&ID de Proceso con el sistema experto implementado – Elaboración propia

Rev.	Fecha	Dibujado	C. BARRIGA		DIAGRAMA P&ID DEL PROCESO CON EL SISTEMA EXPERTO IMPLEMENTADO
A	10-nov-19	Diseñado	C. BARRIGA		

Para implementar el sistema experto; se tuvo que realizar modificaciones en el diagrama P&ID, añadiendo los lazos de control de este sistema multivariable e indicando de que entradas costa cada lazo de control implementado, tal como muestra la Fig. 35, donde se puede observar que las modificaciones son realizadas todas a nivel de programación y no se tiene que realizar algún cambio alguno en la planta.

3.2. DESCRIPCIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO

Teniendo en cuenta el diagrama del proceso de la Fig. 35, podemos observar que existen dos líneas independientes de producción, cada línea con su bomba de relave y bomba de agua, ambas líneas son independientes hasta la salida underflow de los nidos de ciclones, cada nido de ciclones descarga hacia un tanque de Arenas común para ambas líneas de producción; por ende, se tiene que para la primera línea de producción, se trabaja con la bomba de relave PP001, bomba de agua PP003, lazos 1131, 1161, 3132, 3131 y 5522; para la segunda línea de producción se trabaja con la bomba de relave PP002, bomba de agua PP005, lazos 1231, 2131, 5322 y 2122. Sin embargo, solo para el caso de las bombas de agua se tiene una tercera bomba PP-004 (bomba en spare) la cual puede funcionar tanto para la línea 1 como para la línea 2. Considerando estas premisas, el sistema experto trabajará de forma cambiante según la disponibilidad de líneas y equipos que intervengan trabajando ambas líneas de producción o solo una.

Para la implementación del sistema experto debemos obtener todos los parámetros operacionales de la planta 1701 que intervengan en la producción de áreas gruesas, considerando la siguiente secuencia de implementación ver Tabla 7.

Tabla 7 Secuencia de Implementación del Sistema Experto - Elaboración propia

Secuencia de Implementación del Sistema Experto	1. Obtener parámetros operacionales: Presiones y flujos de agua y relave, límites de porcentajes de sólidos y mallas; velocidades de bombas y funcionamiento de la planta en general.
	2. Obtener los datos históricos de los datos operativos y los resultados de análisis granulométrico del porcentaje de malla, para generar una base de datos. A partir de la base de datos podremos crear la red Neuronal del Porcentaje de Malla. El valor de la malla debe ser enviado al DCS.
	3. Modificar la librería Fuzzy para adecuarla a las variables de entrada y salidas que se va a controlar, en este caso se tiene un control

	multivariable directo de lazo cerrado de 3x2 (tres entradas dos salidas por línea).
	4. Realizar la sintonización del sistema experto con la planta operando, para ello se requiere modificar los grados de membresía y las condicionales según se vaya verificando como este actuando ante diversos cambios, hasta tener estable el sistema.

Como se indica en el paso N° 2 de la Tabla 7, debemos obtener la base de datos de los valores operativos de cada transmisor para cada línea de producción, esta base de datos generada se tiene que ingresar al software NeurON line Studio para obtener las dos redes neuronales, obteniendo el valor de porcentaje de malla en el underflow de cada nido de ciclones, luego enviarlo por OPC al DCS System800xA y consecuentemente ser mostrado en el SCADA; ya en el paso N°3 de la Tabla 8, estando en el servidor del System800xA se realiza la modificación de la librería Fuzzy de ABB, adecuándola al número de variables a controlar, en este caso el porcentaje de sólidos, porcentaje de malla y el número de salidas (una bomba de agua y una bomba de relave) por cada línea de producción; el sistema experto determinará el valor de velocidad de cada bomba que esté operando en ese instante según requiera de acuerdo a los Set Point tanto del porcentaje de malla como de sólidos, como muestra la Fig. 36.

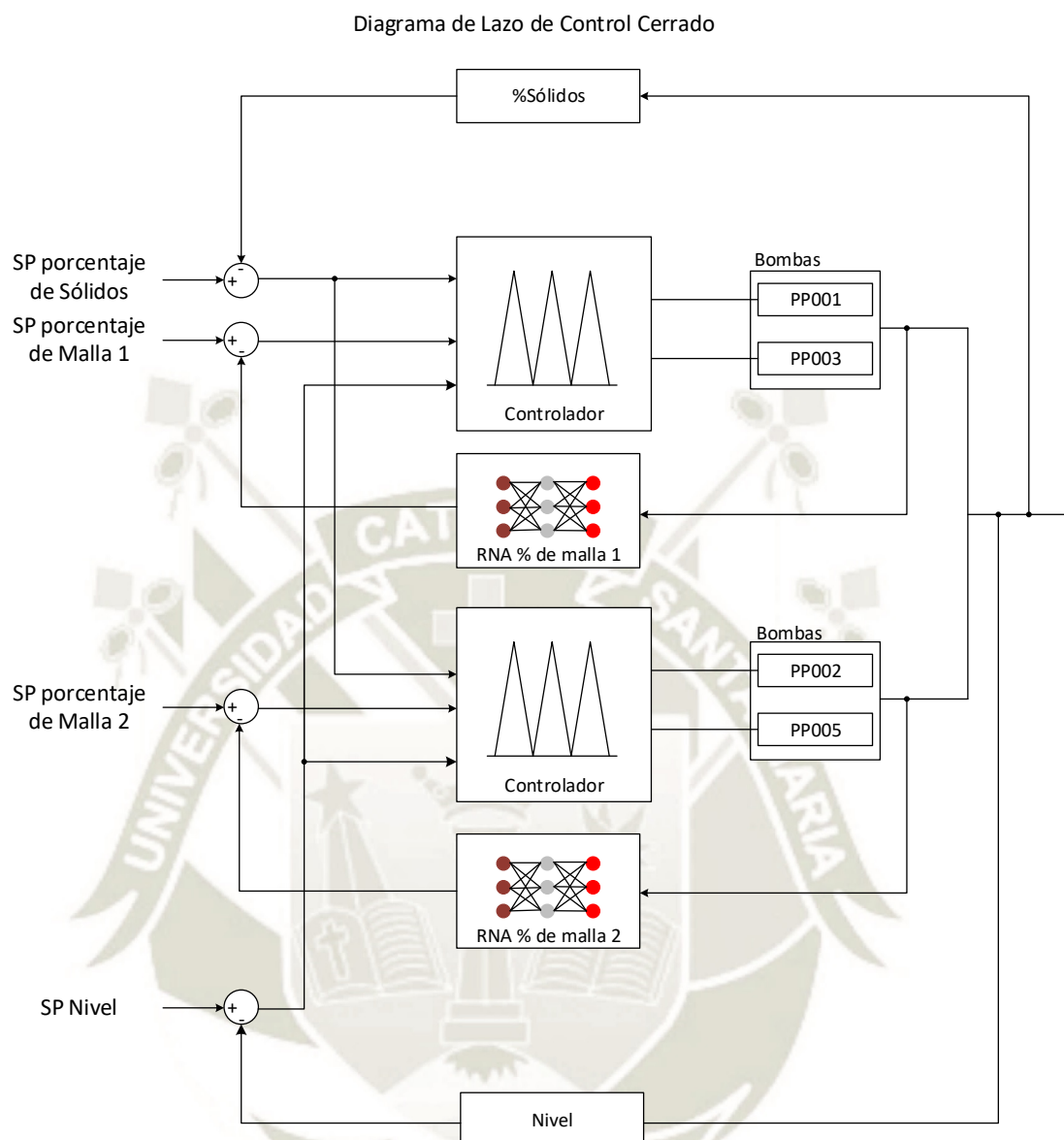


Figura 36 Diagrama de Control de Lazo cerrado – Elaboración propia

3.3. ELABORACIÓN DE LA RED NEURONAL

Para realizar la red Neuronal de la Malla 200 a partir de los datos operativos, se utilizó los reportes de malla (Ver anexo 1), donde obtenemos resultados puntuales de la Malla 200 tanto para el turno de día como para el turno de noche.

Teniendo en cuenta un margen de toma de muestra de entre las 9:00 horas hasta las 11:30 horas tanto para el día y la noche se obtuvo el Average de los datos operativos (Flujo, presión de relave y agua, porcentaje de sólidos antes del ingreso al nido de ciclones) Tabla 9, mediante el sistema PI System, el cual permite obtener los valores históricos de cada variable durante el tiempo que se determine. Obteniendo así una base de datos (ver anexo 2) donde se tiene una matriz entre los datos operativos y los valores de malla puntuales.

Tabla 8 ENTRADAS Y SALIDAS – Elaboración propia

VARIABLES DE ENTRADA	Flujo de relave
	Presión de relave
	Flujo de agua
	Presión de agua
	Porcentaje de Sólidos después (Después de la dilución)
VARIABLE DE SALIDA	Porcentaje de Malla 200

Según las variables de la Tabla 8 tenemos cinco neuronas de entradas y una neurona de salida.

Teniendo en cuenta que se tiene una neurona para cada entrada, se evaluó la posibilidad de generar redes neuronales con el menor error posible. En este caso se entrenó un sistema de 5 neuronas de entrada, una capa oculta con 3 neuronas y una salida. De la misma manera se entrenó un sistema más complejo de 9 neuronas de entrada (5 neuronas reales y las otras 4 neuronas con delay de la misma neurona de entrada) teniendo un sistema de 9 neuronas de entrada, 7 neuronas en la primera capa oculta, 5 neuronas en la segunda capa oculta, 3 neuronas en la tercera capa oculta y una neurona de salida.

Se tuvieron los siguientes resultados Red Neuronal 1 y Red Neuronal 2, que se detallan en los siguientes apartados.

3.3.1 Red Neuronal de una capa oculta

Reemplazando la ecuación 8 obtenemos:

$$h = \sqrt{(1 * 5)}$$

$$h = 2.23$$

Consideramos 3 neuronas para una capa oculta Fig. 37.

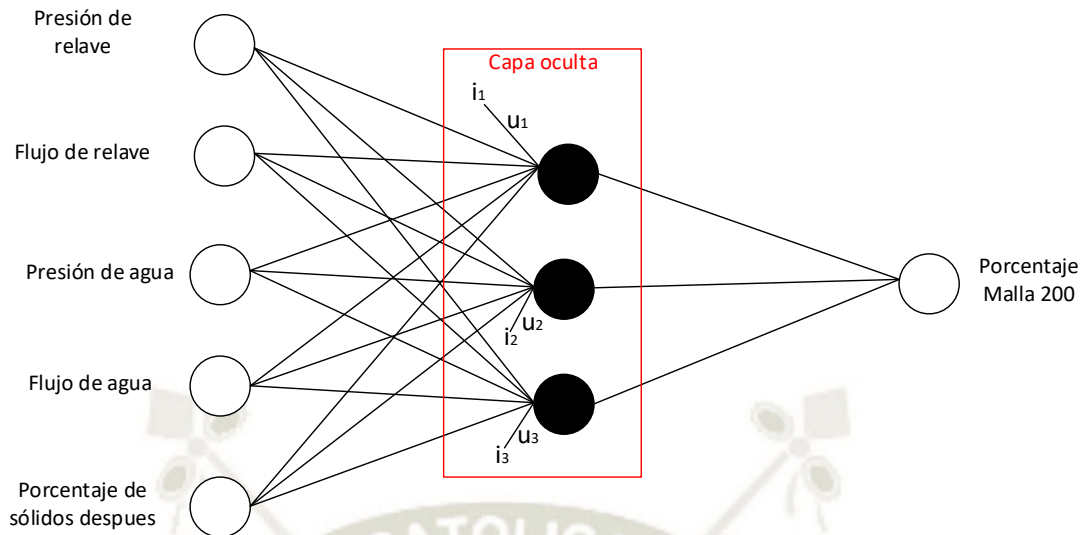


Figura 37 Modelo Neuronal con una capa oculta – Elaboración propia

Reemplazando los nombres de la Fig. 37, asignamos a cada neurona una variable para obtener la ecuación de la red neuronal Fig. 38.

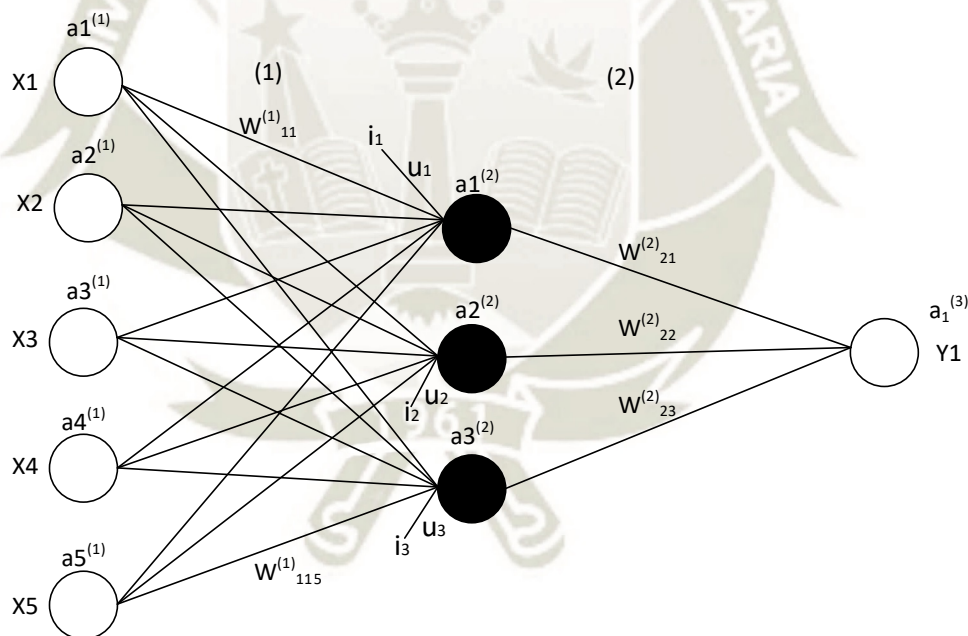


Figura 38 Red Neuronal – Elaboración propia

Obtenemos la ecuación 10, teniendo como premisa la representación matemática de una neurona. Utilizando la derivada parcial para poder obtener el valor de Y1 respecto a W.

$$\frac{dY1}{dW_{11}^{(1)}} = a_1^{(3)} (1 - a_1^{(3)}) * W_{21}^{(2)} * a_1^{(2)} (1 - a_1^{(2)}) a_1^{(1)}$$

Ecuación 10 Derivada parcial de una Neurona – Elaboración propia

Sin embargo, solo obtenemos la ruta Back-Propagation de una sola neurona (X1).

Para poder obtener la ecuación de todo el sistema debemos tratar de simplificar utilizando la sumatoria. Debido a que existe un patrón, se puede considerar realizar la suma para todas las neuronas ecuación 11.

$$\frac{dY1}{dW_{1i}^{(1)}} = a_1^{(3)}(1 - a_1^{(3)})$$

$$\begin{aligned} & * \left[a_1^{(1)} * \left(\sum_{j=1}^3 W_{2j}^{(2)} * a_j^{(2)}(1 - a_j^{(2)}) \right) + a_2^{(1)} * \left(\sum_{j=1}^3 W_{2j}^{(2)} * a_j^{(2)}(1 - a_j^{(2)}) \right) \right. \\ & + a_3^{(1)} * \left(\sum_{j=1}^3 W_{2j}^{(2)} * a_j^{(2)}(1 - a_j^{(2)}) \right) + a_4^{(1)} * \left(\sum_{j=1}^3 W_{2j}^{(2)} * a_j^{(2)}(1 - a_j^{(2)}) \right) \\ & \left. + a_5^{(1)} * \left(\sum_{j=1}^3 W_{2j}^{(2)} * a_j^{(2)}(1 - a_j^{(2)}) \right) \right] \\ & i = 1,15 \end{aligned}$$

Ecuación 11 Ecuación de la red Neuronal figura 39 – Elaboración propia

Se debe considerar que dicha ecuación de Backpropagation nos permite realizar el entrenamiento de la red neuronal y obtener los pesos de la segunda capa.

Como anteriormente se observó en la figura 36 se tiene dos líneas independientes que descargan ambas a un solo tanque (Tanque de Arenas), para tal caso se consideró que se debe implementar una Red Neuronal del porcentaje de Malla 200 para cada línea a las cuales llamaremos Malla 200-1 y Malla 200-2.

El procedimiento de la Malla 200-1 y Malla 200-2, son similares solo varía los datos operativos y de laboratorio. Se debe considerar el uso de Software especializado para poder obtener un entrenamiento adecuado considerando en primera instancia la red con una sola capa oculta, es por ello que al elaborar los datos para la Malla 200-1 importamos los datos al software SGS Gensym ver Fig. 39. Donde observamos que se pueden ver las variables que están siendo considerados en la red Neuronal de la Malla 200-1 y los datos operativos ordenados por fecha.

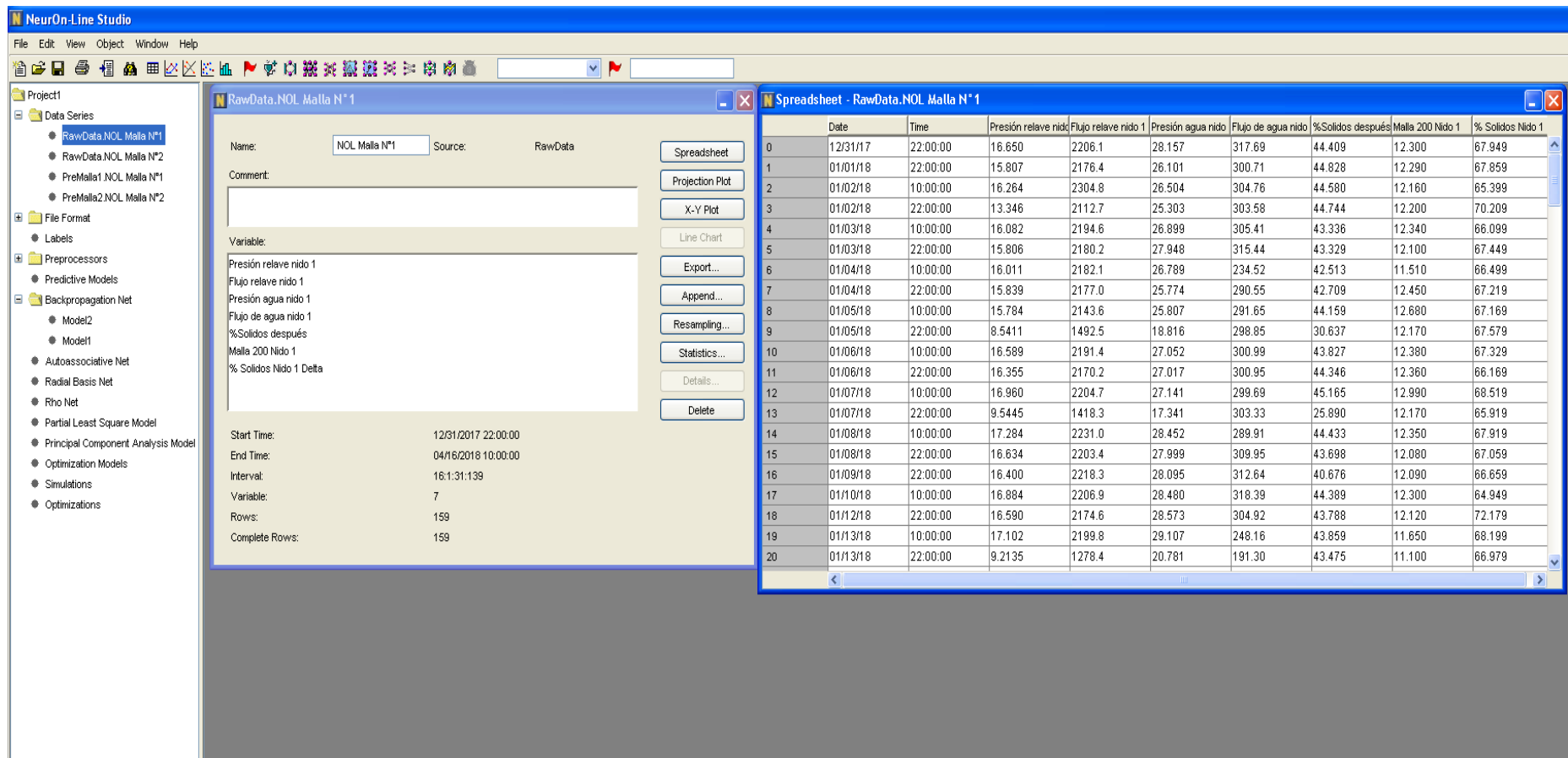
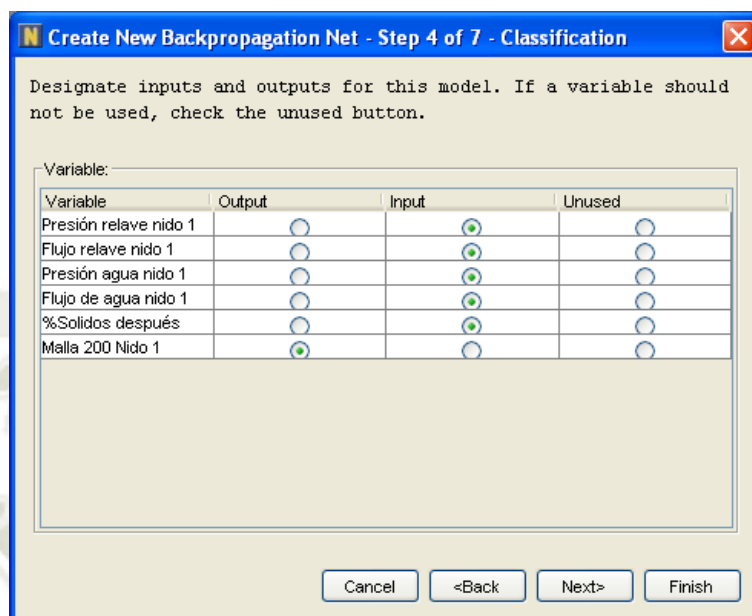


Figura 39 Importación de la base de datos – Elaboración propia

Luego procedemos a crear la red Backpropagation Fig. 40 donde indicaremos cuáles serán las entradas y salidas respectivas, tal como se consideró en la Tabla 8.



Designate inputs and outputs for this model. If a variable should not be used, check the unused button.

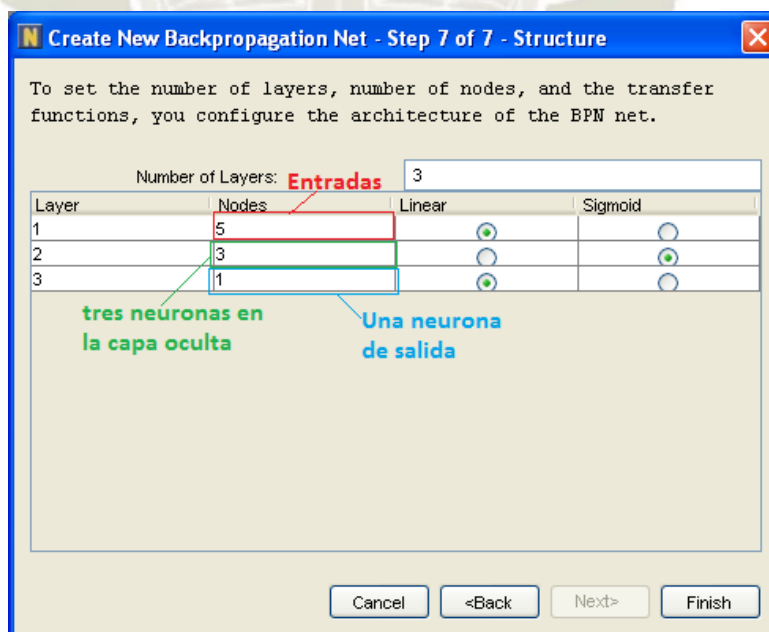
Variable:

Variable	Output	Input	Unused
Presión relave nido 1	☐	☒	☐
Flujo relave nido 1	☐	☒	☐
Presión agua nido 1	☐	☒	☐
Flujo de agua nido 1	☐	☒	☐
%Solidos después	☐	☒	☐
Malla 200 Nido 1	☒	☐	☐

Buttons: Cancel, <Back, Next>, Finish

Figura 40 Asignación de Entradas y Salidas – Elaboración propia

De igual forma nos solicita la estructura donde se indica el número de capas y la función de activación. En este caso se considera tres capas (una capa de entrada, una de salida y una capa oculta) Fig. 41.



To set the number of layers, number of nodes, and the transfer functions, you configure the architecture of the BPM net.

Number of Layers: **Entradas** 3

Layer	Nodes	Linear	Sigmoid
1	5	☒	☐
2	3	☐	☒
3	1	☒	☐

Annotations:

- tres neuronas en la capa oculta (pointing to Layer 2)
- Una neurona de salida (pointing to Layer 3)

Buttons: Cancel, <Back, Next>, Finish

Figura 41 Estructura de la Red Neuronal – Elaboración propia

Luego de tener la estructura se selecciona el método de entrenamiento, entre las cuales se tiene la Conjugación de Gradientes (Polak-Ribiere y Fletcher-Reeves) y Segundo Orden (BFGS y DFP).

Se debe tener en cuenta la cantidad de capas ocultas para poder seleccionar algunos de estos métodos, considerando que para métodos de segundo orden Cuasi-Newton (BFGS y DFP), realizan cálculos de la inversa de la matriz hessiana de la función de manera exacta, lo que implica un gran uso de memoria del computador, en este caso al tener una sola capa es posible interactuar con cualquiera de estos métodos, se seleccionó el método de gradiente Fletcher-Reeves debido a que tiene convergencia global de velocidad lineal y luego aplica el método de Newton que tiene convergencia local de velocidad cuadrática.

Luego de realizar el entrenamiento se puede obtener una gráfica de comparación entre los valores reales y predichos por la red Fig. 42.



Figura 42 Red Neuronal Vs Valor Real 1 capa oculta Malla 200_1 – Elaboración propia

Se puede observar que tanto el valor de la neurona y el valor real tiene una similitud teniendo en cuenta que siempre existe una incertidumbre entre las dos medidas, para ello también podemos observar el error entre los dos valores. Donde el margen de error oscila entre -1 y 1 según la función de activación salvo algunos picos que salen del margen los cuales no son de consideración Fig. 43 y Fig. 44.

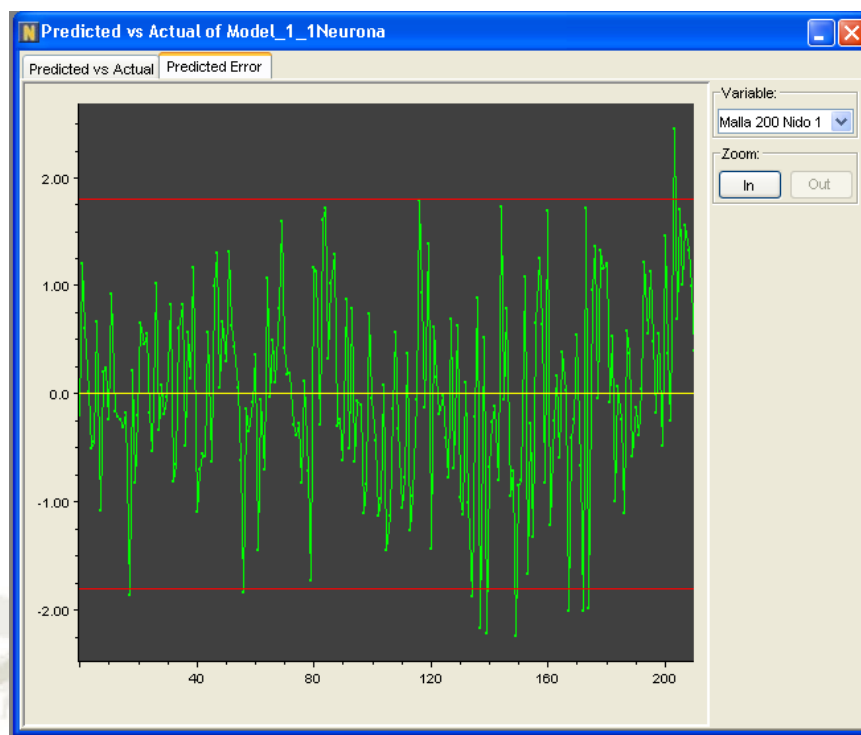


Figura 43 Error de la Red Neuronal Malla 200_1 – Elaboración propia



Figura 44 Error de la Red Neuronal Malla 200_2 – Elaboración propia

El software también nos da los valores estadísticos como el coeficiente de correlación, el cual es un indicador de la relación lineal entre las dos variables, si esta es más cercana a uno

existe una correlación positiva en la cual indica una dependencia entre las dos variables de relación directa Fig. 45 y Fig. 46.

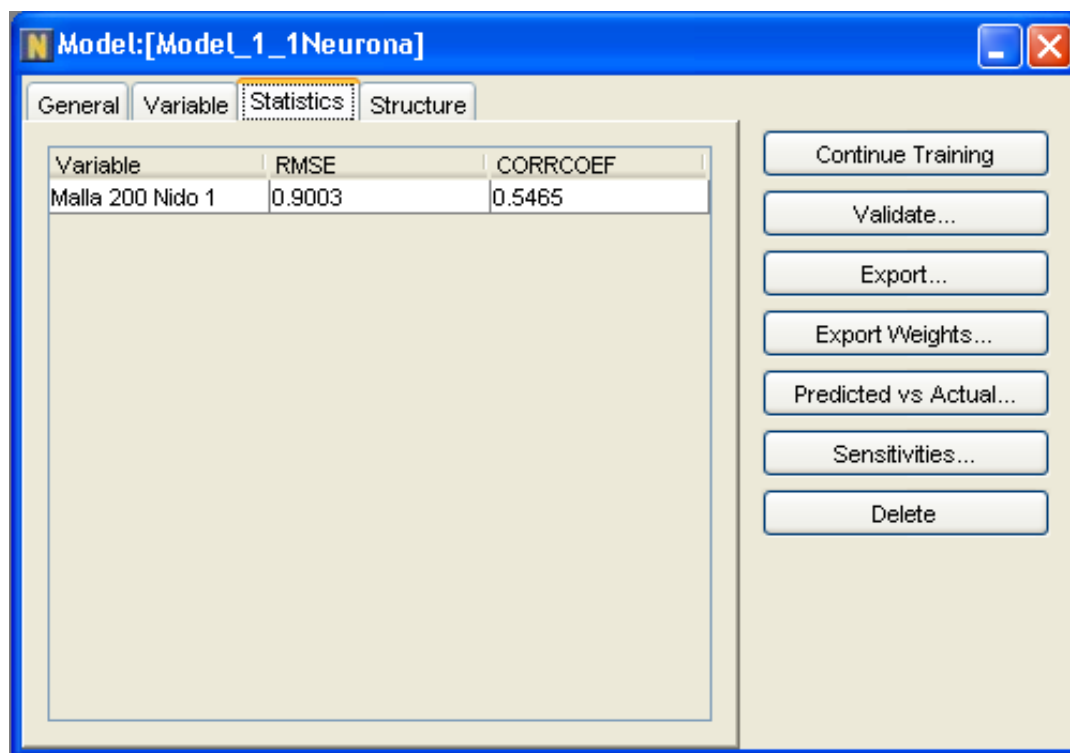


Figura 45 Coeficiente de Correlación Malla 200_1 una capa oculta– Elaboración propia

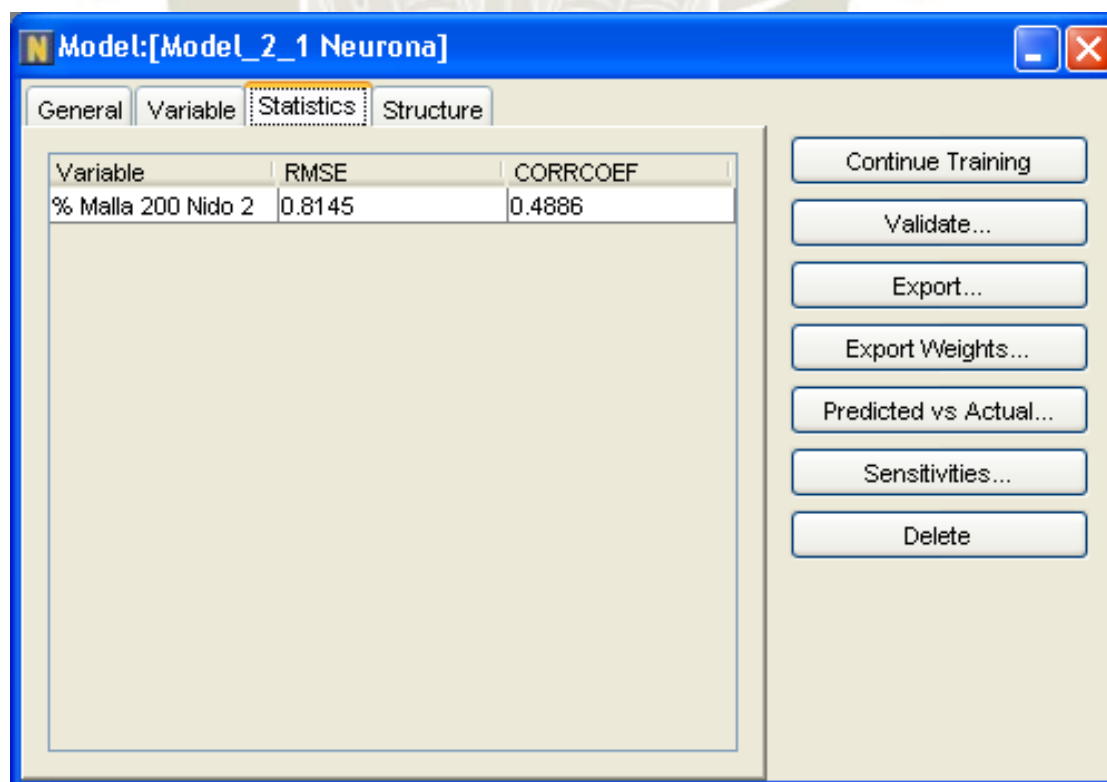


Figura 46 Coeficiente de Correlación Malla 200_2 una capa oculta – Elaboración propia

3.3.2 Red Neuronal de tres capas ocultas

Se realizaron diversas pruebas respecto a la elaboración de una red mucho más exacta, teniendo en cuenta el procesamiento y capacidad de los servidores se realizó y probó una configuración con el número máximo que permite el sistema de capas ocultas (3 capas ocultas); de las entradas que se tienen consideradas, el programa SGS Gensym permite evaluar cada entrada con delay según sea conveniente, para ello se agregó un delay máximo de 3 minutos con intervalos de 1 minuto en cada entrada, el delay de 3 minutos es un aproximado del impacto de cada variable en el punto donde la malla indica el dato. Evaluando a los que tuvieron mayor rating se creó una estructura con 9 neuronas de entrada Fig. 47.

Create New Backpropagation Net - Step 6 of 7 - Settings

If you would like the program to find the most important inputs, select Calculate Ratings. You can change the selection threshold, or manually override the automatic selection.

Automatically Select Variables & Calculate Delays:

Variable	Delay	Rating	Used
Presión relave nido 1	0.0	1.9301	☒
Presión relave nido 1	1.0	1.9159	☐
Presión relave nido 1	2.0	1.9002	☐
Presión relave nido 1	3.0	1.9073	☐
Flujo relave nido 1	0.0	3.3324	☒
Flujo relave nido 1	1.0	3.3470	☒
Flujo relave nido 1	2.0	3.3456	☒
Flujo relave nido 1	3.0	3.3629	☐
%Sólidos después 1	0.0	3.6850	☒
%Sólidos después 1	1.0	3.6843	☒
%Sólidos después 1	2.0	3.6819	☒
%Sólidos después 1	3.0	3.6819	☒
Flujo de agua nido 1	0.0	1.0590	☐
Flujo de agua nido 1	1.0	1.0810	☐
Flujo de agua nido 1	2.0	1.1008	☐
Flujo de agua nido 1	3.0	1.1187	☒
Presión agua nido 1	0.0	0.8494	☐
Presión agua nido 1	1.0	0.852	☐
Presión agua nido 1	2.0	0.84762	☐
Presión agua nido 1	3.0	0.85271	☐

Threshold:

Figura 47 Entradas y sus Delay a usar de la Malla 200_1 - Elaboración propia

Similar se realizó la misma metodología para la Malla 200_2, se evaluó todas las entradas que se tenía y se colocó un delay de 3 minutos en cada una, evaluando el rating se tuvo los siguientes resultados Fig. 48.

Create New Backpropagation Net - Step 6 of 7 - Settings

If you would like the program to find the most important inputs, select Calculate Ratings. You can change the selection threshold, or manually override the automatic selection.

Automatically Select Variables & Calculate Delays:

Variable	Delay	Rating	Used
Flujo relave nido 2	0.0	1.8126	☒
Flujo relave nido 2	1.0	1.8149	☒
Flujo relave nido 2	2.0	1.8044	☐
Flujo relave nido 2	3.0	1.8065	☐
%Solidos después 2	0.0	2.9604	☒
%Solidos después 2	1.0	2.8609	☒
%Solidos después 2	2.0	2.8588	☒
%Solidos después 2	3.0	2.8516	☒
Flujo de agua nido 2	0.0	1.8788	☒
Flujo de agua nido 2	1.0	1.8830	☒
Flujo de agua nido 2	2.0	1.8830	☐
Flujo de agua nido 2	3.0	1.8810	☒
Presión agua nido 2	0.0	0.071995	☐
Presión agua nido 2	1.0	0.076575	☐
Presión agua nido 2	2.0	0.079142	☐
Presión agua nido 2	3.0	0.082346	☐

Threshold:

Figura 48 Entradas y sus Delay a usar de la Malla 200_2 - Elaboración propia

En las Fig. 49 y 50, se muestra la estructura generada para cada malla, teniendo en cuenta las entradas seleccionadas con sus respectivos delays.

Ambas al tener la misma estructura, la reemplazamos por variable y pesos para poder hallar la ecuación general, Fig. 51.

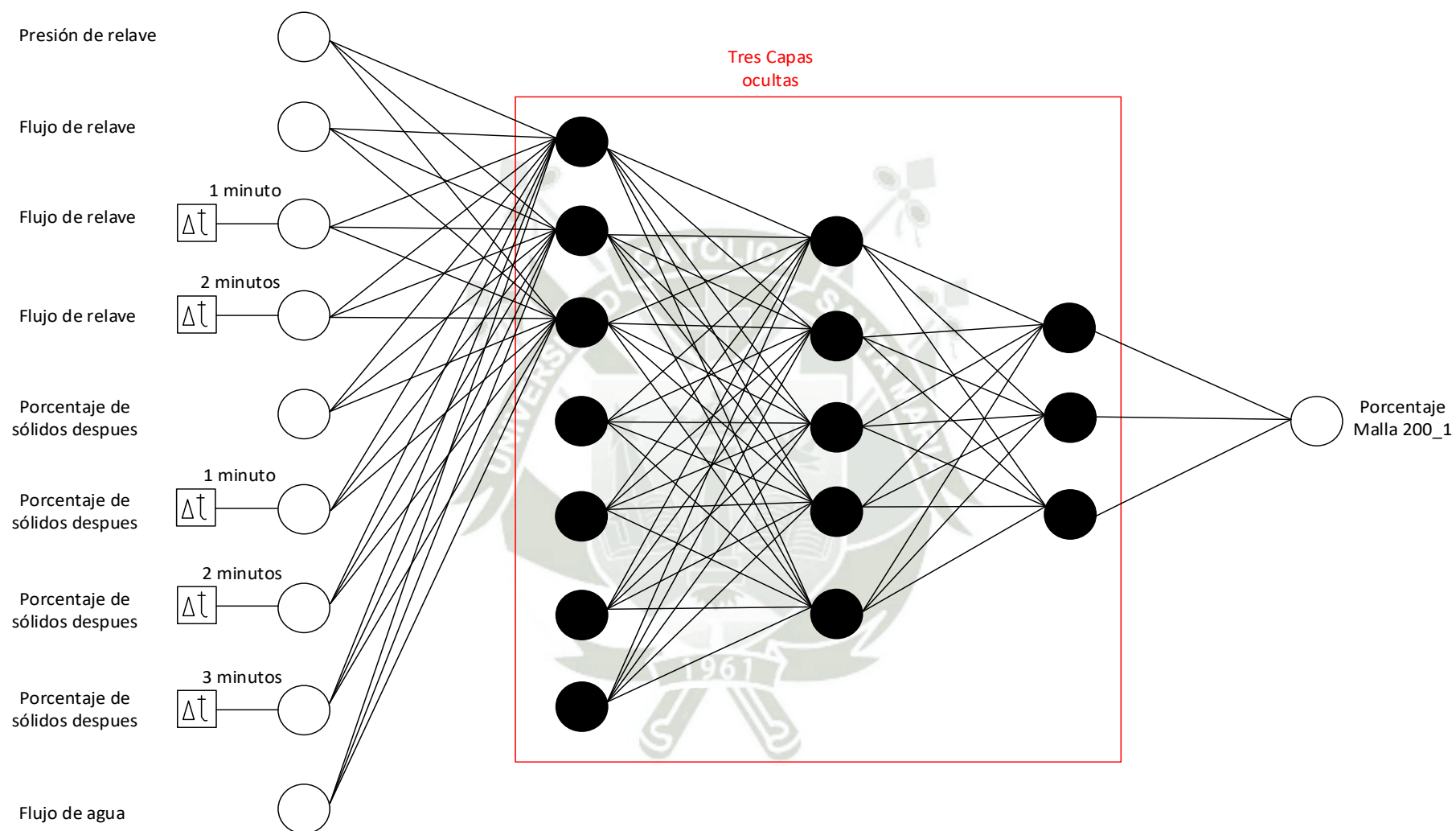


Figura 49 Modelo Neuronal con tres capas ocultas Malla 200_1 – Elaboración propia

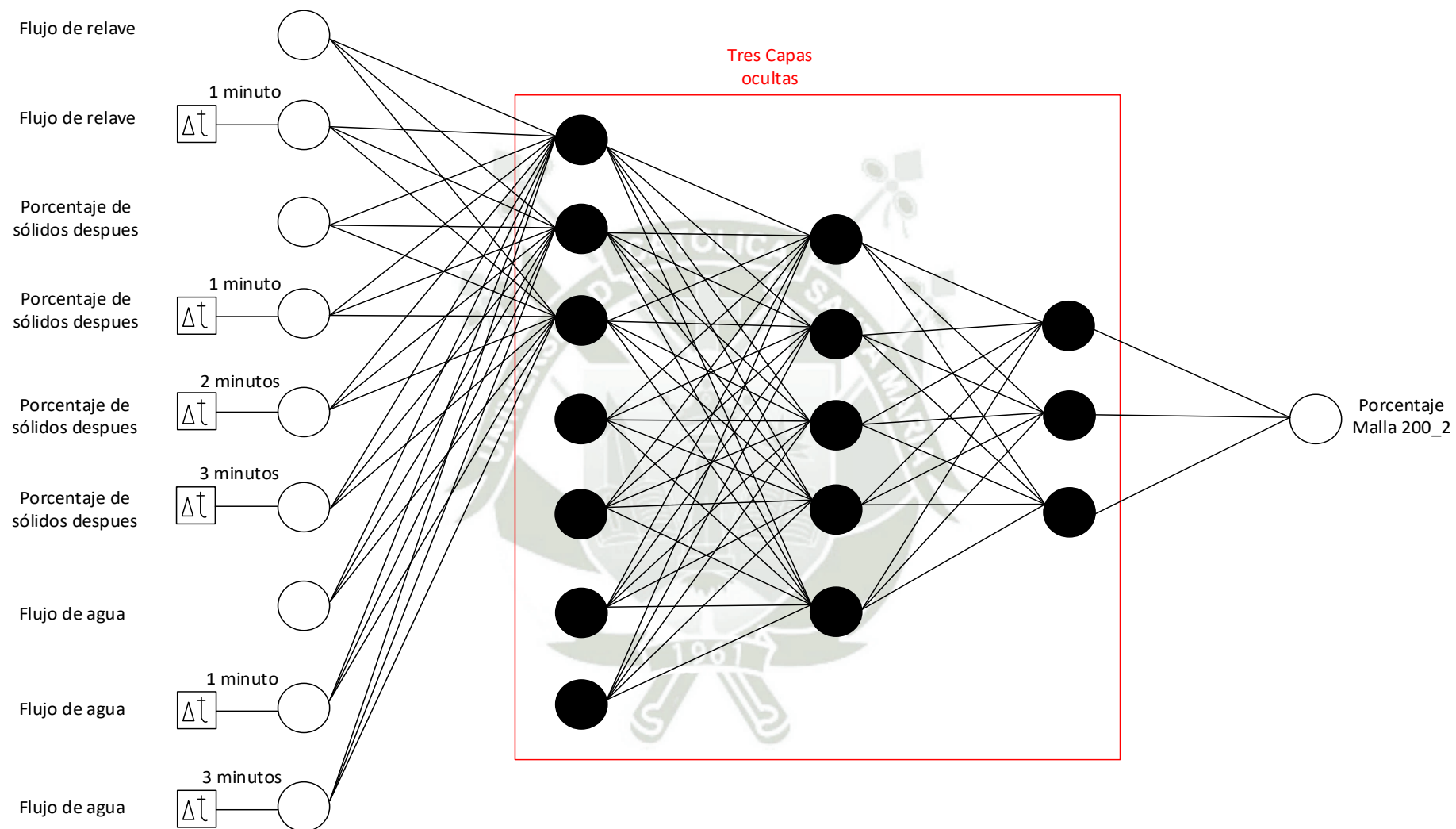


Figura 50 Modelo Neuronal con tres capas ocultas Malla 200_2 – Elaboración propia

Considerando como estructura, para ambas mallas es la misma, por lo que la Fig. 51 puede ser considerada para ambos modelos.

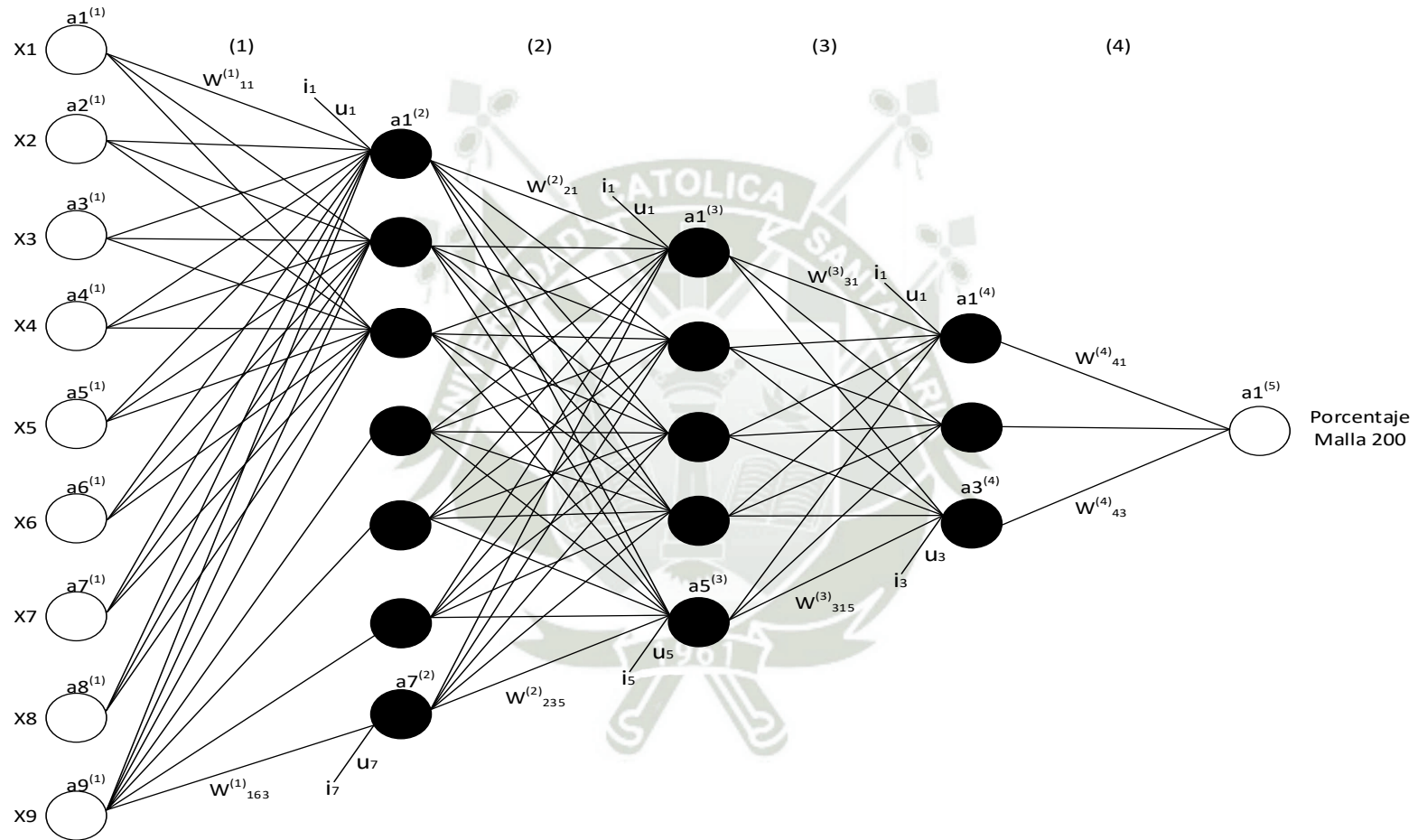


Figura 51 Red Neuronal – Elaboración propia

Se obtiene la igual forma la ecuación 12 del sistema utilizando la derivada parcial de la salida y una entrada.

$$\frac{dY_1}{dW_{11}^{(1)}} = \left[a_1^{(5)} (1 - a_1^{(5)}) W_{41}^{(4)} * a_1^{(4)} (1 - a_1^{(4)}) W_{31}^{(3)} \right. \\ \left. * a_1^{(3)} (1 - a_1^{(3)}) W_{21}^{(2)} * a_1^{(2)} (1 - a_1^{(2)}) a_1^{(1)} \right]$$

Ecuación 12 Derivada de la salida en función al peso de entrada

Tener en cuenta que la formula hallada corresponde a la salida en función al peso de la entrada uno, por lo que verificando el patrón podemos obtener la ecuación 13 general de todo el sistema.

$$\frac{dY_1}{dW_{1i}^{(1)}} = \left[a_1^{(5)} (1 - a_1^{(5)}) \sum_{c=1}^3 W_{4c}^{(4)} \right] * \left[\sum_{d=1}^3 a_d^{(4)} (1 - a_d^{(4)}) * \sum_{e=1}^{15} W_{3e}^{(3)} \right] \\ * \left[\sum_{f=1}^5 a_f^{(3)} (1 - a_f^{(3)}) * \sum_{g=1}^{35} W_{3g}^{(3)} \right] * \left[\sum_{h=1}^7 a_h^{(2)} (1 - a_h^{(2)}) * \sum_{j=1}^9 a_j^{(1)} \right] \\ i = 63$$

Ecuación 13 Ecuación general de la Red neuronal de tres capas ocultas – Elaboración propia

La anterior ecuación es una referencia del cálculo que debe hacer el sistema para poder obtener los pesos (W). Para verificar la diferencia entre 1 capa oculta o 3 capas ocultas se realizó un comparativo. Para ello se creó la siguiente estructura Fig. 52.

Create New Backpropagation Net - Step 7 of 7 - Structure

To set the number of layers, number of nodes, and the transfer functions, you configure the architecture of the BPN net.

Number of Layers: 5

Layer	Nodes	Linear	Sigmoid
1	9	☒	☐
2	5	☐	☒
3	5	☐	☒
4	5	☐	☒
5	1	☒	☐

Capas Ocultas

Cancel <Back Next> Finish

Figura 52 Estructura de la Red Neuronal 2 capas – Elaboración propia

Para entrenar a la red se consideró la Conjugación por gradiente Fletcher-Reeves, obteniendo la siguiente grafica de comparación entre el valor de laboratorio y el valor predicho Fig. 53 y Fig. 54.



Figura 53 Red Neuronal Vs Valor Real 3 capas ocultas Malla 200_1 – Elaboración propia

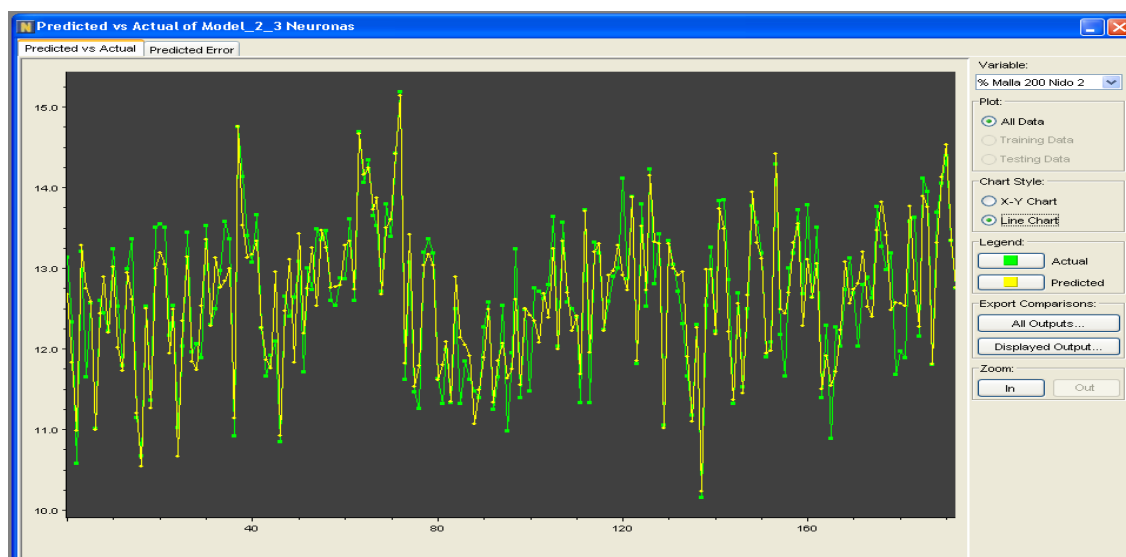


Figura 54 Red Neuronal Vs Valor Real 3 capas ocultas Malla 200_2 – Elaboración propia

Podemos verificar el coeficiente de correlación y el error cuadrático medio de ambas redes Fig. 55 y Fig. 56.

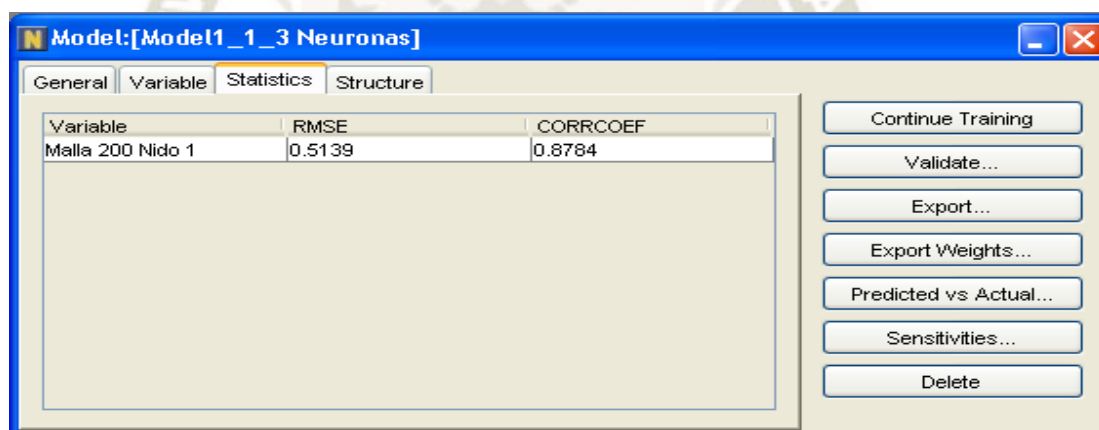


Figura 55 Estadística de la Malla 200_1 con tres capas ocultas – Elaboración propia

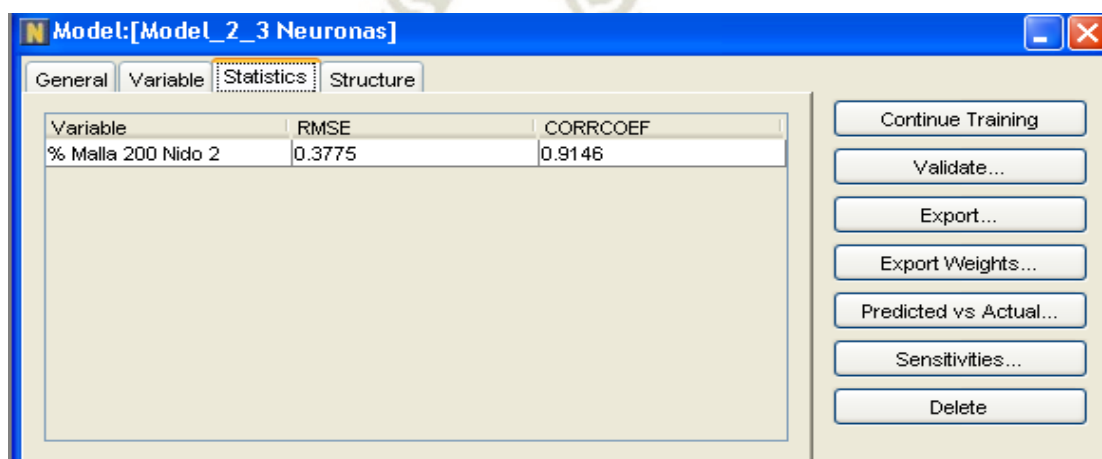


Figura 56 Estadística de la Malla 200_2 con tres capas ocultas – Elaboración propia

Teniendo en cuenta los resultados de ambas redes (Malla 200_1, Malla 200_2) para redes de 1 capa y 3 capas ocultas, podemos realizar un cuadro comparativo y ver la diferencia entre ambos Fig. 57 y Fig. 58.



Figura 57 Comparación entre Redes de una y tres capas Malla 200_1 – Elaboración propia

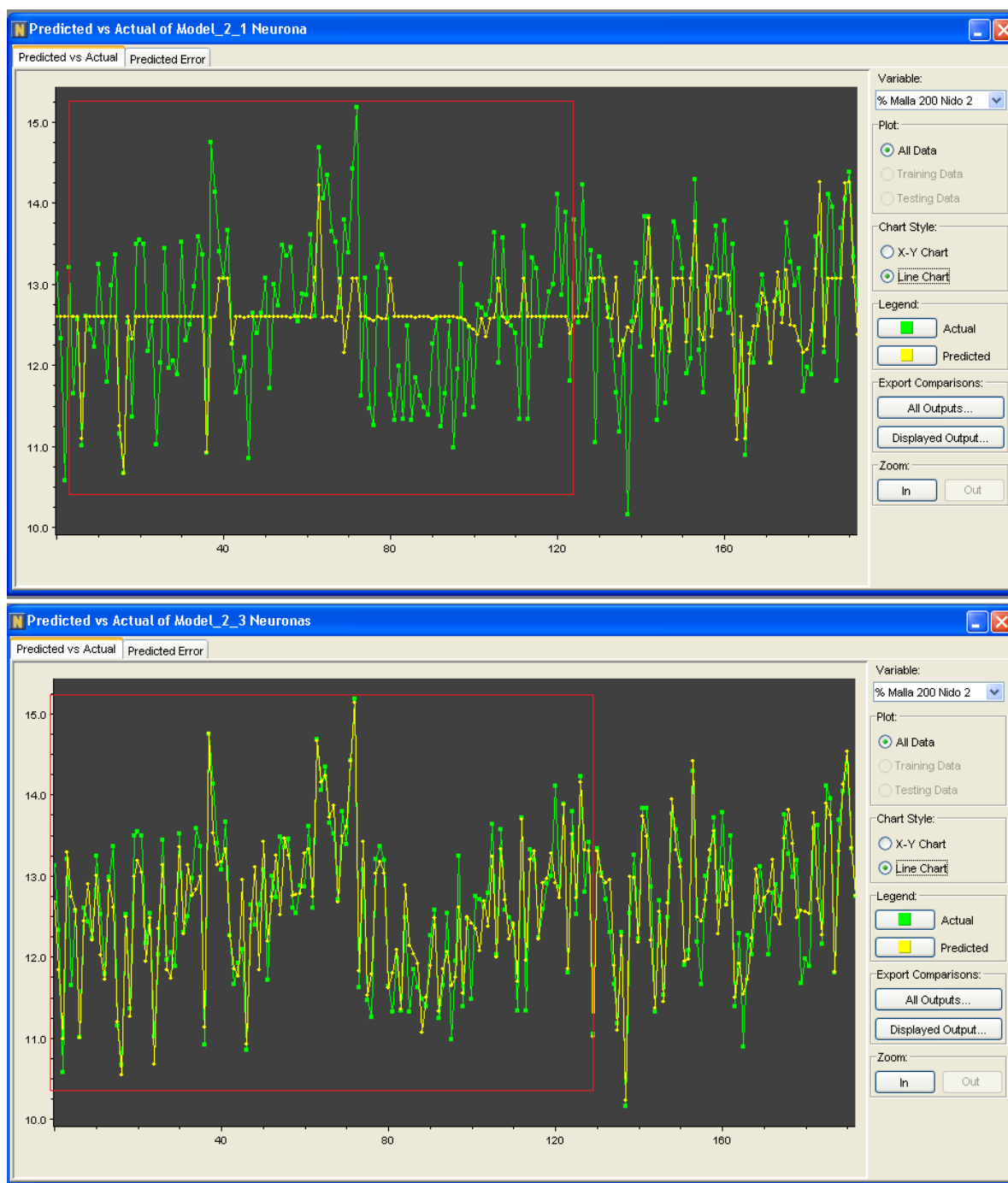
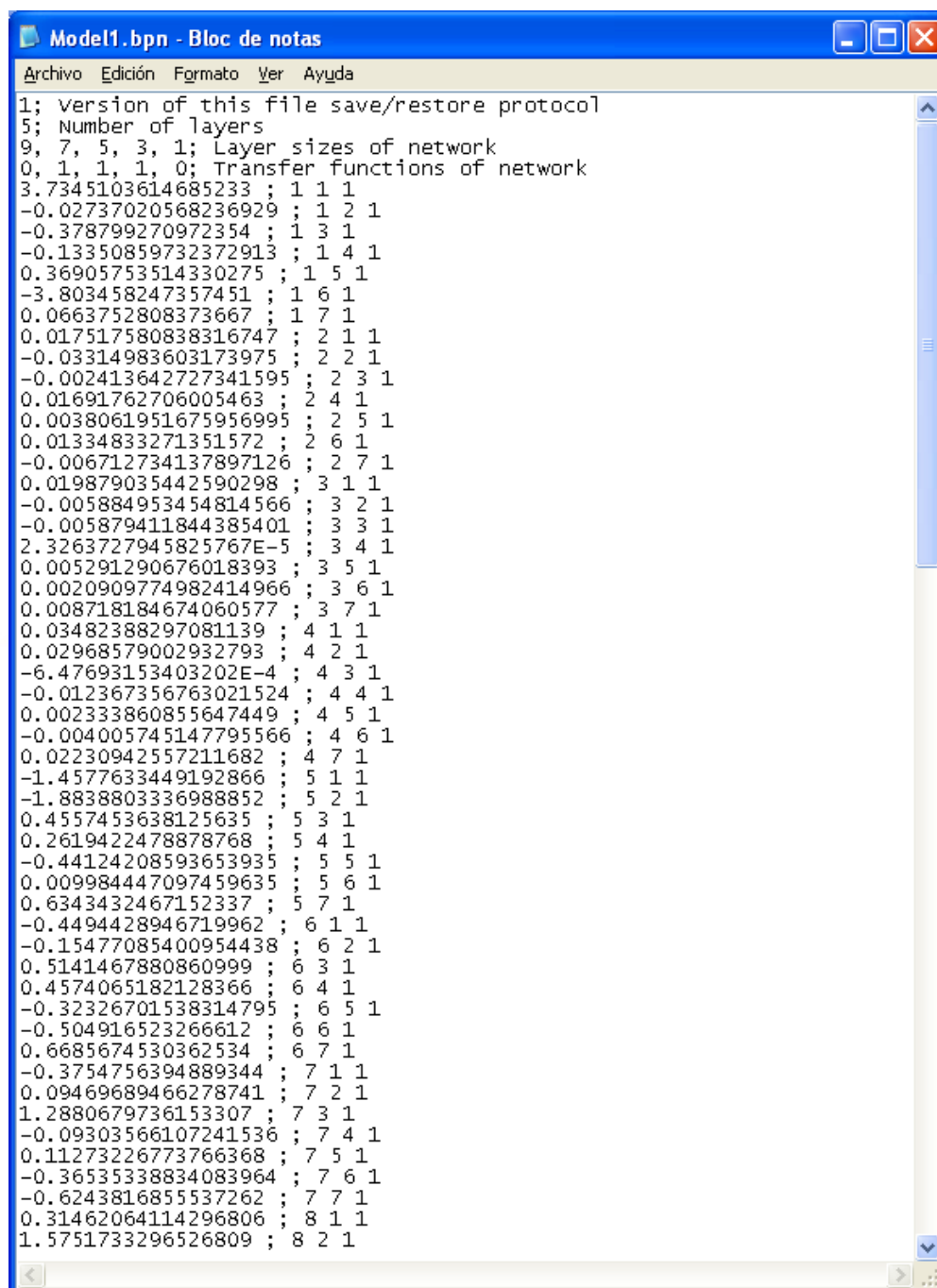


Figura 58 Comparación entre Redes de una y tres capas Malla 200_2 – Elaboración propia

Se puede observar que se tiene una gran diferencia entre las redes de 1 capa y 3 capas ocultas, al revisar los diversos factores lo ideal es utilizar una red de 3 capas ocultas, sin embargo, algo muy importante y determinante es contar con un servidor con la capacidad de procesamiento para poder implementarla en línea; en este caso sí se cuenta con un equipo de tal capacidad para poder realizar el Backpropagation con nueve neuronas de entrada y una neurona de salida.

3.2.3 Integración con el DCS System800xA

En el sistema Gensym luego de realizar el entrenamiento, genera archivos de datos con extensión xx.bpn (Backpropagation Network), dentro del archivo se tiene la estructura de la red neuronal y los pesos (W) que se obtuvieron de todas las interacciones entre las neuronas Fig. 59.



```

1; version of this file save/restore protocol
5; Number of layers
9, 7, 5, 3, 1; Layer sizes of network
0, 1, 1, 1, 0; Transfer functions of network
3.7345103614685233 ; 1 1 1
-0.02737020568236929 ; 1 2 1
-0.378799270972354 ; 1 3 1
-0.13350859732372913 ; 1 4 1
0.36905753514330275 ; 1 5 1
-3.803458247357451 ; 1 6 1
0.0663752808373667 ; 1 7 1
0.017517580838316747 ; 2 1 1
-0.03314983603173975 ; 2 2 1
-0.002413642727341595 ; 2 3 1
0.01691762706005463 ; 2 4 1
0.0038061951675956995 ; 2 5 1
0.01334833271351572 ; 2 6 1
-0.006712734137897126 ; 2 7 1
0.019879035442590298 ; 3 1 1
-0.005884953454814566 ; 3 2 1
-0.005879411844385401 ; 3 3 1
2.3263727945825767E-5 ; 3 4 1
0.005291290676018393 ; 3 5 1
0.0020909774982414966 ; 3 6 1
0.008718184674060577 ; 3 7 1
0.03482388297081139 ; 4 1 1
0.02968579002932793 ; 4 2 1
-6.47693153403202E-4 ; 4 3 1
-0.012367356763021524 ; 4 4 1
0.002333860855647449 ; 4 5 1
-0.004005745147795566 ; 4 6 1
0.02230942557211682 ; 4 7 1
-1.4577633449192866 ; 5 1 1
-1.8838803336988852 ; 5 2 1
0.4557453638125635 ; 5 3 1
0.2619422478878768 ; 5 4 1
-0.44124208593653935 ; 5 5 1
0.009984447097459635 ; 5 6 1
0.6343432467152337 ; 5 7 1
-0.4494428946719962 ; 6 1 1
-0.15477085400954438 ; 6 2 1
0.5141467880860999 ; 6 3 1
0.4574065182128366 ; 6 4 1
-0.32326701538314795 ; 6 5 1
-0.504916523266612 ; 6 6 1
0.6685674530362534 ; 6 7 1
-0.3754756394889344 ; 7 1 1
0.09469689466278741 ; 7 2 1
1.2880679736153307 ; 7 3 1
-0.09303566107241536 ; 7 4 1
0.11273226773766368 ; 7 5 1
-0.36535338834083964 ; 7 6 1
-0.6243816855537262 ; 7 7 1
0.31462064114296806 ; 8 1 1
1.5751733296526809 ; 8 2 1

```

Figura 59 Contenido del archivo .bpn generado a partir del entrenamiento de la Red Neuronal –
Elaboración propia

Realizamos la exportación del archivo que contiene los Pesos (W) para ser enviados al entorno SGS, en este entorno se realiza la integración DCS – Gensym SGS, mediante el standard OPC (OLE Process Control), estando en una misma red se coloca la dirección de cada variable a la cual se va a tener lectura (valores de flujo, presión de agua y relave, porcentaje de sólidos) y de la misma forma nos permite escribir el valor hallado desde Gensym SGS hacia el DCS (Sistema de Control Distribuido) logrando una comunicación entre los servidores del DCS y el servidor de Gensym SGS; usando el servidor SGS podemos crear mediante bloques interactivos la Red Neuronal tal como se muestran en las Fig. 60 y Fig. 61:

- ✓ Entradas: Son las variables leídas desde el DCS (Sistema de Control Distribuido).
- ✓ Filtros: Luego de las entradas de cada variable antes ya determinadas se tiene un filtro donde se le indica al sistema los rangos de trabajo de cada variable, de no estar dentro de cada rango de trabajo, la red no indicará dato alguno.
- ✓ Delay: Los delay son determinados según su rating que se escogió anteriormente en el entrenamiento.
- ✓ Indicadores: Muestran el valor en línea.
- ✓ Multiplexado: Junta todas las entradas ya filtradas con su delay, si corresponde para enseriarlas y puedan ingresar al Backpropagation, como condición se debe guardar el mismo orden de las entradas en el cual fue entrenada la red.
- ✓ Backpropagation: en este bloque se carga el archivo con extensión .bpn donde se encuentra la estructura y los pesos de cada red neuronal.
- ✓ De multiplexado: en este caso como solo se tiene una variable de salida, se podrá mostrar el resultado de la red.
- ✓ Salida OPC: permite enviar el valor de las mallas hacia el DCS.

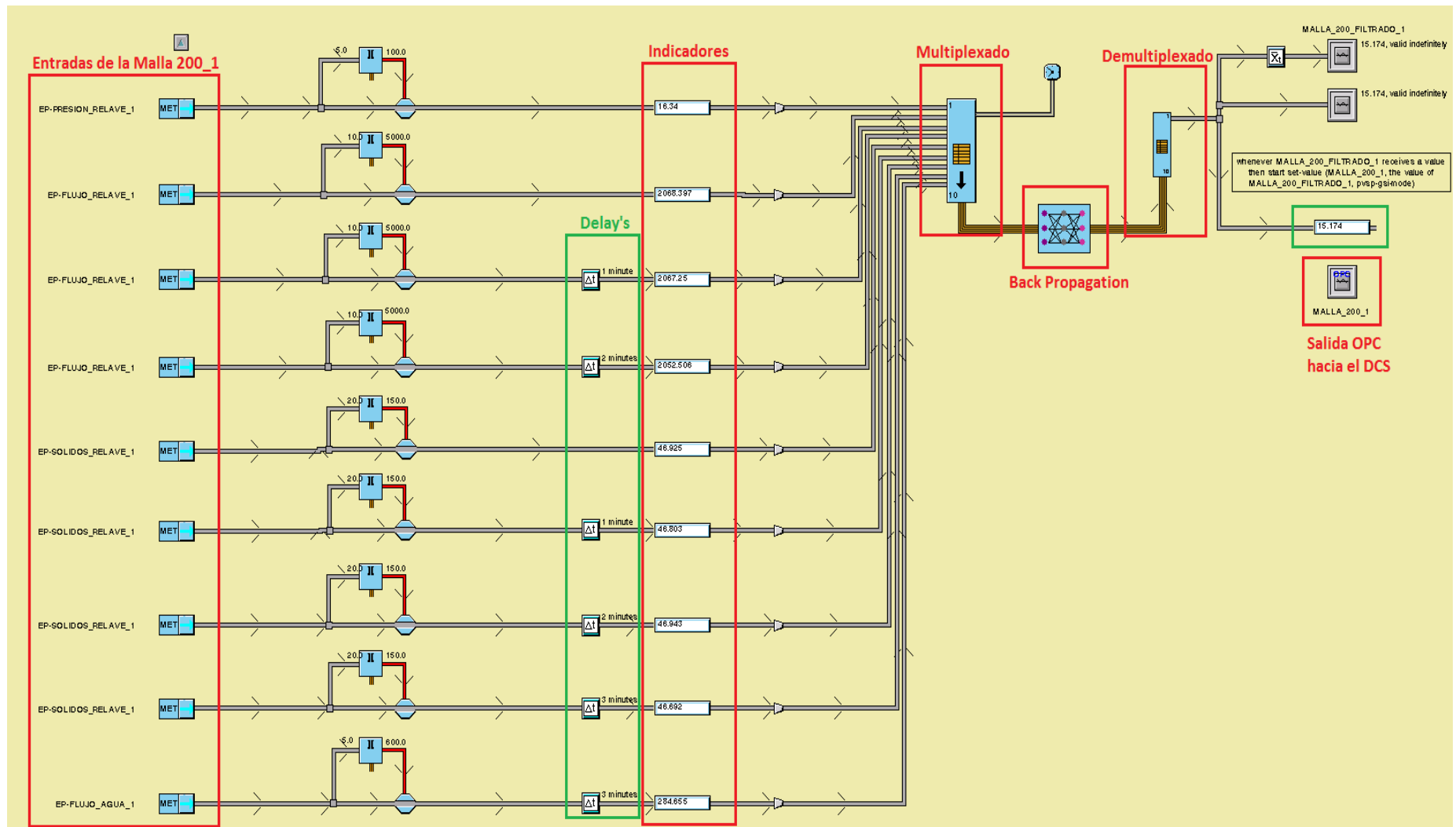


Figura 60 Modelo de Red Neuronal Malla 200_1, con los datos reales de entrada y salida – Elaboración propia

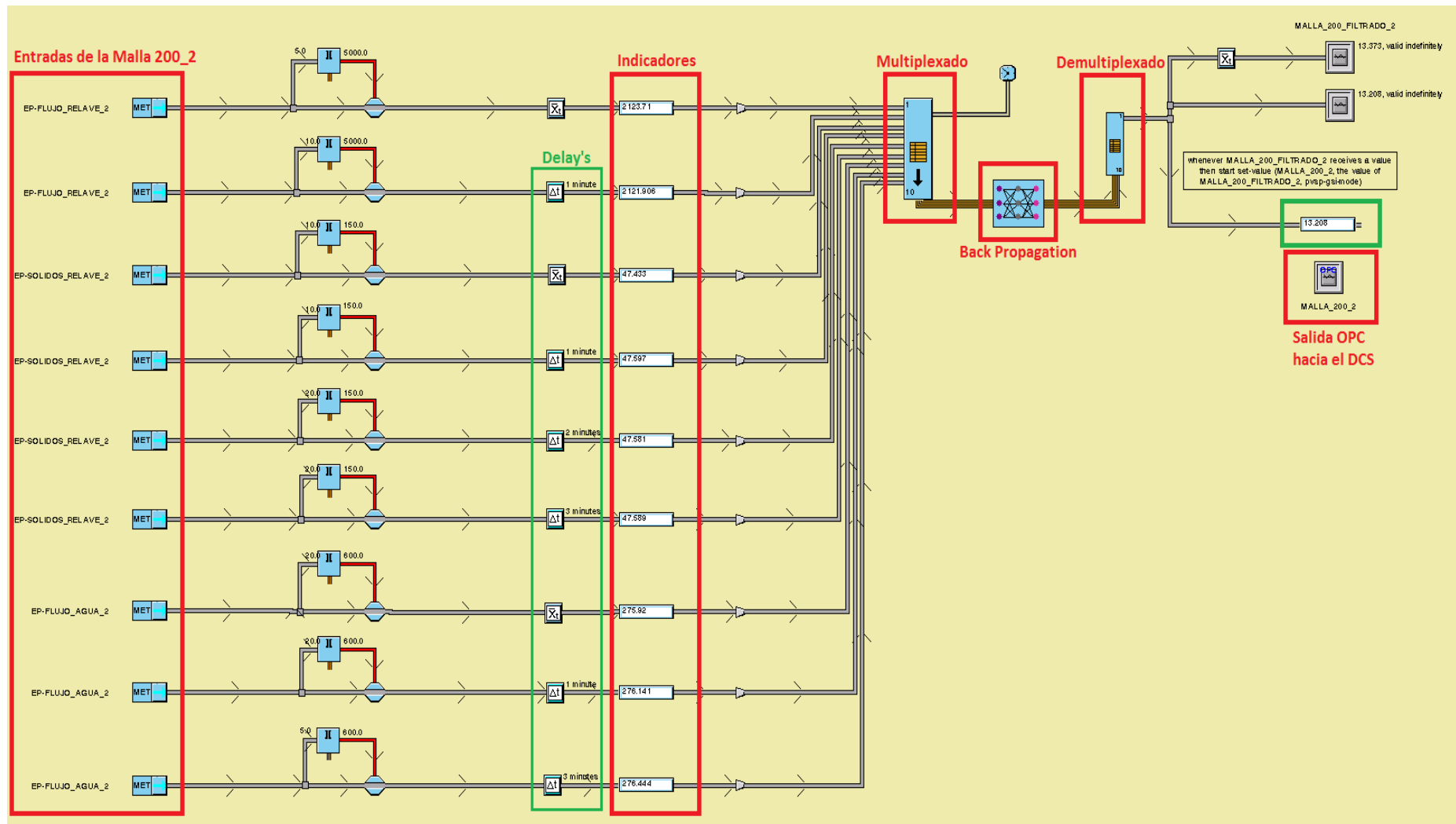


Figura 61 Modelo de Red Neuronal Malla 200_2, con los datos reales de entrada y salida – Elaboración propia

Para asegurar una buena transferencia de datos entre servidores, las variables creadas en el DCS deben ser del mismo tipo, en este caso, son de tipo “Real”, tanto para la lectura y escritura.

Para escribir y leer las variables desde SGS Gensym se crea para cada variable un bloque OPC, en este bloque colocamos el nombre de interface (nombre asignado a la comunicación entre ambos servidores) y el Ítem ID (ruta de la variable en el DCS), tal como muestran las Fig. 62 y Fig. 63 para cada malla.

MALLA_200_1, a mc-opc-float	
Notes	OK
Names	MALLA_200_1
Initial value	none
Last recorded value	15.147, valid indefinitely
Data server	GSI data server
GSI interface name	g2-qh
GSI variable status	0
Datapoint source	none
Source present	false
Target datapoints	sequence ()
Item id	"Root/Control Network/Quebrada_Honda/Applications/_2101DCS001/Diagrams/Calculos_Promedios:_2101_MALL200_1_SGS"
Access path	""

*Figura 62 Tabla de configuración de la variable para enviar el dato de la Malla 200_1 hacia el DCS –
Elaboración propia*

MALLA_200_2, a mc-opc-float	
Notes	OK
Names	MALLA_200_2
Initial value	none
Last recorded value	12.927, valid indefinitely
Data server	GSI data server
GSI interface name	g2-qh
GSI variable status	0
Datapoint source	none
Source present	false
Target datapoints	sequence ()
Item id	"Root/Control Network/Quebrada_Honda/Applications/_2101DCS001/Diagrams/Calculos_Promedios:_2101_MALL200_2_SGS"
Access path	""

*Figura 63 Tabla de configuración de la variable para enviar el dato de la Malla 200_2 hacia el DCS
– Elaboración propia*

Tal como se indica en las figuras anteriores, en el Ítem ID se expresa exactamente a que variable se está enviando el dato en el DCS, para el caso de la Malla 200_1 la variable es la _1701_MALL200_1_SGS y para el caso de la Malla 200_2 es _1701_MALL200_2_SGS Fig. 64 y Fig. 65.

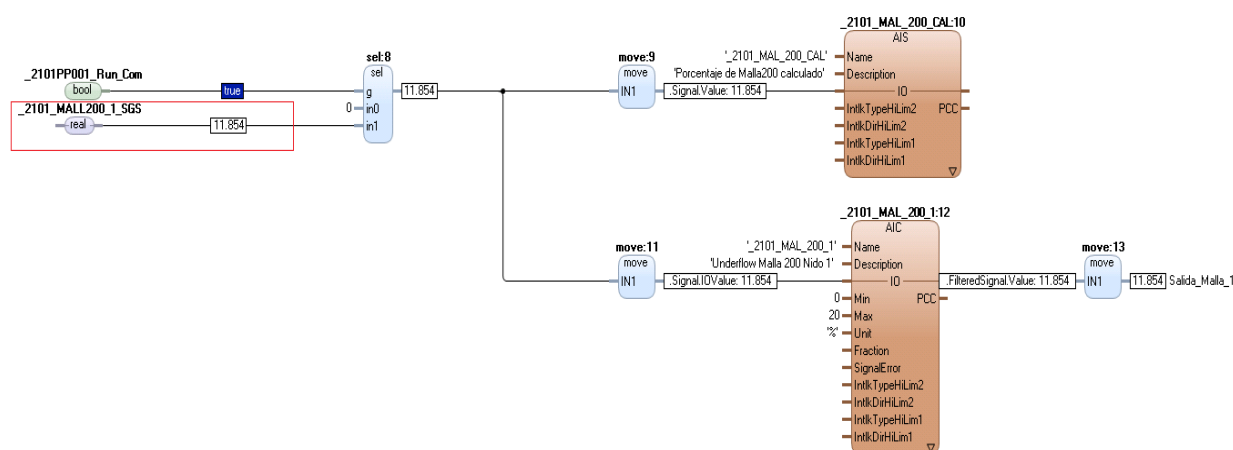


Figura 64 Bloque de funciones de la Malla 200_1 – Elaboración propia

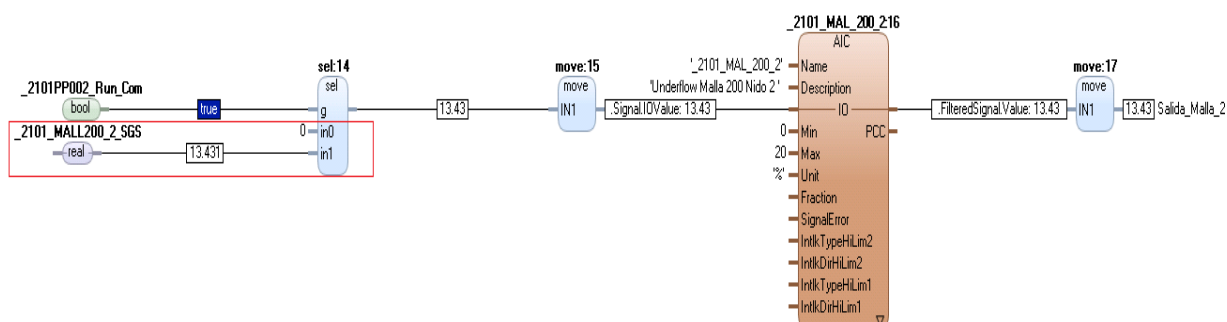


Figura 65 Bloque de funciones de la Malla 200_2 – Elaboración propia

Al ser una librería predefinida, automáticamente genera su respectivo faceplate para visualizarlo desde el SCADA Fig. 66.

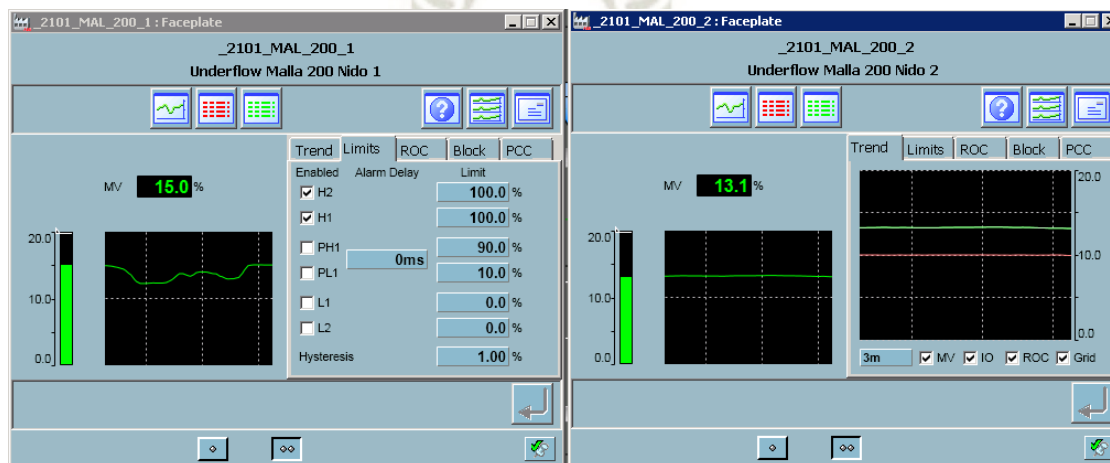


Figura 66 Faceplate de la Malla 200 1 y 2 - Elaboración propia

3.4. IMPLEMENTACIÓN DEL SISTEMA EXPERTO

Se realizó las consultas previas a los operadores de Control, para que indiquen los parámetros de trabajo de las bombas, el SPAN del porcentaje de sólidos, SPAN de la malla 200 y su operación de la planta. Tabla 9 y Tabla 10

Tabla 9 SPAN de variables – Elaboración propia

Trasmisor	Valor Bajo	Valor Alto
% Sólidos	60 %	75 %
% Malla	0 %	20 %
Nivel	3.5 m	4.5 m

Tabla 10 Límites de trabajo de las bombas en la operación – Elaboración propia

Bomba	RPM Bajo	RPM Alto
PP-001	1150	1550
PP-002	1150	1550
PP-003	1200	1450
PP-005	1200	1650

Para el caso de las entradas se debe considerar cual es el margen de error, teniendo en cuenta la ecuación 2.

$$\varepsilon = \text{Set Point}(t) - \text{Variable del proceso}(t)$$

Considerando los márgenes de error de cada variable, se obtiene la Tabla 11.

Tabla 11 Límites de error de variables – Elaboración propia

Variable	Error mínimo	Error máximo
% Sólidos	-14	14
% Malla	-7	7

Con la tabla anterior se considera utilizar cinco grados de membresía, en primera instancia les damos límites en una función constante Fig. 67 y Fig. 68.

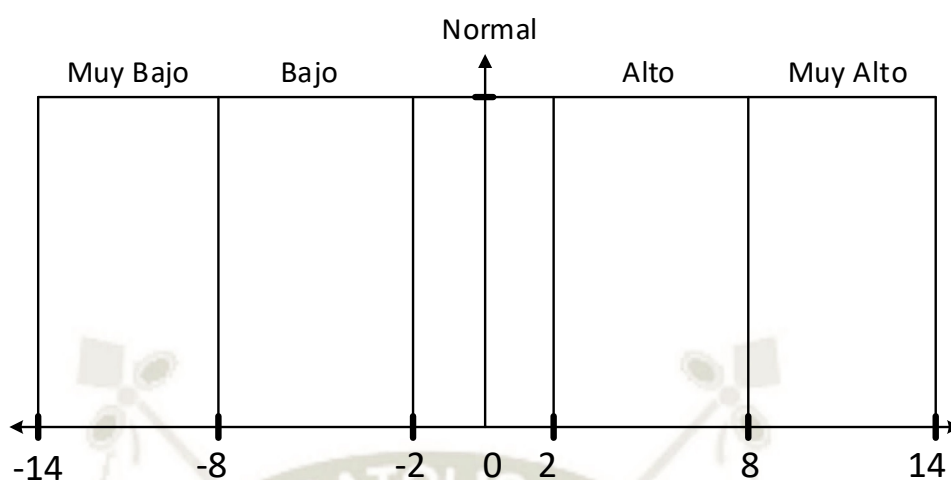


Figura 67 Clasificación de Error de Porcentaje de Sólidos – Elaboración propia

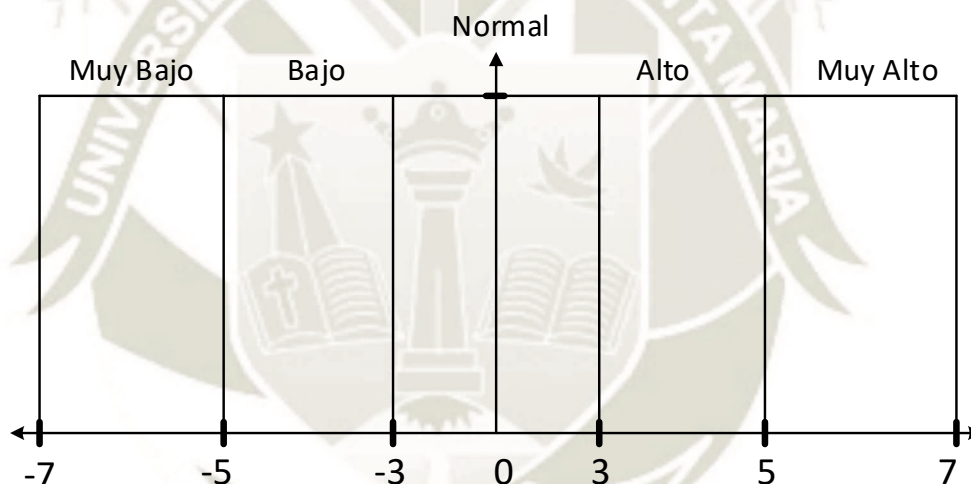


Figura 68 Clasificación de Error de Porcentaje de Malla – Elaboración propia

Teniendo la clasificación de ambas variables aplicamos las funciones triangulares y trapezoidales según corresponda a cada grado de membresía Fig. 69 y Fig. 70.

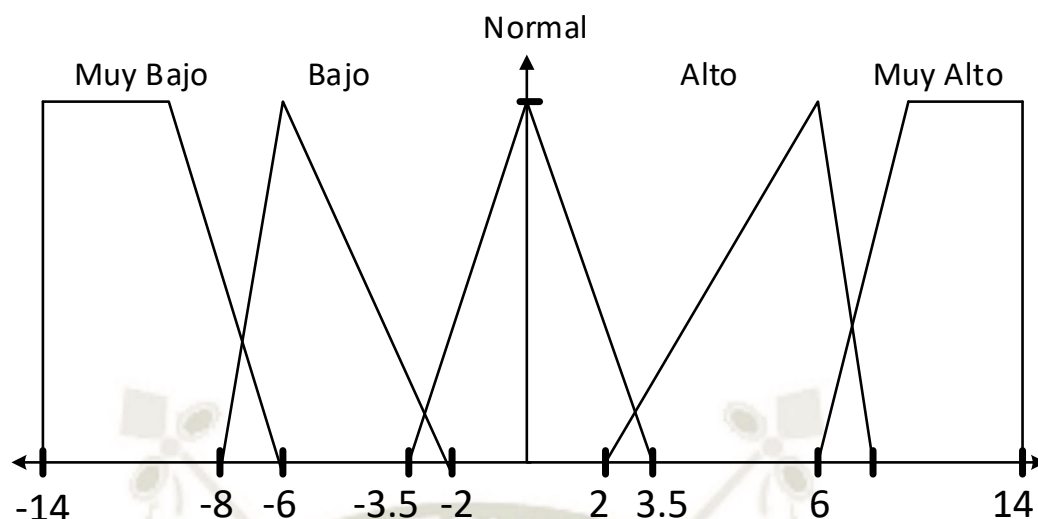


Figura 69 Grados de Membresía del Porcentaje de sólidos – Elaboración propia

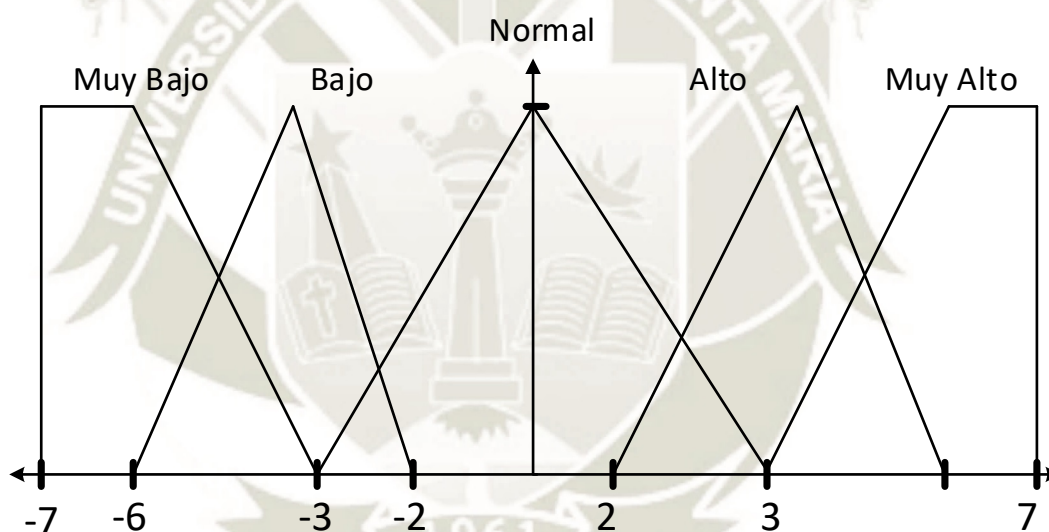


Figura 70 Grados de Membresía del Porcentaje de malla – Elaboración propia

Para el caso de las salidas, se ha determinado sus rangos de trabajo, estas varían según la operación, el sistema escala los límites altos, bajos y los adecua a los grados de membresía Fig. 71, Fig. 72 y Fig. 73.

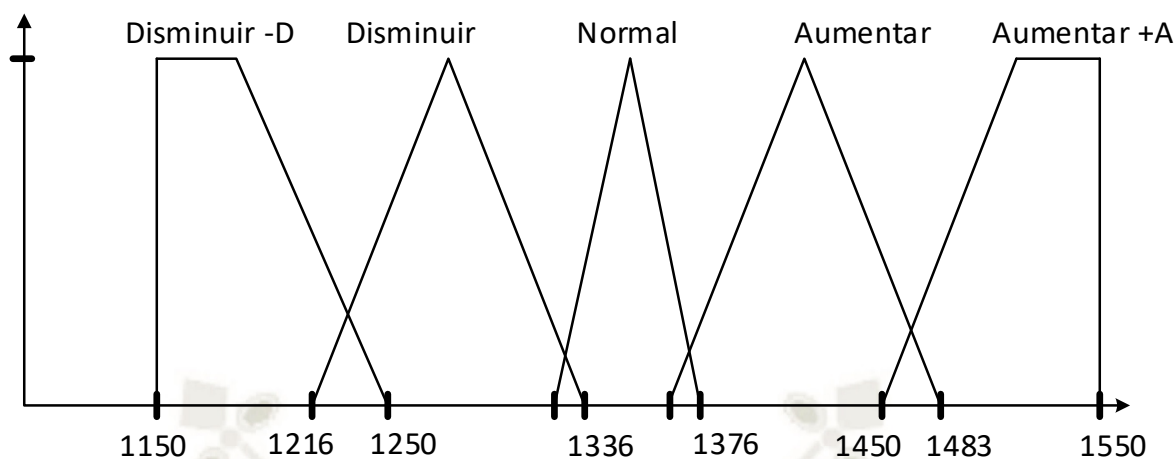


Figura 71 Grado de Membresía de la Bomba PP001 y PP002 – Elaboración propia

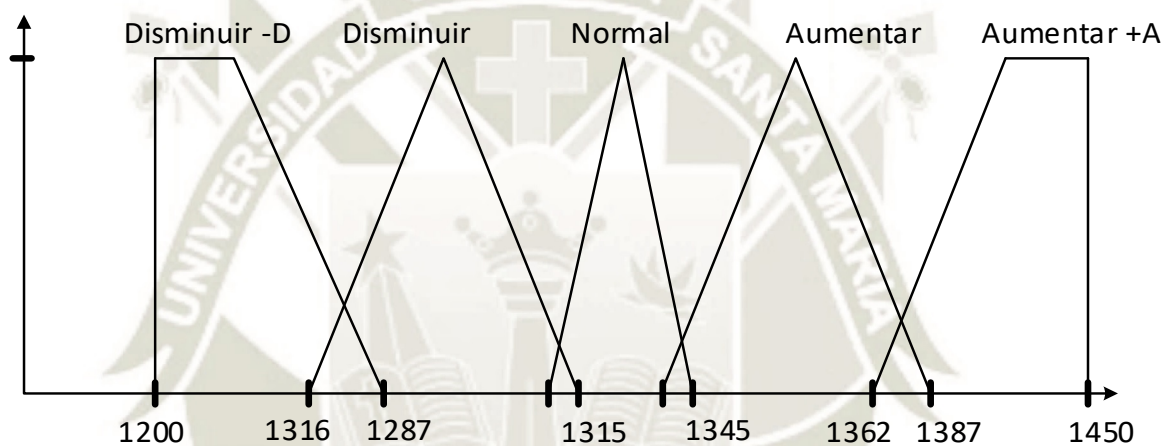


Figura 72 Grado de Membresía de la Bomba PP003 y Bomba PP004 – Elaboración propia

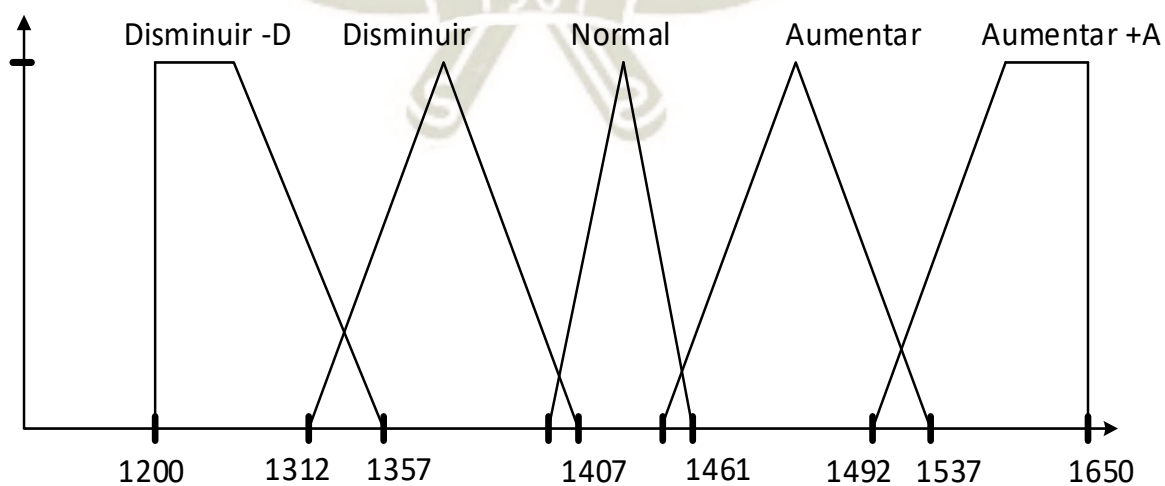


Figura 73 Grado de Membresía de la Bomba PP005 y Bomba PP004 – Elaboración propia

Teniendo definidos los grados de membresía de las variables de entrada y de salida se generó las condicionales y las reglas Tabla 12 y Tabla 13.

Tabla 12 Reglas difusas del Sistema Experto Línea 1 y Línea 2 – Elaboración propia

		MALLA 200				
		MUY BAJO	BAJO	NORMAL	ALTO	MUY ALTO
SÓLIDOS	MUY BAJO	DD/AA	D/AA	D/A	D/A	D/N
	BAJO	D/AA	D/AA	N/A	N/N	N/A
	NORMAL	D/A	D/A	N/N	N/N	A/D
	ALTO	A/N	A/A	N/D	A/D	A/D
	MUY ALTO	A/A	A/A	A/D	A/DD	AA/DD
		PP001/PP003 PP002/PP005 /PP004				
		Relave/Agua				

Tabla 13 Reglas Difusas Control de Nivel – Elaboración propia

NIVEL DEL CAJÓN DE RELAVE 1121	Bomba
Muy Alto	AA
Normal	N
Muy Bajo	DD
	PP001 PP002 Relave

Donde:

Disminuir -D = DD

Disminuir = D

Normal = N

Aumentar = A

Aumentar +A= AA

Se puede generar todo el conjunto de reglas e interpretarlo de la siguiente manera:

Si el Error de Sólidos es MUY ALTO y el Error de Malla es MUY ALTO entonces la Bomba la PP001 va a DISMINUIR -D y la Bomba PP003 va a AUMENTAR +A.

3.4.1. Simulación del Sistema Experto:

Para analizar el control a implementar, se puede realizar simulaciones de la parte difusa utilizando Matlab. Para ingresar a la ventana de FIS Editor, escribimos en la Ventana de Comando la palabra “fuzzy”. Aparecerá el entorno FIS Editor el cual permite adicionar el número de entradas y salidas deseadas y aplicarles los métodos de fusificación y defuzzificación a cada variable según corresponda.

En este caso generamos dos entradas y dos salidas Fig. 74.

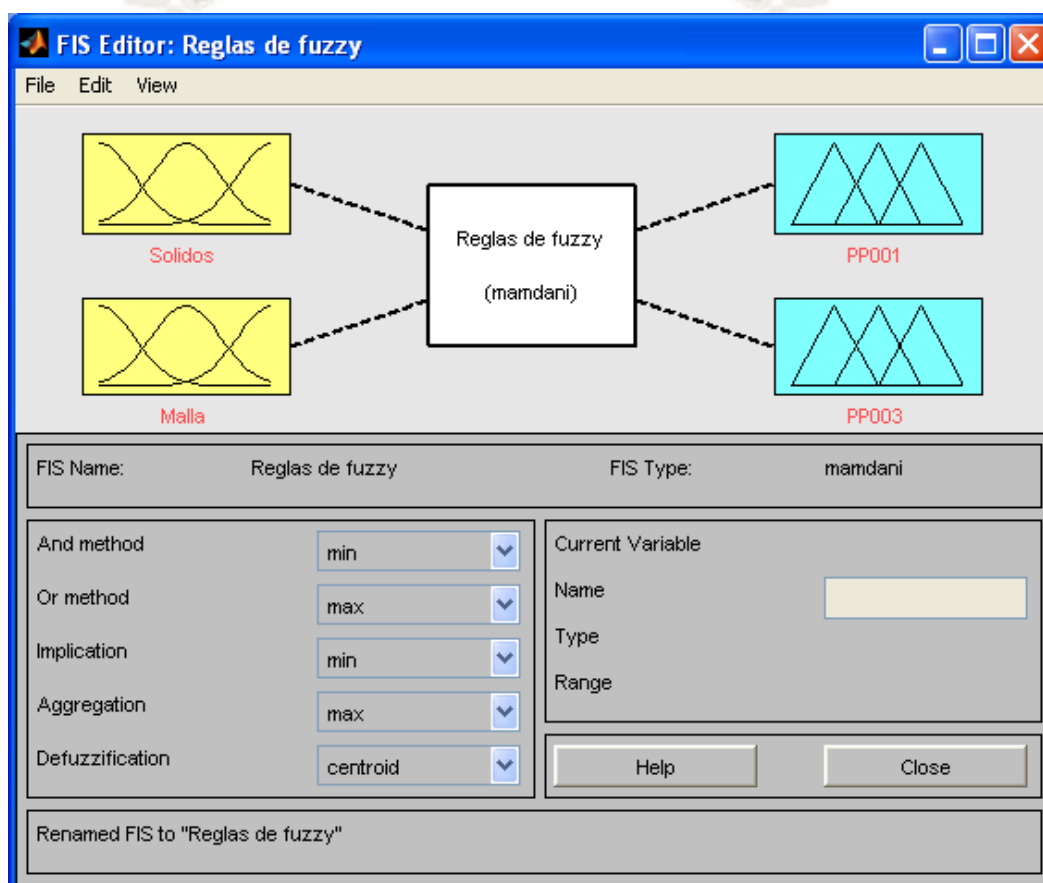


Figura 74 Entradas y Salidas Fuzzy – Elaboración propia

Al ingresar al Controlador (Reglas Fuzzy) nos aparecerá una ventana para poder ingresar todas las reglas Fig. 75 según se diseñó en la Tabla 12.

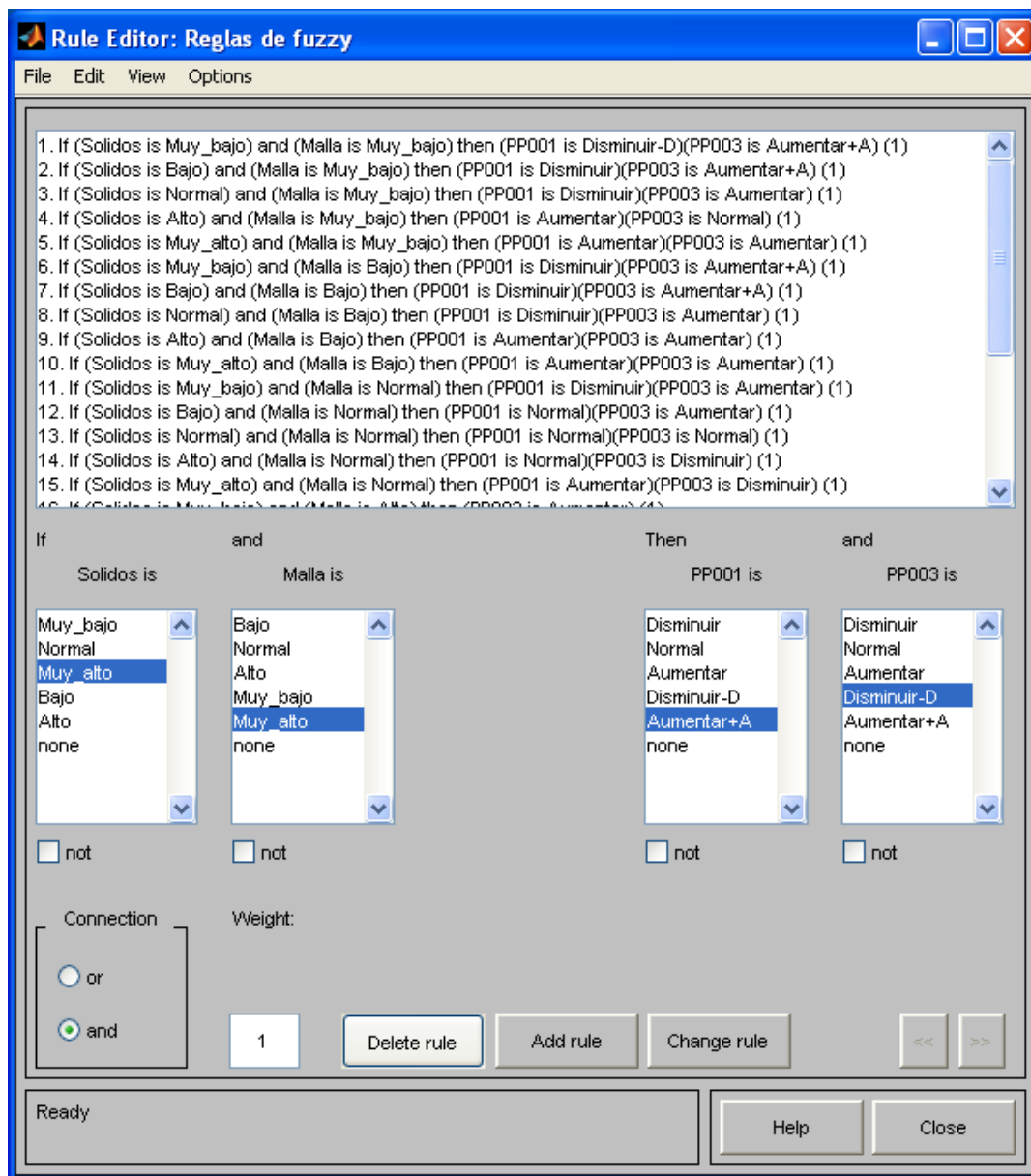


Figura 75 Conjunto de reglas difusas en Matlab – Elaboración propia

Luego de generar todas las reglas; Matlab permite obtener y analizar el comportamiento de las entradas hacia las salidas. En la Fig. 76 y Fig. 77 podemos observar una gráfica de tres variables en función de la salida, tanto para el caso de la bomba de relave y de agua según corresponda, para poder interpretarla definimos gráficamente un valor de error tanto del porcentaje de malla y del porcentaje de sólidos, al hallar la coordenada de convergencia de ambas variables de entrada nos dirigimos hacia la coordenada de salida para determinar gráficamente el valor que tendría dicha salida en RPM.

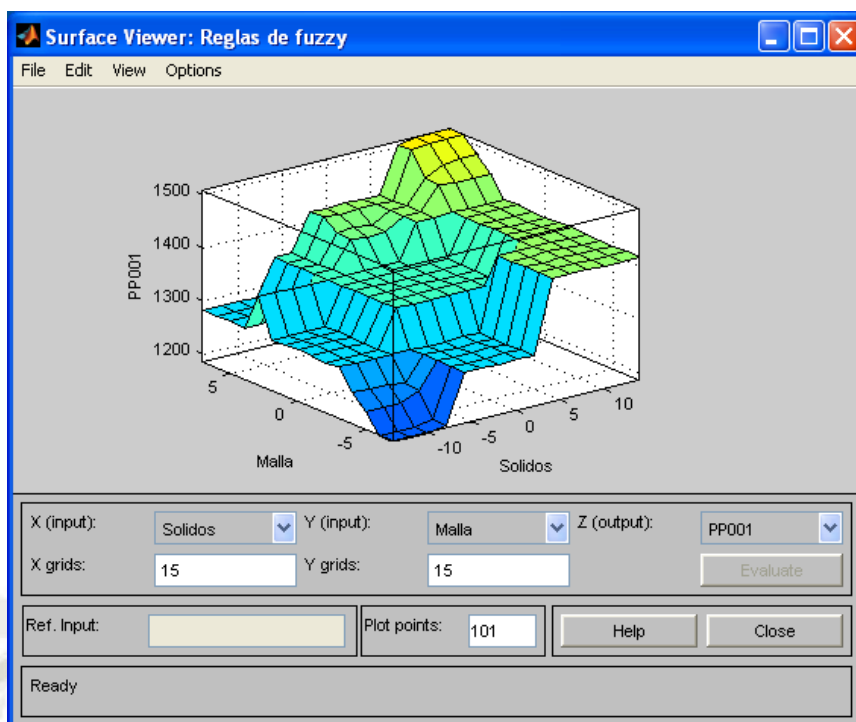


Figura 76 Comportamiento de la PP001 en función a los Sólidos y Malla – Elaboración propia

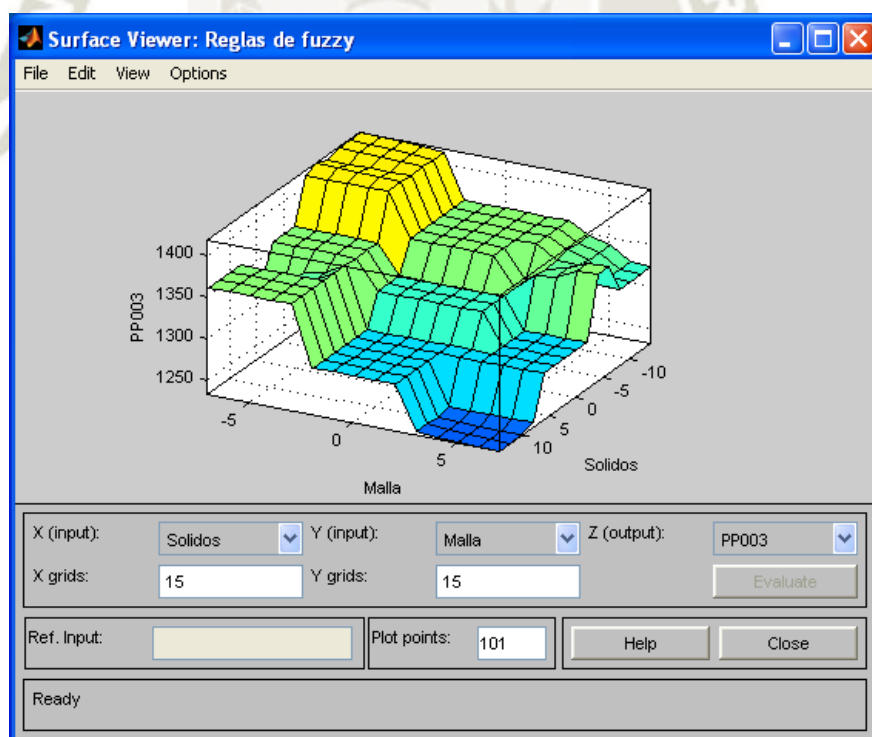


Figura 77 Comportamiento de la PP003 en función de los Sólidos y Malla – Elaboración propia

El poder realizar las simulaciones correspondientes antes de la implementación permite observar y analizar cómo el sistema experto se va a comportar al momento de integrarlo en

el sistema real, tener una idea de cómo es que se quiere plasmar el control y si se requiere, corregir antes de ponerlo a punto.

3.4.2. Adaptación de la librería Fuzzy System800xA:

La librería Fuzzy del DCS Sysmte800xA viene por standard para trabajar con una entrada y una salida (SISO). Fig. 78, se debe modificar la librería para adecuar a las necesidades de control.

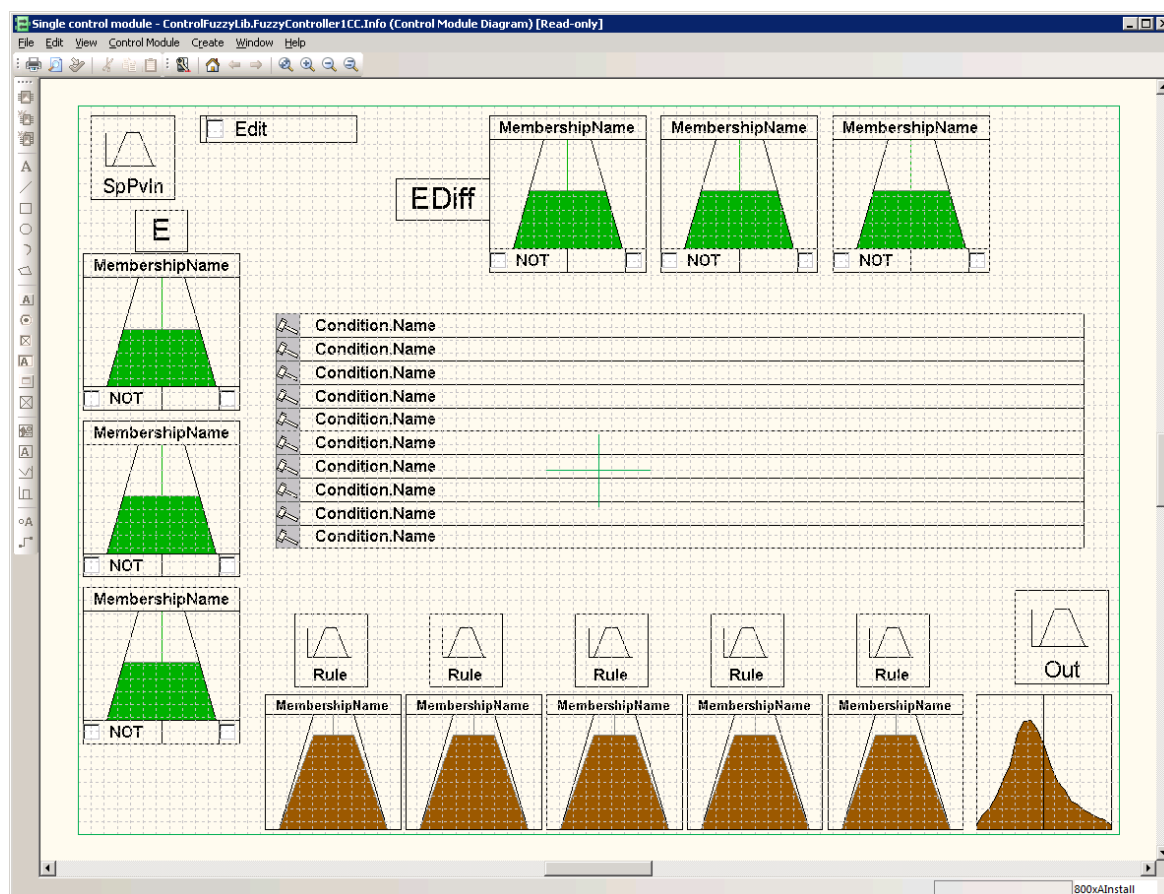


Figura 78 Librería Fuzzy por Defecto – Elaboración propia

Para realizar la modificación de la librería se requiere hacerlo por Control Module Diagram Editor (CMD Editor), el cual es el editor gráfico de los módulos de Control (Editor de parámetros y editor de códigos). Que permite modificar y añadir las entradas y salidas que se requiere, así gráficamente se coloca las variables de entrada y salida con sus correspondientes grados de membresía; para las variables de Sólidos, Malla, bombas de agua y relave se consideran 5 grados de membresía y 3 grados de membresía para el control de nivel del cajón 1701-CA-001 siendo una adición de reglas difusas directas las cuales generaran un impacto en las bombas de relave de acuerdo al nivel que se requiera en el *Cajón de Relave*. Fig. 79.

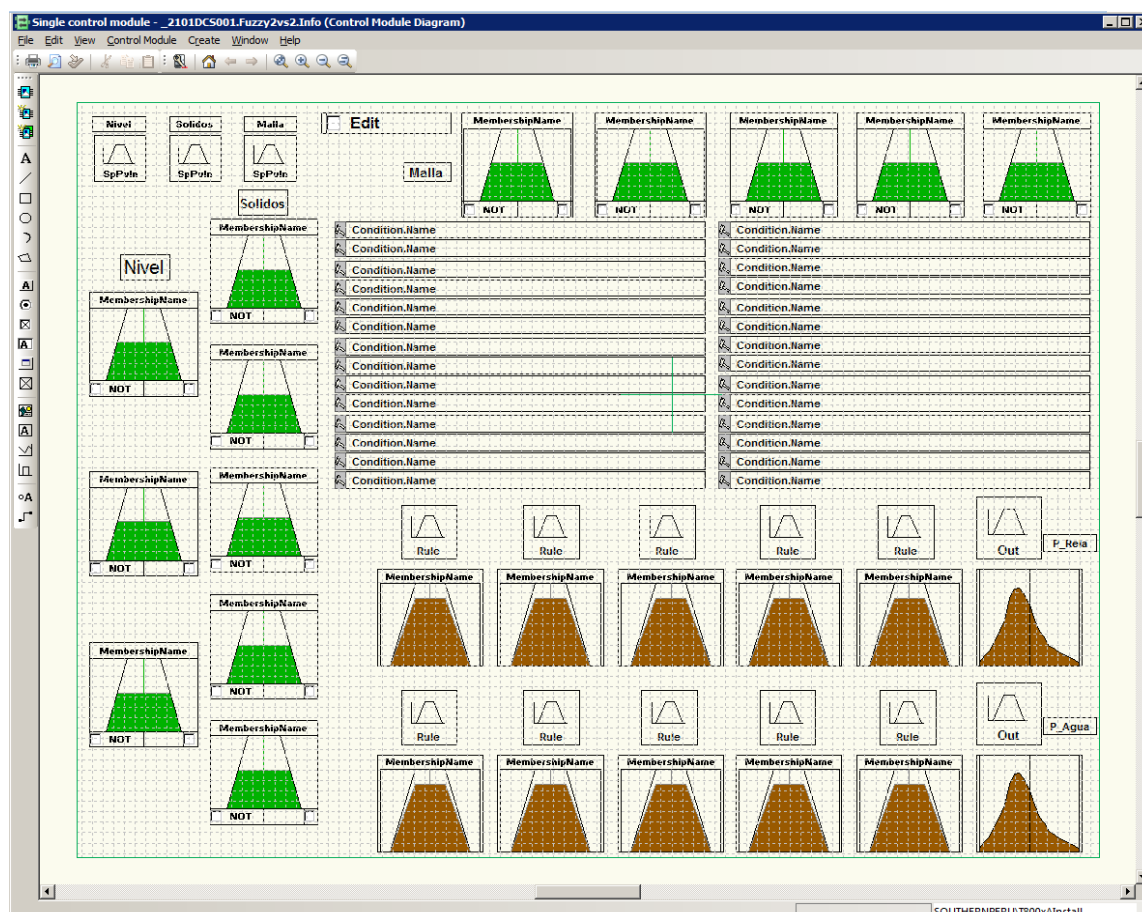


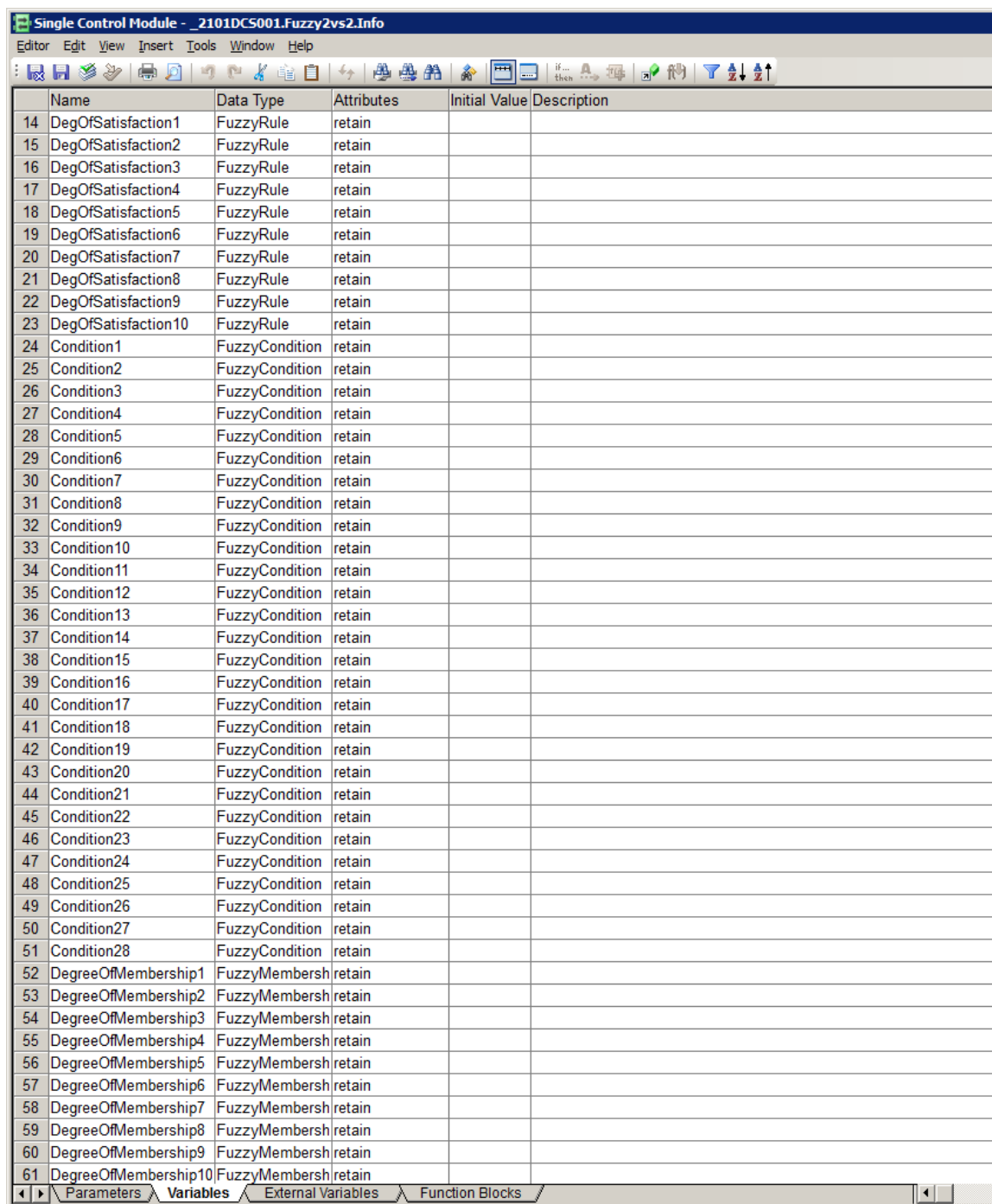
Figura 79 Librería Fuzzy modificada para un Control de tres entradas dos salidas –
Elaboración propia

Se crearon los parámetros de todo el sistema de cada línea los cuales son las entradas y salidas hacia otros bloques de programación o alguna otra lógica adicional que no están dentro del bloque de lógica difusa. Fig. 80.

Control Module Type - _2101DCS001.Fuzzy2vs2						
Editor Edit View Insert Tools Window Help						
	Name	Data Type	Direction	FD Port	Initial Value	Description
2	Description	string[40]	in	no	'FuzzyCont'	IN Description in control window
3	IconName	string[10]	in	no	'Fuzzy'	IN Name presented in controller icon
4	Sp	ControlConnect	in	yes	Default	IN NODE <=>Setpoint value
5	Pv	ControlConnect	in	yes		IN NODE <=>Process value
6	Out	ControlConnect	out	yes		OUT NODE <=>Out signal
7	Track	bool	in	no	false	IN Tracking
8	TrackValue	real	in	no	0.0	IN Track value
9	FeedForward	ControlConnect	in	yes	Default	IN NODE <=>Feedforward signal
10	LevelPar	Level6Connection	in	no	Default	IN Alarm presentation
11	Pv2	ControlConnect	in	yes		IN NODE <=>Process value
12	Sp2	ControlConnect	in	yes	Default	IN NODE <=>Setpoint value
13	Out2	ControlConnect	out	yes		OUT NODE <=>Out signal
14	Track2	bool	in	no	false	IN Tracking
15	TrackValue2	real	in	no	0.0	IN Track value
16	Pv3	ControlConnect	in	yes		IN NODE <=>Process value
17	Sp3	ControlConnect	in	yes	Default	IN NODE <=>Setpoint value
18						
Parameters Variables External Variables Function Blocks						

Figura 80 Parámetros de entrada y salida del sistema - Elaboración propia

De la misma manera se crean las variables, las cuales son datos internos del bloque fuzzy, que permiten la interacción de los bloques fuzzy: las entradas fuzzyficarlas y enviarlas hacia las condicionales, generar las reglas que daran un determinada salida y luego desfuzzyficarlas para enviar el dato hacia el control de bomba. Fig. 81.



Name	Data Type	Attributes	Initial Value	Description
14 DegOfSatisfaction1	FuzzyRule	retain		
15 DegOfSatisfaction2	FuzzyRule	retain		
16 DegOfSatisfaction3	FuzzyRule	retain		
17 DegOfSatisfaction4	FuzzyRule	retain		
18 DegOfSatisfaction5	FuzzyRule	retain		
19 DegOfSatisfaction6	FuzzyRule	retain		
20 DegOfSatisfaction7	FuzzyRule	retain		
21 DegOfSatisfaction8	FuzzyRule	retain		
22 DegOfSatisfaction9	FuzzyRule	retain		
23 DegOfSatisfaction10	FuzzyRule	retain		
24 Condition1	FuzzyCondition	retain		
25 Condition2	FuzzyCondition	retain		
26 Condition3	FuzzyCondition	retain		
27 Condition4	FuzzyCondition	retain		
28 Condition5	FuzzyCondition	retain		
29 Condition6	FuzzyCondition	retain		
30 Condition7	FuzzyCondition	retain		
31 Condition8	FuzzyCondition	retain		
32 Condition9	FuzzyCondition	retain		
33 Condition10	FuzzyCondition	retain		
34 Condition11	FuzzyCondition	retain		
35 Condition12	FuzzyCondition	retain		
36 Condition13	FuzzyCondition	retain		
37 Condition14	FuzzyCondition	retain		
38 Condition15	FuzzyCondition	retain		
39 Condition16	FuzzyCondition	retain		
40 Condition17	FuzzyCondition	retain		
41 Condition18	FuzzyCondition	retain		
42 Condition19	FuzzyCondition	retain		
43 Condition20	FuzzyCondition	retain		
44 Condition21	FuzzyCondition	retain		
45 Condition22	FuzzyCondition	retain		
46 Condition23	FuzzyCondition	retain		
47 Condition24	FuzzyCondition	retain		
48 Condition25	FuzzyCondition	retain		
49 Condition26	FuzzyCondition	retain		
50 Condition27	FuzzyCondition	retain		
51 Condition28	FuzzyCondition	retain		
52 DegreeOfMembership1	FuzzyMembersh	retain		
53 DegreeOfMembership2	FuzzyMembersh	retain		
54 DegreeOfMembership3	FuzzyMembersh	retain		
55 DegreeOfMembership4	FuzzyMembersh	retain		
56 DegreeOfMembership5	FuzzyMembersh	retain		
57 DegreeOfMembership6	FuzzyMembersh	retain		
58 DegreeOfMembership7	FuzzyMembersh	retain		
59 DegreeOfMembership8	FuzzyMembersh	retain		
60 DegreeOfMembership9	FuzzyMembersh	retain		
61 DegreeOfMembership10	FuzzyMembersh	retain		

Figura 81 Variables internas del sistema – Elaboración propia

Luego de tener todos los grados de membresía de cada entrada y salida, de tener todas las condicionales y reglas, procedemos a descargar al procesador.

3.4.3. Sistema Experto System800xA

Teniendo la librería modificada procedemos a conectar los datos de entrada (nivel del tanque, porcentaje de sólidos que se tiene en el sistema, porcentaje de malla que es escrito por la red neuronal Fig. 64, Fig. 65) y salidas (correspondientes a las bombas de cada línea independiente).

En el caso de las salidas se creó variables de tipo “Real” de acuerdo al tipo de datos que se está utilizando, las cuales son enviadas a los diagramas correspondientes donde se encuentran los bloques de funciones de cada bomba, este valor sería la velocidad en RPM a la cual escribirá físicamente al variador Fig. 83.

Luego de programar los bloques de funciones realizamos la descarga al procesador y lo dejamos en línea para poder ingresar al modo edición del bloque y así colocar los parámetros de entrada Fig. 82.

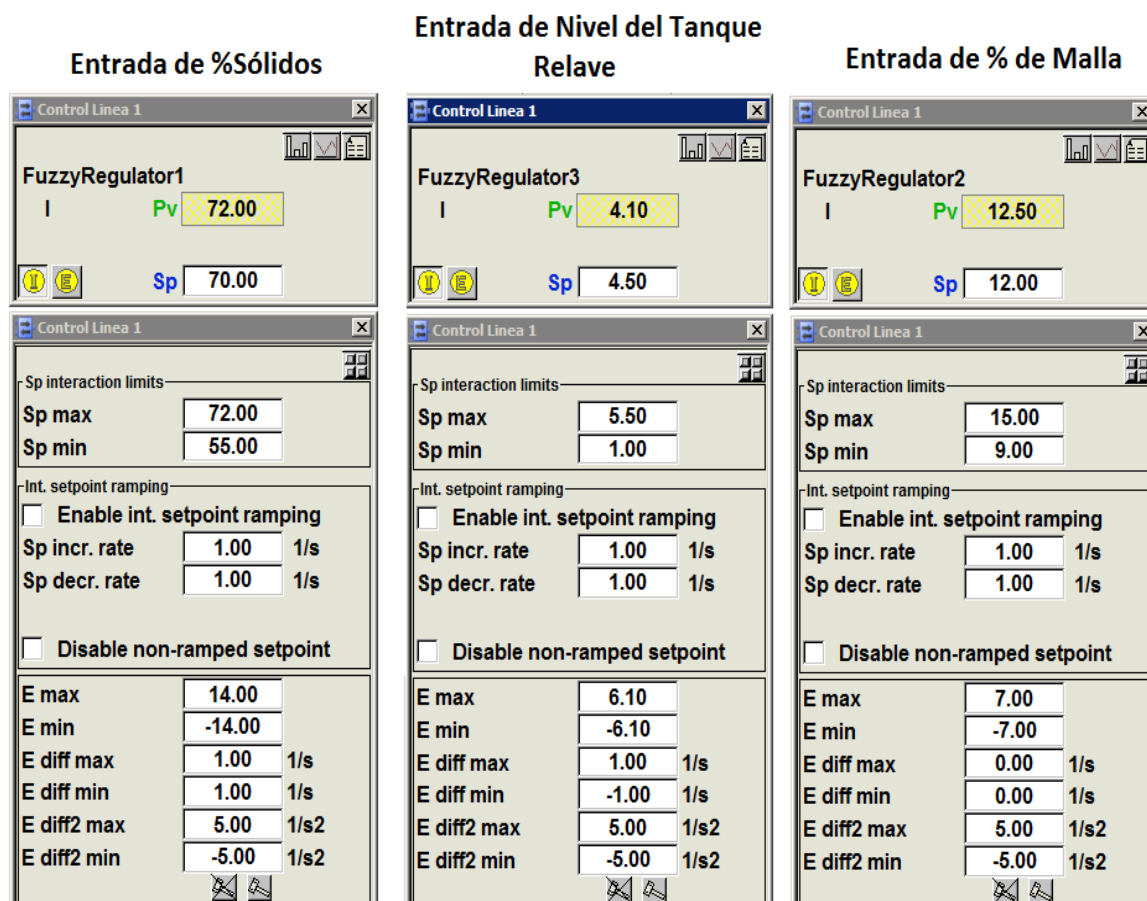


Figura 82 Parámetros de entrada de las Líneas 1 y 2 - Elaboración propia

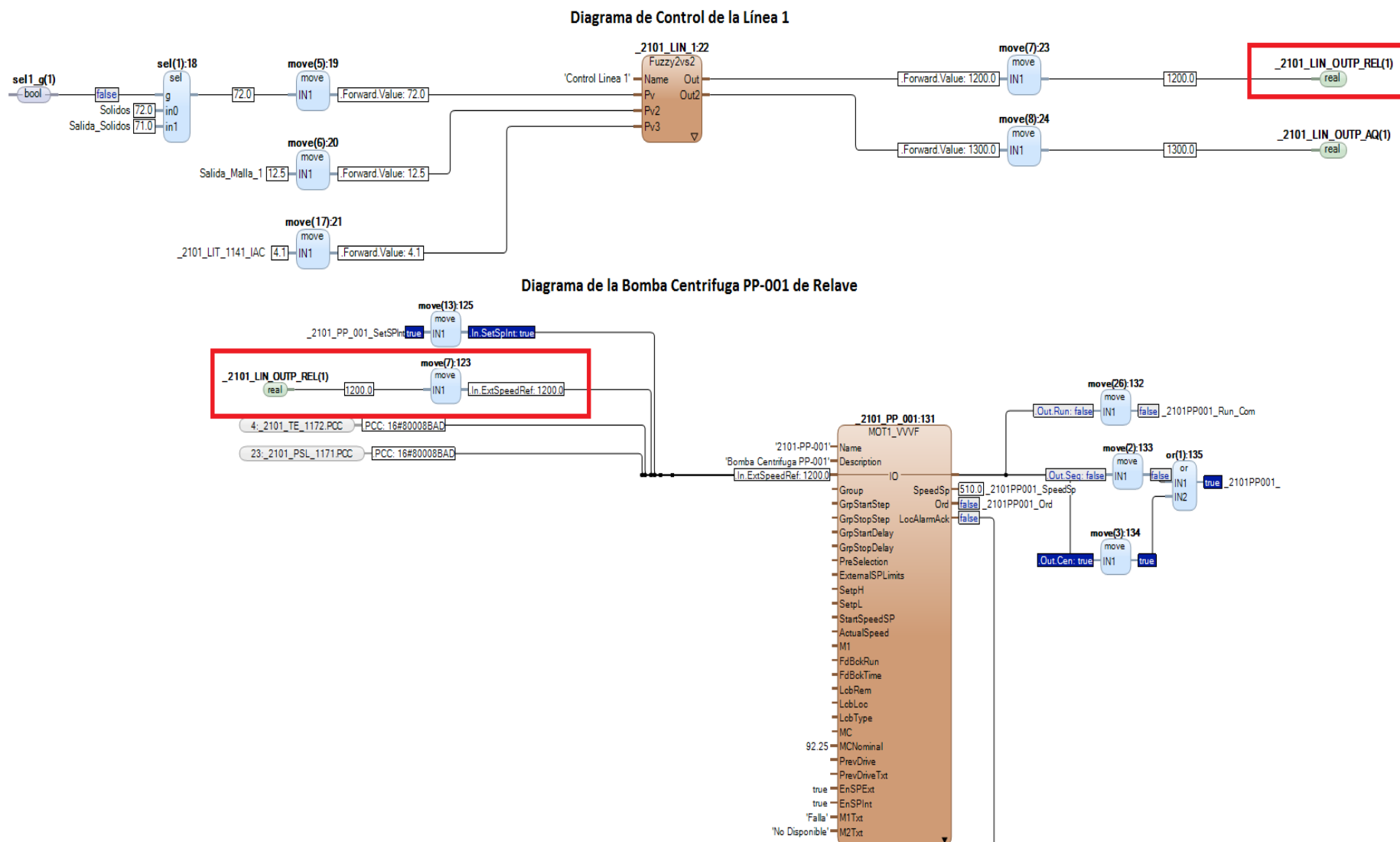


Figura 83 Bloque de funciones de la Línea 1 y envío de salida para el control de la bomba PP-001 - Elaboración propia

Ya configurada las entradas respectivas; se procede a configurar los rangos de cada grado de membresía de las entradas y salidas de acuerdo a la Fig. 71, Fig. 72 y Fig. 73 como muestra Fig. 84.

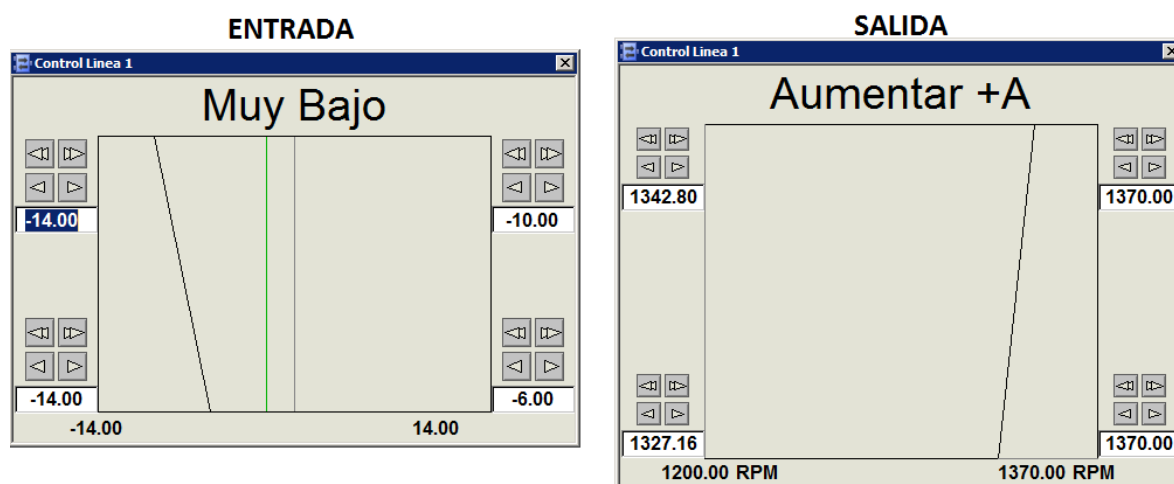


Figura 84 Configuración de los grados de Membresía de las entradas y salidas -
Elaboración propia

Se colocan las condicionales en este caso según la tabla 12 y tabla 13, en la tabla 12 se tiene las combinaciones de los grados de membresía del sólido y de la malla.

Y en la tabla 13 solo se tiene los grados de membresía del Nivel Fig. 85.

Muy Bajo AND Muy Bajo		Normal AND Muy Alto	
Muy Bajo AND Bajo		Alto AND Muy Bajo	
Muy Bajo AND Normal		Alto AND Bajo	
Muy Bajo AND Alto		Alto AND Normal	
Muy Bajo AND Muy Alto		Alto AND Alto	
Bajo AND Muy Bajo		Alto AND Muy Alto	Tabla 13
Bajo AND Bajo	Tabla 13	Muy Alto AND Muy Bajo	
Bajo AND Normal		Muy Alto AND Bajo	
Bajo AND Alto		Muy Alto AND Normal	
Bajo AND Muy Alto		Muy Alto AND Alto	
Normal AND Muy Bajo		Muy Alto AND Muy Alto	
Normal AND Bajo		Bajo Level	
Normal AND Normal		Normal Level	Tabla 14
Normal AND Alto		Alto Level	

Figura 85 Condicionales del Sistema – Elaboración propia

Según las condicionales generamos las reglas en función de cada Grado de membresía de las salidas, las cuales son el producto de la tabla 12 y tabla 13, Fig. 86.

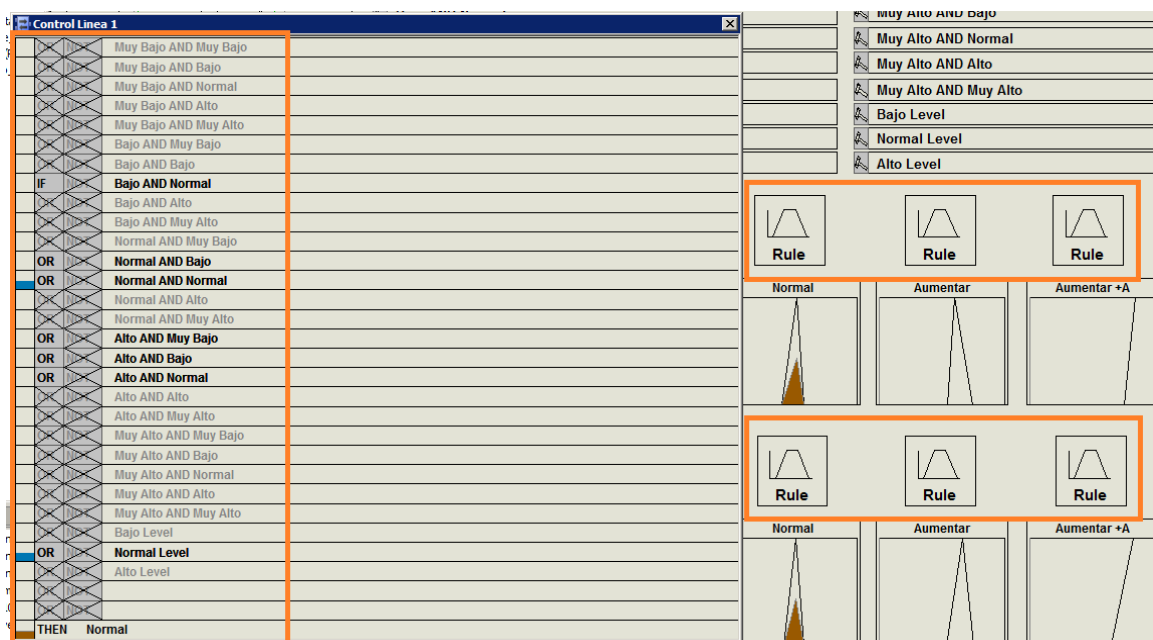


Figura 86 Reglas del sistema, cada grado de membresía tiene su Regla - Elaboración propia

Luego de tener todo el sistema ya completado con las condicionales, reglas respectivas y acondicionamiento de las entradas y salidas Fig. 87.

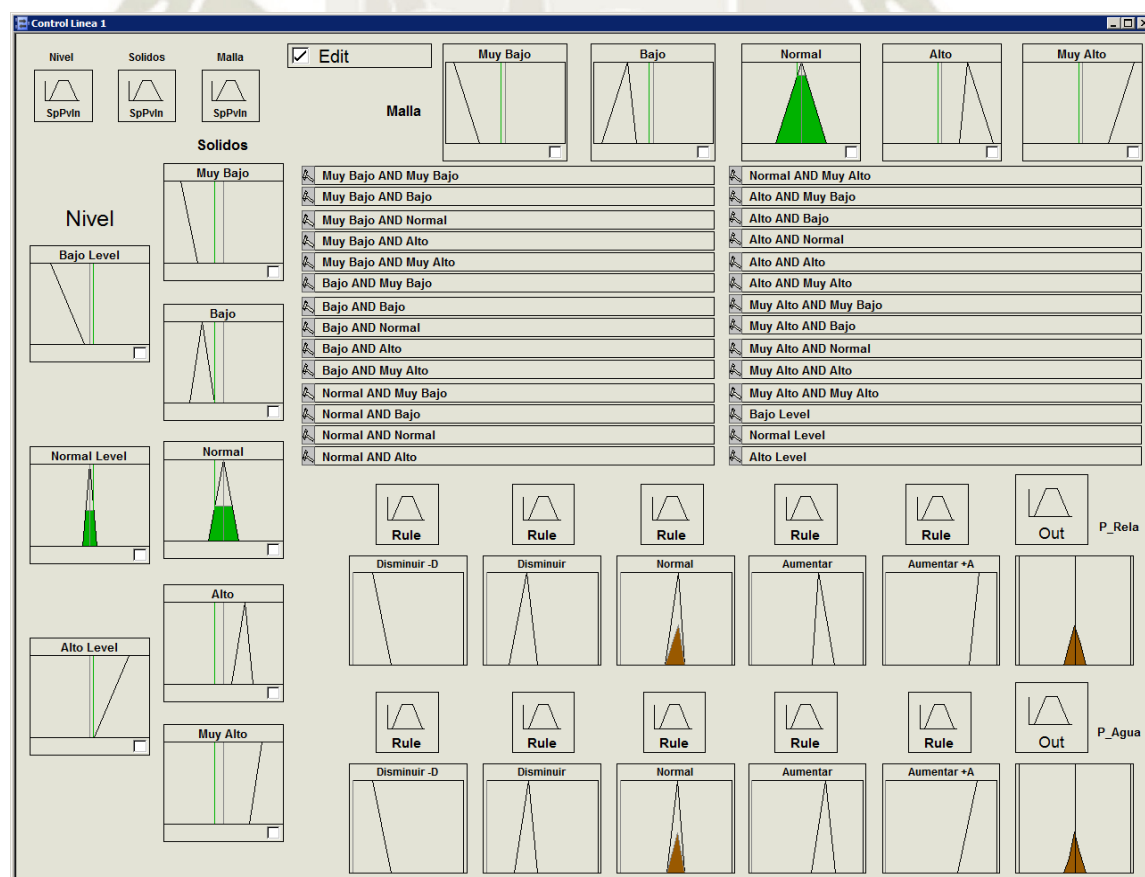


Figura 87 Sistema en General para ambas líneas - Elaboración propia

Procedemos a elaborar el Faceplate, el cual es un pop-up del SCADA que permite realizar las modificaciones respectivas: colocar en funcionamiento el Sistema Experto o retirarlo de acuerdo a requerimiento de la operación, cambiar los límites de las salidas y Set Point de las entradas y ver las tendencias y comportamiento de ambas líneas Fig. 88.

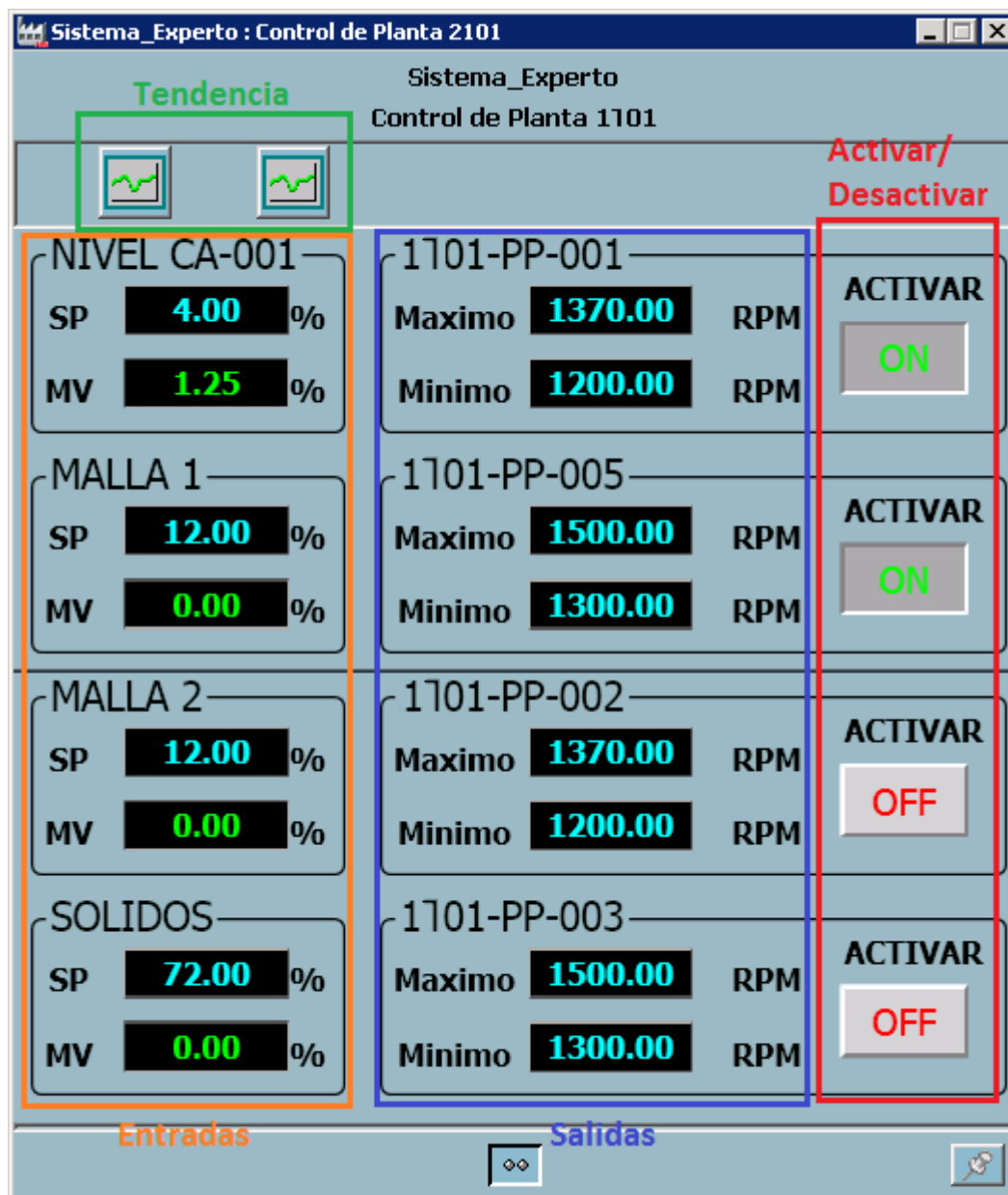


Figura 88 Faceplate del Sistema Experto para ambas líneas - Elaboración propia



CAPITULO IV RESULTADOS

CAPITULO IV

RESULTADOS

Luego de realizar la implementación del Sistema Experto; como único requisito para que entre en funcionamiento es que las líneas de producción ya estén operando, sea una sola o ambas líneas de producción de arenas; en este punto es importante resaltar que los valores de flujo, presión y sólidos estén dentro de los rangos operativos normales (72% de sólidos, 16 PSI en los nidos de ciclones, 280 m³/h de flujo de agua) son valores promedios y normalizados; seguidamente se podrá optar por colocar en funcionamiento o no el Sistema de Control Avanzado de acuerdo al criterio del operador.

1. Para evaluar que tan estable es el sistema experto, podemos observar en las Fig. 93 y Fig. 94 donde se tiene las tendencias en un mismo periodo de tiempo con la línea 1 desactivada y la línea 2 activada. Se puede concluir que el sistema actúa tratando de controlar las variables de proceso dentro de los límites de las velocidades de las bombas permitidos y establecidos por el operador, también al considerar las condicionales se puede observar que el sistema trata de mantener las variables del proceso dentro de los set point establecidos, se ha podido notar que en un sistema de este tipo, multivariable, hay momentos en los que alguna de las variables de proceso aumentan o disminuyen en gran medida el error respecto a los set point, sin embargo, en estos casos no se ha llegado a desestabilizar todo el sistema por tratar de disminuir dicho error, lo que el sistema ha realizado es variar poco a poco hasta retornar a sus valores más estable cercanos a los set point consignados y con el menor error posible; si por control la bomba requiere **aumentar** la velocidad pero el nivel está llegando al límite bajo, la bomba consideraría sólo **aumentar** en tal caso si esta condición con el nivel persiste la bomba consideraría **disminuir**, así se genera un balance entre todas las variables de control.
2. Para evaluar que tan preciso son las dos redes neuronales implementadas, tanto para la línea 1 como línea 2 de producción de arenas, se realizó una comparativa de los valores obtenidos por laboratorio y el valor promedio de las redes neuronales de toma de muestras durante el día y la noche. Para poder verificar que tan confiable es una red neuronal se calcula el error cuadrático medio, el cual mide la cantidad de error que hay entre dos conjuntos de datos, comparando el valor predicho y el valor real, se debe tener en cuenta la siguiente ecuación.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ([Valores reales] - [Valores Predichos])^2}{n}}$$

Ecuación 14 Error cuadrático medio – Fuente (Gensym, 2007)

Donde:

n = a la cantidad de datos que tiene la comparación

RMSE = Error cuadrático medio

Obteniendo un Error Cuadrático de 1.19 en la malla 1 y 0.87 en la malla 2 ver Anexo 5. Se debe considerar que al ser muestreos puntuales el error puede ser mucho mayor debido a que no se tiene la hora exacta de la toma de muestra; por parte de las redes neuronales se toma un promedio de un rango de horas. Ver Fig. 89 y Fig. 90.

Para poder analizar el sistema se realizaron casos donde ambas líneas están operando con el sistema experto activo en el mismo periodo de tiempo y se comparan ambas líneas en un mismo periodo de tiempo, pero en una fecha diferente el otro caso es cuando una línea esta con el sistema experto activo y la otra línea esta con el sistema experto desactivado en el mismo periodo de tiempo

Caso 1: En la Fig. 91 y Fig. 92, se tiene las tendencias de ambas líneas de producción con el Sistema Experto activado, se puede observar que el sistema trata de controlar ambos Set point de porcentaje de malla y de porcentaje de sólidos variando borrosamente las velocidades de las bombas según las condicionales del sistema experto.

Caso 2: En la Fig. 93 muestra a la línea 1 sin activar el sistema experto, examinando la imagen se tiene que cada cierto tiempo el operador manualmente varía la velocidad de las bombas de acuerdo al criterio cuando lo vea necesario. De igual forma si se puede ver que son controladas las variables de proceso (porcentaje de sólidos, porcentaje de malla) dentro de los parámetros normales. En la Fig. 94 muestra a la línea 2 con el sistema experto activo, las velocidades de las bombas van variando con mayor frecuencia según la demanda que requiere, relacionado con las condicionales del sistema experto; también se tiene controladas las variables de proceso.

Para la malla 200_1 se puede ver la comparación de los valores reales y el valor que genera la red neuronal Fig. 53, de igual forma se utilizó una matriz de entrada de [285 X 10] para interactuar con una matriz de salida de [285 X 1] obteniendo un error cuadrático medio de 0.5139 y un coeficiente de correlación de 0.8784 como muestra la Fig. 55; de la misma forma para el caso de la malla 200_2 se tiene la comparación del valor real y

el resultado de la red neuronal Fig. 54, se utilizó una matriz de entrada de $[193 \times 10]$ interactuando con la matriz de salida de $[193 \times 1]$ así obteniendo un error cuadrático medio de 0.3775 y coeficiente de correlación de 0.9146 como muestra la Fig. 56.



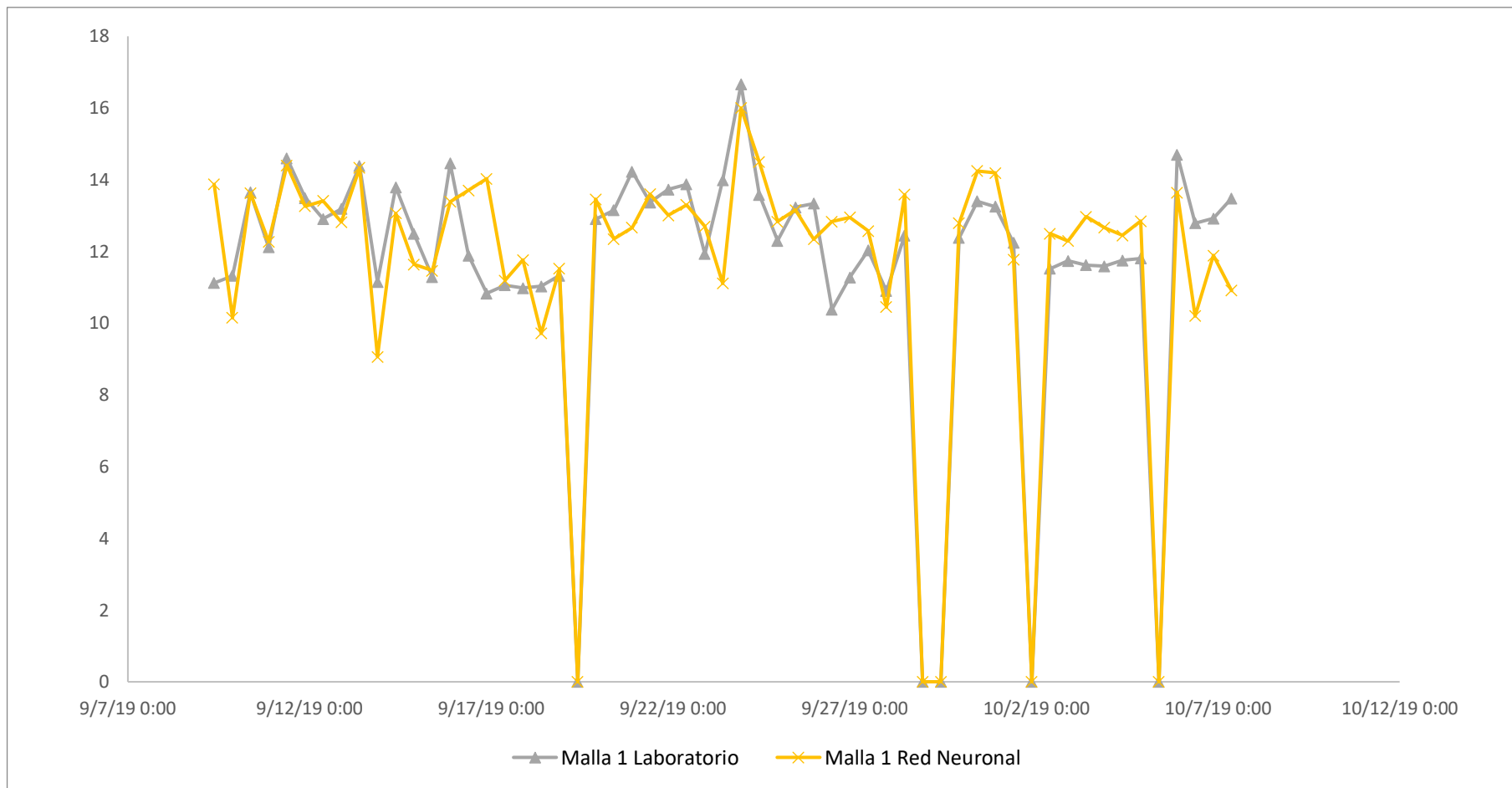


Figura 89 Comparación entre Laboratorio VS Red Neuronal de la Malla 1 – Elaboración propia

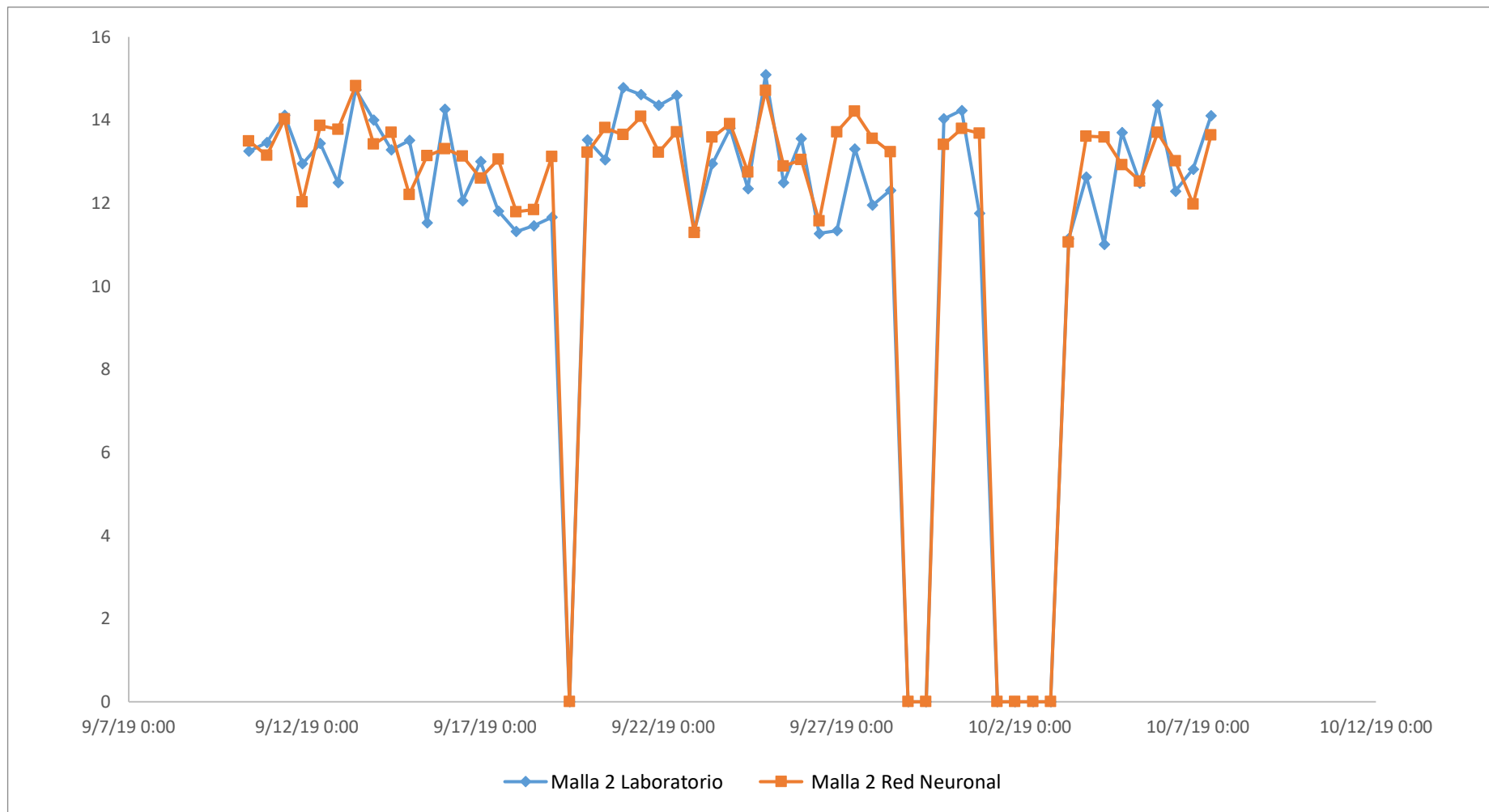


Figura 90 Comparación entre Laboratorio VS Red Neuronal de la Malla 2 - Elaboración propia



Figura 91 Caso 1, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 1 - Elaboración propia

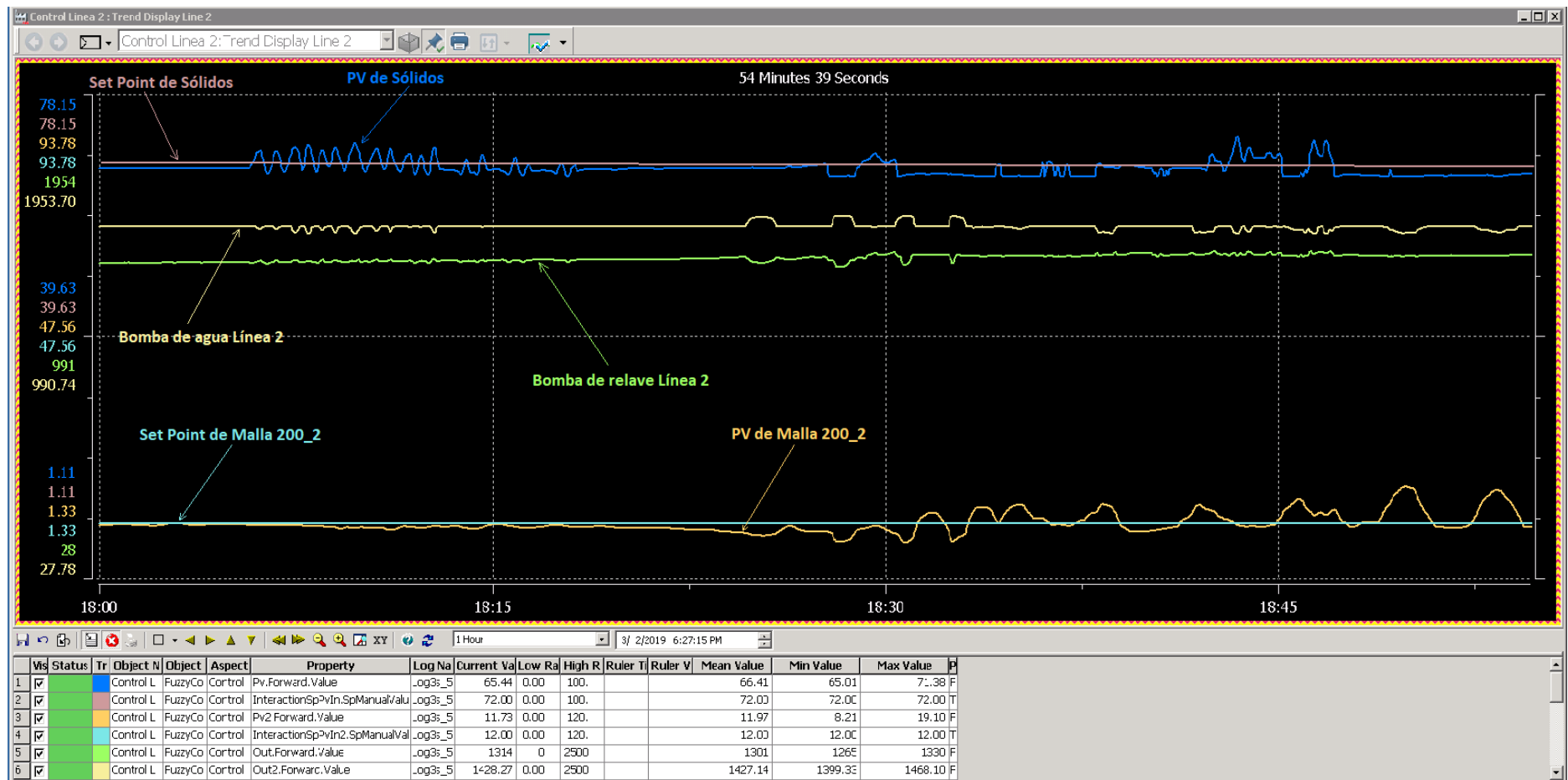


Figura 92 Caso 1, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 2 - Elaboración propia

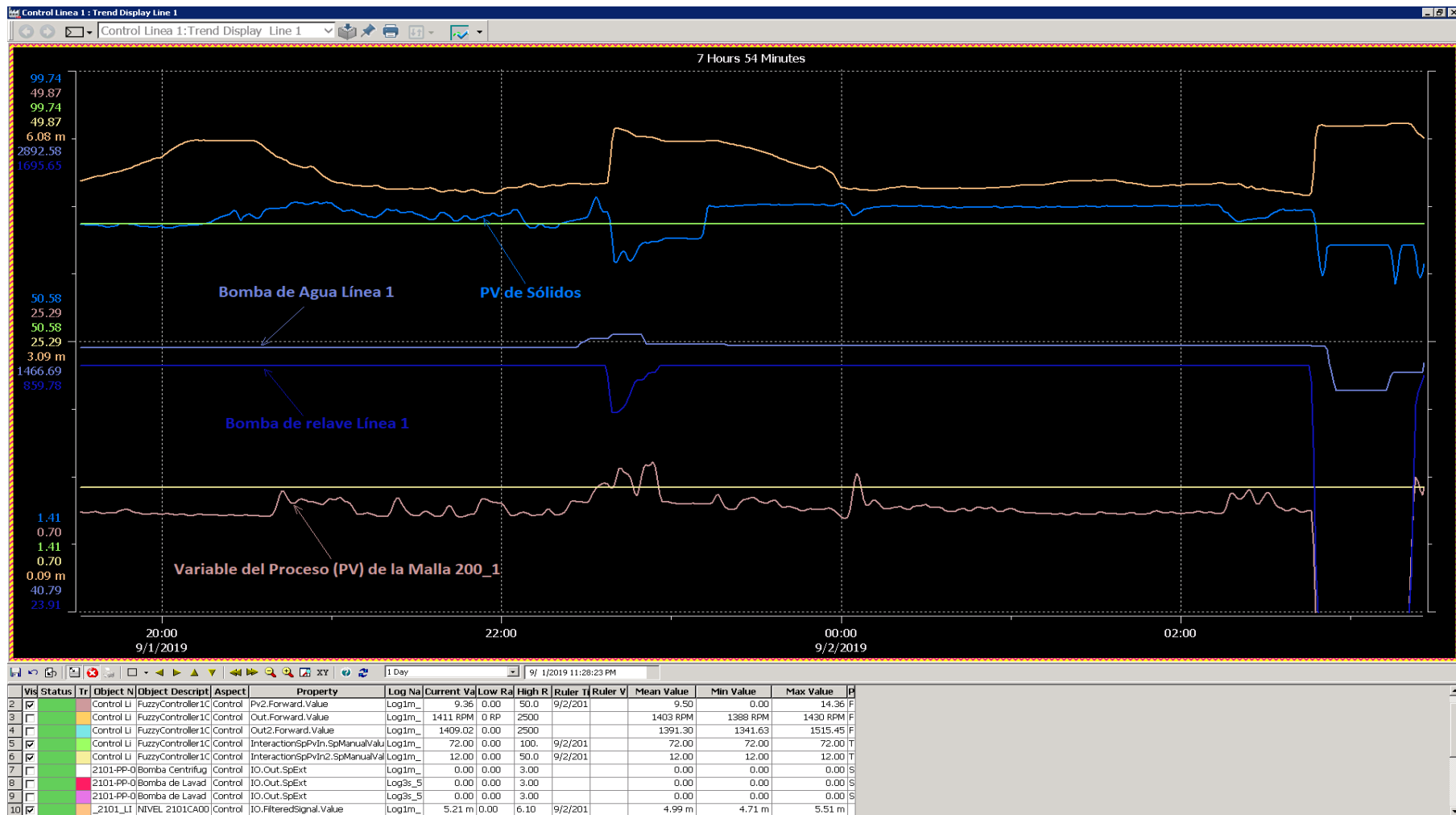


Figura 93 Caso 2, tendencias con el Sistema de Experto desactivado para la línea 1 en un mismo periodo de tiempo - Elaboración propia

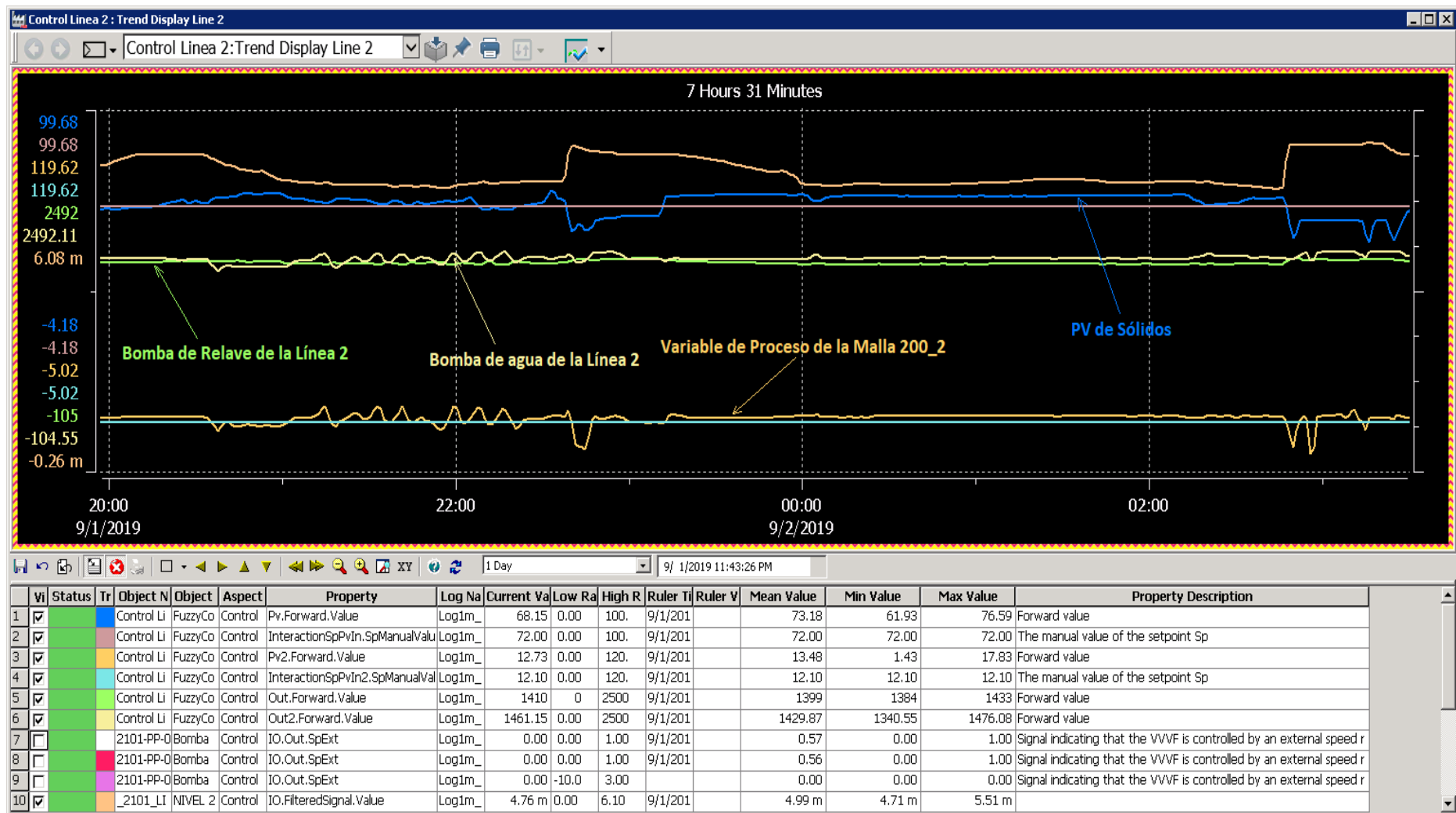


Figura 94 Caso 2, tendencias con el Sistema de Experto activado para la línea 2 en un mismo periodo de tiempo - Elaboración propia

3. Para realizar un análisis de consumo de agua de la misma manera se considera dos situaciones; la primera, considerando cuando el sistema experto está activado en ambas líneas y es comparado en un mismo periodo, pero en fechas diferentes, y la segunda, cuando el sistema experto se encuentra activado en la línea 2 y desactivado en la línea 1 y poder compararlos entre ambos en el mismo periodo de tiempo y la misma fecha.

Caso 1: En esta condición se tiene activado el Sistema Experto para ambas líneas (Línea 1, Línea 2), se obtuvo la data de consumo de agua durante el periodo activo del sistema y se obtuvo la data del consumo de ambas líneas cuando no se encontraba activo el Sistema experto, considerando las mismas situaciones y operando la planta al 100% de productividad, como muestra la Fig. 95, se puede observar que en ambas líneas hay una reducción de consumo de agua en el periodo de 12 horas; podemos sacar la diferencia de la misma línea y obtener un porcentaje en promedio de ahorro para este caso.

Porcentaje de ahorro de agua de la línea 1

$$2567.505962 - 2532.674792 = 34.831169$$

$$\frac{34.831169 * 100}{2567.505962} = 1.36 \%$$

Porcentaje de ahorro de agua de la línea 2

$$2548.666849 - 2501.857569 = 46.809280$$

$$\frac{46.809280 * 100}{2548.666849} = 1.84 \%$$

$$\frac{1.36 + 1.84}{2} = \mathbf{1.60 \%}$$

*Ecuación 15 Porcentaje promedio de ahorro en consumo de agua, Caso 1 –
Elaboración propia*

Se puede observar que para este caso comparando en el periodo de 12 horas activado el sistema y desactivado en la planta se tiene un ahorro promedio de 1.60% como un valor constante de ahorro en este tipo de pruebas.

Caso 2: Para esta condición se tiene una línea activa (línea 2) y la otra desactivada (línea 1) y se evalúa durante un periodo de 8 horas, como muestra la Fig. 96 se tiene al igual que el caso anterior un ahorro al momento de utilizar el sistema experto.

Para obtener el ahorro de consumo de una línea con respecto a la otra utilizamos la siguiente ecuación.

$$1316.561279 - 1243.613037 = 72.948242$$

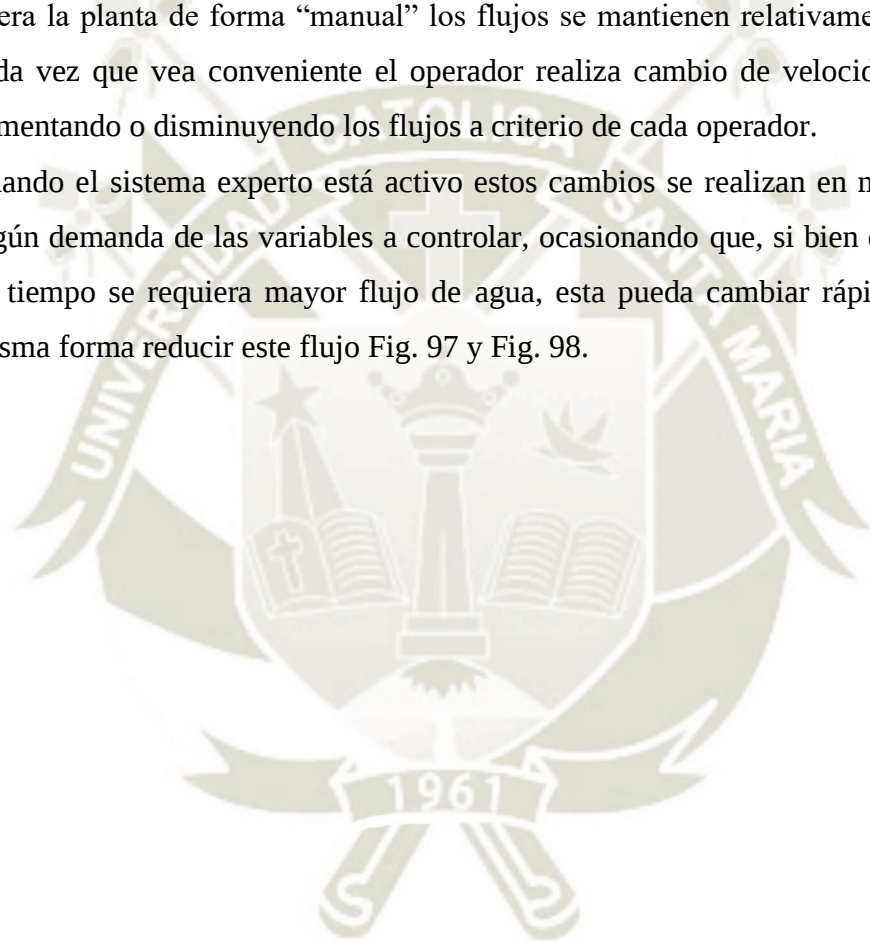
$$\frac{72.948242 * 100}{1316.561279} = 5.54\%$$

*Ecuación 16 Porcentaje promedio de ahorro en consumo de agua, Caso 2 –
Elaboración propia*

Se tiene un ahorro en promedio de 5.54% de la línea 1 con respecto a la línea 2, corroborando la postura de consumir en menor cantidad el agua en la planta.

Los motivos por el cual se tiene un consumo menor de agua es debido a que cuando se opera la planta de forma “manual” los flujos se mantienen relativamente constantes y cada vez que vea conveniente el operador realiza cambio de velocidad en la bomba aumentando o disminuyendo los flujos a criterio de cada operador.

Cuando el sistema experto está activo estos cambios se realizan en mayor frecuencia según demanda de las variables a controlar, ocasionando que, si bien en algún periodo de tiempo se requiera mayor flujo de agua, esta pueda cambiar rápidamente y de la misma forma reducir este flujo Fig. 97 y Fig. 98.



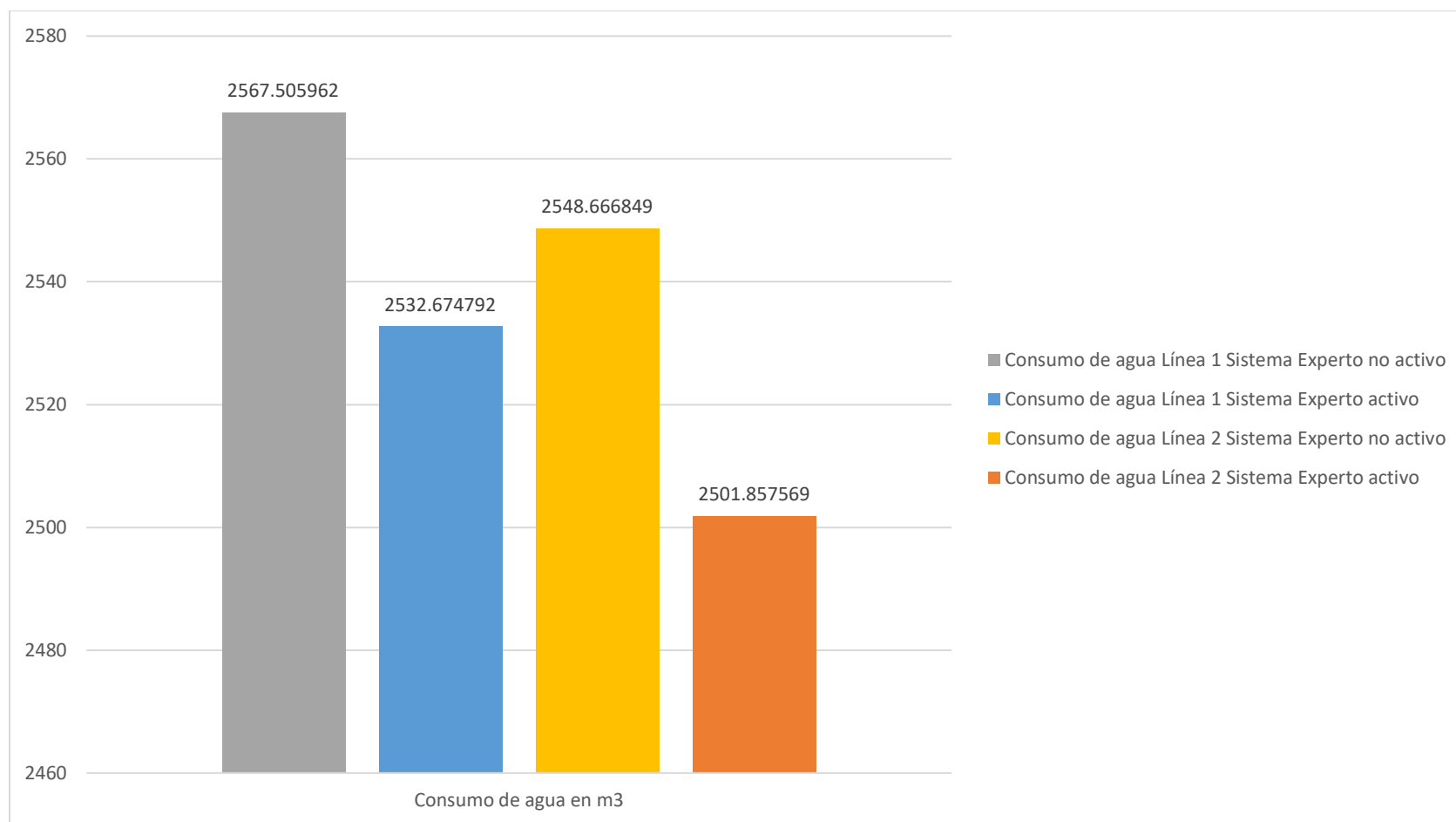


Figura 95 Caso 1, Consumo de agua de cuando ambas líneas tiene el Sistema Experto en línea – Elaboración propia

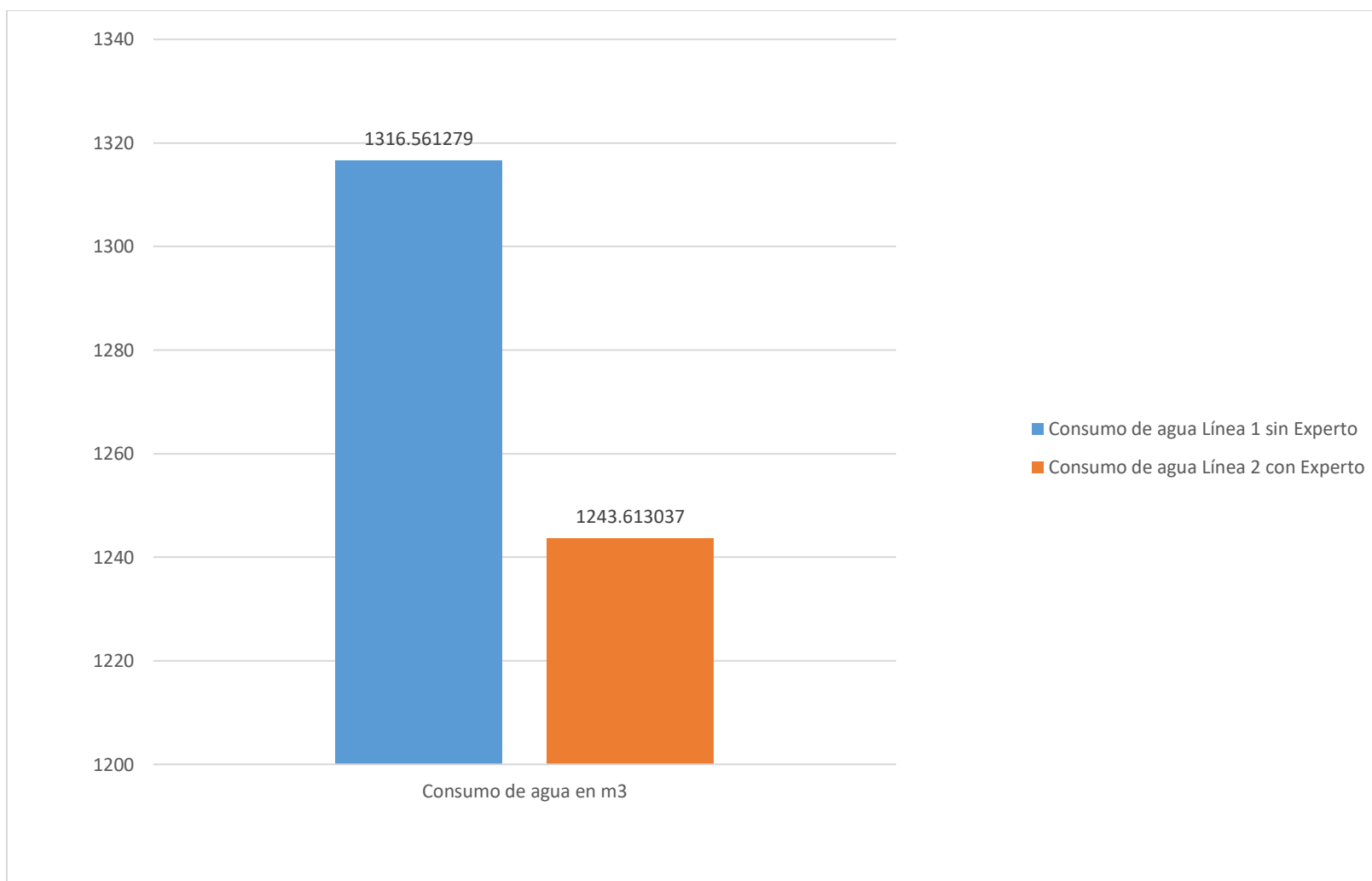


Figura 96 Caso 2, Consumo de agua cuando la línea 1 se encuentra sin experto y la línea 2 con experto - Elaboración propia

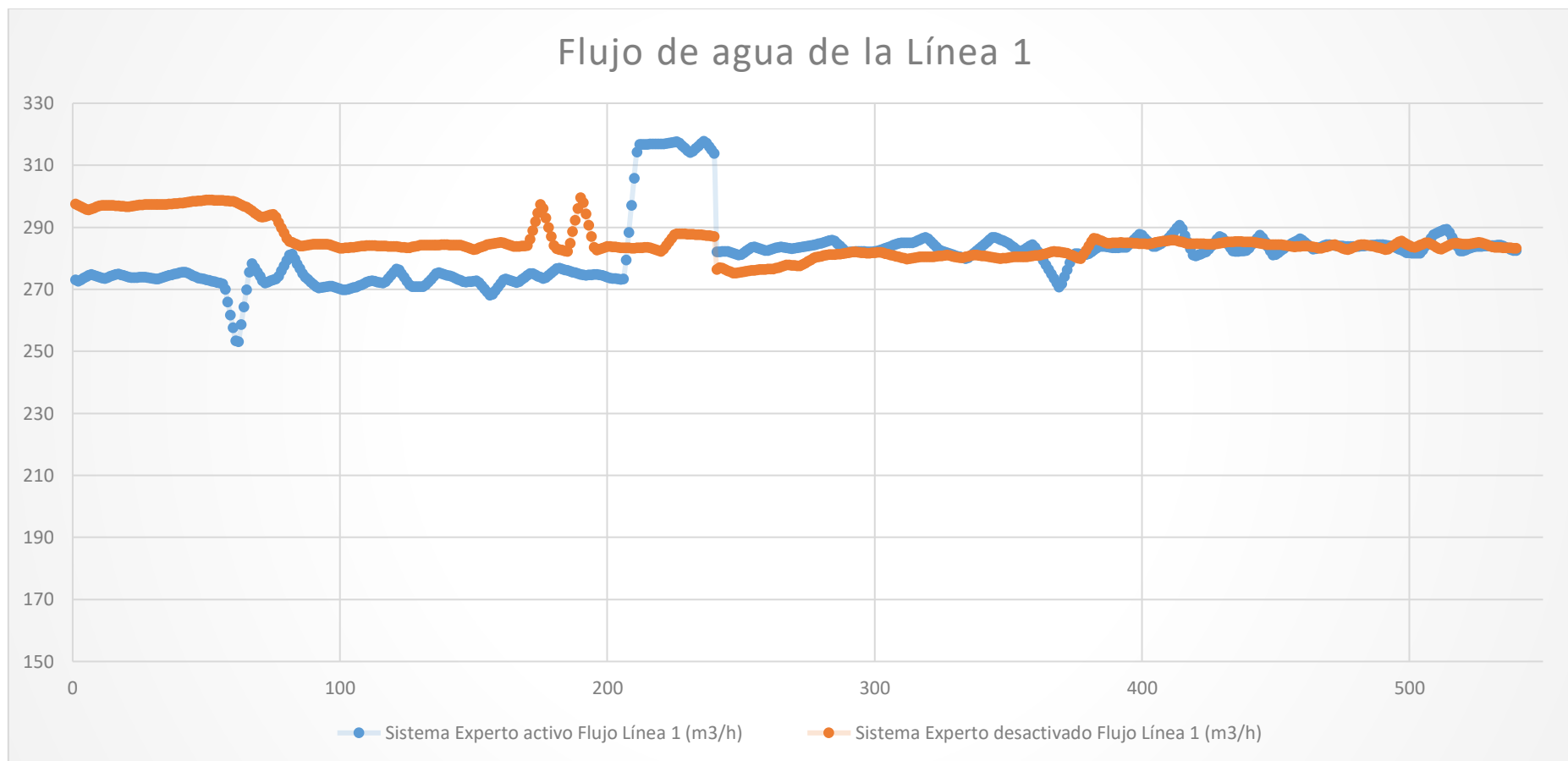


Figura 97 Tendencia de Consumo de agua de la Línea 1 con y sin el Sistema Experto - Elaboración propia

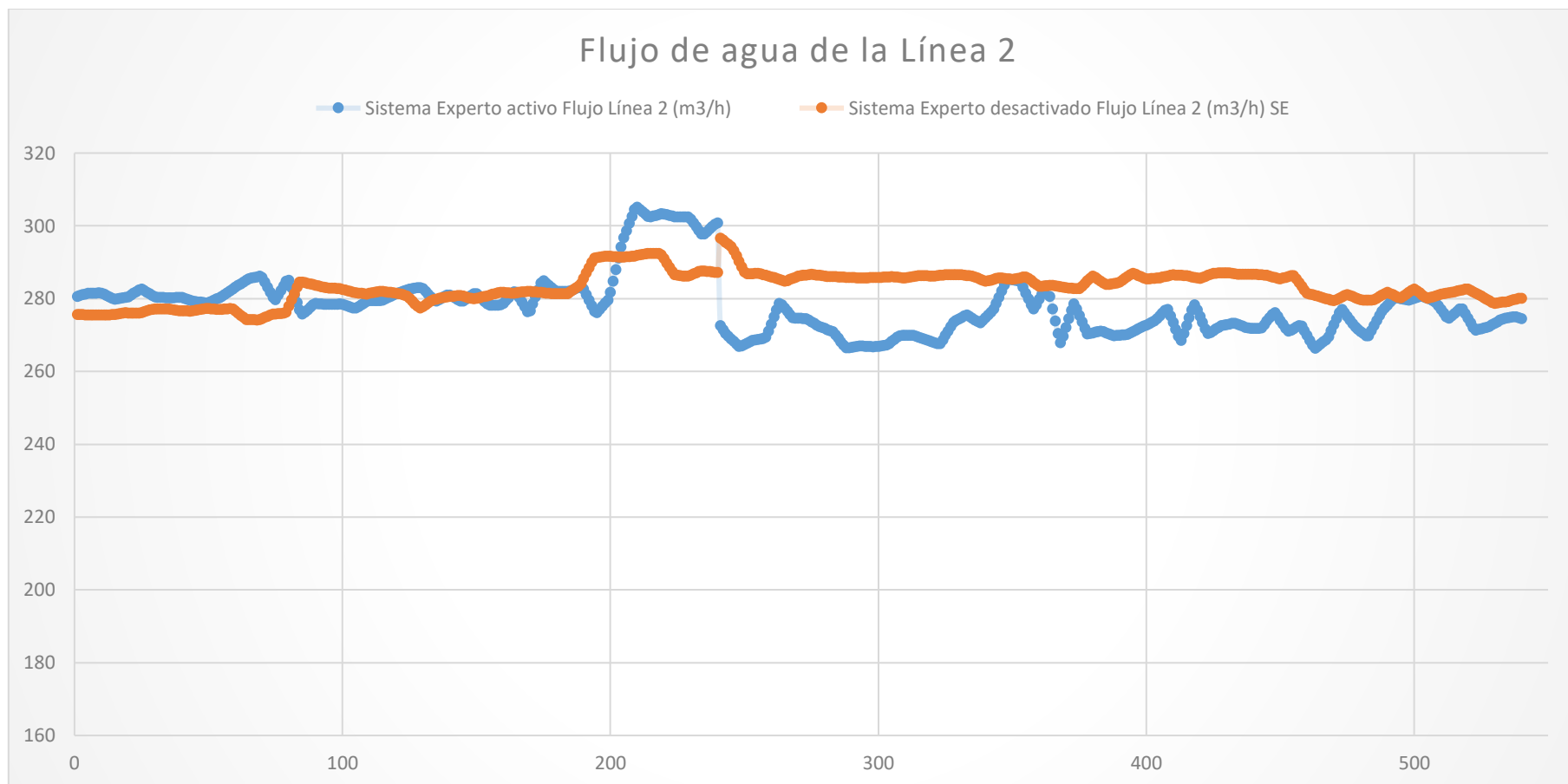


Figura 98 Tendencia de Consumo de agua de la Línea 2 con y sin el Sistema Experto - Elaboración propia

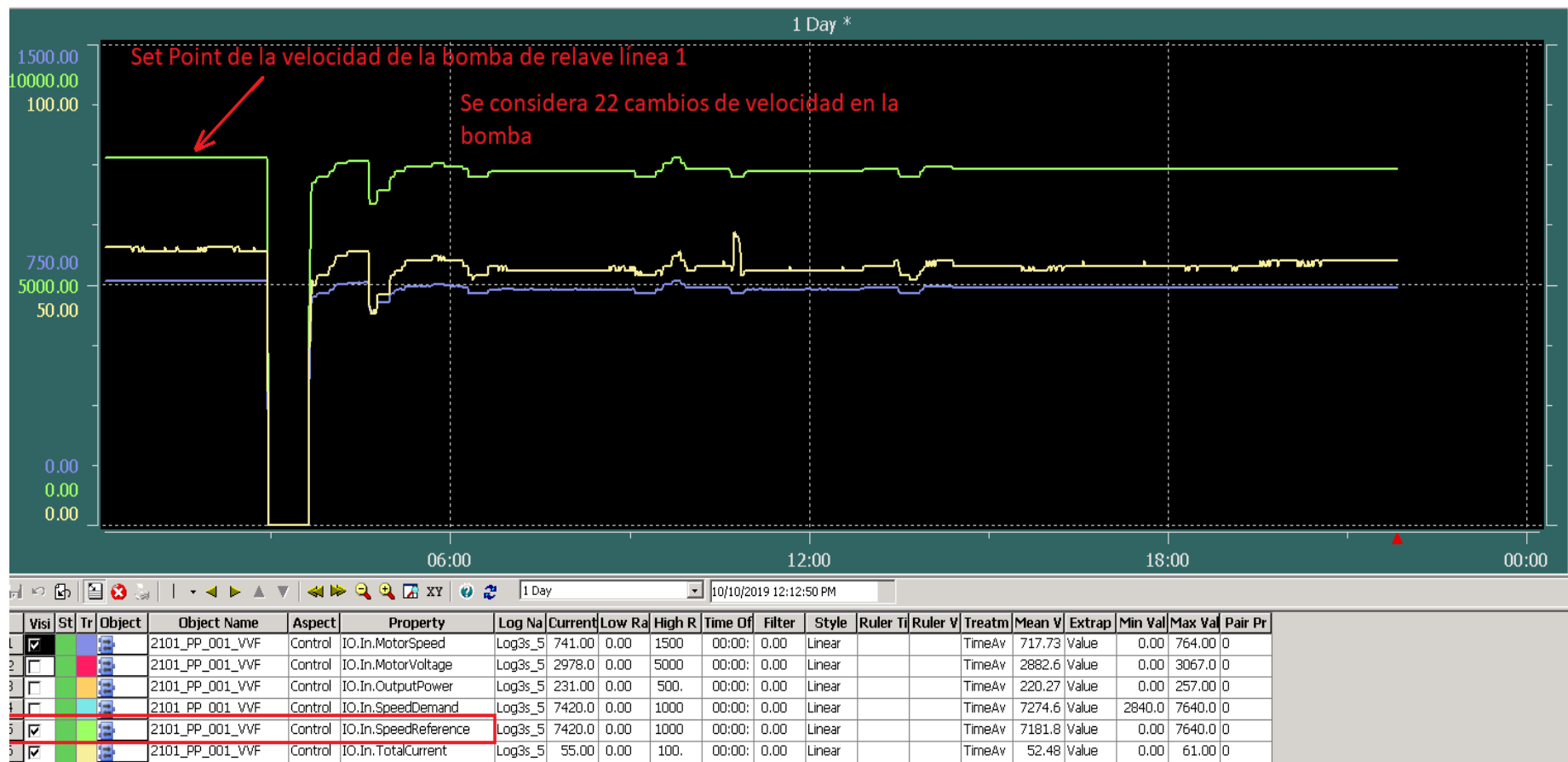


Figura 99 conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de relave en la línea 1 - Elaboración propia

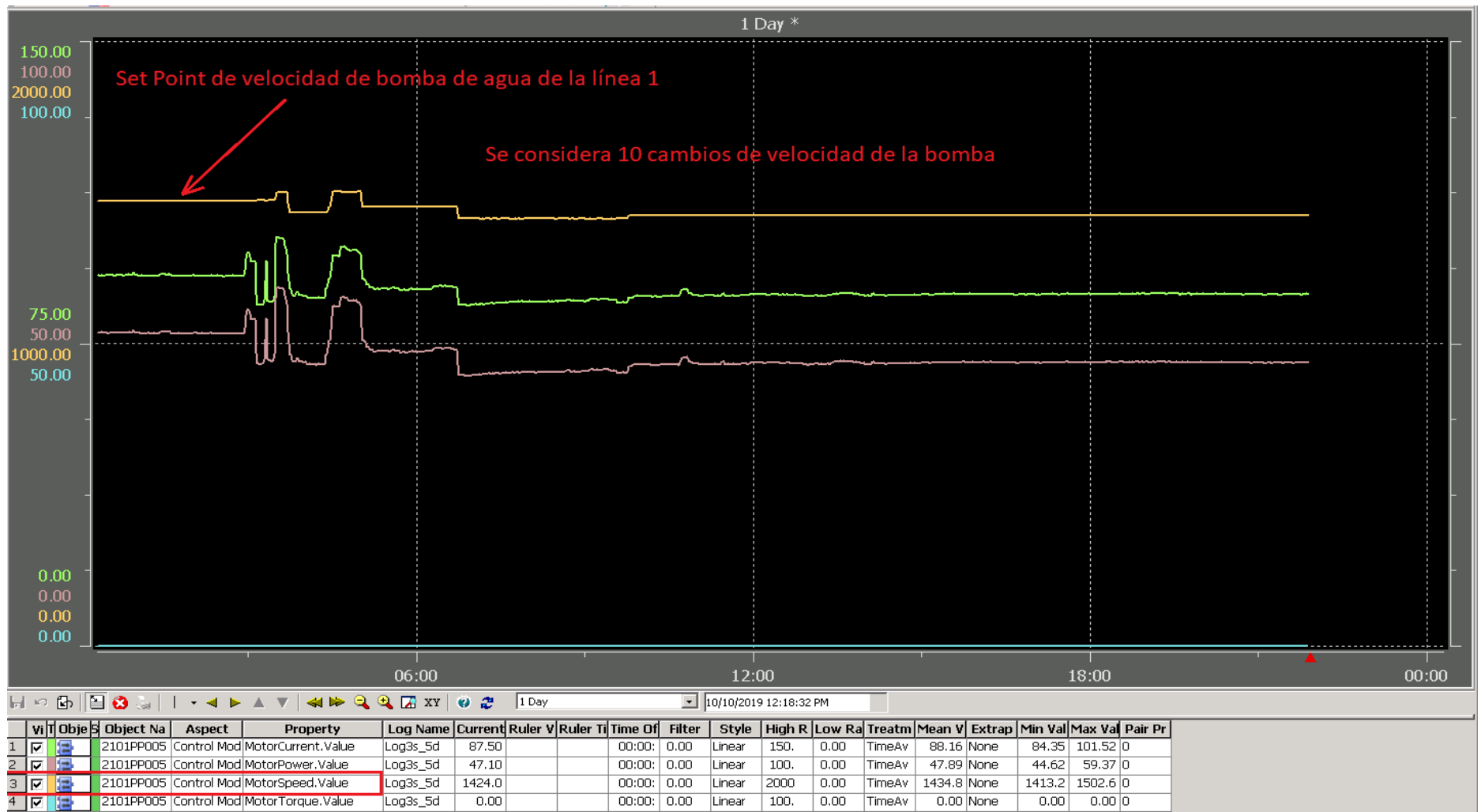


Figura 100 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de agua en la línea 1 - Elaboración propia

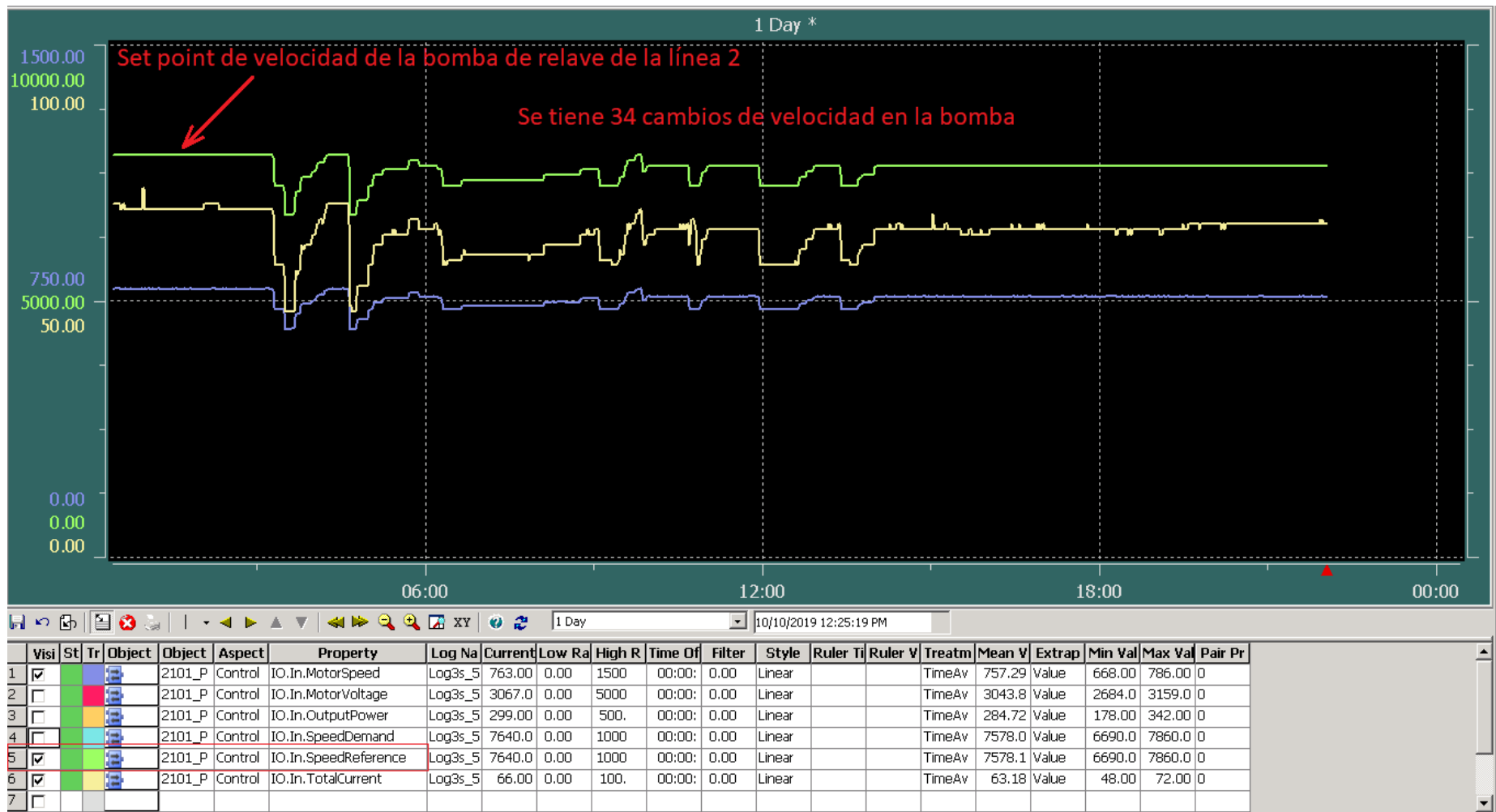


Figura 101 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de relave en la línea 2 - Elaboración propia

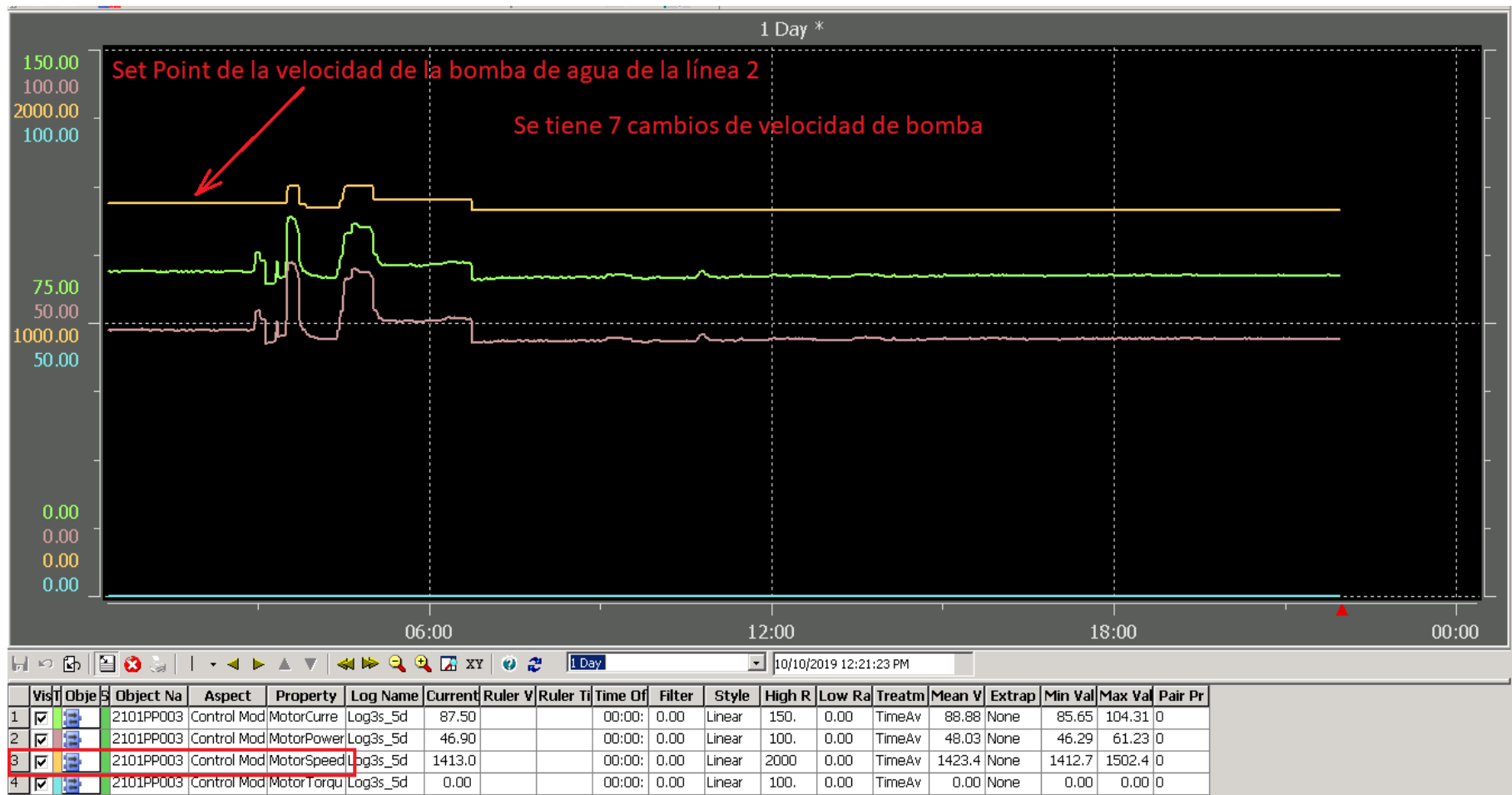


Figura 102 Conteo de variaciones de la velocidad de la bomba de agua en la línea 2 - Elaboración propia

4. Para medir las horas utilizadas en la operación por línea, se analizó por tendencia cuantos cambios se realiza durante un día el operador, tanto en las bombas de agua como de relave; para tener en cuenta durante una operación normal el operador demora alrededor de 20 segundos para realizar algún cambio en cada bomba; así para la línea 1 se tuvieron 22 cambios de velocidad durante 24 horas para la bomba de relave Fig. 99 y 10 cambios de velocidad en la bomba de agua Fig. 100.

$$32 \text{ cambios en total} * 20 \text{ s} = 10 \text{ minutos}$$

Para la línea 2 se tuvieron 34 cambios durante 24 horas en la bomba de relave Fig. 101 y 7 cambios para la bomba de agua Fig. 102.

$$41 \text{ cambios en total} * 20 \text{ s} = 14 \text{ minutos}$$

Si bien es un dato relativo debido a que cada operador tiene diferentes criterios para realizar una operación se puede considerar un valor en promedio de la operación de dos operadores diferentes, sumando ambos valores se obtiene *24 minutos* que son utilizados para realizar cambios en las velocidades de las cuatro bombas; normalmente al día se tiene 2 jornadas de 12 horas con un solo operador por jornada, realizando el control de 5 plantas de procesamiento, obteniendo un promedio de 4 horas para operar cada planta en las dos jornadas.

5. Se modificó la librería de Lógica difusa del DCS System800xA, adecuando al requerimiento de la implementación del sistema de control avanzado; para así tener un total de 3 señales de entrada (porcentaje de malle, porcentaje de sólidos, nivel) junto con sus Set Point correspondientes, y dos salidas (bomba de relave, bomba de agua) para cada línea de producción.



CAPITULO V

COSTO Y PRESUPUESTO

CAPITULO V

COSTO Y PRESUPUESTO

Para poder realizar la implementación del Sistema Experto solo se consideró el trabajo de ingeniería como tal, debido a que se contaba con el software y hardware ya integrado, permitiendo realizar las modificaciones adecuadas de acuerdo a los requerimientos ya mencionados, considerando el costo más manejable a nivel industrial; evidentemente si se tuviera que realizar una implementación desde la adquisición del hardware y software se elevaría exponencialmente. Tabla 14.

Tabla 14 Presupuesto de implementación del Sistema Experto - Elaboración propia

Ítem	Descripción	Precio por Unidad (S/.)	Cantidad	Total (S/.)
Trabajos de implementación				
1	Variables Estudio de variables. Comportamiento de planta, filosofía de control.	10000.00	1	10000.00
2	Red Neuronal Diseño de red neuronal, Calibración de la red y estudio de comportamiento en comparativa con los datos de laboratorio para ambas líneas de producción.	5000.00	2	10000.00
3	Diseño, Modificación, implementación y Sintonización Diseño de Lógica Difusa. Modificación de librería de lógica difusa de acuerdo al control a implementar. Sintonización del control en línea y verificación de los parámetros estables en ambas líneas de producción.	8000.00	2	16000.00
4	Puesta en Marcha Trabajos de post implementación Babysitting (supervisión del control).	6000.00	1	6000.00
Mano de obra				
5	Especialista en control y automatización	20000.00	1	20000.00
Total (S/.)				62000.00

- En el ítem 1 “Estudio de variables, comportamiento de planta y filosofía de control”; se realiza un estudio de las variables, los límites de trabajo cuando la planta se encuentra en estado estable, el comportamiento de la planta cuando varía la velocidad de las bombas de relave y agua. Todo esto ayuda a determinar la filosofía de control que será implementada. Es un punto de partida para iniciar los trabajos y dar pase para ver si es viable o no la propuesta.
- Ítem 2 “Diseño de red neuronal, calibración de la red y estudio de comportamiento en comparativa con los datos de laboratorio para ambas líneas de producción”; al considerarse dos redes neuronales se debe obtener la información de cada línea de producción, para poder realizar las pruebas y diseñar cada red neuronal.
Luego de ello, obtener los muestreos posteriores de laboratorio y poder realizar una comparativa entre el valor hallado por las redes neuronales y el valor del laboratorio, para poder realizar esta comparativa debemos al menos considerar la data de un mes que nos permitirá poder comparar y verificar el valor medio cuadrático.
- Ítem 3 “Diseño de Lógica Difusa, modificación de librería de lógica difusa de acuerdo al control a implementar, sintonización del control en línea y verificación de los parámetros estables en ambas líneas de producción.”; se determina los grados de membresía para la defuzzificación y de acuerdo a ello se elabora las reglas difusas, obteniendo el valor de referencia de velocidad para cada bomba, tanto para la línea 1 como para la línea 2. La sintonización del sistema implementado se debe realizar cuando el sistema está en funcionamiento, para poder modificar, algún rango de los grados de membresía o modificar alguna regla difusa.
- Ítem 4 “Puesta en Marcha, trabajos de post implementación y babysitting”; está dedicado al seguimiento del sistema implementado y supervisión del mismo.
Para analizar el ahorro de agua de la planta cuando está activo el sistema, se trabajó con valores promedio obteniendo un valor estimado, para tal motivo se tomó como referencia el consumo de potencia por día de una sola bomba de agua y se comparó con la cantidad de agua que se bombea por día para luego obtener un valor en soles de la cantidad de agua que se están ahorrando al día y al mes. Tabla 15.

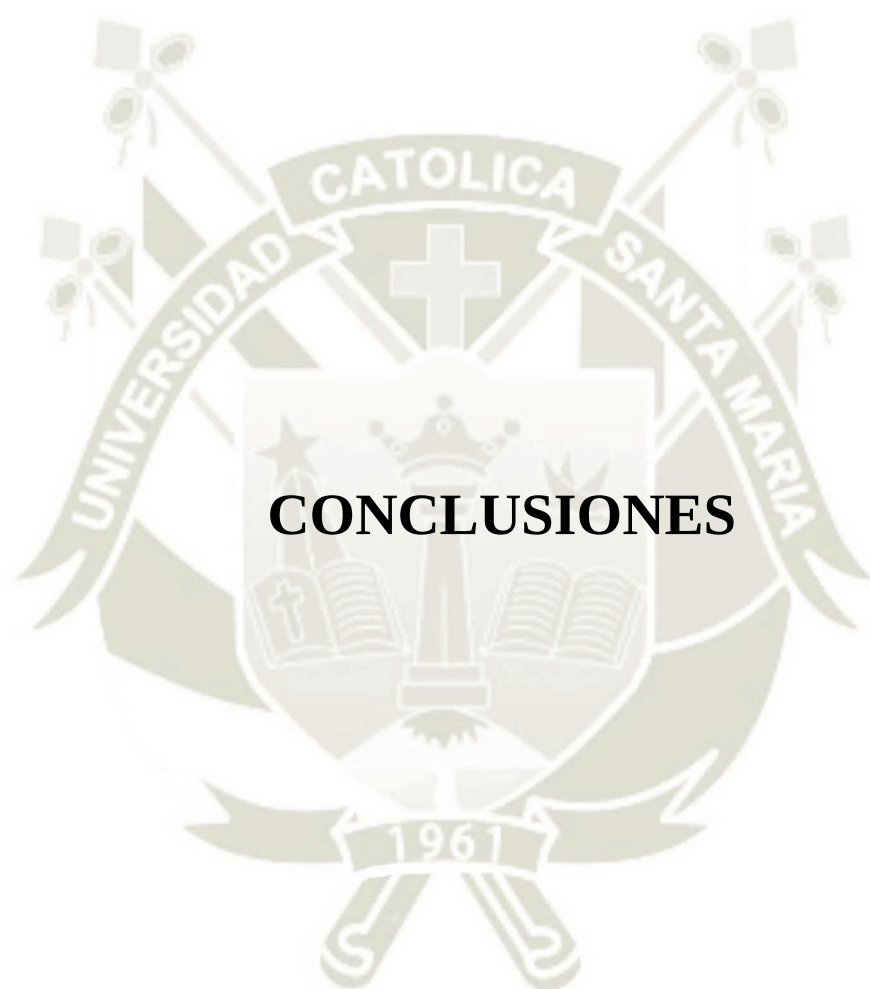
Tabla 15 Ahorro en soles de las bombas de agua – Elaboración propia

Descripción	Cantidad	Unidad
Potencia promedio de una bomba de agua	40.00	Kw/h
Costo del KWh en línea trifásico	1.50	soles
Costo por hora de una bomba	60.00	soles
Costo por día de una bomba	1440.00	soles
Costo por día de dos líneas de producción	2880.00	soles
Consumo de agua por día	6000.00	m3
Factor promedio del consumo por metro cúbico bombeado (costo por día/consumo por día)	0.48	soles/m3
Ahorro de planta con el sistema experto activo	240.00	m3
Ahorro diario en soles con el sistema experto activo	115.20	soles
Ahorro mensual en soles con el sistema experto activo de las bombas de agua	S/3456.00	

De la misma manera para poder cuantificar el costo de las horas hombre que se está reduciendo en la operación de la planta, se realiza el equivalente en soles. Tabla 16.

Tabla 16 Horas hombre expresadas en soles – Elaboración propia

Descripción	Cantidad	Unidad
Pago referencial del personal por día	200.00	Soles
Pago por hora de trabajo	16.67	Soles/hora
Tiempo reducido por día con el sistema experto activo	24.00	minutos
Tiempo total reducido en el mes	720.00	minutos
Horas hombre reducidas al control de la planta en el mes	12.00	horas
Equivalente del valor en soles de las horas hombre destinadas a otras labores al mes	S/200.00	



CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

- Se logró implementar un Sistema de control experto, utilizando el control por lógica difusa debido a la facilidad de diseño, además de que existen librerías para desarrollarse en diferentes plataformas, como en este caso el Sistema de Control Distribuido (DCS) del System800xA.

Se controla el porcentaje de sólidos y porcentaje de malla en la planta 1701, considerando el valor de Set Point (SP), el sistema trata que las variables de proceso (PV) estén cerca al valor consignado y con el menor error posible, en segundo plano se controla el nivel del cajón de relave 1701-CA-001 evitando derrames o la cavitación de las bombas de relave.

- Se obtuvo a partir de redes neuronales de tipo Backpropagation, un valor estimado del porcentaje de malla para ambas líneas de producción independientes (dos líneas de producción) utilizando el software especializado SGS Gemsyn. Se crearon dos redes neuronales de nueve neuronas de entrada (señales de la planta) con tres capas ocultas. En la comparativa entre el valor de laboratorio y las redes neuronales como se indica en los resultados para la malla 200_1 se tuvo un error cuadrático medio de 1.19 y para la malla 200_2 se obtuvo 0.87 de error cuadrático medio, teniendo en cuenta que mientras más pequeño es este valor más precisa es la red neuronal, se concluye que la red neuronal de la malla 200_2 es más confiable que el de la malla 200_1.
- El Sistema Experto implementado controla tanto las bombas de alimentación de relave como las bombas de alimentación de agua recuperada, se comprobó que al tener el Sistema Experto activo, la variación de las velocidades de las bombas de agua son dinámicas, de acuerdo a la demanda que requiere la planta; se realizaron dos pruebas para poder analizar el consumo de agua, obteniendo en ambos una mejora en el consumo, en promedio de alrededor del 4% de agua recuperada en toda la planta, teniendo en cuenta que se tiene un consumo diario promedio de 6000 m³ en total; su equivalente del ahorro es de 120 m³ diario por línea de producción y 240 m³ de agua en toda la planta, lo que equivale a un ahorro de S./3456.00 mensual.
- Se ha comprobado que la planta se mantiene estable; reduciendo el tiempo utilizado para controlarla, según los resultados he obtenido un promedio de 24 minutos que se ahorrará de esas 4 horas donde el sistema está controlando las velocidades de las bombas usadas, la cual se reflejarían en una reducción de al menos un 10 % del tiempo, donde el operador

pueda atender otras plantas de producción o realizar otras labores, teniendo como costo beneficio una cantidad de S/200.00 mensual.

- Se ha realizado la modificación de la librería de lógica difusa del Sistema de Control Distribuido System800xA, para poder adecuarlo al Sistema experto de acuerdo al número de variables de entrada y salida utilizado.



RECOMENDACIONES

- Como parte de una mejora se podría utilizar Lógica Difusa y redes neuronales en el control y optimización de plantas de relave utilizando un Software libre, como es el caso de Python, así no se restringiría a ninguna plataforma ni diversas marcas de Sistema de Control Distribuido.
- Para el caso de las redes neuronales, requiere que periódicamente se añada data, así poder abarcar mayor de la ecuación lineal que se obtiene a partir de los datos de interacción entre los valores predichos y los valores reales.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- A. Bivens, C. P. (2002). Network-based intrusion detection using neural networks . En *Intelligent Enginnering Systems throgh Artificial Neural Networks*, vol 12 (págs. 579 - 584).
- ABB S.A. (2014). Fuzzy Control. En ABB, *System 800xA Control AC800M: Binary and Analog Handling* (págs. 149 - 152). ABB S.A.
- ALNICOLSA. (2018). *Hidrociclones*. Obtenido de ALNICOLSA :
<http://taninos.tripod.com/hidrociclon.htm>
- Cañas, U. C. (s.f.). *Análisis de tamaño de partículas por tamizado en agregado fino y grueso y determinación de material mas fino que el tamiz N° 200 en agregado mineral por lavado*. San Salvador, El Salvador.
- CONSULTANCY, I. &. (2016). METALURGIA EXTRACTIVA DE POLIMETALES.
- Ecured. (s.f.). *Ecured Conocimiento con todos para todos*. Obtenido de Granulometría:
<https://www.ecured.cu/Granulometria>
- Fernández, M. (s.f.). *El ABC de la Automatización: Control Avanzado*. Obtenido de Asociación de la Industria Eléctrica y Electrónica Chile:
http://www.aie.cl/files/file/comites/ca/abc/Control_Avanzado.pdf
- Gensym. (2007). Neuro Line Studio. En G. Corporation, *G2 Neural Network Engine* (págs. 1 - 10). Burlington.
- Gestal Pose, M. (2009). Introducción a las redes de Neuronas Aritificiales. *Departamento Tecnologías de la Información y las Comunicaciones*, 1-20. Obtenido de Academia:
<http://sabia.tic.udc.es/~mgestal>
- Gómez, J., & Gonzáles Osorio, F. (1998). Redes Neuronales. (pág. 19). Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Google LLC. (s.f.). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps:
<https://www.google.com/maps/place/Garita+SPCC+concentradora+Quebrada+Honda/@-17.4187134,-70.8304634,12.21z/data=!4m5!3m4!1s0x9144bfde7643a1e9:0x24e3bd2ab13c8ec8!8m2!3d-17.4426579!4d-70.8061757>
- Google LLC. (s.f.). *Google Maps*. Obtenido de Google Maps:
<https://www.google.com/maps/place/Garita+SPCC+concentradora+Quebrada+Honda/@-17.4636749,-70.8101911,5722m/data=!3m1!1e3!4m5!3m4!1s0x9144bfde7643a1e9:0x24e3bd2ab13c8ec8!8m2!3d-17.4426579!4d-70.8061757>
- Guzmán, D., & Castaño, V. (2006). La Lógica difusa en ingeniería: Principios, Aplicaciones y Futuro. *Ciencia y Tecnología*, 24(2), 87 - 107.
- Heckerman, D. (1998). In Learning in graphical models. En *A tutorial on learning with Bayesian networks* (págs. 304 - 360). Springer.

Lara, J. L. (2013). Experiencias de Operación de Depósitos de relaves espesados y filtrados. *Golder Associates*, 4-22.

Pérez, F. (2006). *OPC Conceptos Fundamentales*. Bilbao, España: Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática.

PUCV, I. e. (2006). *Análisis granulométrico*. Obtenido de Yumpu:
<https://www.yumpu.com/es/document/view/14335698/analisis-granulometrico-ingenieria-en-construccion-pucv>

SGS Mineral Services. (2017). *Capacitación-MEC_Toquepala*. Toquepala.



ANEXOS

Anexo 1 Modelo de Reporte de Malla 200 de laboratorio.

VARIABLES											
BOCATOMA		35.00		MANIFOLD psi		16.00					
% SÓLIDOS ANTES		55.00%		FLUJO DE AGUA m³/h		312.00					
% SÓLIDOS DESPUES		39.43%		FLUJO DE PULPA m³/h		2147.00					
% SÓLIDOS UNDERFLOW COMP.		73.44%		MALLA # 200 CYS		11.23%					
PSI CW Agua (m3 / h)		28.70		RECUPERACION		30.75%					
ASTM E11	ABERTURA	FEED		OVER		U/F Compósito					
MALLA	mm	PESO (g)	% PASS	PESO (g)	% PASS	PESO (g)	% PASS	PESO (g)	% PASS	PESO (g)	% PASS
10	1.680	0.00	100.00	0.00	100.00	1.16	99.77				
20	0.840	0.66	99.87	0.00	100.00	2.48	99.27				
48	0.297	62.17	87.43	12.86	97.43	142.67	70.74				
65	0.210	45.76	78.28	26.62	92.10	102.50	50.24				
100	0.149	46.17	69.05	39.61	84.18	101.32	29.97				
150	0.105	23.28	64.39	20.56	80.07	39.16	22.14				
200	0.074	45.66	55.26	44.59	71.15	54.56	11.23				
325	0.044	41.22	47.02	39.96	63.16	20.22	7.19				
400	0.037	12.10	44.60	10.56	61.05	3.62	6.46				
400		222.98	0.00	305.24	0.00	32.31	0.00				
P. TOTAL		500.00		500.00		500.00					
		% SÓLIDOS	39.43%	% SÓLIDOS	24.57%	% SÓLIDOS	73.44%	% SÓLIDOS		% SÓLIDOS	

Anexo 2 Base de Datos para las Redes Neuronales

1	Fecha		Entradas										Salidas		
	Inicio	Final	Nivel Tk relave	Presion relave nido 1	Presion relave nido 2	Flujo relave nido 1	Flujo relave nido 2	%solidos después	Flujo de agua nido 1	Flujo de agua nido 2	presión agua nido 1	presión agua nido 2	Mailla 200 Underflow	% Solidos talud	%Solidos sensor
			QH_2101_LIT_1141_ABB	QH_2101_PIT_3122_ABB	QH_2101_PIT_2122_ABB	QH_2101_FIC_1131_ABB	QH_2101_FIC_1231_ABB	QH_2101_DIT_1161_ABB	QH_2101_FIT_3131_ABB	QH_2101_FIT_2131_ABB	QH_2101_PIT_3123_ABB	QH_2101_PIT_2123_ABB			QH_2101_DIT_4462_ABB
4	12/31/2017 22:00	12/31/2017 23:30	5.183215415	16.37388285	16.52070887	2208.953135	2172.33109	44.37870513	317.6901778	291.6988895	27.87531243	26.6363148	11.23	73.44	68.76614176
5	1/1/2018 22:00	1/1/2018 23:30	4.958821342	15.60604638	16.21669164	2160.094899	2149.809888	44.82099374	300.708904	305.4208867	26.07199731	27.07804657	11.23	73.35	69.61642231
6	1/2/2018 10:00	1/2/2018 11:30	5.24808575	16.59726985	15.67040855	2222.234087	1937.947748	44.47870062	304.7602111	267.934701	26.8938885	24.64445348	10.9	70.89	66.62446283
7	1/2/2018 22:00	1/2/2018 23:30	4.856552856	13.89292785	13.69319733	2118.704988	2026.548276	44.4025777	303.5766628	292.3389009	25.60254633	24.42551006	10.34	75.7	64.78588915
8	1/3/2018 10:00	1/3/2018 11:30	5.228092181	16.24323537	16.93043411	2201.710597	2157.35506	44.05219132	305.4103361	311.3902413	27.01496645	27.6911914	10.34	71.59	70.5031899
9	1/3/2018 22:00	1/3/2018 23:30	4.277741739	15.82541989	15.79373498	2186.48744	2131.241359	43.43471275	315.4394328	309.7112985	27.64295358	27.34024128	10.76	72.94	68.63668805
10	1/4/2018 10:00	1/4/2018 11:30	5.200549526	6.305161158	17.17524399	886.1553085	2194.044548	29.34799156	234.5176059	262.8185614	14.6618248	24.34929049	11.51	71.99	51.08668966
11	1/4/2018 22:00	1/4/2018 23:30	4.838169824	15.61354982	15.30913472	2160.482817	2178.466505	42.63807797	290.5495238	293.2264473	25.7032163	25.58863525	10.68	72.71	65.87537003
12	1/5/2018 10:00	1/5/2018 11:30	4.747847145	15.80704924	15.83727391	2145.545652	2172.364725	44.09697303	291.6492019	292.8298549	25.75288908	25.5711689	10.98	72.66	68.67953999
13	1/5/2018 22:00	1/5/2018 23:30	5.331177464	14.74114037	15.04410833	2097.687079	2082.5389	43.66916341	282.1765556	25.672015	24.61139072	24.61139072	11.17	73.07	67.50147574
14	1/6/2018 10:00	1/6/2018 11:30	5.284148171	16.8204587	17.05483651	2171.957006	2176.898089	43.92980244	300.9947568	285.1954251	27.04591355	25.84456895	11.61	72.82	67.78431187
15	1/6/2018 22:00	1/6/2018 23:30	4.865700985	16.31683809	16.39881808	2176.156058	2157.676502	44.24304448	300.9516957	286.4042921	26.97731981	25.79284178	12.36	71.66	67.61544545
16	1/7/2018 10:00	1/7/2018 11:30	5.23994892	16.98383493	17.1273529	2205.685802	2153.316332	45.4366472	299.6873391	288.5535204	27.20240888	26.09420264	12.99	74.01	69.24480308
17	1/7/2018 22:00	1/7/2018 23:30	5.323031884	16.15888745	16.31456696	2142.323852	2126.754133	44.98162309	303.3313046	300.2872532	29.37076543	26.75473549	13.7	72.41	65.7321474
18	1/8/2018 10:00	1/8/2018 11:30	5.290324001	17.26426918	17.12302161	2234.196946	2158.669843	44.34026564	289.9052667	296.9954486	29.16575803	26.64561718	12.35	73.41	67.68955455
19	1/8/2018 22:00	1/8/2018 23:30	4.77082264	16.65541516	16.57125829	2203.46548	2164.710719	43.80682993	309.9459531	292.4497952	27.94190801	26.26116091	12.08	72.55	67.18393584
20	1/9/2018 22:00	1/9/2018 23:30	5.213542964	16.38178028	16.27131959	2231.531793	2191.135289	39.71021359	312.637174	308.6196074	27.92103514	27.36632643	14.19	72.15	63.7787888
21	1/10/2018 10:00	1/10/2018 11:30	4.784017217	15.70495521	15.84525608	2123.919857	2080.210603	43.92602763	304.2601169	292.8298549	27.91050246	26.39054352	13.34	70.44	63.43207066
22	1/10/2018 22:00	1/10/2018 23:30	5.420350003	0.366586588	16.17027875	50.55370773	2416.129112	41.46094002	-1.54814595	341.5719751	-0.11882235	27.80948729	12.12	77.67	32.92356411
23	1/13/2018 10:00	1/13/2018 11:30	5.33954843	12.3306934	17.36101111	1542.258727	2183.651076	43.6003012	248.1593871	295.6830237	22.35983998	26.83463676	11.65	73.69	65.99323205
24	1/13/2018 22:00	1/13/2018 23:30	5.462573237	1.383219385	16.53674074	346.3469313	2183.265737	43.07172664	191.2982181	232.4716662	8.758788901	22.26325453	11.1	72.47	42.56006128
25	1/14/2018 10:00	1/14/2018 11:30	5.438206403	0.663312167	17.64947062	62.27302988	2199.00321	38.84832044	12.27717248	308.2647683	0.49348514	27.96585955	12.82	71.85	59.97652215
26	1/15/2018 22:00	1/15/2018 23:30	5.262453158	17.09523645	16.55823644	2232.737151	2178.677256	42.34839908	301.9603282	305.712689	27.53623486	27.53623486	12.08	73.12	64.62717402
27	1/21/2018 22:00	1/21/2018 23:30	4.934982467	16.46911221	16.14137237	2201.945406	2161.489671	39.13128291	306.2679843	294.2834443	26.7585666	25.65167574	10.93	70.18	56.94377425
28	1/22/2018 10:00	1/22/2018 11:30	5.309520643	16.49225771	16.85173607	2247.048553	2187.005661	42.01108274	301.5649394	288.693626	26.52381505	25.33113543	11.53	71.76	66.12947687
29	1/22/2018 22:00	1/22/2018 23:30	4.97787092	16.05617916	15.89137186	2222.265394	2187.629665	38.38426142	303.052029	289.83962	26.4596766	25.14882412	11.91	71.07	59.06812618
30	1/23/2018 10:00	1/23/2018 11:30	5.292556912	4.212861324	17.42155015	685.9182411	2211.423811	40.54267878	107.8996539	287.8875623	8.788141944	25.510648	11	70.92	43.45374144
31	1/23/2018 22:00	1/23/2018 23:30	4.922694268	15.75484275	16.74048934	2165.525019	2185.155028	42.94658509	300.1949144	284.2716031	26.21745305	25.41714815	12.87	71.44	64.45338844
32	1/24/2018 22:00	1/24/2018 23:30	4.814751294	14.77478886	15.77197942	2266.719862	2133.858415	44.32746238	314.0677625	294.867901	26.63057922	25.5943005	14.14	70.59	68.43836534
33	1/25/2018 22:00	1/25/2018 23:30	3.951440095	14.32539494	14.17619571	2082.365933	2044.800907	42.46035553	305.8308573	312.7837051	25.77628684	25.75110214	11.41	71.53	63.64828456
34	1/26/2018 10:00	1/26/2018 11:30	4.39117827	15.14572015	17.1842363	2231.465797	39.21820327	39.21820327	309.6245964	302.2921748	26.50424567	26.27993033	12.92	72.95	59.4001404
35	1/26/2018 22:00	1/26/2018 23:30	5.485904095	12.46868075	0.535070431	8.774071857	289.642454	46.09905789	297.9252869	-304.6106425	24.46964662	2.166029829	12.1	73.36	9.48258961
36	1/27/2018 10:00	1/27/2018 11:30	5.131925699	16.76055677	5.856022388	35.10560081	749.5274132	44.49285417	287.3979579	101.9759875	27.14613544	8.83945974	13.15	72.93	53.86601082
37	1/27/2018 22:00	1/27/2018 23:30	5.423417773	14.74233107	8.686829962	61.43712977	1216.30518	44.11638487	266.6025489	186.3897907	24.01881561	16.49391903	11.63	75.14	48.98302734
38	1/28/2018 10:00	1/28/2018 11:30	5.304902148	16.51124226	16.78956149	87.76865873	2134.763109	45.09139579	304.1757607	294.7739733	28.44104068	25.92939766	11.35	73.32	67.81211888
39	1/28/2018 22:00	1/28/2018 23:30	4.982464545	16.09604496	16.01774089	114.1001877	2138.082977	43.73570144	307.6608683	301.9106454	28.63462606	26.46547374	12.84	72.51	62.39215205
40	1/29/2018 10:00	1/29/2018 11:30	5.446362157	16.58397337	2.409452111	140.4317166	312.7519413	41.49011217	316.6098216	47.85094256	27.38563976	4.055976582	10.97	74.16	66.25700475
41	1/29/2018 22:00	1/29/2018 23:30	4.887436648	15.3200317	15.24164287	166.7632456	2147.681771	40.04321464	298.3866607	294.1353929	27.26645065	24.96955606	11.78	73.22	62.27819466
42	1/30/2018 10:00	1/30/2018 11:30	4.767595305	16.54636948	16.86035498	24.83859065	2177.765566	42.10473446	302.0216424	300.0416148	28.2183236	26.05943729	12.06	73.24	64.89501428
43	1/30/2018 22:00	1/30/2018 23:30	4.35108081	15.75541306	15.83688018	59.61137612	2117.081705	44.50367198	298.2319842	288.0795144	27.26807927	24.97967758	12.25	72.23	64.25757761
44	1/31/2018 10:00	1/31/2018 11:30	5.255134343	15.64996249	17.40322398	94.38416159	2193.167212	40.42443938	305.7830166	281.6304539	28.00113169	25.23991635	11.96	73.1	67.04759575
45	1/31/2018 22:00	1/31/2018 23:30	4.628975346	16.22146889	16.11335105	129.1569471	2120.380825	44.94090311	304.6320331	297.4799616	28.21786567	25.75004742	12.61	72.89	65.21898611
46	2/1/2018 10:00	2/1/2018 11:30	5.440196687	0.453073682	17.28272955	163.9297325	2189.644444	42.19797579	0.244925057	313.1980529	1.0547512	27.98311509	13.36	72.84	57.95381605
47	2/1/2018 22:00	2/1/2018 23:30	5.421067934	0.487825251	17.55637244	198.702518	2268.553281	38.40384516	325.6116066	-13.67463042	32.58451606	28.92552085	12.64	73.29	47.74253944
48	2/2/2018 10:00	2/2/2018 11:30	5.408009979	0.844661779	14.9165783	233.4753035	2665.173799	34.60971453	-36.63237831	348.8119416	-4.205315954	24.41867864	12.23	72.45	47.07948751
49	2/2/2018 22:00	2/2/2018 23:30	4.373888775	15.56501423	15.31643065	268.2480889	2149.176981	40.76943558	304.016661	26.44939577	25.63913404	24.63913404	14.13	71.09	58.8861184
50	2/3/2018 10:00	2/3/2018 11:30	5.136441223	16.05117788	9.990771624	303.0208744	1235.250095	41.6592561	242.8163966	241.5460345	23.89375278	18.24576151	14.55	69.97	57.00618518
51	2/3/2018 22:00	2/3/2018 23:30	4.70228684	16.29568084	16.05353105	337.7996599	1852.761675	42.95412868	277.5127982	269.7582014					

Anexo 3 Flujo de Agua con el Sistema Experto activado

CON SISTEMA EXPERTO				
Fecha	Flujo Línea 1 (m3/h)	Flujo Línea 1 (m3/min)	Flujo Línea 2 (m3/h)	Flujo Línea 2 (m3/min)
	QH_1701_FIT_3131_ABB		QH_1701_FIT_2131_ABB	
3/2/19 14:00	272.9839741	4.549732902	280.6126779	4.676877966
3/2/19 14:01	272.6713368	4.54452228	280.8373871	4.680623119
3/2/19 14:02	273.1244512	4.552074187	281.0620963	4.684368272
3/2/19 14:03	273.6009111	4.560015186	281.2868055	4.688113425
3/2/19 14:04	274.077371	4.567956184	281.4751309	4.691252182
3/2/19 14:05	274.5538309	4.575897182	281.5134377	4.691890628
3/2/19 14:06	274.7792412	4.57965402	281.5354635	4.692257725
3/2/19 14:07	274.4869497	4.574782495	281.5574893	4.692624822
3/2/19 14:08	274.1789774	4.569649623	281.5795152	4.692991919
3/2/19 14:09	273.8710051	4.564516751	281.5317305	4.692195508
3/2/19 14:10	273.5630327	4.559383879	281.1971195	4.686618658
3/2/19 14:11	273.4657857	4.557763095	280.8315246	4.68052541
3/2/19 14:12	273.8027648	4.563379414	280.4659297	4.674432162
3/2/19 14:13	274.1528705	4.569214508	280.1003349	4.668338914
3/2/19 14:14	274.5029761	4.575049601	279.8284809	4.663808015
3/2/19 14:15	274.8530817	4.580884695	279.9195255	4.665325425
3/2/19 14:16	274.9935161	4.583225269	280.0467572	4.667445953
3/2/19 14:17	274.7244798	4.57874133	280.1739888	4.669566648
3/2/19 14:18	274.4447802	4.574079669	280.3012205	4.671687008
3/2/19 14:19	274.1650805	4.569418009	280.4991732	4.674986219
3/2/19 14:20	273.8853809	4.564756349	280.9558422	4.68259737
3/2/19 14:21	273.7174352	4.561957254	281.4363315	4.690605524
3/2/19 14:22	273.767574	4.562792899	281.9168207	4.698613679
3/2/19 14:23	273.8233798	4.563722996	282.39731	4.706621833
3/2/19 14:24	273.8791856	4.564653094	282.6777422	4.711295704
3/2/19 14:25	273.9349915	4.565583191	282.2676957	4.704461595
3/2/19 14:26	273.9217761	4.565362934	281.7993207	4.696655344
3/2/19 14:27	273.7810578	4.56301763	281.3309456	4.688849094
3/2/19 14:28	273.6375327	4.560625546	280.8625706	4.681042843
3/2/19 14:29	273.4940077	4.558233461	280.4866724	4.674777874
3/2/19 14:30	273.3504826	4.555841376	280.4126801	4.673544668
3/2/19 14:31	273.3566861	4.555944769	280.3620787	4.672701312
3/2/19 14:32	273.6240565	4.560400942	280.3114774	4.671857956
3/2/19 14:33	273.896178	4.564936301	280.260876	4.6710146
3/2/19 14:34	274.1682996	4.56947166	280.2284736	4.67047456
3/2/19 14:35	274.4404211	4.574007018	280.2521763	4.670869605
3/2/19 14:36	274.6950825	4.578251375	280.2798368	4.671330614
3/2/19 14:37	274.9193645	4.581989408	280.3074974	4.671791623
3/2/19 14:38	275.1430985	4.585718309	280.335158	4.672252633
3/2/19 14:39	275.3668326	4.58944721	280.3023824	4.671706374
3/2/19 14:40	275.5905666	4.593176111	280.08393	4.668065501
3/2/19 14:41	275.5903693	4.593172822	279.8524547	4.664207579
3/2/19 14:42	275.2008377	4.586680628	279.6209795	4.660349658
3/2/19 14:43	274.8043031	4.580071719	279.3895042	4.656491736
3/2/19 14:44	274.4077686	4.57346281	279.1956897	4.653261495
3/2/19 14:45	274.0112341	4.566853902	279.1111765	4.651852942
3/2/19 14:46	273.6858004	4.561430006	279.0336092	4.650560153
3/2/19 14:47	273.4774017	4.557956696	278.9560419	4.649267365
3/2/19 14:48	273.2707216	4.554512027	278.8784746	4.647974577
3/2/19 14:49	273.0640415	4.551067359	278.907695	4.648461583
3/2/19 14:50	272.8573614	4.547622691	279.2303819	4.653839699
3/2/19 14:51	272.644855	4.544080916	279.5699442	4.65949907
3/2/19 14:52	272.4227653	4.540379421	279.9095065	4.665158442
3/2/19 14:53	272.2005353	4.536675588	280.2490688	4.670817814
3/2/19 14:54	271.9783053	4.532971755	280.6306523	4.677177539
3/2/19 14:55	271.7560753	4.529267922	281.121367	4.685356117

3/2/19 14:56	270.0540676	4.500901127	281.6177049	4.693628415
3/2/19 14:57	265.926483	4.432108051	282.1140428	4.701900713
3/2/19 14:58	261.763864	4.362731066	282.6103806	4.71017301
3/2/19 14:59	257.6012449	4.293354081	283.1063897	4.718439829
3/2/19 15:00	253.4386258	4.223977096	283.6015479	4.726692466
3/2/19 15:01	253.0909834	4.218183057	284.0966626	4.734944377
3/2/19 15:02	258.64172	4.310695334	284.5917773	4.743196288
3/2/19 15:03	264.2590912	4.404318187	285.0868919	4.751448199
3/2/19 15:04	269.8764625	4.497941041	285.4899077	4.758165129
3/2/19 15:05	275.4938337	4.591563894	285.6676146	4.761126909
3/2/19 15:06	278.2788821	4.637981368	285.8350627	4.763917711
3/2/19 15:07	276.9267466	4.615445777	286.0025108	4.766708513
3/2/19 15:08	275.5390585	4.592317641	286.1699589	4.769499315
3/2/19 15:09	274.1513704	4.569189506	285.8795164	4.764658606
3/2/19 15:10	272.7636822	4.546061371	284.5280411	4.742134018
3/2/19 15:11	272.0868535	4.534780891	283.1337162	4.718895269
3/2/19 15:12	272.3881463	4.539802438	281.7393912	4.69565652
3/2/19 15:13	272.6954404	4.544924007	280.3450663	4.672417771
3/2/19 15:14	273.0027345	4.550045576	279.7673335	4.662788891
3/2/19 15:15	273.3100287	4.555167144	280.977998	4.682966634
3/2/19 15:16	274.2027063	4.570045105	282.2518509	4.704197515
3/2/19 15:17	275.8979388	4.598298981	283.5257037	4.725428395
3/2/19 15:18	277.5979861	4.626633102	284.7995566	4.746659276
3/2/19 15:19	279.2980333	4.654967222	285.0532099	4.750886831
3/2/19 15:20	280.9980806	4.683301343	283.0800069	4.718000114
3/2/19 15:21	281.2841893	4.688069822	281.0287685	4.683812808
3/2/19 15:22	279.7459463	4.662432438	278.9775301	4.649625501
3/2/19 15:23	278.2005163	4.636675271	276.9262917	4.615438194
3/2/19 15:24	276.6550862	4.610918104	275.7386966	4.595644943
3/2/19 15:25	275.1096562	4.585160937	276.3325682	4.605542803
3/2/19 15:26	273.9135764	4.565226274	276.9804399	4.616340666
3/2/19 15:27	273.1422368	4.552370614	277.6283117	4.627138529
3/2/19 15:28	272.3718875	4.539531459	278.2761835	4.637936392
3/2/19 15:29	271.6015382	4.526692303	278.6860589	4.644767648
3/2/19 15:30	270.8311889	4.513853148	278.6310934	4.643851556
3/2/19 15:31	270.4880717	4.508134529	278.5640187	4.642733644
3/2/19 15:32	270.6327715	4.510546192	278.4969439	4.641615732
3/2/19 15:33	270.7779989	4.512966649	278.4298692	4.64049782
3/2/19 15:34	270.9232264	4.515387106	278.397898	4.639964967
3/2/19 15:35	271.0684538	4.517807563	278.430688	4.640511467
3/2/19 15:36	271.0033081	4.516721801	278.4648977	4.641081629
3/2/19 15:37	270.7123233	4.511872055	278.4991074	4.64165179
3/2/19 15:38	270.4212682	4.507021136	278.5333171	4.642221952
3/2/19 15:39	270.130213	4.502170217	278.4603944	4.641006574
3/2/19 15:40	269.8391579	4.497319298	278.2004422	4.636674036
3/2/19 15:41	269.8133403	4.496889006	277.9370771	4.632284619
3/2/19 15:42	270.0541953	4.500903256	277.6737121	4.627895202
3/2/19 15:43	270.2950508	4.504917513	277.4103471	4.623505785
3/2/19 15:44	270.5359063	4.508931771	277.4031159	4.623385265
3/2/19 15:45	270.7767618	4.512946029	277.8427284	4.630712139
3/2/19 15:46	271.0936364	4.518227273	278.2904747	4.638174578
3/2/19 15:47	271.4866417	4.524777361	278.738221	4.645637017
3/2/19 15:48	271.879647	4.531327449	279.1859674	4.653099456
3/2/19 15:49	272.2726523	4.537877538	279.4706727	4.657844546
3/2/19 15:50	272.665581	4.54442635	279.4716639	4.657861065
3/2/19 15:51	272.7592356	4.545987261	279.4675364	4.657792274
3/2/19 15:52	272.5722365	4.542870608	279.4634089	4.657723482
3/2/19 15:53	272.3852374	4.539753956	279.4592815	4.657654691
3/2/19 15:54	272.1982382	4.536637304	279.5895714	4.65982619
3/2/19 15:55	272.0118653	4.533531088	279.9406161	4.665676934
3/2/19 15:56	272.4657766	4.541096277	280.2948735	4.671581225

3/2/19 15:57	273.4841452	4.558069086	280.6491309	4.677485516
3/2/19 15:58	274.5025137	4.575041895	281.0033884	4.683389806
3/2/19 15:59	275.5208822	4.592014704	281.3282385	4.688803976
3/2/19 16:00	276.5365749	4.608942916	281.6074312	4.693457187
3/2/19 16:01	276.326747	4.605445783	281.8860984	4.69810164
3/2/19 16:02	275.1024767	4.585041279	282.1647655	4.702746092
3/2/19 16:03	273.8782065	4.564636774	282.4434327	4.707390545
3/2/19 16:04	272.6539362	4.54423227	282.65326	4.710887666
3/2/19 16:05	271.4311986	4.523853309	282.7562826	4.71260471
3/2/19 16:06	270.8840756	4.514734593	282.8580797	4.714301329
3/2/19 16:07	270.8941432	4.514902387	282.9598769	4.715997948
3/2/19 16:08	270.9042108	4.515070181	283.061674	4.717694567
3/2/19 16:09	270.9142785	4.515237975	282.8124056	4.713540093
3/2/19 16:10	270.9263218	4.515438696	282.0198708	4.70033118
3/2/19 16:11	271.4413122	4.524021869	281.2211743	4.687019572
3/2/19 16:12	272.346249	4.539104149	280.4224778	4.673707964
3/2/19 16:13	273.2511858	4.554186429	279.6237813	4.660396356
3/2/19 16:14	274.1561226	4.569268709	279.316175	4.655269583
3/2/19 16:15	275.0584831	4.584308052	279.7242828	4.66207138
3/2/19 16:16	275.3136675	4.588561126	280.1384692	4.668974486
3/2/19 16:17	275.0679438	4.58446573	280.5526555	4.675877592
3/2/19 16:18	274.8222201	4.580370335	280.9668419	4.682780699
3/2/19 16:19	274.5764964	4.57627494	281.0303038	4.683838397
3/2/19 16:20	274.3303215	4.572172025	280.6098369	4.676830614
3/2/19 16:21	274.0067044	4.566778407	280.1863497	4.669772495
3/2/19 16:22	273.6263372	4.560438953	279.7628626	4.662714376
3/2/19 16:23	273.24597	4.5540995	279.3393754	4.655656257
3/2/19 16:24	272.8656028	4.547760046	279.315247	4.655254117
3/2/19 16:25	272.4867946	4.541446577	279.8384036	4.663973393
3/2/19 16:26	272.3734368	4.539557281	280.3648347	4.672747245
3/2/19 16:27	272.4543558	4.540905931	280.8912658	4.681521097
3/2/19 16:28	272.5352748	4.54225458	281.417697	4.69029495
3/2/19 16:29	272.6161938	4.54360323	281.4058581	4.690097635
3/2/19 16:30	272.691748	4.544862466	280.6959631	4.678266052
3/2/19 16:31	272.1234869	4.535391448	279.9832088	4.666386814
3/2/19 16:32	271.1118588	4.51853098	279.2704545	4.654507575
3/2/19 16:33	270.1002307	4.501670512	278.5577002	4.642628336
3/2/19 16:34	269.0886026	4.484810043	278.165187	4.636086451
3/2/19 16:35	268.0914461	4.468190768	278.1876736	4.636461227
3/2/19 16:36	268.4074033	4.473456721	278.2118506	4.636864177
3/2/19 16:37	269.5773313	4.492955522	278.2360277	4.637267128
3/2/19 16:38	270.7472594	4.512454324	278.2602047	4.637670078
3/2/19 16:39	271.9171875	4.531953125	278.6424946	4.644041577
3/2/19 16:40	273.074418	4.551240299	279.4611033	4.657685056
3/2/19 16:41	273.333405	4.555556749	280.2807513	4.671345856
3/2/19 16:42	273.0414164	4.550690273	281.1003993	4.685006655
3/2/19 16:43	272.7494278	4.545823797	281.9200473	4.698667455
3/2/19 16:44	272.4574392	4.54095732	281.7400924	4.695668206
3/2/19 16:45	272.1738333	4.536230555	280.4152181	4.673586969
3/2/19 16:46	272.475163	4.541252716	279.089047	4.651484117
3/2/19 16:47	273.1340543	4.552234239	277.7628759	4.629381266
3/2/19 16:48	273.7929457	4.563215761	276.4367048	4.607278414
3/2/19 16:49	274.451837	4.574197284	276.6211818	4.610353029
3/2/19 16:50	275.0989285	4.584982141	278.5310778	4.64218463
3/2/19 16:51	275.0829919	4.584716531	280.4428491	4.674047485
3/2/19 16:52	274.6845563	4.578075939	282.3546204	4.705910339
3/2/19 16:53	274.2861208	4.571435347	284.2663916	4.737773194
3/2/19 16:54	273.8876853	4.564794755	284.946753	4.749112551
3/2/19 16:55	273.5045234	4.558408723	284.309294	4.738488234
3/2/19 16:56	273.8339382	4.563898971	283.6714594	4.727857656
3/2/19 16:57	274.552339	4.575872316	283.0336247	4.717227078

3/2/19 16:58	275.2707397	4.587845661	282.39579	4.7065965
3/2/19 16:59	275.9891404	4.599819007	282.0667504	4.701112506
3/2/19 17:00	276.6917565	4.611529275	282.0482798	4.700804663
3/2/19 17:01	276.7758498	4.612930829	282.0298098	4.70049683
3/2/19 17:02	276.5410127	4.609016879	282.0113398	4.700188997
3/2/19 17:03	276.3061757	4.605102929	281.9928698	4.699881164
3/2/19 17:04	276.0713387	4.601188979	282.1281218	4.702135363
3/2/19 17:05	275.8362932	4.597271553	282.4178552	4.706964253
3/2/19 17:06	275.5931574	4.593219289	282.7075888	4.711793147
3/2/19 17:07	275.3458642	4.589097736	282.9973225	4.716622041
3/2/19 17:08	275.098571	4.584976183	283.2870561	4.721450935
3/2/19 17:09	274.8512778	4.58085463	282.6652377	4.711087294
3/2/19 17:10	274.6102989	4.576838316	281.130042	4.685500701
3/2/19 17:11	274.5784841	4.576308068	279.5948462	4.659914103
3/2/19 17:12	274.6482263	4.577470438	278.0596503	4.634327505
3/2/19 17:13	274.7179685	4.578632809	276.5247741	4.608746235
3/2/19 17:14	274.7877107	4.579795179	276.2216029	4.603693382
3/2/19 17:15	274.8499398	4.58083233	277.0729757	4.617882929
3/2/19 17:16	274.6958383	4.578263971	277.9243486	4.632072476
3/2/19 17:17	274.4422681	4.574037802	278.7757214	4.646262023
3/2/19 17:18	274.188698	4.569811634	279.6282747	4.660471245
3/2/19 17:19	273.9351279	4.565585465	281.6976743	4.694961239
3/2/19 17:20	273.6854989	4.561424981	284.8403598	4.74733933
3/2/19 17:21	273.5350418	4.558917363	287.9830452	4.79971742
3/2/19 17:22	273.4276839	4.557128065	291.1257307	4.852095511
3/2/19 17:23	273.320326	4.555338767	294.2677897	4.904463162
3/2/19 17:24	273.2129681	4.553549468	296.7719132	4.946198554
3/2/19 17:25	273.3468272	4.555780453	298.7137936	4.978563226
3/2/19 17:26	279.5033758	4.658389596	300.6556739	5.010927898
3/2/19 17:27	288.2684561	4.804474269	302.5975542	5.043292569
3/2/19 17:28	297.0335365	4.950558941	304.5380362	5.075633937
3/2/19 17:29	305.7986168	5.096643614	305.1152781	5.085254634
3/2/19 17:30	314.2906298	5.238177163	304.4943975	5.074906625
3/2/19 17:31	316.7656812	5.279428019	303.873517	5.064558617
3/2/19 17:32	316.7774375	5.279623958	303.2526365	5.054210608
3/2/19 17:33	316.7891938	5.279819897	302.6322146	5.043870243
3/2/19 17:34	316.8009501	5.280015836	302.4537549	5.040895916
3/2/19 17:35	316.8128953	5.280214922	302.6634296	5.044390494
3/2/19 17:36	316.8285578	5.280475964	302.8731043	5.047885071
3/2/19 17:37	316.8456618	5.28076103	303.082779	5.051379649
3/2/19 17:38	316.8627658	5.281046096	303.2919758	5.054866263
3/2/19 17:39	316.8798697	5.281331162	303.2833347	5.054722245
3/2/19 17:40	316.9028089	5.281713482	303.0944538	5.05157423
3/2/19 17:41	317.0285841	5.283809735	302.905573	5.048426216
3/2/19 17:42	317.192044	5.286534066	302.7166921	5.045278202
3/2/19 17:43	317.3555038	5.289258397	302.5280317	5.042133862
3/2/19 17:44	317.5189637	5.291982729	302.4390939	5.040651566
3/2/19 17:45	317.6444687	5.294074478	302.4326049	5.040543416
3/2/19 17:46	317.1053141	5.285088569	302.426116	5.040435266
3/2/19 17:47	316.3234065	5.272056775	302.419627	5.040327116
3/2/19 17:48	315.5414989	5.259024982	302.41188	5.040198
3/2/19 17:49	314.7595913	5.245993189	301.8510249	5.030850416
3/2/19 17:50	314.0511943	5.234186572	300.8341263	5.013902105
3/2/19 17:51	314.5027501	5.241712501	299.8172277	4.996953795
3/2/19 17:52	315.3545942	5.255909904	298.8003291	4.980005485
3/2/19 17:53	316.2064384	5.270107307	297.7855794	4.963092989
3/2/19 17:54	317.0582826	5.284304709	297.7084443	4.961807404
3/2/19 17:55	317.8122433	5.296870721	298.4038025	4.973396708
3/2/19 17:56	317.1619363	5.286032271	299.0991607	4.984986012
3/2/19 17:57	316.0528733	5.267547888	299.7945189	4.996575316
3/2/19 17:58	314.9438103	5.249063506	300.4885292	5.008142153

3/2/19 17:59	313.8347474	5.230579123	300.8332576	5.013887627
3/3/19 15:00	282.038696	4.700644934	272.5699693	4.542832821
3/3/19 15:01	282.1165365	4.701942275	271.5015994	4.525026657
3/3/19 15:02	282.194377	4.703239617	270.4590534	4.50765089
3/3/19 15:03	282.2722175	4.704536958	269.675904	4.4945984
3/3/19 15:04	282.1865035	4.703108392	268.9598394	4.482663989
3/3/19 15:05	281.9020269	4.698367115	268.2437747	4.470729578
3/3/19 15:06	281.617089	4.69361815	267.5277101	4.458795168
3/3/19 15:07	281.332151	4.688869184	266.897289	4.44828815
3/3/19 15:08	281.0472131	4.684120218	267.0633347	4.451055579
3/3/19 15:09	281.1716593	4.686194321	267.4239082	4.457065137
3/3/19 15:10	281.7644368	4.696073946	267.7844817	4.463074696
3/3/19 15:11	282.3577354	4.705962256	268.1450552	4.469084254
3/3/19 15:12	282.951034	4.715850567	268.4882492	4.474804154
3/3/19 15:13	283.5443326	4.725738877	268.6699708	4.477832846
3/3/19 15:14	283.7061119	4.728435198	268.8122829	4.480204715
3/3/19 15:15	283.4048887	4.723414812	268.954595	4.482576584
3/3/19 15:16	283.1035233	4.718392055	269.0969072	4.484948453
3/3/19 15:17	282.8021579	4.713369298	269.3862174	4.48977029
3/3/19 15:18	282.5007925	4.708346541	271.0365479	4.517275798
3/3/19 15:19	282.4802786	4.708004644	273.0181762	4.550302936
3/3/19 15:20	282.7599528	4.712665879	274.9998045	4.583330074
3/3/19 15:21	283.0397094	4.71732849	276.9814327	4.616357212
3/3/19 15:22	283.319466	4.7219911	278.713208	4.645220133
3/3/19 15:23	283.5992226	4.726653711	278.3037902	4.638396504
3/3/19 15:24	283.6748025	4.727913374	277.403651	4.623394183
3/3/19 15:25	283.5460148	4.725766913	276.5035117	4.608391862
3/3/19 15:26	283.4172271	4.723620451	275.6033725	4.593389542
3/3/19 15:27	283.2884394	4.721473989	274.7856378	4.57976063
3/3/19 15:28	283.1596874	4.719328123	274.6242521	4.577070869
3/3/19 15:29	283.1746712	4.719577853	274.60457	4.576742834
3/3/19 15:30	283.3245707	4.722076179	274.5848879	4.576414798
3/3/19 15:31	283.4744702	4.724574504	274.5652058	4.576086763
3/3/19 15:32	283.6243697	4.727072829	274.5026382	4.575043969
3/3/19 15:33	283.7742836	4.729571393	274.1224556	4.568707594
3/3/19 15:34	283.9384878	4.732308129	273.6778287	4.561297144
3/3/19 15:35	284.1152715	4.735254525	273.2332017	4.553886695
3/3/19 15:36	284.2920552	4.738200921	272.7885747	4.546476246
3/3/19 15:37	284.468839	4.741147317	272.3609903	4.539349839
3/3/19 15:38	284.6456722	4.744094536	272.0592266	4.534320444
3/3/19 15:39	284.8698318	4.74783053	271.7829216	4.52971536
3/3/19 15:40	285.1355352	4.75225892	271.5066166	4.525110277
3/3/19 15:41	285.4012386	4.756687311	271.2303116	4.520505193
3/3/19 15:42	285.6669421	4.761115701	270.8878516	4.514797527
3/3/19 15:43	285.9312641	4.765521068	270.0574086	4.50095681
3/3/19 15:44	285.5955231	4.759925384	269.1283009	4.485471682
3/3/19 15:45	284.7656106	4.74609351	268.1991932	4.469986554
3/3/19 15:46	283.9356981	4.732261635	267.2700855	4.454501426
3/3/19 15:47	283.1057856	4.71842976	266.4571046	4.440951743
3/3/19 15:48	282.2778285	4.704630475	266.4452544	4.44075424
3/3/19 15:49	281.9548406	4.699247343	266.5859766	4.44309961
3/3/19 15:50	282.024089	4.700401484	266.7266988	4.445444979
3/3/19 15:51	282.0933375	4.701555625	266.8674209	4.447790349
3/3/19 15:52	282.1625859	4.702709766	266.9881343	4.449802238
3/3/19 15:53	282.231437	4.703857284	266.9709272	4.449515453
3/3/19 15:54	282.2331406	4.703885677	266.9274738	4.44879123
3/3/19 15:55	282.18576	4.703096	266.8840204	4.448067007
3/3/19 15:56	282.1383794	4.702306323	266.840567	4.447342784
3/3/19 15:57	282.0909987	4.701516646	266.8104055	4.446840092
3/3/19 15:58	282.045073	4.700751216	266.8660731	4.447767885
3/3/19 15:59	282.1755578	4.702925964	266.9371087	4.448951811

3/3/19 16:00	282.4277685	4.707129474	267.0081442	4.450135737
3/3/19 16:01	282.6799791	4.711332985	267.0791798	4.451319663
3/3/19 16:02	282.9321897	4.715536495	267.206389	4.453439816
3/3/19 16:03	283.1850718	4.719751196	267.6960275	4.461600458
3/3/19 16:04	283.4989114	4.724981857	268.2505094	4.470841823
3/3/19 16:05	283.8523989	4.730873315	268.8049913	4.480083189
3/3/19 16:06	284.2058864	4.736764773	269.3594733	4.489324555
3/3/19 16:07	284.5593739	4.742656231	269.8499818	4.497499697
3/3/19 16:08	284.9104863	4.748508105	269.9289756	4.49881626
3/3/19 16:09	285.0493458	4.75082243	269.9345547	4.498909245
3/3/19 16:10	285.0506318	4.750843864	269.9401338	4.499002231
3/3/19 16:11	285.0519178	4.750865297	269.945713	4.499095216
3/3/19 16:12	285.0532039	4.750886731	269.9174628	4.49862438
3/3/19 16:13	285.0576858	4.75096143	269.685966	4.494766099
3/3/19 16:14	285.2852788	4.754754647	269.4205495	4.490342491
3/3/19 16:15	285.649272	4.760821199	269.155133	4.485918883
3/3/19 16:16	286.0132651	4.766887752	268.8897165	4.481495276
3/3/19 16:17	286.3772583	4.772954304	268.6270735	4.477117892
3/3/19 16:18	286.7276775	4.778794625	268.3800867	4.473001445
3/3/19 16:19	286.3091139	4.771818565	268.1355518	4.468925863
3/3/19 16:20	285.445899	4.75743165	267.8910169	4.464850281
3/3/19 16:21	284.5826841	4.743044735	267.6464819	4.460774699
3/3/19 16:22	283.7194692	4.72865782	267.5969046	4.45994841
3/3/19 16:23	282.8627481	4.714379136	268.6470038	4.477450063
3/3/19 16:24	282.3729334	4.706215556	269.8691802	4.497819669
3/3/19 16:25	282.0951165	4.701585274	271.0913565	4.518189275
3/3/19 16:26	281.8172995	4.696954992	272.3135328	4.538558881
3/3/19 16:27	281.5394826	4.69232471	273.4290443	4.557150738
3/3/19 16:28	281.2615687	4.687692812	273.9446291	4.565743818
3/3/19 16:29	280.978224	4.682970401	274.3666186	4.572776976
3/3/19 16:30	280.6917492	4.67819582	274.7886081	4.579810135
3/3/19 16:31	280.4052744	4.67342124	275.2105976	4.586843294
3/3/19 16:32	280.1187996	4.66864666	275.5123289	4.591872148
3/3/19 16:33	279.843829	4.664063817	275.1382081	4.585636801
3/3/19 16:34	280.2114566	4.670190943	274.658733	4.57764555
3/3/19 16:35	280.9491758	4.682486264	274.1792579	4.569654299
3/3/19 16:36	281.6868951	4.694781585	273.6997829	4.561663048
3/3/19 16:37	282.4246144	4.707076906	273.3940552	4.556567586
3/3/19 16:38	283.1620301	4.719367169	274.0069727	4.566782879
3/3/19 16:39	283.8853189	4.731421981	274.7540607	4.579234346
3/3/19 16:40	284.6009016	4.743348361	275.5011487	4.591685812
3/3/19 16:41	285.3164844	4.75527474	276.2482368	4.604137279
3/3/19 16:42	286.0320672	4.767201119	277.1292675	4.618821125
3/3/19 16:43	286.7329757	4.778882929	278.7179422	4.645299036
3/3/19 16:44	286.7525372	4.779208954	280.4098834	4.673498057
3/3/19 16:45	286.4007156	4.77334526	282.1018246	4.701697077
3/3/19 16:46	286.048894	4.767481566	283.7937658	4.729896097
3/3/19 16:47	285.6970724	4.761617873	285.2279582	4.753799303
3/3/19 16:48	285.3411871	4.755686452	285.3042456	4.75507076
3/3/19 16:49	284.7981355	4.746635591	285.1829822	4.753049703
3/3/19 16:50	284.1533221	4.735888702	285.0617188	4.751028647
3/3/19 16:51	283.5085087	4.725141812	284.9404554	4.74900759
3/3/19 16:52	282.8636953	4.714394922	284.6062008	4.743436679
3/3/19 16:53	282.2350536	4.703917559	283.1507009	4.719178349
3/3/19 16:54	282.3496271	4.705827118	281.532217	4.692203617
3/3/19 16:55	282.8680063	4.714466771	279.9137331	4.665228884
3/3/19 16:56	283.3863855	4.723106425	278.2952491	4.638254152
3/3/19 16:57	283.9047647	4.731746078	277.1435222	4.619058703
3/3/19 16:58	284.3904488	4.739840813	278.3061313	4.638435521
3/3/19 16:59	283.6013554	4.726689257	279.7833932	4.663056553
3/3/19 17:00	282.1560705	4.702601175	281.2606551	4.687677585

3/3/19 17:01	280.7107856	4.678513094	282.737917	4.712298616
3/3/19 17:02	279.2655007	4.654425012	283.4813526	4.72468921
3/3/19 17:03	277.8202077	4.630336796	280.5926348	4.676543914
3/3/19 17:04	276.3746007	4.606243344	277.2110875	4.620184792
3/3/19 17:05	274.928832	4.5821472	273.8295402	4.56382567
3/3/19 17:06	273.4830634	4.558051056	270.4479929	4.507466549
3/3/19 17:07	272.0372947	4.533954912	267.9368092	4.465613487
3/3/19 17:08	270.6545014	4.510908357	269.7260115	4.495433524
3/3/19 17:09	271.7043972	4.528406621	272.0975402	4.534959003
3/3/19 17:10	274.0025239	4.566708732	274.4690689	4.574484481
3/3/19 17:11	276.3006506	4.605010843	276.8405976	4.61400996
3/3/19 17:12	278.5987772	4.643312954	278.5815058	4.643025097
3/3/19 17:13	280.8565033	4.680941722	277.2120519	4.620200865
3/3/19 17:14	281.5566837	4.692611395	275.4222626	4.590371043
3/3/19 17:15	281.4582233	4.690970388	273.6324733	4.560541221
3/3/19 17:16	281.3597628	4.68932938	271.842684	4.5307114
3/3/19 17:17	281.2613023	4.687688372	270.3725325	4.506208874
3/3/19 17:18	281.1761058	4.686268429	270.3903264	4.50650544
3/3/19 17:19	281.5312158	4.692186931	270.5960543	4.509934239
3/3/19 17:20	282.1002816	4.701671359	270.8017822	4.513363037
3/3/19 17:21	282.6693473	4.711155788	271.0075102	4.516791836
3/3/19 17:22	283.238413	4.720640217	271.1353781	4.518922968
3/3/19 17:23	283.7937694	4.729896156	270.9010915	4.515018192
3/3/19 17:24	283.8948595	4.731580992	270.6211071	4.510351786
3/3/19 17:25	283.7753612	4.729589353	270.3411228	4.505685379
3/3/19 17:26	283.6558629	4.727597715	270.0611384	4.501018973
3/3/19 17:27	283.5363645	4.725606076	269.8404369	4.497340615
3/3/19 17:28	283.4203968	4.72367328	269.8797191	4.497995318
3/3/19 17:29	283.4063447	4.723439079	269.9495309	4.499158849
3/3/19 17:30	283.4392013	4.723986688	270.0193428	4.50032238
3/3/19 17:31	283.4720578	4.724534297	270.0891546	4.501485911
3/3/19 17:32	283.5049144	4.725081906	270.2169214	4.503615356
3/3/19 17:33	283.5581249	4.725968748	270.5839801	4.509733002
3/3/19 17:34	284.1978922	4.736631536	270.9770554	4.516284256
3/3/19 17:35	285.1074494	4.751790823	271.3701306	4.52283551
3/3/19 17:36	286.0170066	4.76695011	271.7632058	4.529386764
3/3/19 17:37	286.9265638	4.782109396	272.1432812	4.535721354
3/3/19 17:38	287.7933609	4.796556014	272.4698229	4.541163714
3/3/19 17:39	287.4354842	4.790591403	272.7905643	4.546509405
3/3/19 17:40	286.5157148	4.775261913	273.1113057	4.551855095
3/3/19 17:41	285.5959453	4.759932422	273.4320471	4.557200786
3/3/19 17:42	284.6761759	4.744602932	273.829665	4.56382775
3/3/19 17:43	283.7889158	4.729815263	274.5436156	4.575726927
3/3/19 17:44	283.8311787	4.730519646	275.2918048	4.588196747
3/3/19 17:45	284.2996267	4.738327111	276.0399941	4.600666568
3/3/19 17:46	284.7680746	4.746134577	276.7881833	4.613136388
3/3/19 17:47	285.2365225	4.753942042	277.0350165	4.617250275
3/3/19 17:48	285.7204549	4.762007581	275.331831	4.588863851
3/3/19 17:49	286.5941334	4.77656889	273.4329389	4.557215649
3/3/19 17:50	287.637211	4.793953517	271.5340468	4.525567447
3/3/19 17:51	288.6802887	4.811338144	269.6351547	4.493919246
3/3/19 17:52	289.7233663	4.828722772	268.5095066	4.475158444
3/3/19 17:53	290.6812006	4.844686677	270.3890619	4.506484365
3/3/19 17:54	289.4967966	4.82494661	272.5699043	4.542831738
3/3/19 17:55	287.3819234	4.789698723	274.7507466	4.57917911
3/3/19 17:56	285.2670502	4.754450836	276.931589	4.615526483
3/3/19 17:57	283.1521769	4.719202949	278.3674823	4.639458038
3/3/19 17:58	281.1039573	4.685065955	276.9155206	4.615258676
3/3/19 17:59	280.721237	4.678687283	275.1750502	4.586250836
3/3/19 18:00	281.0601182	4.684335303	273.4345798	4.557242996
3/3/19 18:01	281.3989994	4.689983323	271.6941093	4.528235156

3/3/19 18:02	281.7378806	4.695631343	270.3973559	4.506622598
3/3/19 18:03	282.0989895	4.701649825	270.7224087	4.512040145
3/3/19 18:04	282.9492877	4.715821462	271.196593	4.519943216
3/3/19 18:05	283.9997428	4.733329047	271.6707773	4.527846288
3/3/19 18:06	285.0501979	4.750836632	272.1449615	4.535749359
3/3/19 18:07	286.100653	4.768344216	272.5522737	4.542537895
3/3/19 18:08	287.0770139	4.784616898	272.7284873	4.545474788
3/3/19 18:09	286.5941217	4.776568695	272.8851408	4.54808568
3/3/19 18:10	285.5452212	4.759087019	273.0417943	4.550696572
3/3/19 18:11	284.4963206	4.741605343	273.1984478	4.553307464
3/3/19 18:12	283.44742	4.724123667	273.2621127	4.554368544
3/3/19 18:13	282.438063	4.707301051	273.0046674	4.550077789
3/3/19 18:14	282.2064345	4.703440574	272.7200746	4.545334576
3/3/19 18:15	282.2762628	4.70460438	272.4354818	4.540591363
3/3/19 18:16	282.3460912	4.705768186	272.150889	4.53584815
3/3/19 18:17	282.4159195	4.706931992	271.9214047	4.532023411
3/3/19 18:18	282.5204807	4.708674678	271.8817466	4.531362444
3/3/19 18:19	283.3047341	4.721745569	271.8580762	4.530967936
3/3/19 18:20	284.3517888	4.73919648	271.8344057	4.530573428
3/3/19 18:21	285.3988434	4.75664739	271.8107352	4.530178921
3/3/19 18:22	286.4458981	4.774098301	271.991184	4.5331864
3/3/19 18:23	287.4050045	4.790083409	272.8742085	4.547903475
3/3/19 18:24	286.6455797	4.777426329	273.8163376	4.563605627
3/3/19 18:25	285.2221785	4.753702975	274.7584667	4.579307778
3/3/19 18:26	283.7987773	4.729979622	275.7005958	4.59500993
3/3/19 18:27	282.3753761	4.706256269	276.1853036	4.603088393
3/3/19 18:28	281.0349618	4.68391603	275.1806437	4.586344062
3/3/19 18:29	281.1554756	4.685924594	274.0610783	4.567684638
3/3/19 18:30	281.81105	4.696850833	272.9415128	4.549025213
3/3/19 18:31	282.4666243	4.707777072	271.8219474	4.530365789
3/3/19 18:32	283.1221986	4.718703311	271.0549853	4.517583089
3/3/19 18:33	283.7713209	4.729522014	271.3721285	4.522868809
3/3/19 18:34	284.3070046	4.738450076	271.7654037	4.529423395
3/3/19 18:35	284.8011701	4.746686169	272.1586788	4.53597798
3/3/19 18:36	285.2953357	4.754922261	272.5519539	4.542532565
3/3/19 18:37	285.7895012	4.763158354	272.5194516	4.541990861
3/3/19 18:38	286.2294606	4.77049101	271.2487645	4.520812742
3/3/19 18:39	285.8076038	4.763460063	269.8991132	4.498318553
3/3/19 18:40	285.0870855	4.751451424	268.5494619	4.475824365
3/3/19 18:41	284.3665671	4.739442785	267.1998105	4.453330176
3/3/19 18:42	283.6460488	4.727434146	266.3518649	4.439197748
3/3/19 18:43	282.9731032	4.716218386	266.882439	4.44804065
3/3/19 18:44	283.0555836	4.717593059	267.4922575	4.458204291
3/3/19 18:45	283.399677	4.723327949	268.1020759	4.468367932
3/3/19 18:46	283.7437704	4.729062839	268.7118944	4.478531573
3/3/19 18:47	284.0878637	4.734797729	269.5893202	4.493155336
3/3/19 18:48	284.4114591	4.740190986	271.2002062	4.520003436
3/3/19 18:49	284.4104869	4.740174782	272.8530569	4.547550949
3/3/19 18:50	284.2972923	4.738288205	274.5059077	4.575098461
3/3/19 18:51	284.1840977	4.736401629	276.1587584	4.602645974
3/3/19 18:52	284.0709031	4.734515052	277.0917009	4.618195015
3/3/19 18:53	283.9610778	4.73268463	276.1598678	4.602664464
3/3/19 18:54	283.9045311	4.731742185	275.1324502	4.585540837
3/3/19 18:55	283.8663924	4.731106541	274.1050326	4.56841721
3/3/19 18:56	283.8282538	4.730470896	273.077615	4.551293583
3/3/19 18:57	283.7901151	4.729835251	272.1755336	4.536258893
3/3/19 18:58	283.7571593	4.729285989	271.5809582	4.526349304
3/3/19 18:59	283.7988269	4.729980449	271.0004707	4.516674512
3/3/19 19:00	283.8649248	4.73108208	270.4199833	4.506999721
3/3/19 19:01	283.9310226	4.73218371	269.8394958	4.497324929
3/3/19 19:02	283.9971204	4.733285341	269.8385539	4.497309231

3/3/19 19:03	284.0640991	4.734401651	271.1815336	4.519692227
3/3/19 19:04	284.143743	4.73572905	272.5788788	4.542981313
3/3/19 19:05	284.2275302	4.737125504	273.9762239	4.566270399
3/3/19 19:06	284.3113175	4.738521958	275.3735691	4.589559485
3/3/19 19:07	284.3951047	4.739918412	276.5983418	4.609972363
3/3/19 19:08	284.4670448	4.741117413	277.4242656	4.62373776
3/3/19 19:09	284.3695966	4.739493277	278.2341777	4.637236294
3/3/19 19:10	284.2169225	4.736948709	279.0440897	4.650734829
3/3/19 19:11	284.0642484	4.73440414	279.8540018	4.664233363
3/3/19 19:12	283.9115742	4.731859571	280.3612596	4.67268766
3/3/19 19:13	283.7452925	4.729088208	280.2074075	4.67012345
3/3/19 19:14	283.4019478	4.723365796	280.0303461	4.667172436
3/3/19 19:15	283.0040907	4.716734846	279.8532848	4.664221413
3/3/19 19:16	282.6062337	4.710103895	279.6762234	4.66127039
3/3/19 19:17	282.2083766	4.703472944	279.634044	4.6605674
3/3/19 19:18	281.8330744	4.697217907	279.8708976	4.664514961
3/3/19 19:19	281.7272618	4.695454363	280.1162749	4.668604581
3/3/19 19:20	281.7000084	4.69500014	280.3616521	4.672694202
3/3/19 19:21	281.672755	4.694545917	280.6070293	4.676783822
3/3/19 19:22	281.6455017	4.694091694	280.673654	4.677894233
3/3/19 19:23	281.6955136	4.694925227	280.3908904	4.673181506
3/3/19 19:24	282.6676436	4.711127393	280.0990056	4.668316759
3/3/19 19:25	283.9083782	4.731806304	279.8071208	4.663452013
3/3/19 19:26	285.1491129	4.752485216	279.515236	4.658587266
3/3/19 19:27	286.3898476	4.773164127	278.9885366	4.649808944
3/3/19 19:28	287.5763654	4.792939423	278.0044133	4.633406889
3/3/19 19:29	288.1192023	4.801986705	277.0084643	4.616807738
3/3/19 19:30	288.4751827	4.807919712	276.0125152	4.600208587
3/3/19 19:31	288.8311631	4.813852719	275.0165661	4.583609436
3/3/19 19:32	289.1871436	4.819785726	274.5969312	4.57661552
3/3/19 19:33	289.41802	4.823633666	275.2377141	4.587295236
3/3/19 19:34	288.2864244	4.80477374	275.9015497	4.598359161
3/3/19 19:35	286.7816918	4.779694863	276.5653852	4.609423087
3/3/19 19:36	285.2769591	4.754615985	277.2292207	4.620487012
3/3/19 19:37	283.7722265	4.729537108	277.1945778	4.61990963
3/3/19 19:38	282.4010528	4.706684213	275.9408977	4.599014961
3/3/19 19:39	282.3772872	4.706288121	274.6649961	4.577749935
3/3/19 19:40	282.7030831	4.711718052	273.3890945	4.556484908
3/3/19 19:41	283.028879	4.717147983	272.1131929	4.535219882
3/3/19 19:42	283.3546748	4.722577913	271.3839581	4.523065969
3/3/19 19:43	283.6593619	4.727656031	271.5551905	4.525919841
3/3/19 19:44	283.767509	4.729458484	271.7396814	4.528994691
3/3/19 19:45	283.8276103	4.730460172	271.9241724	4.53206954
3/3/19 19:46	283.8877117	4.731461861	272.1086634	4.53514439
3/3/19 19:47	283.947813	4.73246355	272.3826761	4.539711268
3/3/19 19:48	284.0071745	4.733452908	272.8041485	4.546735808
3/3/19 19:49	284.0596477	4.734327462	273.2277921	4.553796535
3/3/19 19:50	284.1104371	4.735173952	273.6514358	4.560857263
3/3/19 19:51	284.1612265	4.736020442	274.0750794	4.56791799
3/3/19 19:52	284.2120159	4.736866932	274.40263	4.573377166
3/3/19 19:53	284.2294232	4.737157053	274.5720069	4.576200115
3/3/19 19:54	283.9363104	4.73227184	274.7390613	4.578984355
3/3/19 19:55	283.567343	4.726122383	274.9061156	4.581768594
3/3/19 19:56	283.1983756	4.719972926	275.07317	4.584552833
3/3/19 19:57	282.8294082	4.713823469	275.0706293	4.584510488
3/3/19 19:58	282.4958894	4.708264824	274.7891389	4.579818982
3/3/19 19:59	282.4917753	4.708196255	274.5035646	4.57505941
		Línea 1	Línea 2	
Consumo total en m3 por línea		2532.674792	2501.857569	
Consumo total en m3			5034.532361	

Anexo 4 Flujo de Agua sin el Sistema Experto

SIN SISTEMA EXPERTO				
Fecha	Flujo Línea 1 (m3/h)	Flujo Línea 1 (m3/min)	Flujo Línea 2 (m3/h)	Flujo Línea 2 (m3/min)
	QH_1701_FIT_3131_ABB		QH_1701_FIT_2131_ABB	
3/3/19 7:00	297.4606014	4.957676691	275.6112122	4.593520203
3/3/19 7:01	297.0334231	4.950557052	275.6000178	4.59333363
3/3/19 7:02	296.6027744	4.943379573	275.5888234	4.593147056
3/3/19 7:03	296.1721257	4.936202095	275.5763359	4.592938931
3/3/19 7:04	295.7414769	4.929024616	275.5542566	4.592570943
3/3/19 7:05	295.613815	4.926896917	275.5302284	4.592170473
3/3/19 7:06	295.9292021	4.932153369	275.5062002	4.591770004
3/3/19 7:07	296.2484177	4.937473629	275.4821721	4.591369535
3/3/19 7:08	296.5676333	4.942793889	275.4633997	4.591056662
3/3/19 7:09	296.8868489	4.948114149	275.4834489	4.591390815
3/3/19 7:10	297.0727371	4.951212284	275.5113568	4.591855946
3/3/19 7:11	297.0643485	4.951072475	275.5392646	4.592321077
3/3/19 7:12	297.0543115	4.950905191	275.5671725	4.592786208
3/3/19 7:13	297.0442745	4.950737908	275.6034311	4.593390518
3/3/19 7:14	297.0342374	4.950570624	275.6971023	4.594951705
3/3/19 7:15	296.9949174	4.94991529	275.8016733	4.596694555
3/3/19 7:16	296.9154069	4.948590115	275.9062443	4.598437405
3/3/19 7:17	296.8356537	4.947260895	276.0108153	4.600180255
3/3/19 7:18	296.7559004	4.945931674	276.0994902	4.60165817
3/3/19 7:19	296.6761472	4.944602453	276.0857797	4.601429662
3/3/19 7:20	296.6847063	4.944745104	276.0537809	4.600896349
3/3/19 7:21	296.8075967	4.946793278	276.0217821	4.600363035
3/3/19 7:22	296.9309493	4.948849155	275.9897833	4.599829721
3/3/19 7:23	297.054302	4.950905033	275.990623	4.599843717
3/3/19 7:24	297.1776546	4.95296091	276.1890071	4.603150118
3/3/19 7:25	297.262145	4.954369084	276.4204008	4.607006681
3/3/19 7:26	297.2993307	4.954988846	276.6517946	4.610863244
3/3/19 7:27	297.3364048	4.955606747	276.8831884	4.614719807
3/3/19 7:28	297.3734789	4.956224648	277.0888616	4.618147693
3/3/19 7:29	297.4105529	4.956842549	277.1402622	4.619004369
3/3/19 7:30	297.4291319	4.957152198	277.1659592	4.619432653
3/3/19 7:31	297.4252819	4.957088032	277.1916562	4.619860937
3/3/19 7:32	297.421381	4.957023017	277.2173533	4.620289221
3/3/19 7:33	297.4174801	4.956958002	277.2243285	4.620405476
3/3/19 7:34	297.4135792	4.956892987	277.126259	4.618770983
3/3/19 7:35	297.4485199	4.957475331	277.0118425	4.616864042
3/3/19 7:36	297.5276944	4.958794907	276.8974261	4.614957102
3/3/19 7:37	297.6069149	4.960115249	276.7830097	4.613050161
3/3/19 7:38	297.6861355	4.961435591	276.6822993	4.611371654
3/3/19 7:39	297.765356	4.962755933	276.6539399	4.610898998
3/3/19 7:40	297.8626309	4.964377182	276.6361291	4.610602152
3/3/19 7:41	297.979236	4.966320601	276.6183183	4.610305306
3/3/19 7:42	298.0958467	4.968264112	276.6005076	4.610008459
3/3/19 7:43	298.2124574	4.970207623	276.6070075	4.610116791
3/3/19 7:44	298.3290681	4.972151135	276.7417396	4.612362326
3/3/19 7:45	298.4299774	4.973832957	276.895152	4.6149192
3/3/19 7:46	298.5151435	4.975252391	277.0485644	4.617476074
3/3/19 7:47	298.6003095	4.976671825	277.2019769	4.620032948
3/3/19 7:48	298.6854755	4.978091259	277.3232122	4.622053537
3/3/19 7:49	298.7706282	4.979510471	277.2845915	4.621409859
3/3/19 7:50	298.7971482	4.97995247	277.2241887	4.620403145
3/3/19 7:51	298.7684824	4.979474706	277.1637859	4.619396432
3/3/19 7:52	298.7398166	4.978996943	277.1033831	4.618389719

3/3/19 7:53	298.7111507	4.978519179	277.0605945	4.617676575
3/3/19 7:54	298.6824612	4.97804102	277.1052473	4.618420788
3/3/19 7:55	298.6290996	4.97715166	277.1618046	4.61936341
3/3/19 7:56	298.5539628	4.975899379	277.218362	4.620306033
3/3/19 7:57	298.4788259	4.974647098	277.2749194	4.621248656
3/3/19 7:58	298.4036891	4.973394818	277.229699	4.620494983
3/3/19 7:59	298.3283707	4.972139512	276.6806231	4.611343719
3/3/19 8:00	298.0748704	4.967914507	276.0631668	4.60105278
3/3/19 8:01	297.6646999	4.961078332	275.4457105	4.590761841
3/3/19 8:02	297.2545294	4.954242157	274.8282541	4.580470902
3/3/19 8:03	296.8443589	4.947405982	274.3018483	4.571697472
3/3/19 8:04	296.43393	4.9405655	274.2258526	4.570430876
3/3/19 8:05	295.9082523	4.931804205	274.2109313	4.570182189
3/3/19 8:06	295.28742	4.921457	274.1960101	4.569933502
3/3/19 8:07	294.6665877	4.911109795	274.1810889	4.569684815
3/3/19 8:08	294.0457554	4.900762591	274.2198088	4.570330147
3/3/19 8:09	293.4267348	4.890445579	274.5087127	4.575145212
3/3/19 8:10	293.2814344	4.888023907	274.8292883	4.580488138
3/3/19 8:11	293.5046861	4.891744769	275.1498638	4.585831064
3/3/19 8:12	293.7279378	4.895465631	275.4704394	4.59117399
3/3/19 8:13	293.9511895	4.899186492	275.7482401	4.595804001
3/3/19 8:14	294.1679041	4.902798401	275.8266853	4.597111422
3/3/19 8:15	293.2694445	4.887824075	275.8799158	4.597998596
3/3/19 8:16	291.5545686	4.85924281	275.9331462	4.598885771
3/3/19 8:17	289.8396928	4.830661546	275.9863767	4.599772945
3/3/19 8:18	288.1248169	4.802080281	276.3123519	4.605205865
3/3/19 8:19	286.4146004	4.773576674	277.9060203	4.631767006
3/3/19 8:20	285.4816391	4.758027319	279.6595085	4.660991808
3/3/19 8:21	285.1156768	4.751927947	281.4129967	4.690216611
3/3/19 8:22	284.7497145	4.745828575	283.1664848	4.719441414
3/3/19 8:23	284.3837522	4.739729204	284.6082033	4.743470054
3/3/19 8:24	284.0203004	4.733671673	284.6019193	4.743365322
3/3/19 8:25	283.9545639	4.732576066	284.4132458	4.740220763
3/3/19 8:26	284.0933866	4.734889777	284.2245723	4.737076204
3/3/19 8:27	284.2322093	4.737203488	284.0358987	4.733931646
3/3/19 8:28	284.371032	4.7395172	283.8491338	4.730818896
3/3/19 8:29	284.5088783	4.741814639	283.6707341	4.727845569
3/3/19 8:30	284.5588922	4.742648203	283.4933161	4.724888602
3/3/19 8:31	284.5518926	4.742531543	283.3158982	4.721931636
3/3/19 8:32	284.544893	4.742414884	283.1384802	4.71897467
3/3/19 8:33	284.5378935	4.742298225	282.9843512	4.716405854
3/3/19 8:34	284.5286321	4.742143868	282.9322252	4.715537087
3/3/19 8:35	284.3605129	4.739341882	282.8920582	4.714867636
3/3/19 8:36	284.0951278	4.734918797	282.8518912	4.714198186
3/3/19 8:37	283.8297427	4.730495712	282.8117241	4.713528735
3/3/19 8:38	283.5643576	4.726072626	282.7436511	4.712394185
3/3/19 8:39	283.3020651	4.721701085	282.5536806	4.709228009
3/3/19 8:40	283.2539851	4.720899751	282.3494664	4.70582444
3/3/19 8:41	283.3366056	4.72227676	282.1452522	4.70242087
3/3/19 8:42	283.4192261	4.723653768	281.941038	4.699017301
3/3/19 8:43	283.5018466	4.725030776	281.7547125	4.695911875
3/3/19 8:44	283.5847157	4.726411928	281.6464653	4.694107756
3/3/19 8:45	283.6847599	4.728079332	281.5473325	4.692455542
3/3/19 8:46	283.7952761	4.729921269	281.4481997	4.690803329
3/3/19 8:47	283.9057924	4.731763206	281.3490669	4.689151115
3/3/19 8:48	284.0163086	4.733605143	281.2968736	4.688281227
3/3/19 8:49	284.1251015	4.735418358	281.4380137	4.690633562
3/3/19 8:50	284.1368853	4.735614756	281.6001058	4.693335097
3/3/19 8:51	284.0926758	4.73487793	281.7621979	4.696036632

3/3/19 8:52	284.0484663	4.734141105	281.92429	4.698738167
3/3/19 8:53	284.0042567	4.733404279	282.0391447	4.700652412
3/3/19 8:54	283.9603171	4.732671952	281.9706732	4.699511221
3/3/19 8:55	283.9315347	4.732192245	281.8838583	4.698064305
3/3/19 8:56	283.9114948	4.731858247	281.7970434	4.69661739
3/3/19 8:57	283.8914549	4.731524249	281.7102285	4.695170474
3/3/19 8:58	283.8714151	4.731190251	281.6122664	4.693537774
3/3/19 8:59	283.8502537	4.730837562	281.4733886	4.691223144
3/3/19 9:00	283.7766545	4.729610908	281.3307255	4.688845424
3/3/19 9:01	283.6744104	4.72790684	281.1880623	4.686467705
3/3/19 9:02	283.5721663	4.726202772	281.0453991	4.684089985
3/3/19 9:03	283.4699222	4.724498704	280.7852788	4.679754646
3/3/19 9:04	283.3715959	4.722859931	280.0943316	4.66823886
3/3/19 9:05	283.4560458	4.72426743	279.3635665	4.656059441
3/3/19 9:06	283.6402708	4.727337847	278.6328013	4.643880022
3/3/19 9:07	283.8244958	4.730408264	277.9020362	4.631700603
3/3/19 9:08	284.0087209	4.733478681	277.4155071	4.623591784
3/3/19 9:09	284.1906051	4.736510085	277.8225108	4.63037518
3/3/19 9:10	284.2641605	4.737736008	278.3117898	4.63852983
3/3/19 9:11	284.2787299	4.737978832	278.8010688	4.646684481
3/3/19 9:12	284.2932993	4.738221655	279.2903479	4.654839131
3/3/19 9:13	284.3078687	4.738464479	279.7123902	4.66187317
3/3/19 9:14	284.322256	4.738704267	279.8886363	4.664810605
3/3/19 9:15	284.3295785	4.738826308	280.0422748	4.667371246
3/3/19 9:16	284.3332705	4.738887842	280.1959132	4.669931887
3/3/19 9:17	284.3369626	4.738949376	280.3495517	4.672492528
3/3/19 9:18	284.3406546	4.73901091	280.4890459	4.674817431
3/3/19 9:19	284.3438898	4.73906483	280.5796058	4.676326763
3/3/19 9:20	284.3318713	4.738864522	280.666017	4.67776695
3/3/19 9:21	284.3124248	4.738540413	280.7524282	4.679207137
3/3/19 9:22	284.2929782	4.738216303	280.8388394	4.680647324
3/3/19 9:23	284.2735316	4.737892193	280.8649038	4.681081729
3/3/19 9:24	284.2484041	4.737473402	280.6823467	4.678039112
3/3/19 9:25	284.0339463	4.733899105	280.4821227	4.674702045
3/3/19 9:26	283.7273523	4.728789205	280.2818987	4.671364978
3/3/19 9:27	283.4207583	4.723679304	280.0816747	4.668027911
3/3/19 9:28	283.1141642	4.718569404	279.9584109	4.665973515
3/3/19 9:29	282.8207718	4.713679529	280.1005368	4.668342281
3/3/19 9:30	282.9644216	4.716073694	280.265052	4.6710842
3/3/19 9:31	283.3202239	4.722003732	280.4295672	4.67382612
3/3/19 9:32	283.6760262	4.727933771	280.5940824	4.67656804
3/3/19 9:33	284.0318285	4.733863809	280.7683704	4.679472839
3/3/19 9:34	284.382636	4.7397106	280.9763332	4.682938887
3/3/19 9:35	284.5907488	4.743179147	281.1871338	4.68645223
3/3/19 9:36	284.7334586	4.745557644	281.3979344	4.689965573
3/3/19 9:37	284.8761684	4.74793614	281.6087349	4.693478915
3/3/19 9:38	285.0188782	4.750314637	281.7596739	4.695994565
3/3/19 9:39	285.1498096	4.752496827	281.715309	4.69525515
3/3/19 9:40	284.9845083	4.749741805	281.6558276	4.694263794
3/3/19 9:41	284.6904963	4.744841605	281.5963463	4.693272438
3/3/19 9:42	284.3964843	4.739941405	281.536865	4.692281083
3/3/19 9:43	284.1024723	4.735041205	281.5143725	4.691906209
3/3/19 9:44	283.8182898	4.730304831	281.6124691	4.693541152
3/3/19 9:45	283.7809387	4.729682311	281.7198881	4.695331468
3/3/19 9:46	283.8507609	4.730846015	281.827307	4.697121784
3/3/19 9:47	283.9205832	4.73200972	281.934726	4.6989121
3/3/19 9:48	283.9904054	4.733173424	282.0043389	4.700072315
3/3/19 9:49	284.1353544	4.735589241	281.9510042	4.699183404
3/3/19 9:50	286.1560634	4.769267723	281.8882024	4.698136707

3/3/19 9:51	288.9891967	4.816486611	281.8254006	4.697090011
3/3/19 9:52	291.82233	4.863705499	281.7625988	4.696043314
3/3/19 9:53	294.6554632	4.910924387	281.6974404	4.69495734
3/3/19 9:54	297.3293215	4.955488692	281.6246236	4.693743726
3/3/19 9:55	296.0325972	4.933876619	281.5512178	4.692520297
3/3/19 9:56	293.0173107	4.883621845	281.477812	4.691296867
3/3/19 9:57	290.0020243	4.833367071	281.4044062	4.690073437
3/3/19 9:58	286.9867378	4.783112297	281.3460703	4.689101171
3/3/19 9:59	284.0580024	4.734300041	281.3341208	4.688902013
3/3/19 10:00	283.0456854	4.71742809	281.3254351	4.688757252
3/3/19 10:01	282.819712	4.713661867	281.3167494	4.68861249
3/3/19 10:02	282.5937386	4.709895644	281.3080637	4.688467729
3/3/19 10:03	282.3677652	4.70612942	281.421035	4.690350583
3/3/19 10:04	282.2647706	4.704412843	281.9081996	4.698469993
3/3/19 10:05	284.8808061	4.748013434	282.4216599	4.707027665
3/3/19 10:06	288.6117548	4.810195913	282.9351202	4.715585337
3/3/19 10:07	292.3427035	4.872378391	283.4485806	4.72414301
3/3/19 10:08	296.0736522	4.93456087	284.1826601	4.736377668
3/3/19 10:09	299.5737863	4.992896439	285.5936123	4.759893539
3/3/19 10:10	297.9978406	4.966630677	287.0519287	4.784198812
3/3/19 10:11	294.3456681	4.905761135	288.5102451	4.808504084
3/3/19 10:12	290.6934955	4.844891592	289.9685614	4.832809357
3/3/19 10:13	287.041323	4.784022049	291.1118058	4.85186343
3/3/19 10:14	283.5124016	4.725206694	291.2890547	4.854817578
3/3/19 10:15	282.6900847	4.711501411	291.3987865	4.856646442
3/3/19 10:16	282.9740759	4.716234598	291.5085184	4.858475307
3/3/19 10:17	283.2580671	4.720967785	291.6182503	4.860304172
3/3/19 10:18	283.5420583	4.725700972	291.6858688	4.861431147
3/3/19 10:19	283.8127301	4.730212168	291.6312565	4.860520942
3/3/19 10:20	283.8202095	4.730336825	291.5688759	4.859481265
3/3/19 10:21	283.7254352	4.728757254	291.5064953	4.858441588
3/3/19 10:22	283.630661	4.727177683	291.4441146	4.85740191
3/3/19 10:23	283.5358867	4.725598112	291.410022	4.856833701
3/3/19 10:24	283.443678	4.724061301	291.4579725	4.857632875
3/3/19 10:25	283.396547	4.723275783	291.5111303	4.858518839
3/3/19 10:26	283.3659086	4.722765143	291.5642882	4.859404803
3/3/19 10:27	283.3352702	4.722254503	291.617446	4.860290766
3/3/19 10:28	283.3046318	4.721743863	291.6996026	4.861660043
3/3/19 10:29	283.2783846	4.721306411	291.8614698	4.86435783
3/3/19 10:30	283.3220251	4.722033752	292.0279226	4.867132044
3/3/19 10:31	283.389899	4.723164983	292.1943755	4.869906258
3/3/19 10:32	283.4577728	4.724296213	292.3608283	4.872680472
3/3/19 10:33	283.5256466	4.725427443	292.4779635	4.874632725
3/3/19 10:34	283.5770368	4.726283947	292.466989	4.874449817
3/3/19 10:35	283.366411	4.722773516	292.4494105	4.874156842
3/3/19 10:36	283.064994	4.7177499	292.4318321	4.873863868
3/3/19 10:37	282.7635771	4.712726284	292.4142536	4.873570893
3/3/19 10:38	282.4621601	4.707702669	292.0914019	4.868190031
3/3/19 10:39	282.2258065	4.703763442	290.9758286	4.849597144
3/3/19 10:40	283.0229361	4.717048935	289.8194186	4.830323644
3/3/19 10:41	284.1780344	4.736300574	288.6630087	4.811050145
3/3/19 10:42	285.3331328	4.755552213	287.5065987	4.791776645
3/3/19 10:43	286.4882312	4.774803853	286.6302649	4.777171081
3/3/19 10:44	287.5855236	4.79309206	286.4806863	4.774678105
3/3/19 10:45	287.851258	4.797520966	286.3684911	4.772808184
3/3/19 10:46	287.8448971	4.797414951	286.2562959	4.770938264
3/3/19 10:47	287.8385361	4.797308936	286.1441006	4.769068344
3/3/19 10:48	287.8321752	4.79720292	286.1486006	4.769143344
3/3/19 10:49	287.8236225	4.797060375	286.4550506	4.774250843

3/3/19 10:50	287.783693	4.796394884	286.7769444	4.779615741
3/3/19 10:51	287.7335261	4.795558768	287.0988383	4.784980639
3/3/19 10:52	287.6833591	4.794722652	287.4207322	4.790345537
3/3/19 10:53	287.6331921	4.793886535	287.6307047	4.793845079
3/3/19 10:54	287.5803183	4.793005304	287.5669524	4.79278254
3/3/19 10:55	287.4887419	4.791479031	287.4907444	4.791512407
3/3/19 10:56	287.3845472	4.789742453	287.4145365	4.790242275
3/3/19 10:57	287.2803525	4.788005875	287.3383285	4.788972142
3/3/19 10:58	287.1761579	4.786269298	287.2674145	4.787790242
3/3/19 10:59	287.0913136	4.784855227	287.2087643	4.786812738
3/4/19 14:00	276.4272602	4.607121003	296.6315265	4.943858776
3/4/19 14:01	276.9356141	4.615593568	296.0660995	4.934434992
3/4/19 14:02	276.783595	4.613059917	295.5006725	4.925011208
3/4/19 14:03	276.4029722	4.606716203	294.9352455	4.915587424
3/4/19 14:04	276.0223493	4.600372489	294.3596531	4.905994218
3/4/19 14:05	275.6417265	4.594028775	293.2112391	4.886853985
3/4/19 14:06	275.2868791	4.588114652	291.7320986	4.862201644
3/4/19 14:07	275.3024249	4.588373749	290.2529581	4.837549302
3/4/19 14:08	275.4390913	4.590651521	288.7738176	4.81289696
3/4/19 14:09	275.5757576	4.592929294	287.3154446	4.788590744
3/4/19 14:10	275.712424	4.595207066	286.821696	4.7803616
3/4/19 14:11	275.847399	4.59745665	286.8537973	4.780896622
3/4/19 14:12	275.9602607	4.599337679	286.8858986	4.781431644
3/4/19 14:13	276.066294	4.6011049	286.9179999	4.781966666
3/4/19 14:14	276.1723273	4.602872121	286.9461555	4.782435925
3/4/19 14:15	276.2783605	4.604639342	286.8203396	4.780338994
3/4/19 14:16	276.3800766	4.606334609	286.6152443	4.776920738
3/4/19 14:17	276.4255699	4.607092831	286.410149	4.773502483
3/4/19 14:18	276.4537449	4.607562416	286.2050537	4.770084228
3/4/19 14:19	276.48192	4.608032	285.9995238	4.766658731
3/4/19 14:20	276.510095	4.608501584	285.7771598	4.762952664
3/4/19 14:21	276.5521041	4.609201735	285.5461492	4.759102486
3/4/19 14:22	276.7740548	4.612900913	285.3151385	4.755252309
3/4/19 14:23	277.0513914	4.61752319	285.0841279	4.751402132
3/4/19 14:24	277.328728	4.622145467	284.8635957	4.747726595
3/4/19 14:25	277.6060646	4.626767744	284.9896926	4.74982821
3/4/19 14:26	277.8612759	4.631021265	285.284005	4.754733417
3/4/19 14:27	277.852223	4.630870384	285.5783174	4.759638623
3/4/19 14:28	277.7661521	4.629435868	285.8726298	4.76454383
3/4/19 14:29	277.6800811	4.628001352	286.1622353	4.769370588
3/4/19 14:30	277.5940102	4.626566836	286.3164642	4.77194107
3/4/19 14:31	277.548554	4.625809233	286.4084753	4.773474589
3/4/19 14:32	277.9479846	4.632466409	286.5004864	4.775008107
3/4/19 14:33	278.4697425	4.641162374	286.5924975	4.776541626
3/4/19 14:34	278.9915004	4.649858339	286.6789474	4.777982457
3/4/19 14:35	279.5132583	4.658554304	286.6256201	4.777093668
3/4/19 14:36	280.0131184	4.666885306	286.5115779	4.775192965
3/4/19 14:37	280.2743139	4.671238565	286.3975357	4.773292261
3/4/19 14:38	280.4701123	4.674501871	286.2834935	4.771391558
3/4/19 14:39	280.6659107	4.677765178	286.1715991	4.769526652
3/4/19 14:40	280.8617091	4.681028485	286.1132761	4.768554602
3/4/19 14:41	281.0474979	4.684124964	286.0781454	4.76796909
3/4/19 14:42	281.1328813	4.685548022	286.0430146	4.767383577
3/4/19 14:43	281.1923243	4.686538738	286.0078839	4.766798065
3/4/19 14:44	281.2517672	4.687529454	285.9726079	4.766170132
3/4/19 14:45	281.3112102	4.688520169	285.9341296	4.765568827
3/4/19 14:46	281.3779379	4.689632299	285.8943398	4.764905663
3/4/19 14:47	281.5123221	4.691872034	285.85455	4.7642425
3/4/19 14:48	281.6632136	4.694386893	285.8147601	4.763579336

3/4/19 14:49	281.8141052	4.696901753	285.7761002	4.762935004
3/4/19 14:50	281.9649967	4.699416612	285.7597773	4.762662955
3/4/19 14:51	282.0962736	4.70160456	285.7521346	4.762535576
3/4/19 14:52	282.0455704	4.700759507	285.7444919	4.762408198
3/4/19 14:53	281.9505006	4.699175011	285.7368491	4.762280819
3/4/19 14:54	281.8554309	4.697590514	285.7302086	4.762170143
3/4/19 14:55	281.7603611	4.696006018	285.7432806	4.76238801
3/4/19 14:56	281.6775707	4.694626178	285.7639939	4.762733232
3/4/19 14:57	281.7083195	4.695138658	285.7847072	4.763078454
3/4/19 14:58	281.7666777	4.696111296	285.8054205	4.763423675
3/4/19 14:59	281.825036	4.697083933	285.8269732	4.763782886
3/4/19 15:00	281.8833942	4.698056571	285.8649252	4.764415421
3/4/19 15:01	281.9191745	4.698652908	285.909213	4.765153551
3/4/19 15:02	281.7464041	4.695773402	285.9535009	4.765891681
3/4/19 15:03	281.5229601	4.692049335	285.9977887	4.766629811
3/4/19 15:04	281.299516	4.688325267	286.0369763	4.767282938
3/4/19 15:05	281.076072	4.684601199	285.9869084	4.766448473
3/4/19 15:06	280.8529361	4.680882268	285.9042528	4.76507088
3/4/19 15:07	280.6324462	4.677207437	285.8215972	4.763693287
3/4/19 15:08	280.4125636	4.673542727	285.7389416	4.762315694
3/4/19 15:09	280.1926811	4.669878018	285.6667629	4.761112715
3/4/19 15:10	279.9727985	4.666213308	285.7604414	4.762674023
3/4/19 15:11	279.7850489	4.663084148	285.9114601	4.765191002
3/4/19 15:12	279.872904	4.6645484	286.0624789	4.767707981
3/4/19 15:13	280.0239647	4.667066079	286.2134976	4.77022496
3/4/19 15:14	280.1750255	4.669583759	286.3546936	4.772578227
3/4/19 15:15	280.3260863	4.671701438	286.3548329	4.772580548
3/4/19 15:16	280.4630266	4.674383777	286.3088644	4.771814407
3/4/19 15:17	280.487148	4.6747858	286.2628959	4.771048265
3/4/19 15:18	280.4868489	4.674780816	286.2169274	4.770282124
3/4/19 15:19	280.4865499	4.674775831	286.1782671	4.769637785
3/4/19 15:20	280.4862508	4.674770846	286.2352918	4.770588197
3/4/19 15:21	280.4967029	4.674945048	286.3218891	4.772031485
3/4/19 15:22	280.5929718	4.67654953	286.4084864	4.773474774
3/4/19 15:23	280.7078015	4.678463358	286.4950838	4.774918063
3/4/19 15:24	280.8226312	4.680377186	286.5765637	4.776276061
3/4/19 15:25	280.9374609	4.682291014	286.5968236	4.776613727
3/4/19 15:26	281.0229272	4.683715454	286.5992228	4.776653713
3/4/19 15:27	280.8747581	4.681245969	286.601622	4.776693699
3/4/19 15:28	280.6761916	4.677936526	286.6040211	4.776733686
3/4/19 15:29	280.477625	4.674627084	286.6013698	4.776689497
3/4/19 15:30	280.2790585	4.671317641	286.5386201	4.775643668
3/4/19 15:31	280.1180394	4.668633989	286.4583977	4.774306628
3/4/19 15:32	280.2551342	4.670918903	286.3781753	4.772969588
3/4/19 15:33	280.45642	4.674273666	286.2979529	4.771632548
3/4/19 15:34	280.6577057	4.677628429	286.2032052	4.77005342
3/4/19 15:35	280.8589915	4.680983192	285.9499036	4.765831727
3/4/19 15:36	281.0317708	4.683862846	285.6531104	4.760885173
3/4/19 15:37	280.9932606	4.68321701	285.3563171	4.755938619
3/4/19 15:38	280.9118499	4.681864165	285.0595239	4.750992065
3/4/19 15:39	280.8304392	4.68050732	284.799233	4.746653884
3/4/19 15:40	280.7490285	4.679150476	284.9067443	4.748445739
3/4/19 15:41	280.6586537	4.677644229	285.1095906	4.75182651
3/4/19 15:42	280.5063768	4.675106281	285.3124369	4.755207282
3/4/19 15:43	280.3423004	4.672371673	285.5152832	4.758588054
3/4/19 15:44	280.1782239	4.669637065	285.6948512	4.761580854
3/4/19 15:45	280.0141475	4.666902458	285.6579192	4.760965319
3/4/19 15:46	279.8826435	4.664710725	285.5681063	4.759468438
3/4/19 15:47	279.9751429	4.666252381	285.4782934	4.757971557

3/4/19 15:48	280.1101803	4.668503004	285.3884805	4.756474675
3/4/19 15:49	280.2452177	4.670753628	285.3182312	4.755303853
3/4/19 15:50	280.3802551	4.673004251	285.4290731	4.757151218
3/4/19 15:51	280.4998612	4.674997687	285.583988	4.759733134
3/4/19 15:52	280.5204075	4.675340125	285.738903	4.76231505
3/4/19 15:53	280.523316	4.675388599	285.8938179	4.764896965
3/4/19 15:54	280.5262244	4.675437074	285.9881619	4.766469364
3/4/19 15:55	280.5291329	4.675485548	285.5635035	4.759391725
3/4/19 15:56	280.5457922	4.675763203	285.019914	4.7503319
3/4/19 15:57	280.6451931	4.677419886	284.4763246	4.741272076
3/4/19 15:58	280.758424	4.679307066	283.9327351	4.732212252
3/4/19 15:59	280.8716548	4.681194247	283.4457172	4.724095287
3/4/19 16:00	280.9848857	4.683081428	283.4097235	4.723495392
3/4/19 16:01	281.1123439	4.685205732	283.4711827	4.724519711
3/4/19 16:02	281.3253431	4.688755719	283.5326418	4.72554403
3/4/19 16:03	281.5526286	4.692543811	283.5941009	4.726568349
3/4/19 16:04	281.7799142	4.696331903	283.6353727	4.727256212
3/4/19 16:05	282.0071997	4.700119995	283.5269953	4.725449921
3/4/19 16:06	282.1919276	4.703198793	283.388229	4.723137149
3/4/19 16:07	282.1215304	4.702025506	283.2494626	4.720824377
3/4/19 16:08	282.0086491	4.700144152	283.1106963	4.718511606
3/4/19 16:09	281.8957679	4.698262798	282.9809752	4.716349587
3/4/19 16:10	281.7828866	4.696381443	282.9180228	4.71530038
3/4/19 16:11	281.6321755	4.693869592	282.8685787	4.714476311
3/4/19 16:12	281.2691103	4.687818505	282.8191346	4.713652243
3/4/19 16:13	280.8729832	4.681216386	282.7696905	4.712828175
3/4/19 16:14	280.476856	4.674614267	282.8054078	4.713423464
3/4/19 16:15	280.0807289	4.668012149	283.4268688	4.723781146
3/4/19 16:16	279.9405893	4.665676489	284.159576	4.735992933
3/4/19 16:17	281.1510617	4.685851029	284.8922832	4.74820472
3/4/19 16:18	282.5583401	4.709305669	285.6249904	4.760416506
3/4/19 16:19	283.9656185	4.732760308	286.2117079	4.770195132
3/4/19 16:20	285.3728969	4.756214948	285.8586929	4.764311548
3/4/19 16:21	286.5104808	4.775174679	285.3379192	4.755631987
3/4/19 16:22	286.3122587	4.771870978	284.8171455	4.746952426
3/4/19 16:23	285.9326442	4.765544071	284.2963719	4.738272865
3/4/19 16:24	285.5530298	4.759217164	283.8583644	4.730972741
3/4/19 16:25	285.1734154	4.752890257	283.9184476	4.731974127
3/4/19 16:26	284.8639581	4.747732636	284.0617953	4.734363254
3/4/19 16:27	284.8817972	4.748029953	284.2051429	4.736752382
3/4/19 16:28	284.9410822	4.749018036	284.3484905	4.739141509
3/4/19 16:29	285.0003671	4.750006119	284.5403606	4.742339343
3/4/19 16:30	285.0596521	4.750994202	285.0063197	4.750105328
3/4/19 16:31	285.1009933	4.751683221	285.5152324	4.758587207
3/4/19 16:32	285.0635896	4.751059827	286.0241452	4.767069087
3/4/19 16:33	285.0169313	4.750282188	286.533058	4.775550967
3/4/19 16:34	284.9702729	4.749504549	286.9233269	4.782055448
3/4/19 16:35	284.9236146	4.748726909	286.685894	4.778098234
3/4/19 16:36	284.874801	4.74791335	286.3567198	4.772611996
3/4/19 16:37	284.8165633	4.746942722	286.0275455	4.767125759
3/4/19 16:38	284.7572231	4.745953718	285.6983713	4.761639521
3/4/19 16:39	284.6978828	4.744964713	285.4253547	4.757089246
3/4/19 16:40	284.6385425	4.743975709	285.4486122	4.757476871
3/4/19 16:41	284.6179896	4.743633159	285.5150386	4.758583976
3/4/19 16:42	284.757116	4.745951934	285.5814649	4.759691082
3/4/19 16:43	284.9135364	4.748558941	285.6478913	4.760798188
3/4/19 16:44	285.0699569	4.751165948	285.7302566	4.762170943
3/4/19 16:45	285.2263773	4.753772955	285.8914044	4.764856739
3/4/19 16:46	285.377045	4.756284083	286.0632249	4.767720415

3/4/19 16:47	285.5053479	4.758422465	286.2350455	4.770584092
3/4/19 16:48	285.6314077	4.760523462	286.4068661	4.773447768
3/4/19 16:49	285.7574675	4.762624458	286.5432901	4.775721501
3/4/19 16:50	285.8835273	4.764725455	286.5145928	4.775243213
3/4/19 16:51	285.9344807	4.765574678	286.4649875	4.774416458
3/4/19 16:52	285.7101419	4.761835698	286.4153823	4.773589704
3/4/19 16:53	285.4603857	4.757673095	286.365777	4.77276295
3/4/19 16:54	285.2106296	4.753510493	286.297323	4.77162205
3/4/19 16:55	284.9608734	4.749347891	286.1410066	4.769016777
3/4/19 16:56	284.7575462	4.745959103	285.9735748	4.766226247
3/4/19 16:57	284.723809	4.745396816	285.8061431	4.763435718
3/4/19 16:58	284.7056517	4.745094195	285.6387113	4.760645188
3/4/19 16:59	284.6874944	4.744791574	285.5456633	4.759094389
3/4/19 17:00	284.6693372	4.744488953	285.7984088	4.763306814
3/4/19 17:01	284.6509477	4.744182461	286.0947586	4.768245976
3/4/19 17:02	284.631758	4.743862633	286.3911083	4.773185138
3/4/19 17:03	284.6125009	4.743541681	286.687458	4.7781243
3/4/19 17:04	284.5932438	4.743220729	286.9419987	4.782366645
3/4/19 17:05	284.5739866	4.742899777	287.0023226	4.783372043
3/4/19 17:06	284.5929051	4.743215084	287.0381776	4.783969626
3/4/19 17:07	284.7362668	4.745604447	287.0740326	4.78456721
3/4/19 17:08	284.8892471	4.748154119	287.1098876	4.785164793
3/4/19 17:09	285.0422275	4.750703791	287.1241169	4.785401948
3/4/19 17:10	285.1952078	4.753253463	287.0435417	4.784059029
3/4/19 17:11	285.3155708	4.755259513	286.9518388	4.782530647
3/4/19 17:12	285.3355343	4.755592238	286.8601359	4.781002266
3/4/19 17:13	285.3484336	4.755807226	286.7684331	4.779473884
3/4/19 17:14	285.3613328	4.756022214	286.6951866	4.77825311
3/4/19 17:15	285.3742321	4.756237201	286.7027915	4.778379859
3/4/19 17:16	285.3748497	4.756247495	286.7198778	4.778664629
3/4/19 17:17	285.3377907	4.755629845	286.736964	4.7789494
3/4/19 17:18	285.2980958	4.754968263	286.7540503	4.779234171
3/4/19 17:19	285.2584009	4.754306681	286.7565131	4.779275218
3/4/19 17:20	285.218706	4.753645099	286.695087	4.77825145
3/4/19 17:21	285.1483896	4.752473161	286.6261939	4.777103231
3/4/19 17:22	284.9893387	4.749822312	286.5573007	4.775955012
3/4/19 17:23	284.8246644	4.74707774	286.4884076	4.774806793
3/4/19 17:24	284.65999	4.744333167	286.3956487	4.773260811
3/4/19 17:25	284.4953157	4.741588594	286.1986976	4.769978293
3/4/19 17:26	284.3770258	4.739617097	285.9895801	4.766493002
3/4/19 17:27	284.3860114	4.739766857	285.7804626	4.76300771
3/4/19 17:28	284.4022947	4.740038246	285.5713451	4.759522418
3/4/19 17:29	284.4185781	4.740309634	285.4422417	4.757370695
3/4/19 17:30	284.4348614	4.740581023	285.6430749	4.760717915
3/4/19 17:31	284.4047483	4.740079138	285.8797177	4.764661961
3/4/19 17:32	284.2543186	4.737571976	286.1163604	4.768606007
3/4/19 17:33	284.0977077	4.734961795	286.3530032	4.772550053
3/4/19 17:34	283.9410968	4.732351613	286.3624561	4.772707601
3/4/19 17:35	283.7844859	4.729741431	285.435771	4.75726285
3/4/19 17:36	283.6926447	4.728210746	284.4075784	4.740126306
3/4/19 17:37	283.768197	4.72946995	283.3793857	4.722989762
3/4/19 17:38	283.8522905	4.730871509	282.3511931	4.705853218
3/4/19 17:39	283.9363841	4.732273068	281.4840983	4.691401639
3/4/19 17:40	284.0204776	4.733674627	281.2444117	4.687406861
3/4/19 17:41	284.0289132	4.73381522	281.0678055	4.684463425
3/4/19 17:42	283.8516522	4.73086087	280.8911993	4.681519988
3/4/19 17:43	283.6658767	4.727764611	280.7145931	4.678576552
3/4/19 17:44	283.4801011	4.724668352	280.5242878	4.675404797
3/4/19 17:45	283.2943256	4.721572093	280.2806684	4.671344473

3/4/19 17:46	283.2342622	4.720571036	280.0316939	4.667194898
3/4/19 17:47	283.4819822	4.724699703	279.7827194	4.663045323
3/4/19 17:48	283.7437399	4.729062331	279.5337449	4.658895748
3/4/19 17:49	284.0054976	4.73342496	279.4042534	4.656737556
3/4/19 17:50	284.2672553	4.737787588	279.7385527	4.662309211
3/4/19 17:51	284.3462981	4.739104969	280.1192699	4.668654498
3/4/19 17:52	284.0025011	4.733375019	280.499987	4.674999784
3/4/19 17:53	283.6416785	4.727361309	280.8807042	4.68134507
3/4/19 17:54	283.2808559	4.721347599	281.128984	4.685483067
3/4/19 17:55	282.9200333	4.715333888	280.8635854	4.681059757
3/4/19 17:56	282.7824031	4.713040052	280.5468305	4.675780508
3/4/19 17:57	283.1339686	4.718899476	280.2300755	4.670501259
3/4/19 17:58	283.5028521	4.725047535	279.9133206	4.665222009
3/4/19 17:59	283.8717356	4.731195593	279.6605025	4.661008375
3/4/19 18:00	284.2406191	4.737343652	279.6422428	4.660704047
3/4/19 18:01	284.4520127	4.740866878	279.645667	4.660761117
3/4/19 18:02	284.3374738	4.738957897	279.6490912	4.660818187
3/4/19 18:03	284.2129683	4.736882804	279.6525155	4.660875258
3/4/19 18:04	284.0884627	4.734807712	279.7407751	4.662346252
3/4/19 18:05	283.9639571	4.732732619	280.1400237	4.669000395
3/4/19 18:06	283.8027413	4.730045689	280.5679903	4.676133172
3/4/19 18:07	283.5657418	4.726095697	280.995957	4.683265949
3/4/19 18:08	283.3264403	4.722107338	281.4239236	4.690398726
3/4/19 18:09	283.0871387	4.718118978	281.6978889	4.694964816
3/4/19 18:10	282.8478371	4.714130619	281.4087415	4.690145692
3/4/19 18:11	282.8886728	4.714811214	281.0677829	4.684463049
3/4/19 18:12	283.4759387	4.724598979	280.7268244	4.678780406
3/4/19 18:13	284.0773853	4.734623088	280.3858658	4.673097764
3/4/19 18:14	284.6788318	4.744647197	280.2298056	4.670496759
3/4/19 18:15	285.2802784	4.754671306	280.7115708	4.67852618
3/4/19 18:16	285.509921	4.758498683	281.2471738	4.687452897
3/4/19 18:17	285.0530455	4.750884092	281.7827768	4.696379614
3/4/19 18:18	284.5810791	4.743017985	282.3183798	4.705306331
3/4/19 18:19	284.1091126	4.735151877	282.6125022	4.71020837
3/4/19 18:20	283.6371462	4.72728577	282.1193631	4.701989386
3/4/19 18:21	283.468474	4.724474566	281.5653632	4.692756054
3/4/19 18:22	283.8285837	4.730476396	281.0113633	4.683522722
3/4/19 18:23	284.1982976	4.736638293	280.4573634	4.674289391
3/4/19 18:24	284.5680114	4.74280019	280.0887821	4.668146368
3/4/19 18:25	284.9377252	4.748962087	280.2910363	4.671517272
3/4/19 18:26	285.0020837	4.750034728	280.5334669	4.675557782
3/4/19 18:27	284.535879	4.74226465	280.7758975	4.679598291
3/4/19 18:28	284.0601525	4.734335875	281.0183281	4.683638801
3/4/19 18:29	283.584426	4.7264071	281.2336095	4.687226826
3/4/19 18:30	283.1086995	4.718478325	281.3655195	4.689425326
3/4/19 18:31	282.9716924	4.716194873	281.4915866	4.691526443
3/4/19 18:32	283.3901239	4.723168731	281.6176536	4.693627561
3/4/19 18:33	283.8165909	4.730276515	281.7437207	4.695728678
3/4/19 18:34	284.2430579	4.737384299	281.8843984	4.698073307
3/4/19 18:35	284.669525	4.744492083	282.0699128	4.701165213
3/4/19 18:36	284.8918625	4.748197708	282.2585658	4.704309429
3/4/19 18:37	284.7977554	4.746629256	282.4472188	4.707453646
3/4/19 18:38	284.7000307	4.745000511	282.6358718	4.710597863
3/4/19 18:39	284.602306	4.743371767	282.6804066	4.71134011
3/4/19 18:40	284.5045813	4.741743022	282.3062914	4.705104856
3/4/19 18:41	284.5067374	4.741778957	281.9055285	4.698425474
3/4/19 18:42	284.6548506	4.74424751	281.5047655	4.691746092
3/4/19 18:43	284.8042208	4.746737014	281.1040026	4.685066711
3/4/19 18:44	284.953591	4.749226517	280.6970899	4.678284832

3/4/19 18:45	285.1029612	4.75171602	280.273297	4.671221616
3/4/19 18:46	285.0538705	4.750897842	279.8485355	4.664142259
3/4/19 18:47	284.7157844	4.745263073	279.4237741	4.657062901
3/4/19 18:48	284.3752545	4.739587575	278.9990126	4.649983543
3/4/19 18:49	284.0347246	4.733912077	278.7119164	4.645198607
3/4/19 18:50	283.6941947	4.728236578	278.8014066	4.64669011
3/4/19 18:51	283.49136	4.724856001	278.9123646	4.648539409
3/4/19 18:52	283.4773839	4.724623065	279.0233226	4.650388709
3/4/19 18:53	283.4645438	4.724409064	279.1342805	4.652238009
3/4/19 18:54	283.4517037	4.724195062	279.2684847	4.654474746
3/4/19 18:55	283.4388636	4.72398106	279.4627878	4.657713129
3/4/19 18:56	283.3987245	4.723312075	279.6601594	4.661002657
3/4/19 18:57	283.3232674	4.722054457	279.8575311	4.664292184
3/4/19 18:58	283.2476683	4.720794472	280.0549027	4.667581712
3/4/19 18:59	283.1720692	4.719534486	280.1580136	4.669300226
Línea 1			Línea 2	
Consumo total en m3 por línea		2567.505962	2548.666849	
Consumo total en m3			5116.172811	



Anexo 5 Laboratorio VS Red Neuronal

Turno	Fecha	Malla 1 Laboratorio	Malla 2 Laboratorio	Malla 1 Red Neuronal	Malla 2 Red Neuronal
A	9/9/19 9:00	11.12		13.8753787	0
B	9/9/19 21:00	11.32	11.99	10.15003193	0
A	9/10/19 9:00	13.65	13.25	13.63239206	13.49724712
B	9/10/19 21:00	12.12	13.46	12.27455901	13.14482468
A	9/11/19 9:00	14.6	14.12	14.40183742	14.01758426
B	9/11/19 21:00	13.49	12.95	13.26401052	12.03041433
A	9/12/19 9:00	12.91	13.44	13.4108753	13.86553236
B	9/12/19 21:00	13.19	12.49	12.81838051	13.77295013
A	9/13/19 9:00	14.39	14.73	14.33360761	14.82373713
B	9/13/19 21:00	11.15	14	9.064958771	13.41931533
A	9/14/19 9:00	13.79	13.28	13.06465399	13.69879998
B	9/14/19 21:00	12.49	13.51	11.64161888	12.20487986
A	9/15/19 9:00	11.29	11.53	11.46748869	13.13831936
B	9/15/19 21:00	14.46	14.26	13.38757402	13.30966612
A	9/16/19 9:00	11.89	12.06	13.70448382	13.12578008
B	9/16/19 21:00	10.83	13	14.02573445	12.60019616
A	9/17/19 9:00	11.06	11.81	11.19324989	13.05506397
B	9/17/19 21:00	10.98	11.32	11.76618648	11.79206216
A	9/18/19 9:00	11.03	11.46	9.716039856	11.84004178
B	9/18/19 21:00	11.33	11.66	11.51867034	13.11390738
A	9/19/19 9:00	0	0	0	0
B	9/19/19 21:00	12.9	13.52	13.45807068	13.22316283
A	9/20/19 9:00	13.15	13.05	12.35060952	13.81212962
B	9/20/19 21:00	14.23	14.78	12.66274195	13.64439155
A	9/21/19 9:00	13.37	14.61	13.59987919	14.08110708
B	9/21/19 21:00	13.73	14.35	13.00905781	13.22449108
A	9/22/19 9:00	13.87	14.59	13.29887012	13.71201961
B	9/22/19 21:00	11.93	11.34	12.69893091	11.28700368
A	9/23/19 9:00	13.99	12.95	11.11198461	13.58248059
B	9/23/19 21:00	16.66	13.8	15.99998033	13.91257219
A	9/24/19 9:00	13.58	12.35	14.49560366	12.74692172
B	9/24/19 21:00	12.3	15.09	12.83643494	14.70660905
A	9/25/19 9:00	13.23	12.49	13.15919896	12.89307249
B	9/25/19 21:00	13.34	13.55	12.3396649	13.04204755
A	9/26/19 9:00	10.38	11.27	12.83181358	11.5654606
B	9/26/19 21:00	11.28	11.34	12.95395678	13.71086521
A	9/27/19 9:00	12.03	13.31	12.56925073	14.204244
B	9/27/19 21:00	10.9	11.95	10.45335357	13.55593605
A	9/28/19 9:00	12.45	12.31	13.58568442	13.23058819
B	9/28/19 21:00	0	0	0	0
A	9/29/19 9:00	0	0	0	0
B	9/29/19 21:00	12.38	14.03	12.78949435	13.41339433

A	9/30/19 9:00	13.4	14.23	14.24647652	13.79021553
B	9/30/19 21:00	13.25	11.76	14.18885666	13.68058407
A	10/1/19 9:00	12.24	0	11.77719933	0
B	10/1/19 21:00	0	0	0	0
A	10/2/19 9:00	11.52	0	12.49848082	0
B	10/2/19 21:00	11.74	0	12.29544313	0
A	10/3/19 9:00	11.62	11.14	12.96772687	11.05888139
B	10/3/19 21:00	11.59	12.63	12.66520214	13.60858432
A	10/4/19 9:00	11.75	11.01	12.44716489	13.58880927
B	10/4/19 21:00	11.81	13.7	12.84711108	12.92242014
A	10/5/19 9:00	0	12.48	0	12.52715873
B	10/5/19 21:00	14.7	14.37	13.64324167	13.69724874
A	10/6/19 9:00	12.79	12.29	10.20012833	13.01149288
B	10/6/19 21:00	12.92	12.82	11.88791522	11.97848965
A	10/7/19 9:00	13.48	14.11	10.91194235	13.64241107

Error Cuadrático Medio Malla 1	Error Cuadrático Medio Malla 2
1.197588	0.87479