

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**DISEÑO, PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA  
DE CONTROL DIFUSO PARA EL PROCESO DE PRODUCCIÓN DE  
HIDRÓGENO A PARTIR DE VAPOR SOBRECALENTADO DE AGUA**

**TESIS PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN DISEÑO  
PRODUCCIÓN Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

**RITA PAOLA LEÓN PÉREZ**  
rpleon1@espe.edu.ec

**DIRECTOR: Dr. ÁLVARO GONZALO AGUINAGA BARRAGÁN. MSc. PhD.**  
alvaro.aguinaga@epn.edu.ec

**Quito, Mayo-2014**

## DECLARACIÓN

Yo Rita Paola León Pérez, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Rita Paola León Pérez**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Rita Paola León Pérez bajo mi supervisión.

---

Dr. Álvaro Aguinaga B. MSc. PhD.

**DIRECTOR DE PROYECTO**

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar quiero agradecer a Dios por todas las oportunidades y bendiciones recibidas a lo largo de mi vida, gracias a él todo ha sido posible.

Agradezco a toda mi familia que con su infinita comprensión y esfuerzo hicieron este logro posible, gracias a mi amado esposo Darwin por ser mi compañero de vida y apoyarme cada día para salir juntos adelante, a mis hijas Abicita y Emilita por su inmenso amor y sacrificio, y por ser la motivación más grande que tengo para continuar, a mi mamita Martha por dedicar su vida entera a la familia, a mi papi Jorge, hermanas Kary y Georgi y a mis sobrinos Tita, Sol, Ivannita y Martín por su apoyo y amor constante.

De forma especial agradezco al Dr. Álvaro Aguinaga y al Ing. Hernán Lara por su valioso aporte en el desarrollo y culminación de este proyecto. De igual manera a mis profesores que han colaborado en mi formación personal y profesional

## **DEDICATORIA**

A mi esposo Darwin porque solo con su apoyo incondicional fue posible culminar esta etapa.

A las personas que siempre han estado a mi lado, acompañándome en cada paso y que me han tendido la mano en todo momento.

Con todo mi amor a mi familia.

## CONTENIDO

DECLARACIÓN .....	II
CERTIFICACIÓN .....	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
DEDICATORIA.....	V
CONTENIDO.....	VI
LISTADO DE FIGURAS .....	X
LISTADO DE TABLAS .....	XI
RESUMEN .....	XII
PRESENTACIÓN .....	XIII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Problema.....	1
1.3 Importancia y actualidad del Tema.....	2
1.4 Objetivos.....	3
1.4.1. General.....	3
1.4.2 Específicos.....	3
CAPÍTULO 2.....	4
2. MARCO TEÓRICO.....	4
2.1 Introducción.....	4
2.2 Tipos de Vapor de agua.....	4
2.2.1 Vapor Saturado.....	5
2.2.2 Vapor húmedo.....	5
2.2.3 Agua Supercrítica.....	5
2.2.4 Vapor sobrecalentado.....	6
2.2.4.1 Definición. ....	6
2.2.4.2 Características.....	6
2.3 La Electrólisis.....	7
2.3.1 Definición.....	7
2.3.2 Determinación condiciones iniciales para realizar la electrólisis.....	8

2.3.3	Parámetros totales necesarios para iniciar la electrólisis.....	10
2.3.4	Electrólisis a bajas temperaturas.....	12
2.3.5	Electrólisis a altas temperaturas.....	12
2.4	Control fuzzy.....	12
2.4.1	Generalidades.....	12
2.4.2	Definición.....	13
2.5	Tipos Controladores con lógica difusa.....	14
2.5.1	Modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno.....	14
2.5.2	Controlador fuzzy de Mamdani.....	17
2.5.2.1	Fuzzificación.....	17
2.5.2.2	Inferencia.....	17
2.5.2.3	Defuzzificación.....	18
2.6	Componentes del proceso.....	19
CAPÍTULO 3.....		21
3.	PARÁMETROS DE DISEÑO.....	21
3.1	Principios básicos para el diseño de un controlador fuzzy.....	21
3.1.1	Clasificación (fuzzificación). .....	21
3.1.2	Bloques de decisión fuzzy.....	21
3.1.3	El proceso de 'Defuzzificación'.....	22
3.2	Especificaciones requeridas para el control del prototipo. ....	22
3.3	Variables a controlar.....	23
3.3.1.	Fuzzificación de las variables de entrada.....	24
3.3.2.	Bloques de decisión fuzzy.....	26
3.3.3.	Defuzzificación de las variables de salida.....	26
3.4	Características del controlador.....	27
3.5	Cálculos.....	28
3.6	Definición de componentes. ....	32
3.6.1	Controlador.....	33
3.6.1	Selección de sensores.....	34
3.6.1.1	Método de Residuos Ponderados para selección de sensores.....	35
3.6.2	Dimensionamiento del PLC. ....	37

CAPÍTULO 4. ....	38
4 PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR.....	38
4.1 Diagrama de esquemático. ....	38
4.2 Diagrama de Flujo.....	38
4.3 Software de programación para PLC. ....	40
4.3.1 Totally Integrated Automation Portal. ....	40
4.3.2 Fuzzy Control++.....	41
4.4 Programación del PLC en TIA Portal. ....	42
4.4.1. Entorno TIA Portal.....	42
4.4.2 Creación del proyecto en TIA Portal.....	44
4.4.3 Configuración de dispositivos. ....	45
4.4.4 Comunicación de TIA PORTAL V11 con el PLC. ....	46
HMI RUNTIME.....	47
4.5 Implementación del controlador.....	49
4.5.1 Descripción. ....	49
4.5.1.1 Funciones para fuzzificación de las entradas.....	49
4.5.1.2 Función para la evaluación de la base de reglas. ....	50
4.5.1.3 Funciones para la defuzzificación de la señal de salida.....	56
4.5.1.4 Bloque principal Main OB1.....	56
4.5.2 Diagrama de conexión. ....	57
4.6 Procedimiento de Operación. ....	58
4.7 Medidas de seguridad. ....	61
CAPÍTULO 5.....	62
5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	62
5.1 Introducción.....	62
5.2 Procedimiento experimental.....	62
5.2.1 Medición de parámetros.....	64
5.2.2 Análisis de las salidas obtenidas. ....	65
5.3 Protocolo de pruebas. ....	66
5.3 Análisis de resultados. ....	67
CAPÍTULO 6.....	69

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	69
6.1 Conclusiones. ....	69
6.2 Recomendaciones.....	70
CAPÍTULO 7.....	71
7. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS.....	71
7.1 Bibliografía. ....	71
7.2 Anexos. ....	72
Anexo A: Módulo del PLC.....	73
Anexo C: Código de programa en TIA Portal.....	74
Anexo C: Código de programa en MATLAB.....	75
Anexo C: Código de programa en Toolbox FUZZY de Matlab.....	76

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 2.1: Relación Presión-Temperatura del Agua y Vapor.....	5
Figura 2.2. Proceso de electrólisis.....	7
Figura 2.3 Sistema eléctrico básico de un electrolizador.....	10
Figura. 2.4. Configuración básica de un Controlador Fuzzy Mamdani.....	14
Figura 2.5 Sistema Fuzzy tipo Sugeno de primer orden.....	15
Figura 2.6 Componentes del proceso.....	19
Figura 3.1 Funciones de pertenencia para los sensores de entrada Temperatura y Presión.....	25
Figura 3.2 Funciones de pertenencia para la variable de salida.....	27
Figura 3.3 Funciones de pertenencia para temperatura =60%.....	29
Figura 3.4 Funciones de pertenencia para presión = 30%.....	29
Figura 3.5 Variable se salida en base a la inferencia difusa .....	31
Figura 3.6 Componentes del proceso.....	33
Figura 4.1 Diagrama esquemático del controlador.....	38
Figura 4.2 Diagrama de flujo del controlador.....	39
Figura 4.3 Conceptualización Totally Integrated Automation Portal.....	41
Figura 4.4 Módulos presentes en el entorno TIA Portal.....	43
Figura 4.5 Creación de un proyecto en TI Portal .....	44
Figura 4.6 Configuración de dispositivos en TI Portal.....	45
Figura 4.7 Asignación de la dirección IP al PLC.....	46
Figura 4.8 Asignación de la dirección IP al PC.....	47
Figura 4.9 Creación de Aplicación RUNTIME.....	48
Figura 4.10 interfaz HMI para el manejo del controlador.....	49
Figura 4.11 Ejemplo de evaluación de la base de reglas.....	50
Figura 4.12 Bloque Main OB1.....	56
Figura 4.13 Diagrama de conexión del controlador. ....	57
Figura 4.14 Primer paso para la operación del controlador. ....	58
Figura 4.15 Segundo paso para la operación del controlador. ....	58
Figura 4.16 Tercer paso para la operación del controlador. ....	59
Figura 4.17 Cuarto paso para la operación del controlador. ....	60
Figura 4.18 Quinto paso para la operación del controlador. ....	61
Figura 5.1 Sistema fuzzy creada en MATLAB. ....	62
Figura 5.2 Aplicación creada en toolbox FUZZY de MATLAB.....	63

## LISTADO DE TABLAS

Tabla. 2.1. Interpretación de la agregación bajo varias implicaciones.....	18
Tabla 3.1. Especificaciones requeridas para la presión y temperatura.....	23
Tabla 3.2. Funciones de Pertenencia para las entradas presión y temperatura. ....	25
Tabla. 3.3. Base de reglas para el control fuzzy. ....	26
Tabla. 3.4. Valores de las funciones de pertenencia para la salida.....	27
Tabla. 3.5. Base de reglas para el control fuzzy. ....	30
Tabla. 3.6. Ponderación de los criterios de selección.....	35
Tabla. 3.7. Evaluación alcance de medición.....	36
Tabla. 3.8. Evaluación de exactitud.....	36
Tabla. 3.9. Evaluación de resistencia.....	36
Tabla. 3.10. Evaluación de intercambiabilidad.....	37
Tabla. 3.11. Criterios para el dimensionamiento del PLC. ....	37
Tabla. 3.12. Componentes del PLC. ....	37
Tabla. 4.1. Módulos del PLC. ....	45
Tabla. 4.2. Funciones creadas para la fuzzificación de las entradas. ....	50
Tabla. 4.3. Funciones creadas para la defuzzificación de la salida. ....	56
Tabla. 5.1. Descripción de funciones creadas en matlab.....	63
Tabla. 5.2. Medición de parámetros para las diferentes aplicaciones creadas. ....	64
Tabla. 5.3. Análisis de las salidas mediante la desviación estándar. ....	65
Tabla. 5.4. Análisis de resultados mediante % de error.....	67

## **RESUMEN**

En el presente proyecto se evaluará una solución práctica al control necesario para la producción de hidrógeno, basado en lógica fuzzy, donde se pone de manifiesto la necesidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan innovar y redefinir procesos, respecto al planteamiento tradicional del control utilizado para la producción de hidrógeno. La alternativa de control fuzzy propuesta analizará los resultados obtenidos respecto a su implementación en un controlador lógico programable.

Mediante investigación, estudio y análisis del método de Mamdani para el desarrollo de sistemas fuzzy se establecen los fundamentos necesarios para la creación y manejo de un sistema de control fuzzy bajo la plataforma TIA Portal, para lo cual se explica de manera clara y sencilla como ha sido desarrollada dicha aplicación, mediante la descripción del software, analizándose además el hardware requerido y sus características.

Se detalla también la programación realizada para controlar la producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua así como su simulación e implementación, adicionalmente se recopila los datos obtenidos de las pruebas y se los compara con aplicaciones comerciales para el diseño de sistemas fuzzy, a fin de analizar los resultados.

## PRESENTACIÓN

El desarrollo de sistemas basados en lógica difusa, brinda soluciones de control a procesos que debido a su complejidad no tienen definido un modelo matemático, por lo que su control con herramientas estándar sería complejo, acortando de esta forma el período de desarrollo.

En el presente proyecto se evaluará una solución práctica al control necesario para la producción de hidrógeno, basado en lógica difusa, donde se pone de manifiesto la necesidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan innovar y redefinir procesos, respecto al planteamiento tradicional del control utilizado para la producción de hidrogeno.

La alternativa de control fuzzy propuesta en el estudio, analizará los resultados obtenidos respecto a su implementación en un controlador lógico programable utilizando el método de los promedios ponderados para defuzzificación de la variable de salida.

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Antecedentes

El proyecto “Producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua en un panel solar capilar con control fuzzy” tiene por objetivo producir hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua, para lo cual se ha considerado construir un controlador se base en lógica difusa, planteando un nuevo concepto en cuanto al control del proceso, cabe aclarar que no se trata de un nuevo concepto tecnológico, puesto que el control mediante lógica difusa ya se ha venido aplicando, sino más bien una nueva propuesta en referencia al planteamiento tradicional del control que se ha realizado para este tipo de aplicaciones.

El controlador propuesto en este proyecto pretende brindar nuevas soluciones prácticas a requerimientos de control que puedan surgir en el futuro, puesto que se basa en demostrar que la lógica difusa puede ser utilizada de la misma forma que se utilizan otros controladores pero sin la necesidad de realizar modelamientos al sistema, lo cual acorta el período de desarrollo.

### 1.2 Problema

Para controlar la producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua, es necesario desarrollar un controlador que actúe en base a la relación existente entre la presión y temperatura del vapor sobrecalentado, considerando para ello que

no existe un modelo definido para el sistema y que en referencia al control no tiene por que existir una solución única a dicho problema.

El diseño de sistemas de control se ha realizado tradicionalmente utilizando lógica booleana, misma que se basa en que toda proposición lógica tiene solamente dos valores aceptables: verdadera o falso, lo cual resulta poco adecuado, considerando que las variables utilizadas en los procesos, generalmente se miden en valores analógicos, por este motivo surge la necesidad de definir términos que permitan expresar valores intermedios, intentando emplear una forma de pensar humana en la programación, la lógica difusa nace como respuesta a este problema.

### **1.3 Importancia y actualidad del Tema**

Para los próximos años, el hidrógeno, como combustible, es considerado como una fuente potencial de energía renovable, la cual es clave para evitar aún más el deterioro de nuestro medio ambiente, sea que se lo utilice en procesos de combustión o para regenerar energía eléctrica en las pilas de combustible.

Todo indica que el futuro de la energía pasa por hidrógeno, el combustible más limpio que existe. Es versátil y muy eficaz. Un combustible revolucionario, ya que transformará las relaciones sociales y económicas en todo el mundo. También supone una esperanza en la conquista de una economía energética sostenida.

Las ventajas de la utilización del hidrógeno como carburante son patentes: es una fuente de energía abundante y su combustión sólo origina vapor de agua y calor, además de ser un sistema energético no contaminante y silencioso. Entre los inconvenientes hay que señalar que es un gas muy inflamable y que sería muy costosa la construcción de las infraestructuras para su distribución.

Estas tecnologías tienen una amplia aplicación en diferentes órdenes del quehacer humano, a nivel doméstico, en la transportación y a nivel industria, por lo que la asimilación, transferencia, adaptación y generación de estas tecnologías es de una singular importancia en nuestro país y es un reto fundamental para la universidad ecuatoriana desarrollar procesos de investigación aplicada que nos permitan el aprovechamiento del hidrógeno como vector energético.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1. General**

Diseñar programar e Implementar un controlador fuzzy para el proceso de producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua, utilizando un PLC.

### **1.4.2 Específicos**

- Estudiar el comportamiento de las señales que intervienen en el proceso de producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua.
- Definir los rangos de las variables que interviene en el proceso que permitan lograr un rendimiento óptimo.
- Diseñar los algoritmos de control del controlador fuzzy para el proceso de producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua por medio del PLC.
- Implementar el controlador fuzzy para la producción del hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado de agua.
- Evaluar los resultados y compararlos con los otros métodos.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Introducción

En la presente tesis se evaluará una solución práctica al control necesario para la producción de hidrógeno, donde se pone de manifiesto la necesidad de aplicar nuevas tecnologías que permitan innovar y redefinir procesos, respecto al planteamiento tradicional del control utilizado para la producción de hidrogeno.

Para el mejoramiento de los sistemas y un control más eficiente se requiere de un buen controlador. En este caso se utilizará el controlador lógico programable en sus cifras en inglés PLC que es un dispositivo electrónico diseñado para controlar y automatizar procesos industriales, el PLC seleccionado, además cuenta con la capacidad de trabajar con módulos que permiten la creación de sistemas de control fuzzy, . Este dispositivo deberá satisfacer las necesidades requeridas para desarrollar un sistema fuzzy para la producción de hidrógeno a fin de lograr un control más preciso de las variables analógicas.

La alternativa de control propuesta, analizará los resultados obtenidos respecto de métodos usados anteriormente, para lo cual será necesario que la respuesta obtenida sea el resultado de la optimización del controlador.

#### 2.2 Tipos de Vapor de agua [1]

Si es agua es calentada sobre su punto de ebullición, esta se convierte en vapor, o agua en estado gaseoso. Sin embargo, no todo el vapor es el mismo. Las propiedades del vapor varían de gran forma dependiendo de la presión y la temperatura a la cual está sujeto tal como se muestra en la Figura 2.1.

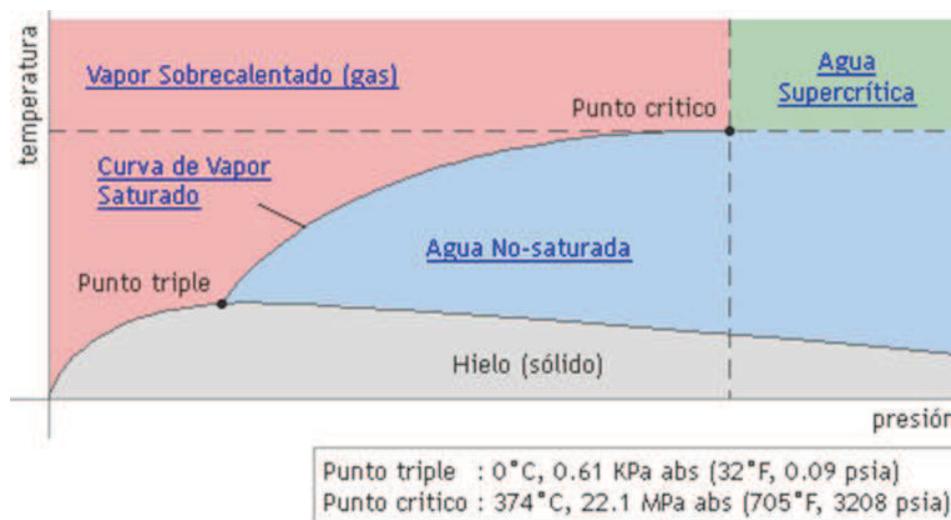


Figura 2.1: Relación Presión-Temperatura del Agua y Vapor [1].

### 2.2.1 Vapor Saturado

Como se indica en la línea negra en la parte superior de la Figura 2.1, el vapor saturado se presenta a presiones y temperaturas en las cuales el vapor (gas) y el agua (líquido) pueden coexistir juntos. En otras palabras, esto ocurre cuando el rango de vaporización del agua es igual al rango de condensación.

### 2.2.2 Vapor húmedo

Esta es la forma más común de vapor que se pueda experimentar en plantas industriales. Cuando el vapor se genera utilizando una caldera, generalmente contiene humedad proveniente de las partículas de agua no vaporizadas las cuales son arrastradas hacia las líneas de distribución de vapor. Incluso las mejores calderas pueden descargar vapor conteniendo de un 3% a un 5% de humedad. Al momento en el que el agua se aproxima a un estado de saturación y comienza a evaporarse, normalmente, una pequeña porción de agua generalmente en la forma de gotas, es arrastrada en el flujo de vapor y arrastrada a los puntos de distribución.

Este uno de los puntos claves del porque la separación es usada para remover el condensado de la línea de distribución.

### 2.2.3 Agua Supercrítica

El agua supercrítica es agua en estado que excede su punto crítico: 22.1MPa, 374 °C (3208 psi, 705°F). En el punto crítico, el calor latente del vapor es cero, y su volumen específico es exactamente igual ya sea que se considere como gas o líquido. En otras palabras, el agua que se encuentra a una presión y temperatura mayor que la de su punto crítico es un estado indistinguible en el cual no es líquido o gas.

El agua supercrítica es utilizada para impulsar turbinas en plantas de energía que demandan mayor eficiencia. Investigaciones sobre agua supercrítica se realizan con un énfasis hacia su uso como fluido que tiene propiedades tanto de líquido y gas, y en particular que es adecuado para su uso como solvente para reacciones químicas.

### 2.2.4 Vapor sobrecalentado [1]

#### 2.2.4.1 Definición

El vapor sobrecalentado se crea por el sobrecalentamiento del vapor saturado o húmedo para alcanzar un punto mayor al de saturación. Esto quiere decir que es un vapor que contiene mayor temperatura y menor densidad que el vapor saturado en una misma presión. El vapor sobrecalentado es usado principalmente para el movimiento-impulso de aplicaciones como lo son las turbinas, y normalmente no es usado para las aplicaciones de transferencia de calor.

#### 2.2.4.2 Características [2]

La presión y la temperatura no son propiedades dependientes y se pueden usar convenientemente como dos propiedades independientes en las Tablas, ya que en la

región de vapor sobrecalentado sólo existe una fase (vapor), Las propiedades se listan en las Tablas en función de la temperatura para presiones elegidas, iniciando con el valor de vapor saturado. Algunas de las características del vapor sobrecalentado son:

- Bajas presiones ( $P < P_{\text{sat}}$  a una Temperatura dada)
- Altas temperaturas ( $T > T_{\text{sat}}$  a una Presión dada)
- Altos volúmenes específicos ( $v > v_g$  a presiones o temperaturas dadas)
- Altas energías internas ( $u > u_g$  a presiones o temperaturas dadas)
- Altas entalpías ( $h > h_g$  a presiones o temperaturas dadas).

## 2.3 La Electrólisis [3]

### 2.3.1 Definición

Proceso mediante el cual se hace pasar una corriente eléctrica entre electrodos inertes sumergidos en agua, y así separar sus moléculas en sus elementos constitutivos: hidrógeno y oxígeno. El proceso se puede observar en la Figura N° 2.2

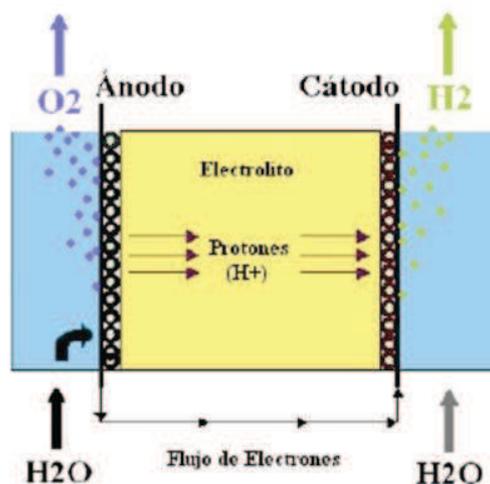


Figura 2.2. Proceso de electrólisis [3]

Dado que el agua es virtualmente un aislante eléctrico, se le agrega un electrolito para hacerla un medio conductor; el hidrógeno se libera en el cátodo y una cantidad equivalente de oxígeno se libera en el ánodo. El líquido mismo y los separadores porosos usados en la celda electrolítica evitan que se mezclen los gases liberados, que pueden recogerse a presiones convenientes.



El rendimiento promedio durante la electrólisis viene siendo de un 65%, sin embargo, los dispositivos más modernos para la electrólisis pueden alcanzar un rendimiento entre el 80 y el 85%. En la actualidad, ésta técnica se utiliza solamente en plantas relativamente pequeñas, a un costo de entre 2,40 y 3,60 dólares por kilogramo de hidrógeno producido.

### 2.3.2 Determinación condiciones iniciales para realizar la electrólisis [4]

La reacción de descomposición del agua para dar hidrógeno y oxígeno gaseosos no se produce de manera espontánea, sino que es necesario aplicar una energía correspondiente al cambio de energía libre de Gibbs, que en condiciones estándar toma el valor:



Por tanto, la ruptura de la molécula de agua por vía electroquímica requiere aplicar un potencial eléctrico mínimo en la celda electrolítica ( $E_{\text{equilibrio}}$ ) para vencer el valor de  $\Delta G$  en unas condiciones dadas. El potencial de celda necesario se relaciona con la energía libre de Gibbs mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta G = -n_{\text{mol}} \times F \times E_{\text{equilibrio}} \quad (2.3)$$

En la Figura 2.3 puede verse un esquema de un sistema electrolítico básico. Consta de una fuente de alimentación encargada de generar una paso neto de corriente entre dos conductores, llamados electrodos, en contacto con una disolución que contiene los reactivos susceptibles de oxidarse (anolito) y reducirse (catolito).

Así, gracias al potencial eléctrico aplicado por la fuente se genera un flujo de electrones desde el electrodo positivo (ánodo) hacia el electrodo negativo (cátodo) a través de un circuito eléctrico externo.

La reacción de reducción en la que una especie química gana electrones se produce por tanto en el cátodo, mientras que la reacción de oxidación con pérdida de electrones por parte de un elemento se produce en el ánodo.

Para mantener el balance de cargas en el sistema es necesario que exista también un transporte electrónico dentro de la celda electrolítica. Dicho transporte se consigue mediante la introducción de un electrolito que aporta al medio de reacción iones cargados positiva y negativamente.

Los aniones transportan las cargas eléctricas negativas hacia el ánodo y los cationes transportan las cargas eléctricas positivas hacia el cátodo, completando de esta forma el circuito de corriente eléctrica. Finalmente la celda electrolítica suele constar de un diafragma que separa los productos de la reacción redox, para evitar su posible recombinación.

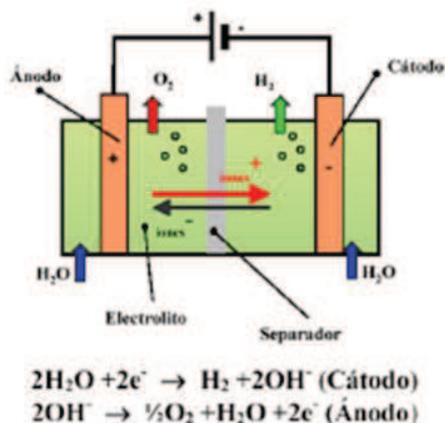
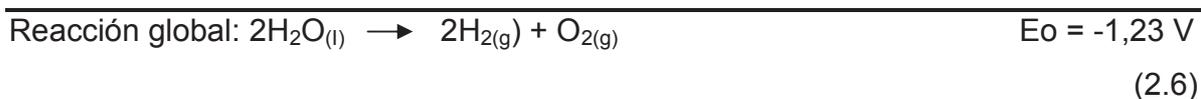
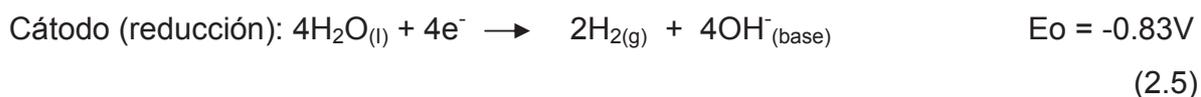
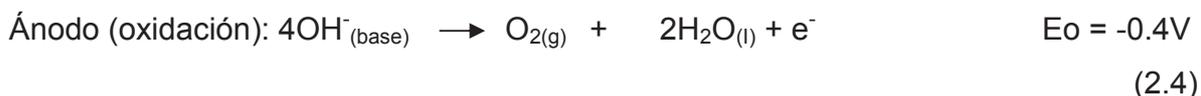


Figura 2.3 Sistema eléctrico básico de un electrolizador

En el caso de la electrolisis de agua generalmente se adiciona una base que actúa como electrolito y proporciona al medio de reacción los iones necesarios para aumentar la conductividad del medio.

En medio alcalino, las reacciones que se producen en ambos electrodos son:



### 2.3.3 Parámetros totales necesarios para iniciar la electrólisis [4]

Para poder producir la reacción es necesario aplicar una diferencia de potencial (en voltios) entre los dos electrodos extremos de una celda electrolítica. Dicho potencial unitario de celda ( $E_{\text{celda}}$ ) debe alcanzar un valor mínimo, que resulta de la suma de varias contribuciones:

$$E_{(\text{celda})} = E_{(\text{equilibrio})} + \eta \quad (2.7)$$

donde

$$\eta = \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{\text{sist}} \quad (2.8)$$

$E_{(\text{equilibrio})}$ : El potencial de equilibrio termodinámico de la reacción redox se calcula a partir de los potenciales de equilibrio del ánodo y del cátodo. En el caso de la electrolisis del agua este parámetro en condiciones estándar es:

$$E^{\circ}_{(\text{equilibrio})} = -0,83\text{V} + (-0,40)\text{V} = -1,23\text{V} \quad (2.9)$$

$\eta$  (Sobre voltaje): El sobre voltaje se define como la diferencia entre el potencial al que transcurre una reacción electroquímica y el potencial de equilibrio de la misma. Este voltaje adicional que es necesario aplicar a la celda electrolítica para que se produzca la reacción resulta de la suma de las distintas resistencias eléctricas que oponen los componentes del sistema:

$\eta_c$ : Sobretensión catódica. Es la sobretensión que existe en el cátodo a la reacción catódica de formación de hidrógeno gas.

$\eta_a$ : Sobretensión anódica. Es la sobretensión que existe en el ánodo a la reacción de formación de oxígeno gas.

$\eta_{\Omega}$ : Es la caída de tensión en el electrolito por efecto de la resistividad que presenta la disolución.

$\eta_{\text{sist}}$ : Representa la caída de potencial a través del resto de sistema, tal como el diafragma, los cables conductores de electricidad, etc.

En el caso de la electrolisis del agua valores típicos de sobrevoltaje en electrolizadores darían una estimación del voltaje unitario de la celda de:

$$E_{(\text{celda})} = E_{(\text{equilibrio})} + \eta_c + \eta_a + \eta_{\Omega} + \eta_{\text{sist}} \quad (2.10)$$

$$E_{(\text{celda})} = - (1,23 + 0,30 + 0,30 + 0,25 + 0,11) = -2,19\text{V} \quad (2.11)$$

### **2.3.4 Electrólisis a bajas temperaturas [5]**

El consumo eléctrico es muy elevado, del orden de la energía contenida en el hidrógeno producido. Si ese hidrógeno se emplea para producir electricidad mediante una pila de combustible con un rendimiento menor del 60% resulta un balance energético deficitario en electricidad. Este procedimiento, por tanto, sólo se justifica para obtener hidrógeno “in situ” en pequeñas cantidades y en ausencia de otro tipo de suministros. Otra alternativa puede ser la integración con energías renovables (principalmente eólica) en la que se busque una forma de almacenar el potencial eólico excedentario. La temperatura de operación realmente no es 25°C sino hasta 80°C en electrolizadores alcalinos o de membrana de intercambio protónico.

### **2.3.5 Electrólisis a altas temperaturas [5]**

El consumo de electricidad, siendo alto, comienza a resultar aceptable, para esta operación se precisa disponer de vapor de agua y de una fuente térmica de elevada temperatura, que puede ser energía solar concentrada o energía nuclear de reactores avanzados. Los electrolizadores también han de ser modificados, pasando a ser de óxidos sólido

## **2.4 Control fuzzy**

### **2.4.1 Generalidades [6]**

- El control fuzzy es lógico. El denominador de lógico significa que el algoritmo de control utiliza expresiones IF-THEN, con las que se pueden mencionar muchas condiciones, combinando expresiones lógicas con IF y AND.
- El control fuzzy es disperso. Esta característica, que diferencia básicamente los sistemas de control fuzzy de los sistemas de control basados en una sola

ecuación, admite la coexistencia de controladores con lógicas distintas y su actuación en paralelo.

- El control fuzzy es lingüístico. Permite el uso de variables lingüísticas imprecisas, en particular en los antecedentes de las reglas. Dicho lenguaje cualitativo es fácil de entender, permite efectuar el control por medio de un diálogo con los operadores, usando sus ojos experimentados en la observación del proceso como entradas externas, e introducir variables como las condiciones del proceso a modo de información útil para el control.

Asimismo el algoritmo de control puede contener los procedimientos inusuales que hay siempre en las operaciones de un proceso real.

#### **2.4.2 Definición**

Un controlador fuzzy, es una estructura basada en conocimiento definida a través de un conjunto de reglas difusas del tipo si-entonces, las cuales, contienen una cuantificación lógica difusa de la descripción lingüística del experto de cómo realizar un control adecuado. La información se procesa difusamente en la forma de reglas, tal como:

SI valor de entrada “buena presión”, ENTONCES valor de salida “hacer nada”, o SI valor de entrada “medio”, ENTONCES hacer valor de salida “pequeño”.

“Los valores de entrada y salida son variables lingüísticas y los términos “medio” y “pequeño” no son valores numéricos pero si valores lingüísticos. Ellos son también llamados conjuntos fuzzy. Una variable lingüística usualmente posee 3, 5 o 7 valores lingüísticos. La colección completa de las reglas forma la regla base” [7].

## 2.5 Tipos Controladores con lógica difusa

El sistema fuzzy es, forzosamente, parte de un sistema técnico que trabaja con valores numéricos (señales), con valores no fuzzy, en sus entradas y salidas. En el presente documento se detallaran los dos tipos de sistemas fuzzy más utilizados:

- Controlador fuzzy de Takagi-Sugeno: Sus entradas y salidas son variables con valores reales.
- Controlador fuzzy de Mamdani: Interpone un fusificador en la entrada y un defusificador en la salida. En la Figura 2.4. se ilustra el principio

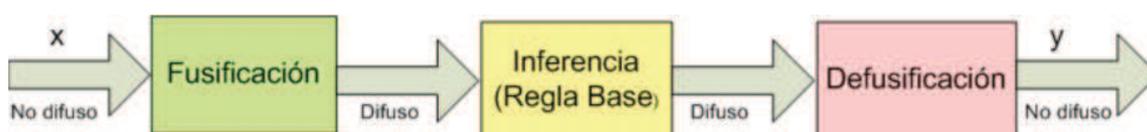


Figura. 2.4. Configuración básica de un Controlador Fuzzy Mamdani

### 2.5.1 Modelo fuzzy tipo Takagi-Sugeno [8]

Este modelo fue propuesto inicialmente por Takagi, Sugeno y Kang; en un esfuerzo por desarrollar un método sistemático para generar reglas difusas a partir de un conjunto dado de datos de entrada / salida. Una regla difusa típica en un modelo fuzzy tipo Sugeno tiene la forma: Si  $x$  es  $A$  e  $y$  es  $B$ , entonces  $z = f(x,y)$ , donde  $A$  y  $B$  son conjuntos fuzzy en la parte de antecedentes y  $z = f(x, y)$  es una función clara en la parte de consecuente. Normalmente  $f(x, y)$  es un polinomio dependiente de las variables de entrada  $x$  e  $y$ , pero, en general, puede ser cualquier función que pueda describir apropiadamente la salida del modelo dentro de la región difusa especificada por el antecedente de la regla. Cuando  $f(x, y)$  es un polinomio de primer orden, el sistema de inferencias fuzzy resultante es llamado un modelo fuzzy tipo Sugeno de primer orden; si  $f$  es una constante, entonces se tiene un modelo fuzzy tipo Sugeno

de orden cero. Cabe mencionar que, aunque también se ha desarrollado un modelo fuzzy tipo Sugeno de segundo orden, esto es,  $f(x, y)$  es un polinomio de segundo grado, en la mayoría de desarrollos se encuentran solamente modelos tipo Sugeno de orden cero y uno. En la Figura 2.5 se muestra el procedimiento de razonamiento fuzzy para un modelo fuzzy de Sugeno de 1er orden.

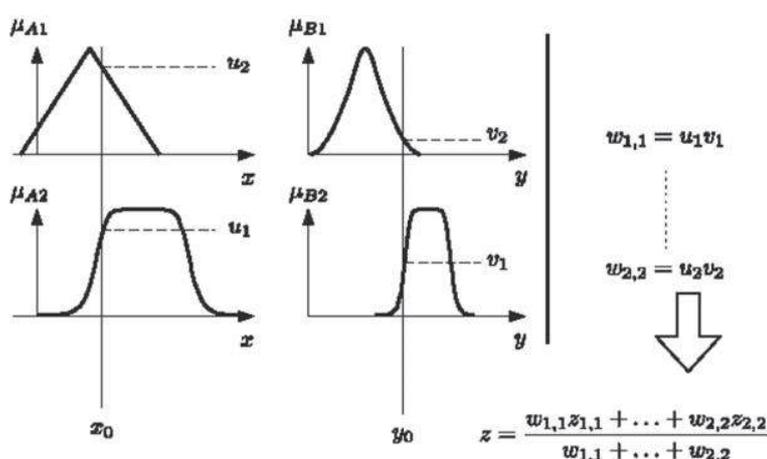


Figura 2.5 Sistema Fuzzy tipo Sugeno de primer orden

Puesto que cada regla tiene una salida clara, la salida global se obtiene mediante un promedio ponderado. En la práctica, la operación de promedio ponderado se sustituye con una suma ponderada (esto es,  $z = w_1 z_1 + w_2 z_2$  en la Figura anterior), a fin de reducir los cálculos, especialmente durante el entrenamiento de un sistema de inferencias fuzzy. Sin embargo, esta simplificación puede llevar a la pérdida de significado lingüístico de las funciones de membresía (FM), a menos que la suma de las intensidades de disparo (esto es,  $\sum_i w_i$ ) sea cercana a la unidad.

En un sistema de inferencias fuzzy, el antecedente de una regla define una región difusa local, mientras que el consecuente describe el comportamiento dentro de esa región mediante varios componentes.

El espacio fuzzy de entrada se puede particionar con diferentes métodos para formar los antecedentes de las reglas difusas. Los tres métodos básicos son: Partición de rejilla, partición de árbol y partición dispersa.

La partición de rejilla sólo requiere un pequeño número de FM para cada entrada; sin embargo, tiene algunos problemas cuando se tiene un número moderadamente grande de entradas. Por ejemplo, un modelo fuzzy con 10 entradas y 2 FM por cada una de ellas, podría resultar en 210 - 1024 reglas difusas, lo cual es prohibitivamente grande.

En la partición de árbol cada región se puede especificar en forma única a través de un árbol de decisiones correspondiente. Esta partición resuelve el problema de un incremento exponencial del número de reglas, pero se requieren más FM en cada entrada para definir tales regiones difusas, y esas FM generalmente no tienen un significado lingüístico claro tal como "pequeño", "grande", etc.

Con la partición dispersa se puede limitar el número de reglas a una cantidad razonable; sin embargo, esta partición normalmente se define por los pares de datos de entrada / salida deseados, debido a lo cual no se mantiene ortogonalidad en X, Y o en el producto cartesiano  $X \times Y$ . Esto hace difícil estimar la función de transformación global directamente de los consecuentes de cada salida de las reglas.

Con todos los elementos hasta aquí establecidos, se puede definir el proceso mediante el cual se construye un sistema de inferencias fuzzy para una aplicación específica. A este proceso normalmente se le llama modelado fuzzy y, los pasos que para su realización se muestran a continuación

Seleccionar las variables de entrada y salida relevantes.

Elegir un tipo específico de sistema de inferencias fuzzy.

Determinar el número de etiquetas asociados con cada variable de entrada y salida. (En un modelo tipo Sugeno, se debe determinar el orden de las ecuaciones del consecuente).

Definir un conjunto de reglas difusas del tipo si... entonces.

Elegir una familia adecuada de FM parametrizadas.

Consultar humanos expertos del sistema que se desea reproducir, para determinar los parámetros de las FM usadas en la base de reglas.

Refinar los parámetros de las FM usando regresión y técnicas de optimización.

Esta última tarea asume la disponibilidad de un conjunto de datos de entrada / salida deseado, mientras que los pasos anteriores a esta parlen de la disponibilidad de un humano experto. Las técnicas de optimización y adaptación expanden las aplicaciones de los sistemas de inferencia fuzzy a campos tales como el control adaptivo, procesamiento de señal adaptivo, regresión no lineal y el reconocimiento de patrones.

### **2.5.2 Controlador fuzzy de Mamdani.**

En controlador fuzzy de Mamdani está compuesto por:

#### **2.5.2.1 Fuzzificación [7]**

Los grados de satisfacción para los valores lingüísticos (grados de pertenencia del conjunto fuzzy) de las variables lingüísticas son fijados a los valores de entrada no fuzzy.

Tal fuzzificación determina, por ejemplo, a que grado la “presión es buena” si esta es, digamos, 115 bares. Esto se hace usando la función de pertenencia. Este grado es llamado “grado de satisfacción o cumplimiento de la parte SI”.

#### **2.5.2.2 Inferencia [7]**

Para cada regla de la regla base, el grado de satisfacción de la parte ENTONCES es formado desde el grado de satisfacción de la parte SI por un cierto método. Este proceso es llamado también Implicación. El grado de satisfacción de la parte entonces es equivalente al grado de satisfacción de la regla, la cual es llamada también intensidad de la regla. Todas estas evaluaciones de reglas individuales puestas juntas resultan en una función de pertenencia para la señal de salida, la cual es también llamada composición.

El resultado de la función de pertenencia describe un “comando de control fuzzy” que podría, por ejemplo, ser algo como “válvula de posición solo por debajo del centro”. Cuando la parte SI contiene una declaración combinada “SI....Y...”--- (ENTONCES....), la operación Y de la lógica difusa es ejecutada primero y el grado de satisfacción es usado en la evaluación de la regla total. Todas estas declaraciones juntas son a menudo llamadas una agregación. La elección del operador de implicación condiciona la elección del operador de agregación [9], la Tabla. 2.1 indica el tipo de implicación con su respectiva agregación:

**Tabla. 2.1. Interpretación de la agregación bajo varias implicaciones [9]**

IMPLICACIÓN	AGREGACIÓN
Zadeh Máx-Min	Y ( $\wedge$ )
Mamdani Min	O ( $\vee$ )
Larsen Producto	O ( $\vee$ )
Aritmética	Y ( $\wedge$ )
Booleana	Y ( $\wedge$ )
Producto Obligado	O ( $\vee$ )
Producto Drástico	O ( $\vee$ )
Secuencia Estándar	Y ( $\wedge$ )
Gougen	Y ( $\wedge$ )
Gödelian	Y ( $\wedge$ )

Los métodos más utilizados y más eficientes desde el punto de vista computacional son: como operador de implicación el Mínimo y como operador de agregación el Máximo.

### 2.5.2.3 Defuzzificación

El valor de salida numérico (no difusa) más representativo es calculado para la variable de control desde el comando de control fuzzy (en la forma de la función de pertenencia resultante) [7].

Las técnicas de defuzzificación más usadas son [9]:

- Método de promedio ponderado (Weighted Average Method).

- Centroide o Centro de las Áreas (COA o Center of Áreas)
- Centro de las Sumas (COS o Center of Sums)
- Media de los Máximos (MOM o Mean of Máxima)
- Promedio de los Centros (CA o Center Average)

Para este proyecto se utilizará el método de promedio ponderado, el cual es posible de implementarlo mediante el cálculo realizado por el PLC. De acuerdo este método el valor de salida del sistema fuzzy se calcula con la ecuación 2.12 [10]:

$$Salida = Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n MAX(S_i) * \mu_S(S_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_S(S_i)} \quad (2.12)$$

Donde  $\mu_n$  es el grado de pertenencia de las reglas y  $S_i$  es el valor máximo de la función de salida.

## 2.6 Componentes del proceso

Los componentes del proceso de control fuzzy para la producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado, se muestran en la Figura 2.6:

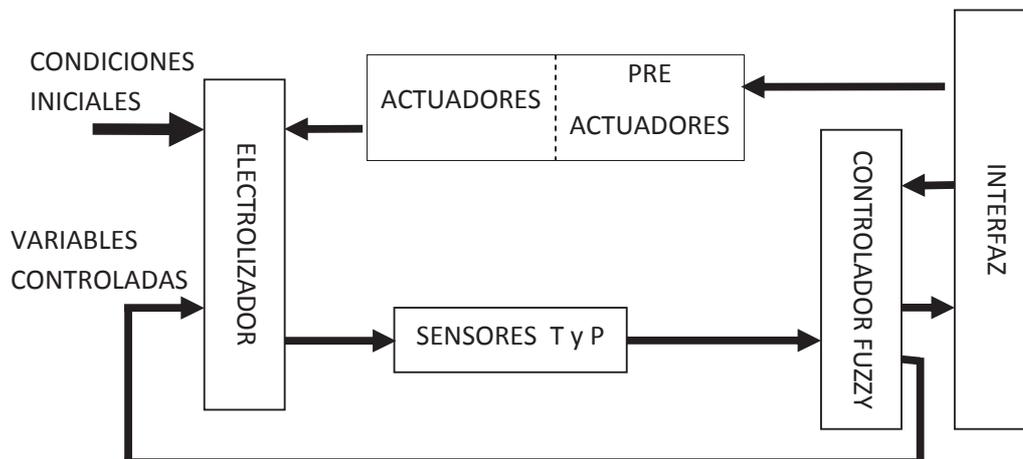


Figura 2.6 Componentes del proceso.

La finalidad de esta aplicación es controlar el tiempo en el proceso de electrólisis a partir de vapor sobrecalentado de agua utilizando lógica difusa. El proceso podrá ser monitoreado y controlado mediante el computador a través una interfaz gráfica. Para la obtención de datos y control del proceso se deberán utilizar transmisores de temperatura y presión. Mediante la interfaz el operador encender el controlador, también podrá visualizar el valor de las variables de entrada (temperatura y presión), así como la variable de salida.

## CAPÍTULO 3

### 3 PARÁMETROS DE DISEÑO

#### 3.1 Principios básicos para el diseño de un controlador fuzzy [11]

El diseño de un controlador fuzzy depende de la comprensión y definición del sistema en términos de las variables de entrada y salida, para el diseño de nuestro sistema las variables de entrada son la temperatura y la presión, mientras que la salida es el tiempo requerido para que el proceso de electrólisis de vapor sobrecalentado sea óptimo. Adicionalmente se determinará la teoría de conjuntos fuzzy basados en reglas difusas y sistemas de razonamiento fuzzy, a fin de cumplir con todos los pasos necesarios para el diseño (Clasificación (fuzzificación), bloques de decisión fuzzy y el proceso de 'Defuzzificación').

##### 3.1.1 Clasificación (fuzzificación). Ajustando una señal real dentro del conjunto de variables difusas

El primer paso es convertir las señales de entrada (temperatura y presión) en un conjunto de variables difusas (fuzzificación), a las cuales se les asignará valores a partir de un conjunto de funciones de membresía o pertenencia. Los valores de cada función de pertenencia se etiquetan mediante  $\mu(x)$ , y son determinados por el valor de la señal  $x$  y la Figura de cada función de membresía.

##### 3.1.2 Bloques de decisión fuzzy

A fin de establecer el bloque de control fuzzy utilizaremos equivalentes fuzzy de los operadores lógicos AND, OR y NOT a fin de construir las reglas difusas. Las definiciones para dichos operadores son la siguiente:

**AND:** Si  $\mu_\alpha$  es la membresía de la clase  $\alpha$  para un variable medida  $\mu_\beta$  y es la membresía de clase  $\beta$  para otra variable medida, entonces el AND fuzzy se obtiene como el mínimo de los dos valores de membresía, es decir:

$$\mu_\alpha \text{ AND } \mu_\beta = \mu_\alpha \otimes \mu_\beta = \min(\mu_\alpha, \mu_\beta)$$

**OR:** Las definiciones previas de  $\mu_\alpha, \mu_\beta$  se utilizan de nuevo, y la función OR difusa se define como:

$$\mu_\alpha \text{ OR } \mu_\beta = \mu_\alpha \oplus \mu_\beta = \max(\mu_\alpha, \mu_\beta)$$

**NOT:** Para la membresía  $\mu_\alpha$  la operación difusa NOT se define como:

$$\mu_{\text{NOT}\alpha} = \neg\mu_\alpha = 1 - \mu_\alpha$$

### 3.1.3 El proceso de ‘Defuzzificación’, regresando valores fuzzy a valores reales

El último paso en la construcción de nuestro controlador con lógica difusa será convertir de nuevo las variables difusas generadas por la base de reglas en valores con interpretación real (Defuzzificación) por que combina las variable difusas para generar el valor real de la señal (CRISP o no-fuzzy) el cual será utilizado para controlar el tiempo de encendido del electrolizador a fin de que el proceso de electrólisis de vapor sobrecalentado sea óptimo.

## 3.2 Especificaciones requeridas para el equipo para el control del prototipo

Para realizar el control del prototipo, es indispensable contar con equipo que permita realizar las mediciones mostradas en la Tabla 3.1, mismas que son necesarias para el control de proceso:

Tabla 3.1. Especificaciones requeridas para la presión y temperatura

Especificación Requerida	Valor	Descripción
Presión nominal de trabajo	< 22,1 MPa	Presión requerida para obtener vapor sobrecalentado
Presión máxima de trabajo	22,1 MPa	Máximo valor detectable
Presión mínima de trabajo	0 MPa	Mínimo valor producible
Temperatura nominal de trabajo	> 374°C	Temperatura requerida para obtener vapor sobrecalentado
Temperatura máxima de trabajo	1500°C	Máximo valor detectable
Temperatura mínima de trabajo	0°C	Mínimo valor producible

### 3.3 Variables a controlar

A fin de cumplir con los objetivos del proyecto es necesario realizar el control fuzzy del tiempo que permanecerá encendido el electrolizador para que el proceso de electrólisis de vapor sobrecalentado sea óptimo. Dado que el tiempo de encendido está directamente relacionado con la masa de gas presente en el reservorio, se ha utilizado la ecuación de estado de los gases para determinar la masa presente y en función de este valor mediante el controlador fuzzy establecer el tiempo.

$$PV = \frac{mRt}{M} \quad (3.1)$$

$$\frac{P}{T} = n \frac{R}{VM} \quad (3.2)$$

Donde V es volumen, m es la masa del gas, M es la masa molar,  $R=8.3143\text{m}^3\cdot\text{Pa}/\text{K}\cdot\text{mol}$  es la constante del gas ideal y T es la temperatura absoluta (medida en grados Kelvin). De la ecuación despejamos la relación  $\frac{P}{T}$  dado que son

valores conocidos, podemos observar que el término  $\frac{R}{VM} = K$  es constante, obteniéndose la relación requerida para determinar la masa en función de la temperatura y la presión, en función de la cual se determinará en tiempo de encendido del electrolizador.

$$\frac{P}{T} = mk \quad (3.3)$$

y para el cual se realizarán los procesos necesarios para el desarrollo de un sistema fuzzy que se mencionan a continuación.

### 3.3.1. Fuzzificación de las variables de entrada

El primer paso para la fuzzificación de las entradas es delimitar su dominio, es decir establecer sus límites superior e inferior, para lo cual se estable porcentualmente (0% al 100%) el rango de las variables de entrada, el siguiente paso es definir el número y tipo de funciones de pertenencia. Las funciones de pertenencia utilizadas son de tipo trapezoidal y triangular, dado que su estructura permite definir de mejor manera el valor lingüístico asociado a la temperatura y la presión, además son sencillas, lo cual generan menor gasto computacional y adicionalmente permiten manejar de mejor manera los rangos.

Para las entradas temperatura presión, se definieron 3 funciones de pertenencia, dos de tipo trapezoidal y una triangular con sus respectivos rangos. Tal como se muestra en la Figura 3.1. Los rangos establecidos para las funciones de pertenencia, se pueden visualizar en la Tabla. 3.2. Cabe recalcar que la cima de la función de pertenencia equivale al 100% del grado de pertenencia del valor relativo.

Tabla 3.2. Funciones de Pertinencia para las entradas presión y temperatura.

<b>TEMPERATURA</b>	
<b>Funciones de Pertinencia</b>	<b>Rangos</b>
Pequeña (P)	<b>0-50</b> (25 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)
Mediana (M)	<b>25-75</b> (50 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)
Grande (G)	<b>50-100</b> (75 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)
<b>PRESIÓN</b>	
<b>Funciones de Pertinencia</b>	<b>Rangos</b>
Pequeña (P)	<b>0-50</b> (25 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)
Mediana (M)	<b>25-75</b> (50 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)
Grande (G)	<b>50-100</b> (75 es el valor con el 100% de grado de pertenencia de esta función)

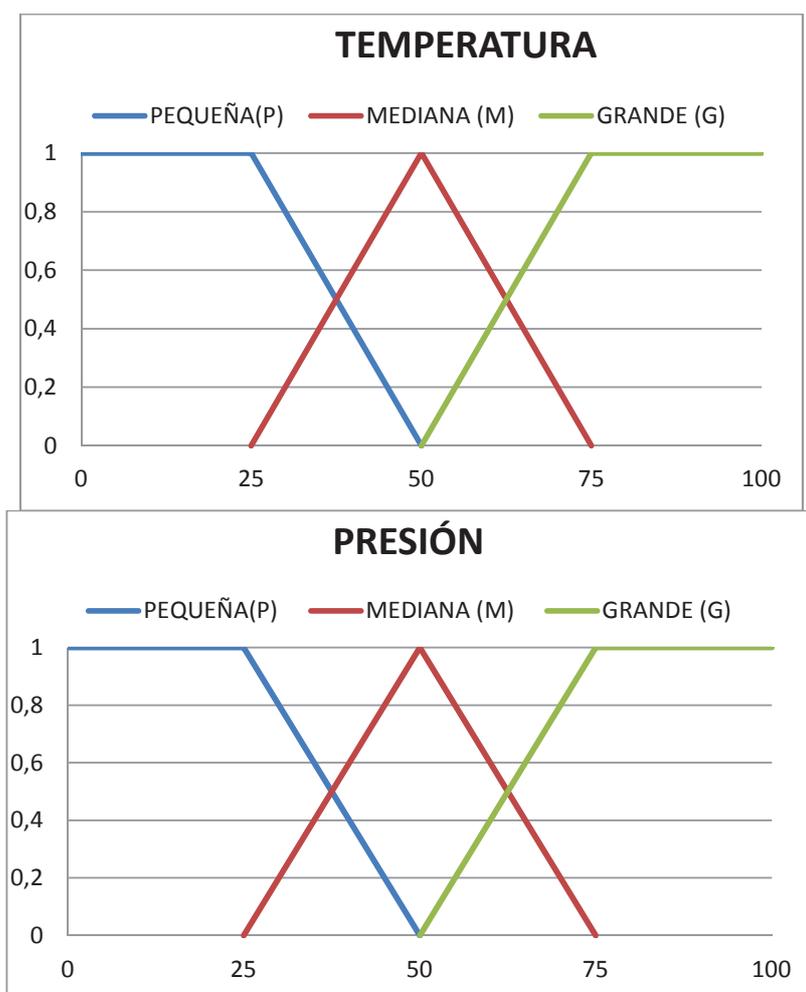


Figura 3.1 Funciones de pertenencia para los sensores de entrada Temperatura y Presión

### 3.3.2. Bloques de decisión fuzzy

Las reglas de decisión se establecieron considerando la relación obtenida mediante la ecuación  $\frac{P}{T} = mk$  explicada en el punto 3.3. La Tabla 3.3 muestra la función de pertenencia asignado a la salida definido en base a dicha relación.

Tabla. 3.3. Base de reglas para el control fuzzy.

		TEMPERATURA (TM)		
		PEQUEÑA(P)	MEDIANA(M)	GRANDE(G)
PRESIÓN (PR)	PEQUEÑA(P)	M	P	PP
	MEDIANA(M)	G	M	P
	GRANDE(G)	MG	G	M

### 3.3.3. Defuzzyficación de las variables de salida

Para el proceso de defuzzyficación de la salida se utilizó el método de promedio ponderado. En base al análisis de todas las posibles combinaciones presentes en las entradas se cubrió el rango de salidas programando 5 funciones de pertenencia de tipo triangular, como se muestra en la Figura 3.2, cada una de ellas posee un valor máximo que corresponde al 100% del grado de pertenencia de dicha función. Los valores para cada función son dados de acuerdo al comportamiento requerido en la salida, en la Tabla. 3.4 se muestran los valores establecidos para cada función de pertenencia de la salida.

**Tabla. 3.4. Valores de las funciones de pertenencia para la salida**

Función	Punto máximo de salida	Descripción
MUY PEQUEÑA (PP)	10	Tiempo para la masa 1
PEQUEÑA (P)	30	Tiempo para la masa 2
MEDIANA (M)	50	Tiempo para la masa 3
GRANDE (G)	70	Tiempo para la masa 4
MUY GRANDE (MG)	90	Tiempo para la masa 5

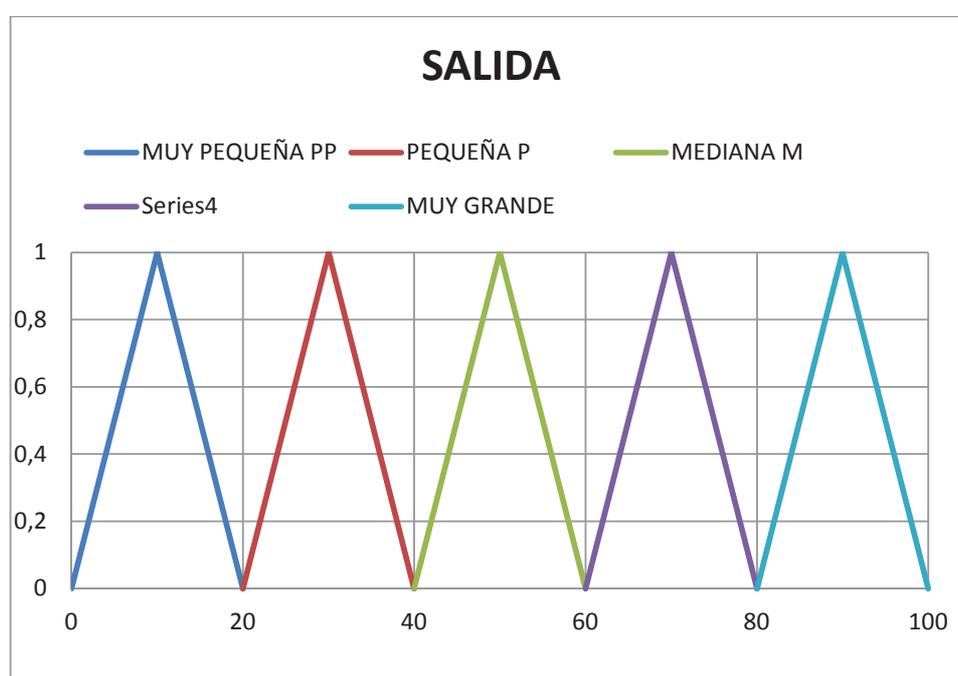


Figura 3.2 Funciones de pertenencia para la variable de salida

### 3.4 Características del controlador

Un controlador de tipo fuzzy como el que se va a diseñar, al igual que otros controladores, deberá tomar el valor de las variables de entrada, procesarlas y actuar sobre la salida a fin de controlar la planta, sin embargo, por la característica de funcionamiento establecida en lógica difusa se utilizarán un sistema basado en reglas.

Dependiendo del estado y los valores de las variables de entrada, el controlador evaluará la veracidad de cada regla y tomará la decisión sobre los cambios a realizar en la salida. La actualización de la salida producirá un cambio en el sistema posteriormente se vuelven a obtener los valores de las variables de entrada, comenzando un nuevo ciclo.

Es importante considerar que en un controlador fuzzy no se procesan ecuaciones, números o Tablas, si no que se trabaja en base a reglas de decisión, siendo este tipo de procesamiento mucho más cercano al del razonamiento humano.

.

### 3.5 Cálculos

A continuación se explicará el método de cálculo que el controlador fuzzy realiza para obtener el valor de la salida.

Una vez establecidas las variables lingüísticas de entrada (temperatura y presión) y salida, con sus respectivos rangos y funciones de pertenencia, se forman los conjuntos fuzzy:

Entrada:

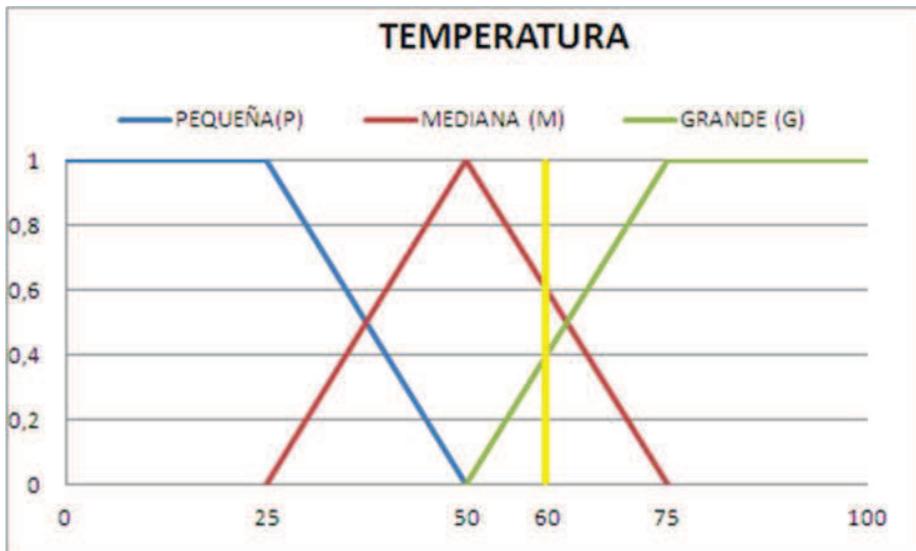
- Temperatura (T): pequeña, mediana, grande (P, M, MG).
- Presión (P): alta pequeña, mediana, grande (P, M, MG).

Salida:

- Tiempo (t): muy pequeño, pequeño, mediano, grande, muy grande (PP, P, M, G, MG).

Para la fuzzificación se obtiene los valores de membresía para los valores de entrada: En las Figuras 3.3 y 3.4 se han establecido de forma gráfica valores de temperatura en 60% y presión en 30% respectivamente, determinándose además los valores de la entrada en relación a las funciones de pertenencia.

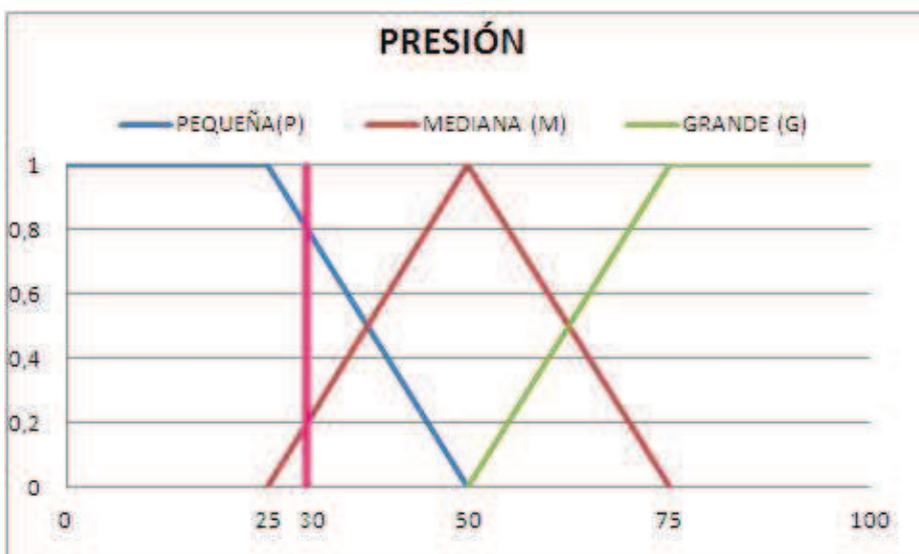
Temperatura 60%



- $\mu_P(T)=0$
- $\mu_M(T)=0.6$
- $\mu_G(T)=0.4$

Figura 3.3 Funciones de pertenencia para temperatura = 60%

Presión 30%



- $\mu_P(PR)=0.8$
- $\mu_M(PR)=0.2$
- $\mu_G(PR)=0$

Figura 3.4 Funciones de pertenencia para presión = 30%

Luego se procede a la evaluación de cada una de las reglas de acuerdo a la base de reglas mostrada en la Tabla 3.5:

Tabla. 3.5. Base de reglas para el control fuzzy.

		TEMPERATURA (TM)		
		PEQUEÑA(P)	MEDIANA(M)	GRANDE(G)
PRESIÓN (PR)	PEQUEÑA(P)	M	P	PP
	MEDIANA(M)	G	M	P
	GRANDE(G)	MG	G	M

Regla 1: IF TM=M AND PR=P THEN SALIDA=SP

$$\mu_M(T)=0.6, \mu_P(PR)=0.8 \gg \mu_{SP1}(S)=\min(0.6, 0.8); \mu_{SP1}(S)=0.6$$

Regla 2: IF TM=M AND PR=M THEN SALIDA=SM

$$\mu_M(T)=0.6, \mu_M(PR)=0.2 \gg \mu_{M2}(S)=\min(0.6, 0.2); \mu_{M2}(S)=0.2$$

Regla 3: IF TM=G AND PR=P THEN SALIDA=SPP

$$\mu_G(T)=0.4, \mu_P(PR)=0.8 \gg \mu_{PP3}(S)=\min(0.4, 0.8); \mu_{PP3}(S)=0.4$$

Regla 4: IF TM=G AND PR=M THEN SALIDA=SP

$$\mu_G(T)=0.4, \mu_M(PR)=0.2 \gg \mu_{P4}(S)=\min(0.4, 0.2); \mu_{P4}(S)=0.2$$

De la evaluación de las reglas se agregan los resultados

- $\mu_{P1}(S) = 0.6$
- $\mu_{M2}(S) = 0.2$
- $\mu_{PP3}(S) = 0.4$
- $\mu_{P4}(S) = 0.2$

En la Figura 3.5 se puede observar de forma gráfica la solución obtenida para cuando se tiene una temperatura de 60% y una presión de 30%.

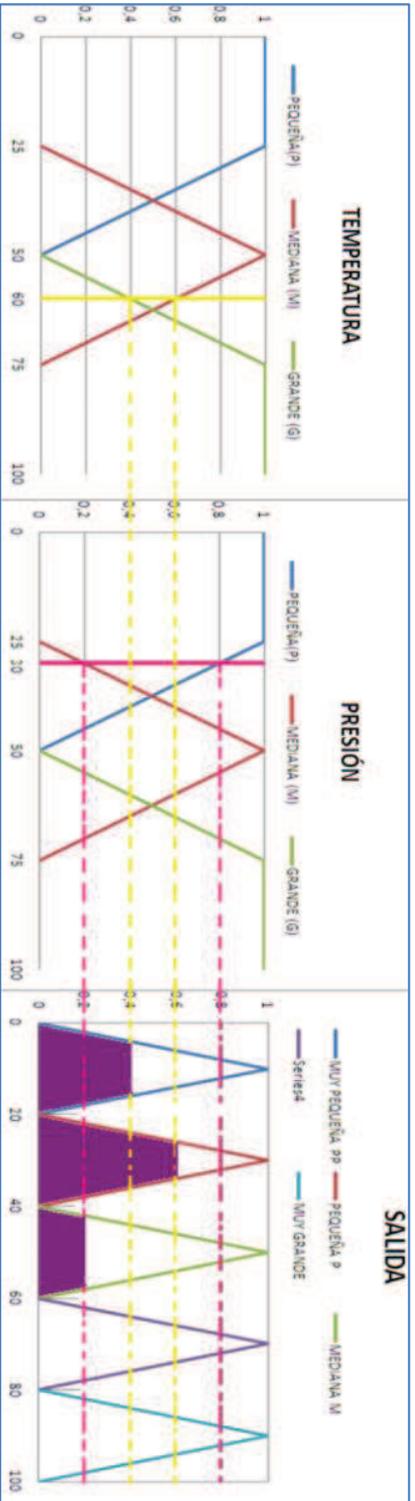


Figura 3.5 Variable se salida en base a la inferencia difusa

Estos valores representan el grado de membresía a cada uno de los conjuntos, finalmente se debe convertir la salida de las reglas difusas en un valor escalar para lo cual se utiliza el método de max-min, en el cual se selecciona la regla de mayor valor, posteriormente se utiliza el método de promedio ponderado para calcular el valor de la salida del controlador.

$$Salida = Z^* = \frac{\sum_{i=1}^n MAX(S_i) * \mu_S(S_i)}{\sum_{i=1}^n \mu_S(S_i)} \quad (3.4)$$

Para el ejemplo el valor de salida sería:

$$Salida = \frac{10(0.4) + 30(0.6) + 50(0.2)}{0.4 + 0.2 + 0.6}$$

$$Salida = 26,6$$

### 3.6 Definición de componentes

Analizando el diagrama de la Figura 3.6 se puede determinar que los principales componentes involucrados en el proceso de controlar mediante lógica difusa la producción de hidrógeno a partir de vapor sobrecalentado son: el controlador fuzzy, el pre actuador, la interfaz que permite el diálogo entre el operador y el control automático.

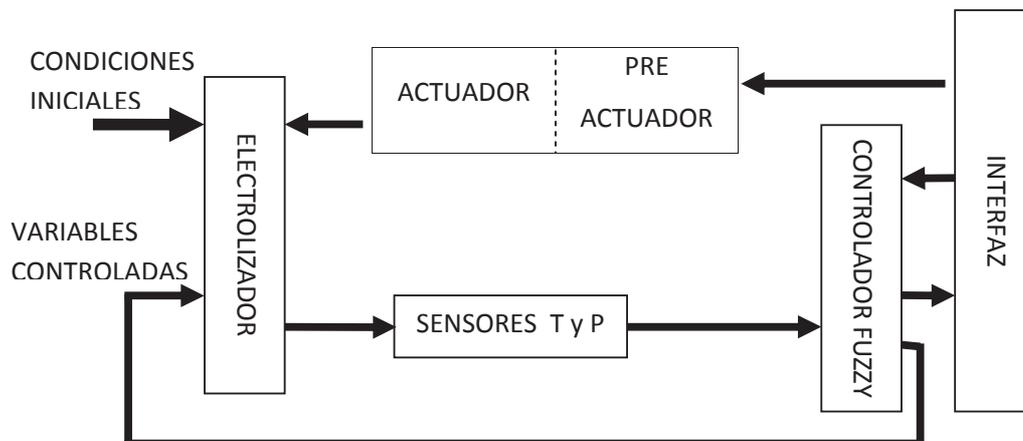


Figura 3.6 Componentes del proceso.

### 3.6.1 Controlador

Para poder analizar el controlador es necesario considerar que este se subdivide en dos componentes principales que son: el tipo de controlador propiamente dicho y el algoritmo a utilizar dentro de este controlador.

Para un control fuzzy podemos tener dos tipos de controladores: un computador (PC) y un autómata programable industrial (API). La característica particular de ambos controladores es que permiten realizar diferentes funciones de control sin la necesidad de modificar el hardware del sistema sino únicamente cambiando la lógica del programa.

El controlador desarrollado en un PC, posee una gran capacidad de cálculo y comunicación con las interfaces gráficas con el usuario, lo cual le permite resolver procesos complejos, sin embargo este tipo de control tiene limitado número de interfaces apropiadas para sensar e ingresar los datos al sistema, otro elemento importante a considerar es el tamaño y la sensibilidad que este tipo de sistemas presenta a las perturbaciones externas.

Un API es un dispositivo de control que posee una configuración interna que puede ser adaptada a diferentes procesos mediante un programa específico, dicha configuración permite la conexión de entradas provenientes de señales tanto analógicas como digitales directamente en el dispositivo, las entradas son evaluadas y procesadas en base a lo definido en el programa para posteriormente generar las salidas del sistema, las cuales también pueden ser analógicas o digitales.

Las ventajas que presenta un API están relacionadas con la capacidad de incluir las interfaces necesarias para conectar las señales de entrada, así como la modularidad que permite interconectar hardware a fin de configurar el equipo de acuerdo a las necesidades. Adicionalmente han sido creados para su aplicación en la industria, lo cual implica tamaños reducidos y gran resistencia a las perturbaciones y factores externos.

En base al análisis realizado, debido a su aplicación industrial y a la posibilidad de programar un control fuzzy se ha seleccionado entre los posibles controladores al API para el desarrollo del controlador en este proyecto.

Una vez definido el tipo de controlador se procedió a seleccionar el equipo comercial a utilizarse. Debido a la experiencia en la programación adquirida durante el proceso de formación en equipos de marca SIEMENS, considerando además que debido a su amplia gama de productos esta marca permite obtener la configuración más adecuada a los requerimientos, se decidió utilizar un API de esta marca para el desarrollo de la aplicación.

### **3.6.1 Selección de sensores**

Existen varios tipos de sensores de temperatura y presión que permiten realizar la medición deseada, como los que se enlistan más adelante. Para el presente proyecto la selección estuvo basada en el Método de residuos ponderados, el cual nos permitirá elegir los sensores más adecuados para la detección de la señal de

temperatura, asegurando acoplamiento y equilibrio en el proceso de medición, considerandos además las medidas, la forma y forma de medición del sensor.

Sensores de Temperatura:

- Termocupla
- RTD
- Termistor

### 3.6.1.1 Método de Residuos Ponderados para selección de sensores

La valoración de las alternativas de sensores de temperatura, se realizó tomando en cuenta los siguientes criterios:

- Alcance de medición
- Exactitud
- Intercambiabilidad
- Resistencia

La ponderación de cada criterio está definida en la Tabla 3.6, posteriormente se muestra en las respectivas Tablas la evaluación de cada criterio.

**Tabla. 3.6. Ponderación de los criterios de selección**

Alcance de medición = exactitud > resistencia > intercambiabilidad						
Criterio	Alcance de medición	Exactitud	Resistencia	Intercambiabilidad	$\Sigma$ +1	ponderación
Alcance de medición		0.5	1	1	3.5	0.35
Exactitud	0.5		1	1	3.5	0.35
Resistencia	0	0		1	2	0.2
Intercambiabilidad	0	0	0		1	0.1
				Suma	10	1

- 1) En la Tabla 3.7 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación alcance de medición

**Tabla. 3.7. Evaluación alcance de medición**

termocupla > RTD = termistor					
Alcance de medición	Termocupla	RTD	Termistor	$\sum +1$	ponderación
Termocupla		1	1	3	0.5
RTD	0		0.5	1.5	0.25
Termistor	0	0.5		1.5	0.25
			Suma	6	1

- 2) En la Tabla 3.8 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de exactitud

**Tabla. 3.8. Evaluación de exactitud**

RTD > termocupla > termistor					
Exactitud	Termocupla	RTD	Termistor	$\sum +1$	Ponderación
Termocupla		1	0	2	0.333
RTD	1		1	3	0.5
Termistor	0	0		1	0.166
			suma	6	1

- 3) En la Tabla 3.9 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de resistencia

**Tabla. 3.9. Evaluación de resistencia**

termocupla = RTD = termistor					
Resistencia	Termocupla	RTD	Termistor	$\sum +1$	Ponderación
Termocupla		0.5	0.5	2	0.333
RTD	0.5		0.5	2	0.333
Termistor	0.5	0.5		2	0.333
			suma	6	1

- 4) En la Tabla 3.10 se muestran los resultados obtenidos en la evaluación de intercambiabilidad

**Tabla. 3.10. Evaluación de intercambiabilidad**

termocupla = RTD = termistor					
Intercambiabilidad	Termocupla	RTD	Termistor	$\sum +1$	Ponderación
Termocupla		0.5	0.5	2	0.333
RTD	0.5		0.5	2	0.333
Termistor	0.5	0.5		2	0.333
			suma	6	1

En referencia al análisis por el método de los residuos ponderados, los sensores seleccionados fueron para la temperatura: Termocupla de 0 a 1500oC. Para el sensor de presión se consideró su alcance de medición de 0 a 30 MPa.

### 3.6.2 Dimensionamiento del PLC

Para el dimensionamiento del PLC han sido considerados los análisis realizados, en base a los cuales se establecieron los requerimientos mostrados en la Tabla 3.11.

**Tabla. 3.11. Criterios para el dimensionamiento del PLC.**

<b>Parámetro</b>	<b>Descripción</b>	<b>Característica de PLC</b>
Sensores	Medición de temperatura y presión	Módulo de entrada de termocupla Módulo de entrada analógica
Actuadores	Activación de electrolizador.	Módulo de salidas digitales
Requerimientos del controlador.	Implementación de sistema Fuzzy	Soporte para implementación de lógica difusa.
Entradas/salidas adicionales	Expansión o modificación del controlador	PLC modular.

Los requerimientos establecidos, definieron los componentes que debe poseer el PLC, mismo que están definidos en la Tabla 3.12.

**Tabla. 3.12. Componentes del PLC.**

<b>COMPONENTE</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>
PLC SIEMENS ET 200S	IM 151-8 PN/DP CPU
Micro memory card	S7 300 64K
Fuente de Poder	para PLC
Módulo de señales analógicas	2 señales de entrada analógicas HF
Módulo de señales analógicas para termocupla	2 señales de entrada analógicas TC
Módulo salidas digitales	8 salidas digitales 24VDC
Módulo entradas digitales	8 entradas digitales 24VDC
Módulo terminal para módulos de potencia	Terminal TM
Modulo de potencia para alimentación	MOD E/S
Módulo terminal para módulos de E/S	Terminal E/S

El controlador que cumple con los requerimientos para el desarrollo del proyecto es el SIEMENS ET200S.

## CAPÍTULO 4

### 4 PROGRAMACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR

#### 4.1 Diagrama de esquemático

A continuación en la Figura Nro 4.1 se muestra una síntesis de la relación existente entre los sensores de entrada, el controlador fuzzy y la interfaz de usuario.

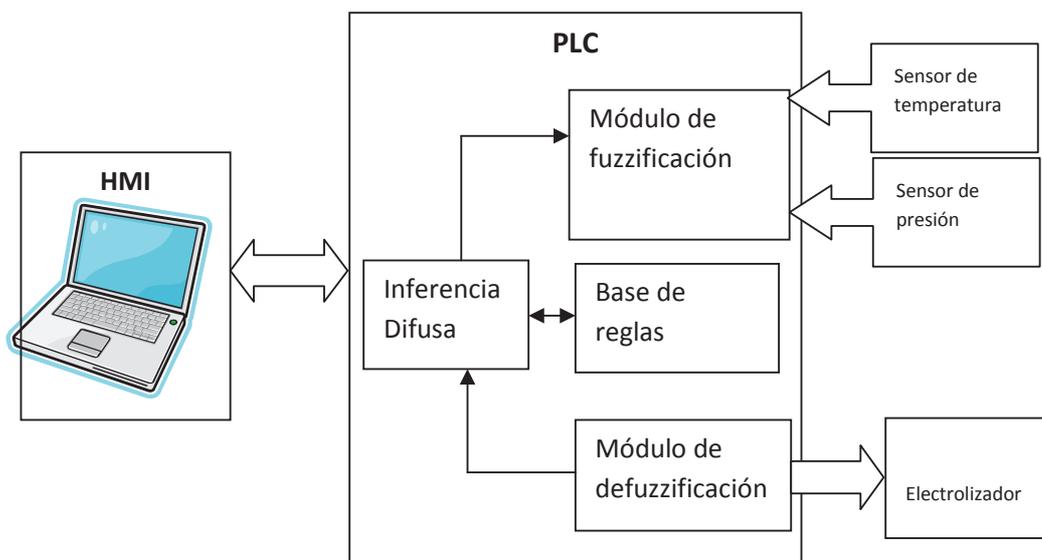


Figura 4.1 Diagrama esquemático del controlador.

#### 4.2 Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo de la Figura 4.2 muestra de forma simplificada la estructura y orden del control fuzzy (fuzzificación, evaluación de reglas y defuzzificación)

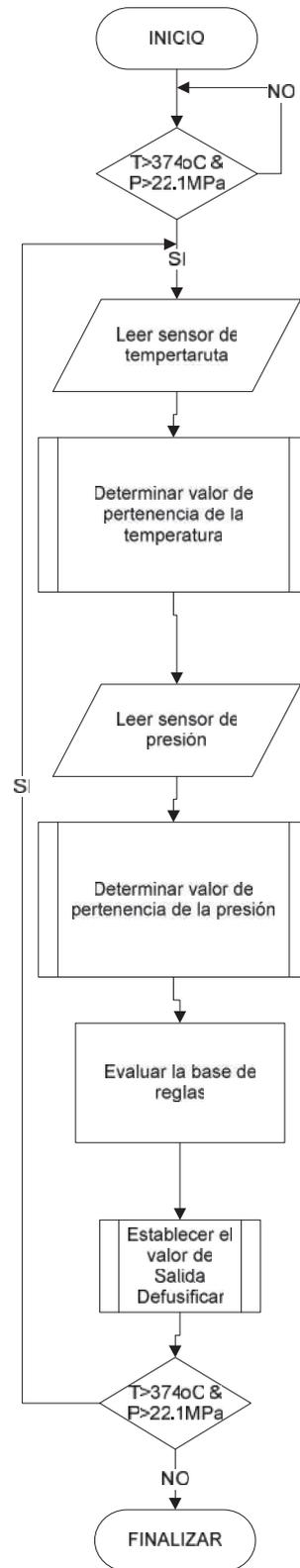


Figura 4.2 Diagrama de flujo del controlador.

### **4.3 Software de programación para PLC**

El software utilizado para la programación del PLC, permite trabajar con diferentes modos de programación como son KOP (diagrama de escalera), FUP (diagrama de bloques de funciones), AWL (lista de instrucciones) y SCL (lenguaje de programación estructurado). Debido a que fue necesario realizar activaciones, comparaciones, escalamientos así como programar ecuaciones tanto para las rectas como para los cálculos, con el fin de implementar mediante programación el control fuzzy, para el desarrollo del controlador se utilizaron dos modos de programación, el KOP, y SCL.

#### **4.3.1 Totally Integrated Automation Portal [12]**

TIA PORTAL es un nuevo framework de ingeniería que reúne todas las herramientas de software de automatización en un único entorno de desarrollo, permitiendo a los usuarios puedan llevar a cabo la ingeniería, puesta en marcha, operación y monitorización de un proceso a través de una única plataforma de control.

Mediante una única interfaz el TIA PORTAL admite integrar distintas aplicaciones de software industrial, a fin de facilitar el desarrollo, la interconexión y la operación, tal como se lo muestra la Figura 4.3, donde se ha representado de forma gráfica dicha integración.

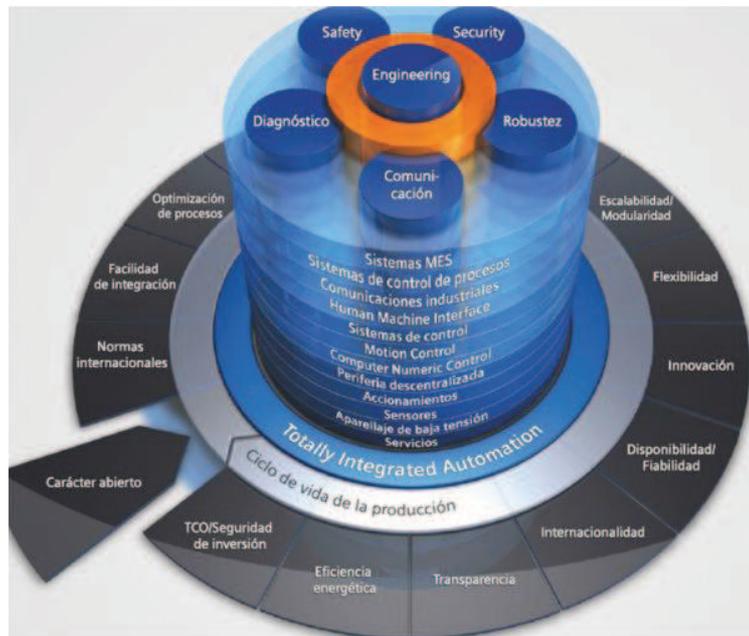


Figura 4.3 Conceptualización Totally Integrated Automation Portal 12].

Considerando que el controlador que cumple con los requerimientos para el desarrollo del proyecto es el SIEMENS ET200S, la programación del controlador se desarrollará en el TIA PORTAL V12, dado que esta versión soporta este tipo de PLC. Para la interfaz HMI se utilizará la versión Runtime que permite el control desde la PC y comunicación será establecida por medio de la configuración de red vía puerto Ethernet.

#### 4.3.2 Fuzzy Control++ [13]

SIEMENS posee una herramienta para la configuración de lógica difusa, denominada FuzzyControl++. Al ser esta una herramienta para el control de procesos mediante lógica difusa, brinda soluciones de control a procesos que debido a su complejidad no tienen definido un modelo matemático así como a regulaciones no lineales cuyo control con herramientas estándar sería complejo.

La herramienta FuzzyControl++ proporciona una interfaz gráfica mediante el cual es posible desarrollar y configurar un sistema fuzzy para la automatización de procesos a través de la descripción verbal de las variables de entrada, salida y reglas de funcionamiento.

Sin embargo los bloques y librerías de la herramienta FuzzyControl++ únicamente están disponibles para el SIMATIC S7-300, S7-400 y SIMATIC WinCC y NO para el TIA PORTAL, motivo por el cual no fue posible la utilización de esta herramienta para el desarrollo del control fuzzy de este proyecto.

Debido a la imposibilidad de utilizar la herramienta para la creación de controladores fuzzy, fue necesario programar cada etapa del controlador fuzzy mediante subfunciones en el software del PLC.

#### **4.4 Programación del PLC en TIA Portal**

A continuación se detallan los pasos necesarios para realizar la programación del PLC utilizando el software de SIEMENS TIA Portal.

##### **4.4.1. Entorno TIA Portal**

El entorno del TIA Portal incluye en una única vista los módulos mostrados en la Figura 4.4.

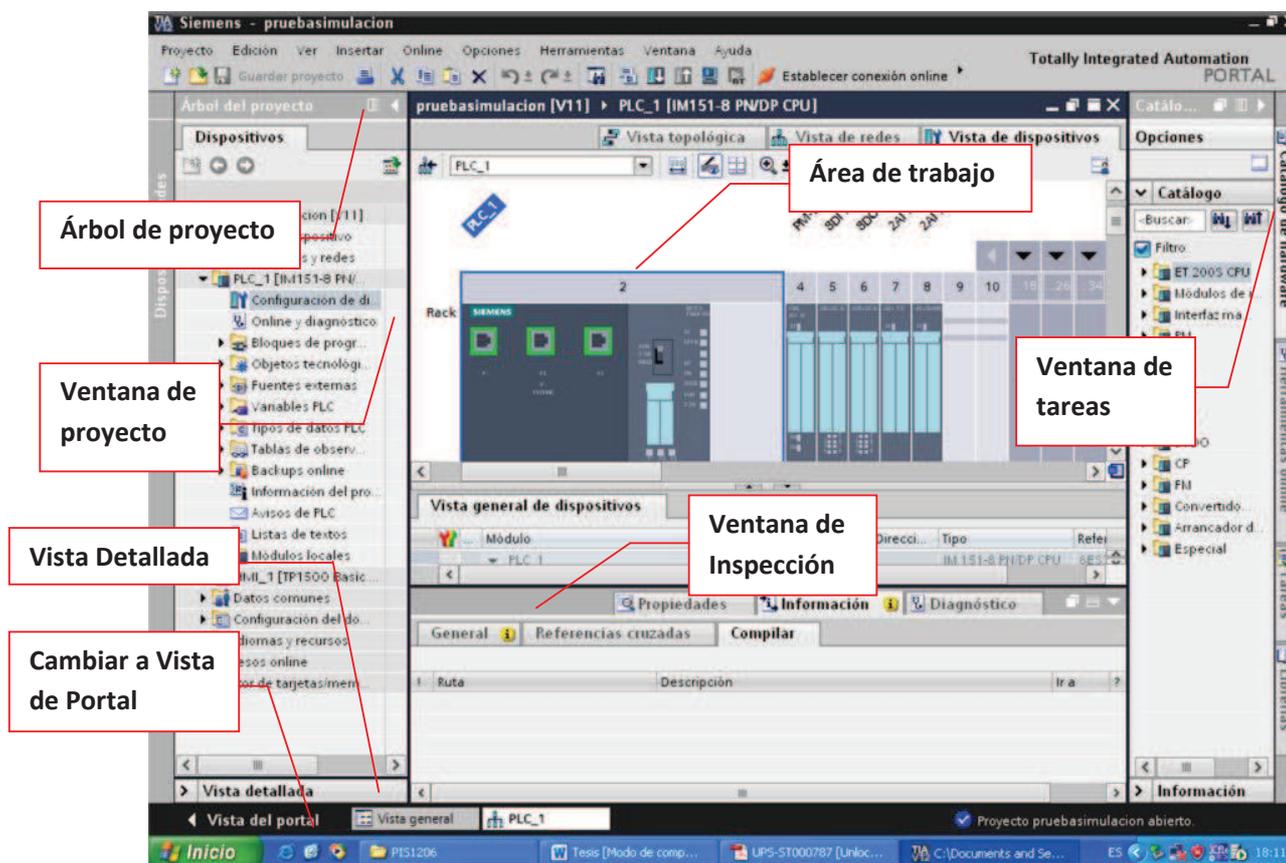


Figura 4.4 Módulos presentes en el entorno TIA Portal

**Árbol de proyecto:** permite acceder a los todos los elementos y datos del proyecto, adicionalmente es posible modificar y agregar propiedades en cada componente

**Ventana de proyecto:** muestra todos los elementos y datos del proyecto.

**Ventana detallada:** muestra las listas de texto o variables del elemento seleccionado.

**Cambiar a vista de portal:** permite acceder a la vista de portal que posee el TIA Portal.

**Área de trabajo:** permite acceder a las características del componente de hardware seleccionado permitiendo editar las propiedades activas.

**Ventana de inspección:** muestra las características adicionales del componente seleccionado, así como acciones realizadas durante la compilación del programa.

**Ventana de tareas:** mediante esta ventana es posible realizar acciones de librería o de hardware en el componente seleccionado.

Previo a implementación del controlador, es necesario crear un proyecto en el TIA Portal

#### 4.4.2 Creación del proyecto en TIA Portal

Para la creación de un proyecto es necesario iniciar el TIA Portal y posteriormente realizar los pasos que se detallan a continuación y posteriormente se muestran en la Figura 4.5.

1er Paso: Seleccionar Crear proyecto.

2do Paso: Seleccionar Configurar un dispositivo.

3er Paso: Seleccionar entre la lista de PLC el CPU a utilizarse en la aplicación.

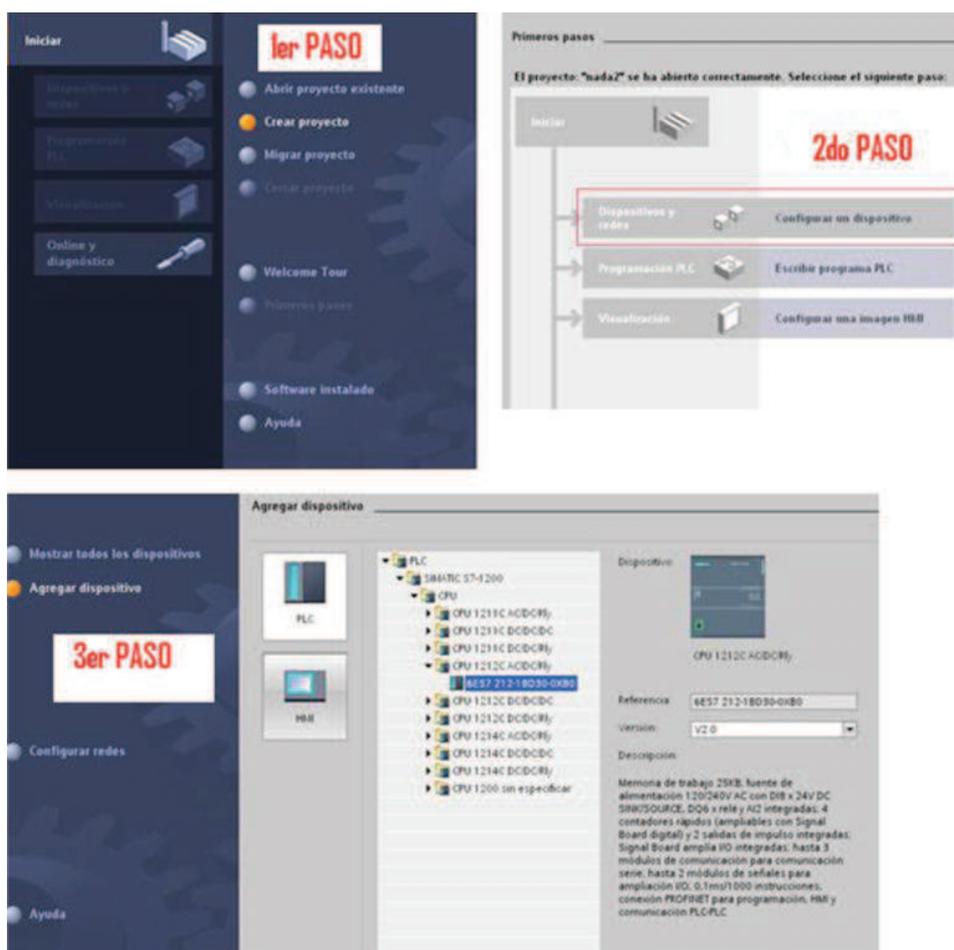


Figura 4.5 Creación de un proyecto en TI Portal

#### 4.4.3 Configuración de dispositivos

Una vez definido el CPU, es necesario incluir los módulos definidos para el desarrollo de la aplicación, para esto se debe seleccionar del catálogo de hardware en orden los módulos descritos en Tabla 4.1. La configuración de dispositivos se muestra en la Figura 4.6.

Tabla. 4.1. Módulos del PLC.

Descripción	Referencia
Modulo de potencia para alimentar MOD E/S	6ES7 138-4CB11-0AB0
Módulo 8DI 24VDC entradas digitales	6ES7 131-4BF00-0AA0
Módulo 8DO 24VDC salidas digitales	6ES7 132-4BF00-0AA0
Módulo de 2 AI p/señales analógicas TC	6ES7 134-4JB01-0AB0
Módulo de 2 AI p/señales analógicas HF	6ES7 134-4MB02-0AB0

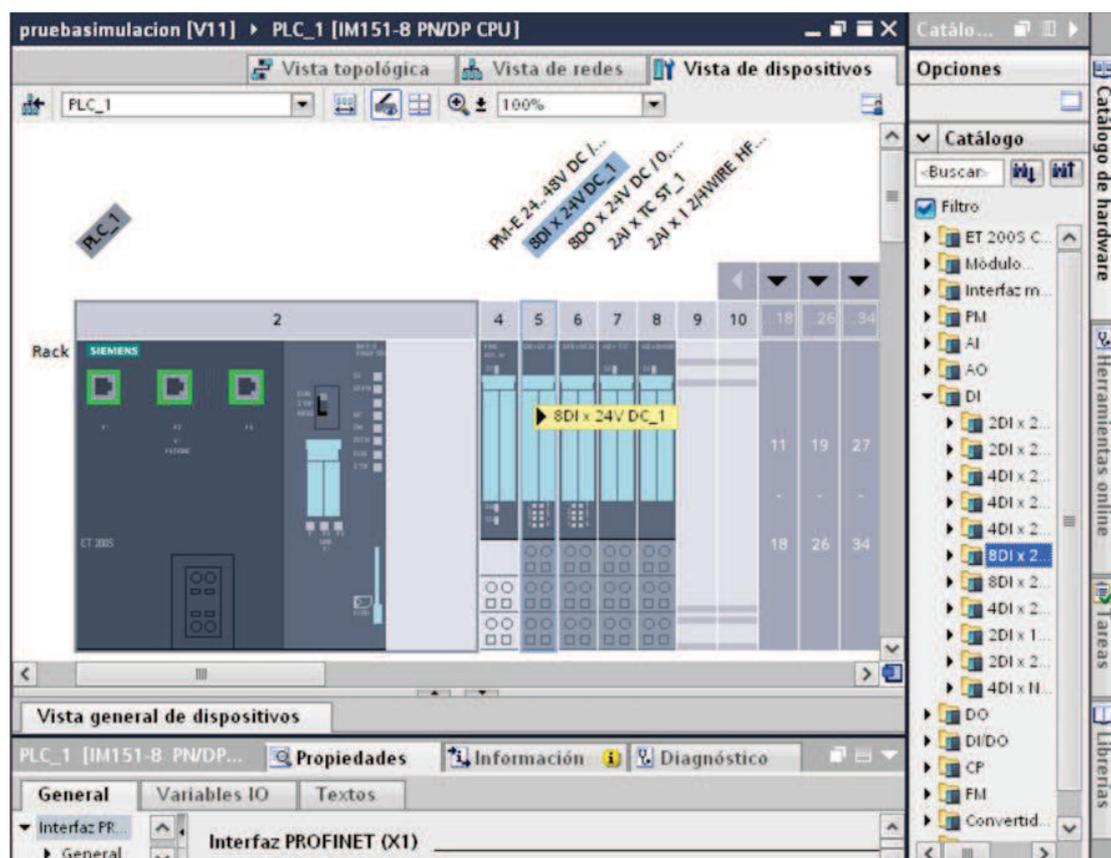


Figura 4.6 Configuración de dispositivos en TIA Portal

#### 4.4.4 Comunicación de TIA PORTAL V11 con el PLC

Para establecer la comunicación entre el TIA Portal instalado en la PC y el PLC es necesario configurar el hardware y utilizar la interfaz PROFINET provista en el PLC, mediante la cual se es posible conectar un cable Ethernet estándar o cruzado directamente entre los dos dispositivos

Para configurar el hardware en primer lugar es necesario asignar una dirección IP al PLC realizando los pasos listados a continuación y mostrados en la Figura 4.7.

1. En el área de trabajo seleccione el CPU del PLC.
2. En la ventana de inspección selecciones la pestaña Propiedades/General/InterfazPROFINET X1/Direcciones Ethernet.
3. Llenar la información en los campos de acuerdo a la red que esté usando.

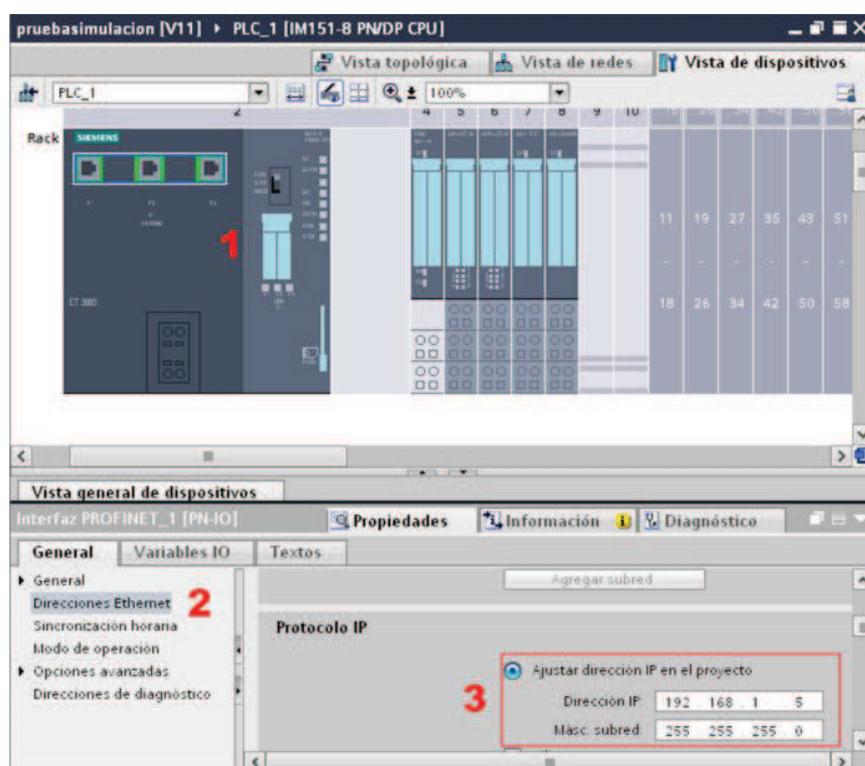


Figura 4.7 Asignación de la dirección IP al PLC

En segundo lugar se debe asignar una dirección IP al PC realizando los listados a continuación y mostrados en la Figura 4.8.

1. Ir a Mis sitios de red dar clic derecho del mouse y acceder a Propiedades.
2. Conexión de área local dar clic derecho del mouse y acceder a Propiedades
3. En Propiedades de conexión de área local/Protocolo Internet (TCP/IP)/Propiedades/ Usar la siguiente dirección IP llene los campos con la información que se muestra en la Figura 4.8.

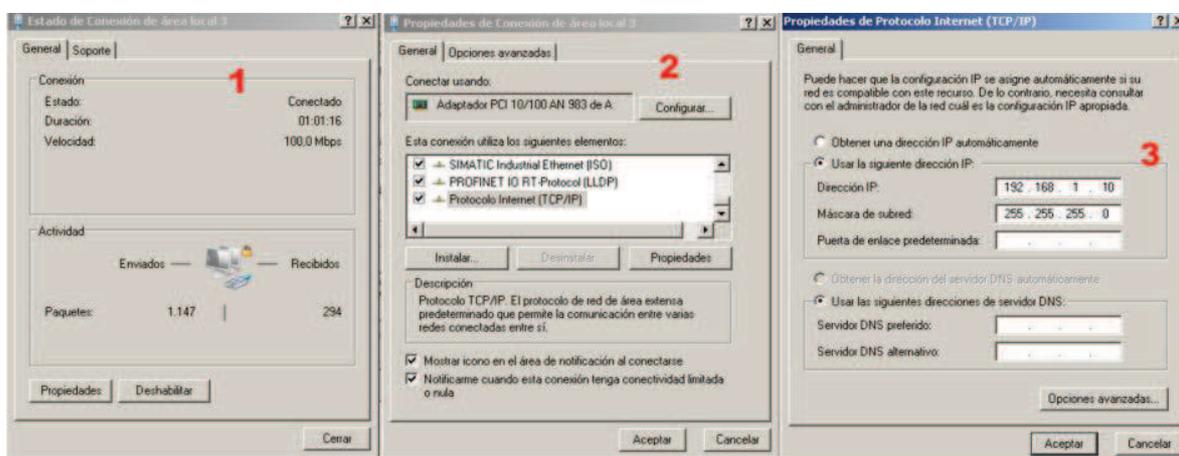


Figura 4.8 Asignación de la dirección IP al PC

Para realizar la comunicación deberá establecerse la conexión ONLINE mediante el siguiente icono  (icono de conexión entre TIA – CPU), para finalizar la conexión deberá utilizarse el icono para desactivar la conexión ONLINE  (Deshace conexión entre TIA – CPU).

#### 4.4.4.1 HMI RUNTIME

La interfaz de manejo y visualización del controlador se realizó utilizando la aplicación RUNTIME que permite que la HMI se maneje desde el PC.

Para crear una aplicación RUNTIME es necesario realizar los listados a continuación y mostrados en la Figura 4.9:

1. Agregar un nuevo dispositivo/Sistema PC/Simatic HMI Application/WinCC RT Advanced/Aceptar
2. En el área de trabajo seleccionar el módulo WinCC RT Advanced ir a la ventana de tareas/Communication modules/PROFINET ethernet/IE general.
3. Ir a vista de redes y realizar la conexión entre el PLC y el PC System.

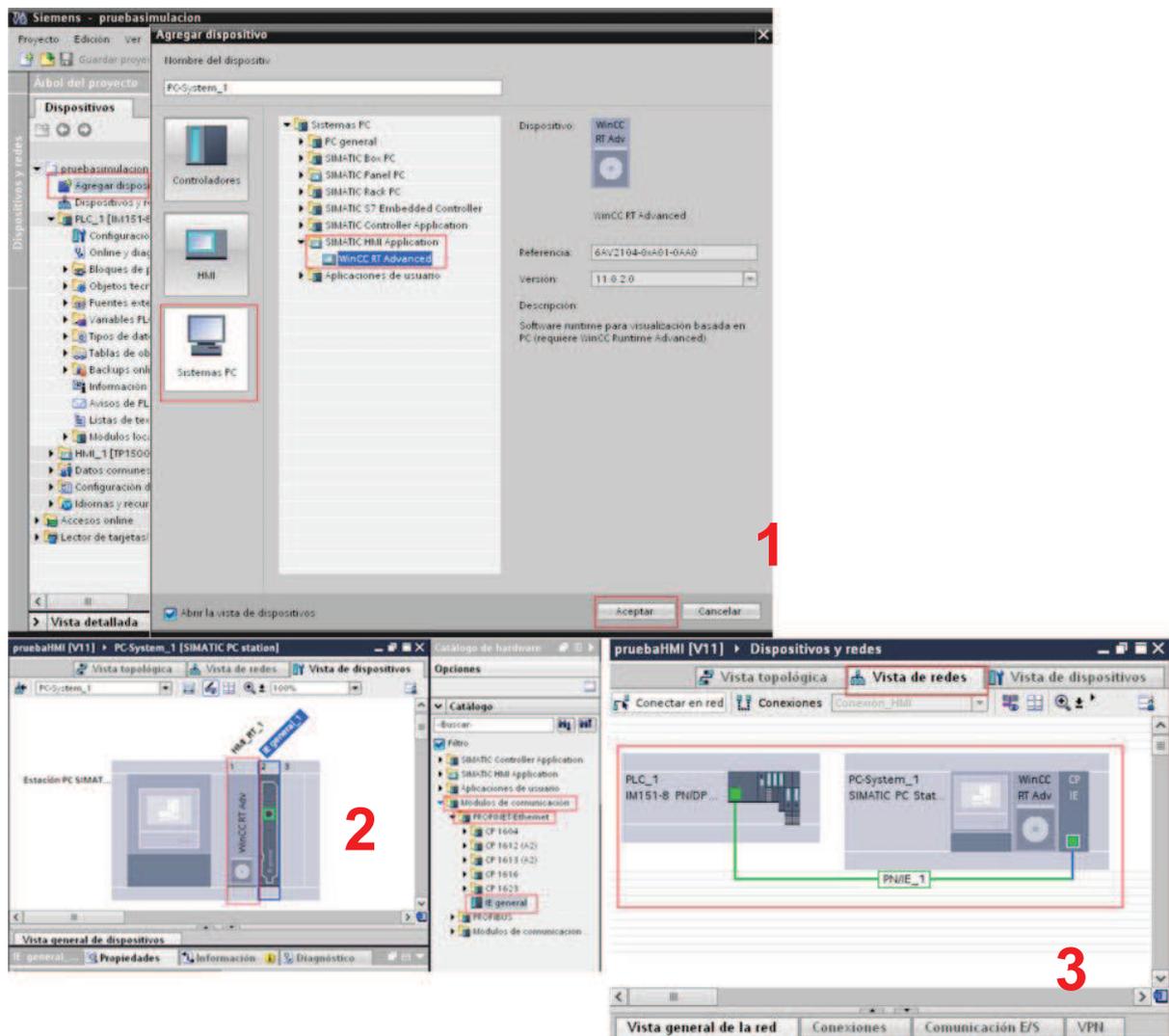


Figura 4.9 Creación de Aplicación RUNTIME.

Finalmente se debe crear la interfaz HMI para el manejo del controlador, como se muestra en la Figura 4.10.

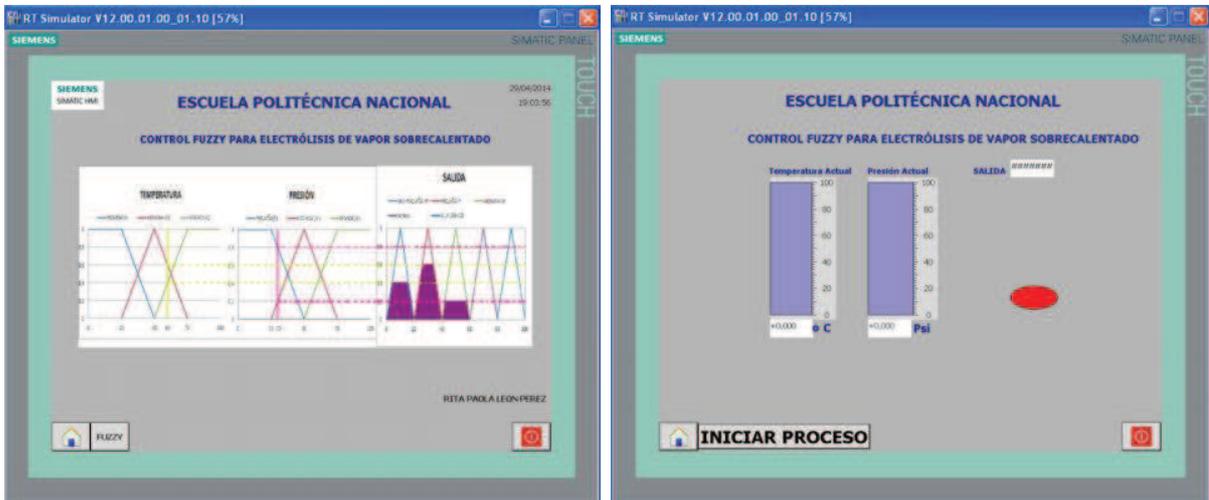


Figura 4.10 interfaz HMI para el manejo del controlador.

## 4.5 Implementación del controlador

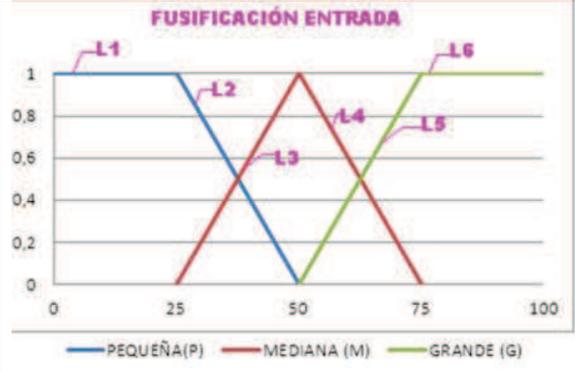
Para la implementación del controlador fuzzy, fue necesario crear funciones para: las rectas que representan las funciones de membresía para las entradas, determinar el valor de membresía correspondiente al valor presente en el sensor, rectas de las funciones de pertenencia para la salida, evaluación de la base de reglas, y defuzzificación utilizando la ecuación del método de promedio ponderado.

### 4.5.1 Descripción

#### 4.5.1.1 Funciones para fuzzificación de las entradas

Para la fuzzificación de las entradas se crearon las funciones L1, L2, L3, L4, L5, Y L6 a fin construir las rectas que conforman las funciones de membresía como se muestra en la Tabla 4.2:

Tabla. 4.2. Funciones creadas para la fuzzificación de las entradas.

FUNCIONES DE MEMBRESIA PARA LAS ENTRADAS	RECTA	FUNCION	CÓDIGO
	L1	L1 [FC2]	#Y:=1;
	L2	L2 [FC3]	#Y:=-#X/25+2;
	L3	L3 [FC5]	#Y:=#X/25-1;
	L4	L4 [FC6]	#Y:=-#X/25+3;
	L5	L5 [FC7]	#Y:=#X/25-2;
	L6	L6 [FC8]	#Y:=1;

4.5.1.2 Función para la evaluación de la base de reglas

Para la evaluación de la base de reglas se creó la función FUZZY [FC4], la cual calcula la pertenencia de las entradas y evalúa la base de reglas en base a todas las posibles combinaciones y se establecen los parámetros para la defuzzificación, tal como se muestra en la solución gráfica de la Figura 4.11.

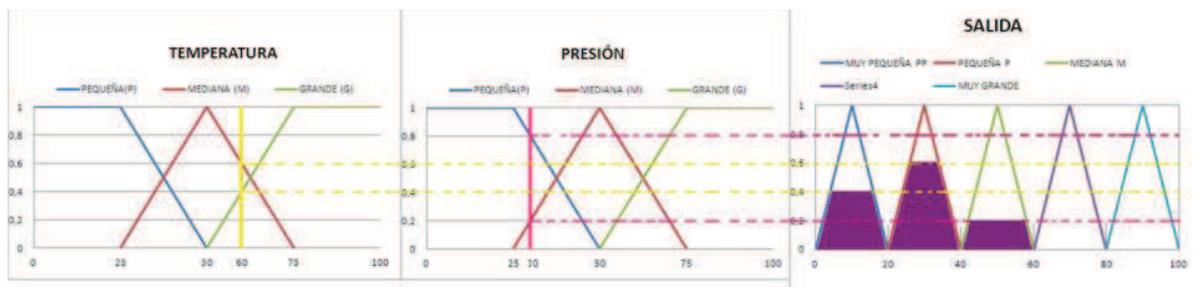


Figura 4.11 Ejemplo de evaluación de la base de reglas.

**CÓDIGO:**

#PP:=10;

#P:=30;

#M:=50;

#G:=70;

```
#MG:=90;
IF #TM>=0 AND #TM<=25 THEN
  #a:=1;
  IF #PR>=0 AND #PR<=25 THEN
    #b:=1;
    #SL:=#M;
  END_IF;
  IF #PR>25 AND #PR<=50 THEN
    "L2"(X:=#PR,Y=>#b);
    "L3"(X:=#PR,Y=>#c);
    #alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #b);
    #alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
    "DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#M, z2:=#G);
  END_IF;
  IF #PR>50 AND #PR<=75 THEN
    "L4"(X:=#PR,Y=>#b);
    "L5"(X:=#PR,Y=>#c);
    #alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #b);
    #alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
    "DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#G, z2:=#MG);
  END_IF;
  IF #PR>75 AND #PR<=100 THEN
    #b:=1;
    #SL:=#MG;
  END_IF;
```

END\_IF;

IF #TM>25 AND #TM<=50 THEN

"L2"(X:=#TM,Y=>#a);

"L3"(X:=#TM,Y=>#b);

IF #PR>=0 AND #PR<=25 THEN

#c:=1;

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

#alpha2:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

"DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#M, z2:=#P);

END\_IF;

IF #PR>25 AND #PR<=50 THEN

"L2"(X:=#PR,Y=>#c);

"L3"(X:=#PR,Y=>#d);

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

#alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #d);

#alpha3:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

#alpha4:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #d);

"DEFUZ2"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, alpha3:=#alpha3, alpha4:=#alpha4,  
SL=>#SL, z1:=#M, z2:=#G, z3:=#P, z4:=#M);

END\_IF;

IF #PR>50 AND #PR<=75 THEN

"L4"(X:=#PR,Y=>#c);

"L5"(X:=#PR,Y=>#d);

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

#alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #d);

```

#alpha3:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

#alpha4:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #d);

"DEFUZ2"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, alpha3:=#alpha3, alpha4:=#alpha4,
SL=>#SL, z1:=#G, z2:=#MG, z3:=#M, z4:=#G);

END_IF;

IF #PR>75 AND #PR<=100 THEN

#c:=1;

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

#alpha2:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

"DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#MG, z2:=#G);

END_IF;

END_IF;

IF #TM>50 AND #TM<=75 THEN

"L4"(X:=#TM,Y=>#a);

"L5"(X:=#TM,Y=>#b);

IF #PR>=0 AND #PR<=25 THEN

#c:=1;

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

#alpha2:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

"DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#P, z2:=#PP);

END_IF;

IF #PR>25 AND #PR<=50 THEN

"L2"(X:=#PR,Y=>#c);

"L3"(X:=#PR,Y=>#d);

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);

```

```

#alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #d);
#alpha3:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);
#alpha4:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #d);

"DEFUZ2"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, alpha3:=#alpha3, alpha4:=#alpha4,
SL=>#SL, z1:=#P, z2:=#M, z3:=#PP, z4:=#P);

END_IF;

IF #PR>50 AND #PR<=75 THEN

"L4"(X:=#PR,Y=>#c);

"L5"(X:=#PR,Y=>#d);

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
#alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #d);
#alpha3:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);
#alpha4:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #d);

"DEFUZ2"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, alpha3:=#alpha3, alpha4:=#alpha4,
SL=>#SL, z1:=#M, z2:=#G, z3:=#P, z4:=#M);

END_IF;

IF #PR>75 AND #PR<=100 THEN

#c:=1;

#alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
#alpha2:=MIN(IN1:=#b , IN2 := #c);

"DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#G, z2:=#M);

END_IF;

END_IF;

IF #TM> 75 AND #TM<=100 THEN

#a:=1;

```

```
IF #PR>=0 AND #PR<=25 THEN
    #b:=1;
    #SL:=#PP;
END_IF;
IF #PR>25 AND #PR<=50 THEN
    "L2"(X:=#PR,Y=>#b);
    #alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #b);
    "L3"(X:=#PR,Y=>#c);
    #alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
    "DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#PP, z2:=#P);
END_IF;
IF #PR>50 AND #PR<=75 THEN
    "L4"(X:=#PR,Y=>#b);
    "L5"(X:=#PR,Y=>#c);
    #alpha1:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #b);
    #alpha2:=MIN(IN1:=#a , IN2 := #c);
    "DEFUZ"(alpha1:=#alpha1, alpha2:=#alpha2, SL=>#SL, z1:=#P, z2:=#M);
END_IF;
IF #PR>75 AND #PR<=100 THEN
    #b:=1;
    #SL:=#M;
END_IF;
END_IF;
```

#### 4.5.1.3 Funciones para la defuzzificación de la señal de salida

La defuzzificación de la salida se creó dos funciones DEFUZ y DEFUZ2 debido a que dependiendo de la pertenencia de las entradas se podrá calcular con cuatro u ocho parámetros respectivamente. Para ambas funciones el valor de salida se calcula en base al método de Promedio Ponderado. Las funciones y parámetros necesarios para cada una de ellas se muestran en la Tabla 4.3.

Tabla. 4.3. Funciones creadas para la defuzzificación de la salida.

FUNCIÓN	CÓDIGO
 DEFUZ [FC10]	$\#SL:=\frac{(\#alpha1*\#z1+\#alpha2*\#z2)}{(\#alpha1+\#alpha2)};$
 DEFUZ2 [FC1]	$\#SL:=\frac{(\#alpha1*\#z1+\#alpha2*\#z2+\#alpha3*\#z3+\#alpha4*\#z4)}{(\#alpha1+\#alpha2+\#alpha3+\#alpha4)};$

#### 4.5.1.4 Bloque principal Main OB1

En el bloque principal (Figura 4.12) se sensa si está activado el botón de inicio del proceso, el cual activa el funcionamiento del bloque FUZZY.

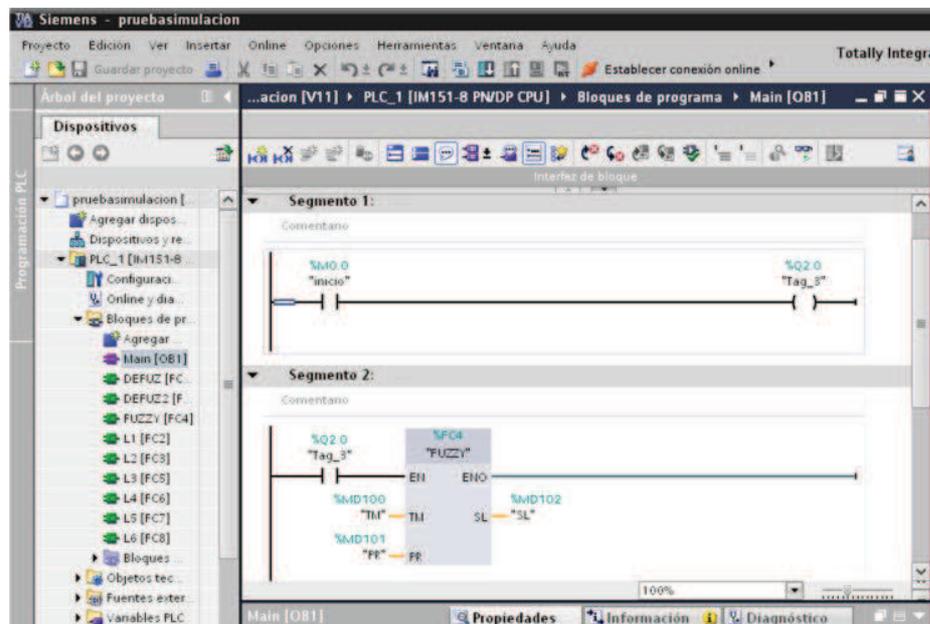


Figura 4.12 Bloque Main OB1

#### 4.5.2 Diagrama de conexión

A fin de facilitar la conexión entre el PLC y los diversos componentes del sistema, a continuación se muestra en la Figura 4.13, el diagrama de conexión a realizarse.

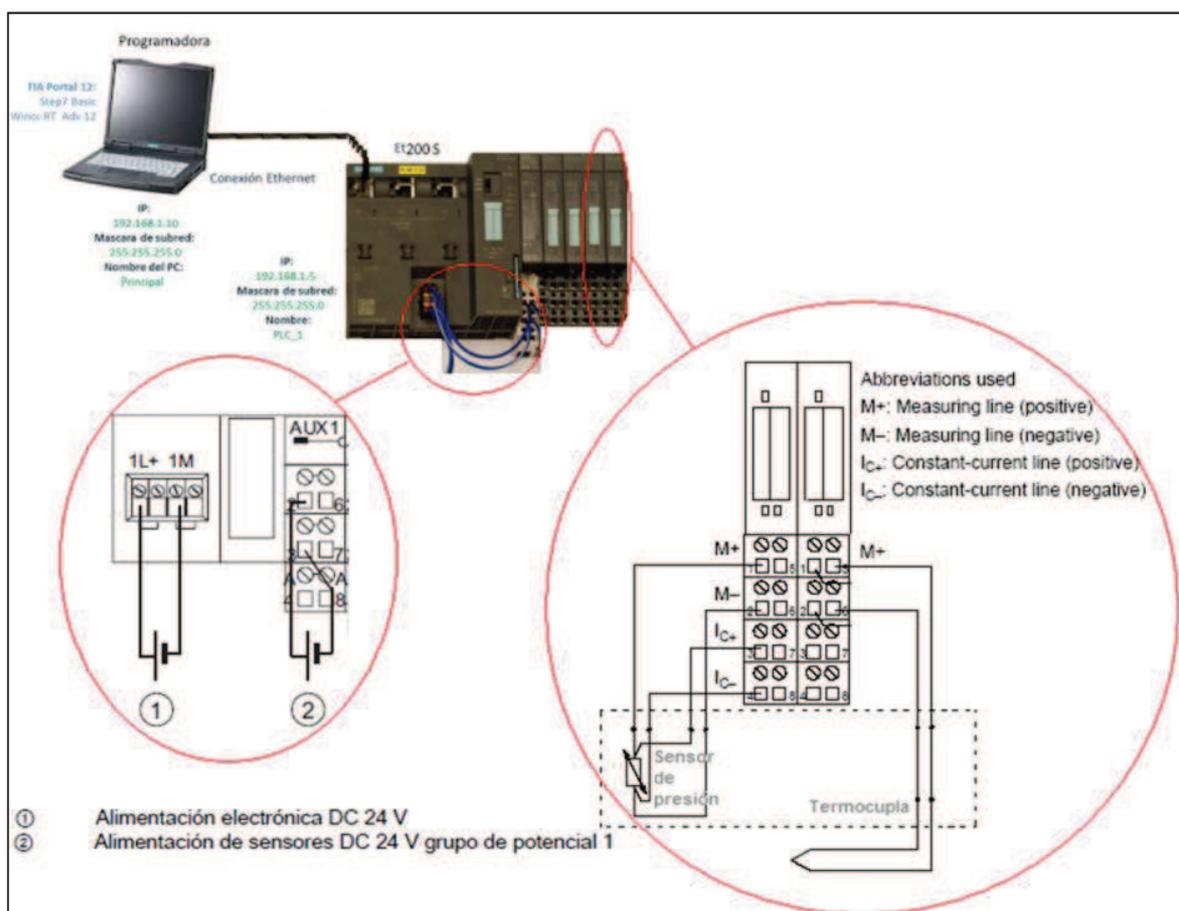


Figura 4.13 Diagrama de conexión del controlador.

En el diagrama de conexión se puede visualizar que por ser un PLC modular será necesario alimentar con 24V tanto el CPU como el AUX 1 del PLC a fin de que todos los módulos queden energizados.

El procedimiento necesario para conectar los sensores de presión y temperatura se muestra en el diagrama para su módulo correspondiente.

## 4.6 Procedimiento de Operación

A continuación se detallan los pasos necesarios para la puesta en marcha y funcionamiento del controlador:

1. Ejecutar el programa S7 PLCSIM Simulating Modules, como se muestra en la Figura 4.14.

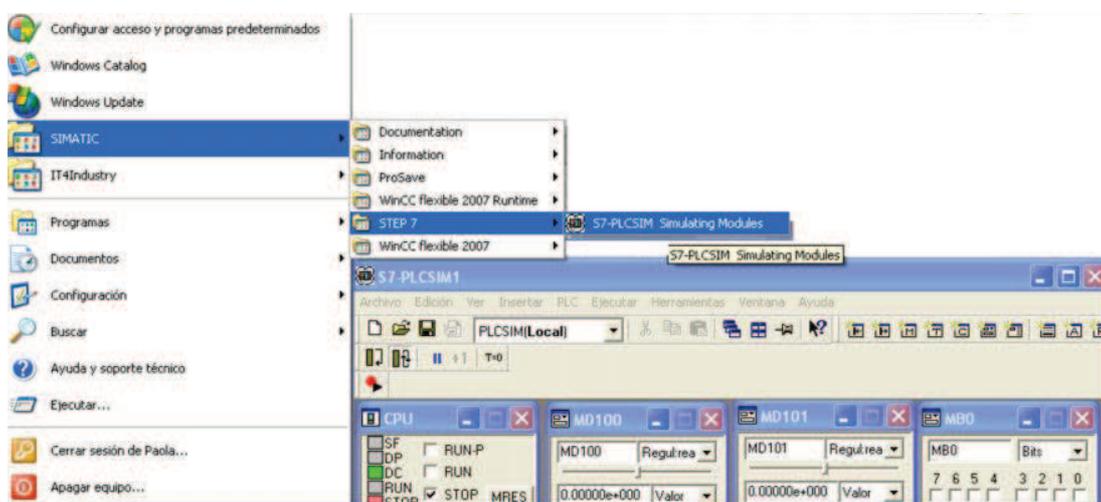


Figura 4.14 Primer paso para la operación del controlador.

2. Dentro del TIA Portal, en el Árbol de proyecto: PLC\_1/ Bloques de programa/clic derecho en Main/Cargar en dispositivo. Activar todas las casillas correspondientes a todas las funciones de software programadas/Cargar. Figura 4.15

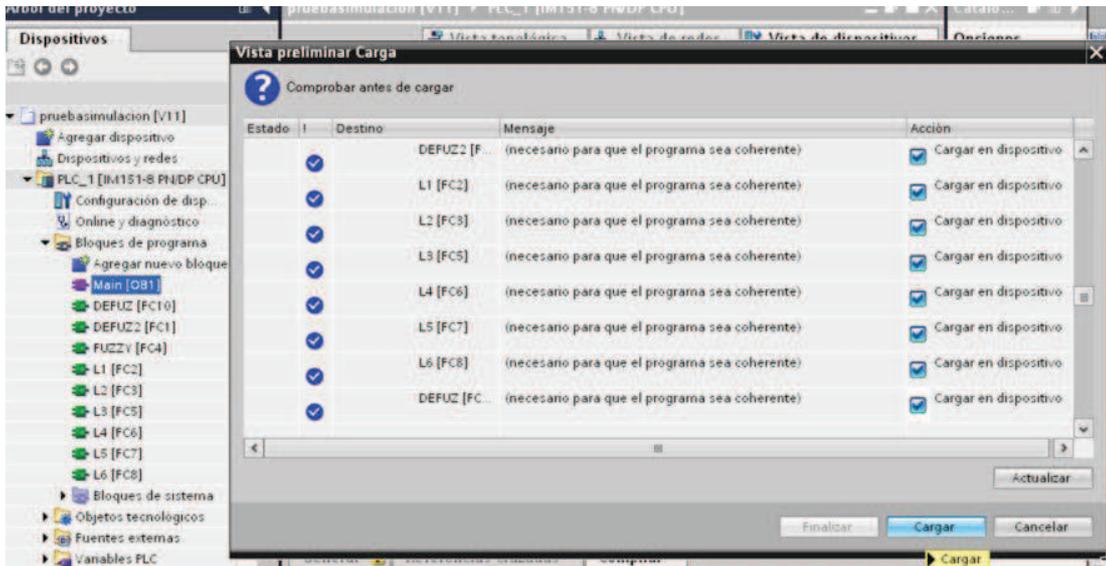


Figura 4.15 Segundo paso para la operación del controlador.

3. En Árbol de proyecto: PLC\_1/ Bloques de programa/clic derecho en Main/Establecer conexión online. Seguidamente Dirigirse al S7 PLCSIM y activar el casillero de RUN: Figura 4.16.

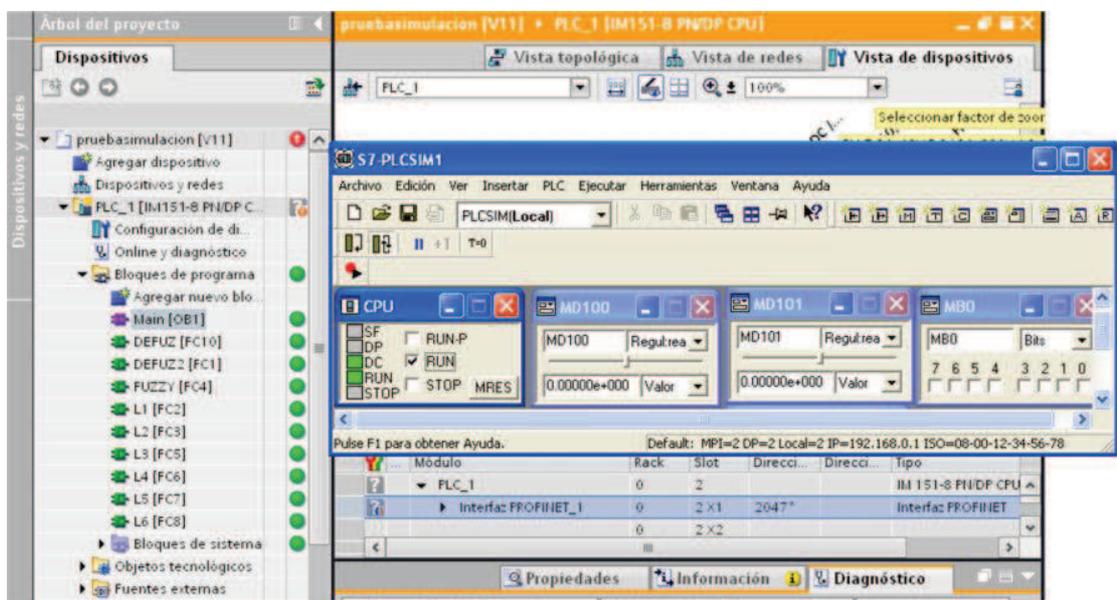


Figura 4.16 Tercer paso para la operación del controlador.

4. En Árbol de proyecto: clic derecho en HMI\_1/Iniciar simulación: Figura 4.17.

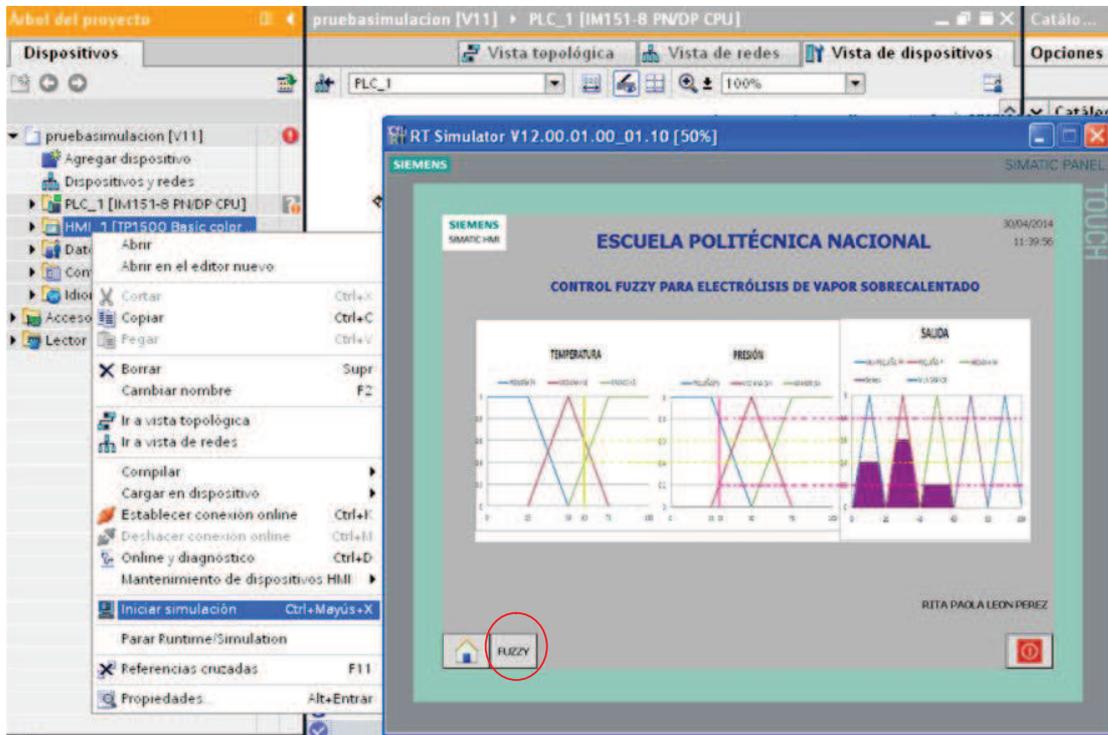


Figura 4.17 Cuarto paso para la operación del controlador.

5. La primera pantalla (Figura 4.18) muestra La presentación inicial de HMI del proceso por medio de botón **FUZZY** se puede acceder a la pantalla de control del proceso, donde se puede ingresar valores para la temperatura y presión e INICIAR EL PROCESO, mediante el cual se calcula el valor de la salida

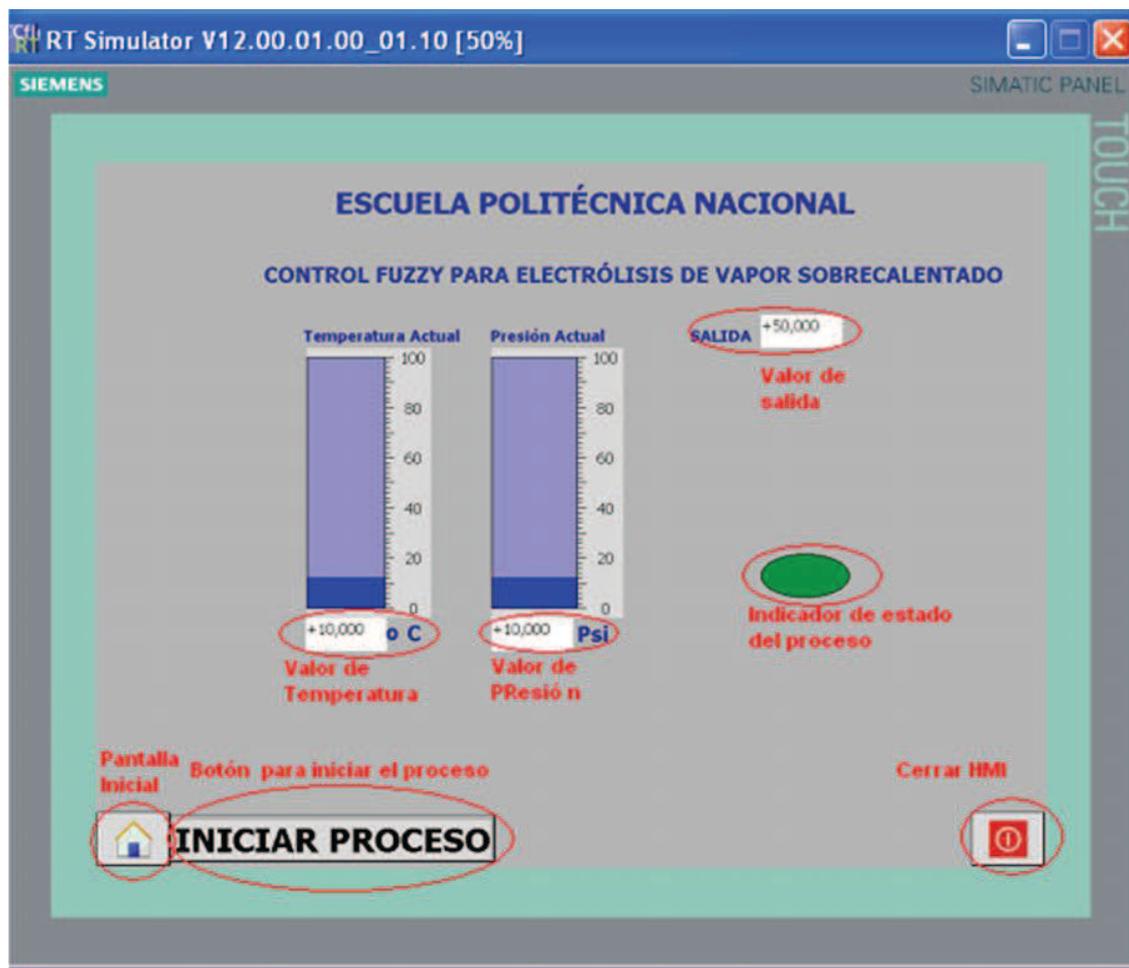


Figura 4.18 Quinto paso para la operación del controlador.

#### 4.7 Medidas de seguridad

- Previo a la conexión del PLC verificar el correcto funcionamiento de todos los componentes del sistema
- Comprobar que el voltaje de alimentación sea 24 Voltios.
- Para operación del controlador deben seguirse en orden los pasos detallados en Procedimiento de operación a fin evitar errores de funcionamiento.
- Al momento operar el software revisar periódicamente la ventana de avisos del TIA Porta a fin de detectar posibles advertencias y errores.

## CAPÍTULO 5

### 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1 Introducción

A fin de probar, analizar y comparar el Controlador Fuzzy desarrollado, se crearon dos aplicaciones en MATLAB. La primera aplicación es un archivo .m que realiza el control fuzzy bajo las mismas condiciones establecidas para el desarrollo del control fuzzy en TIA Portal. La segunda aplicación utilizó el Toolbox de Matlab para realizar control fuzzy "FUZZY", en el cual la única diferencia está en el método de cálculo de salida, dado que este toolbox utiliza el método del centroide para el cálculo.

#### 5.2 Procedimiento experimental

En primer lugar se creó en Matlab el archivo mostrado en la Figura 5.1, FUZZY\_HIDRÓGENO.m (Anexo) considerando las mismas condiciones establecidas para el controlador desarrollado en el TIA Portal.

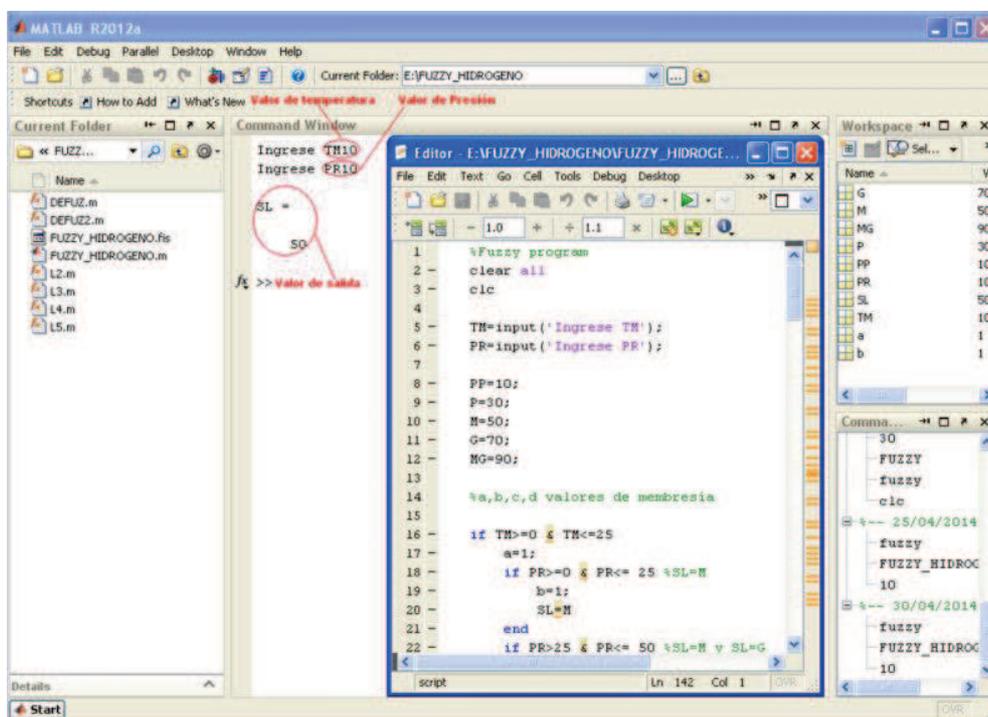


Figura 5.1 Sistema fuzzy creada en MATLAB.

Para este desarrollo fueron creadas cada una de las funciones necesarias para crear sistema fuzzy. Las funciones creadas y su descripción se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla. 5.1. Descripción de funciones creadas en matlab

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
L1, L2, L3 L4, L5	Funciones para la fuzzificación de entradas
FUZZY_HIDROGENO	Funciones para calcular la membresía y evaluar la base de reglas.
DEFUZ, DEFUZ2	Funciones para la defuzzificación de la salida por el método del Promedio Ponderado

Para la aplicación creada utilizando el toolbox de Matlab FUZZY se crearon las mismas funciones de pertenencia para las entradas y se estableció la misma base de reglas, para bajo estas condiciones poder comparar el valor de salida obtenido bajo el cálculo por el método del centroide.

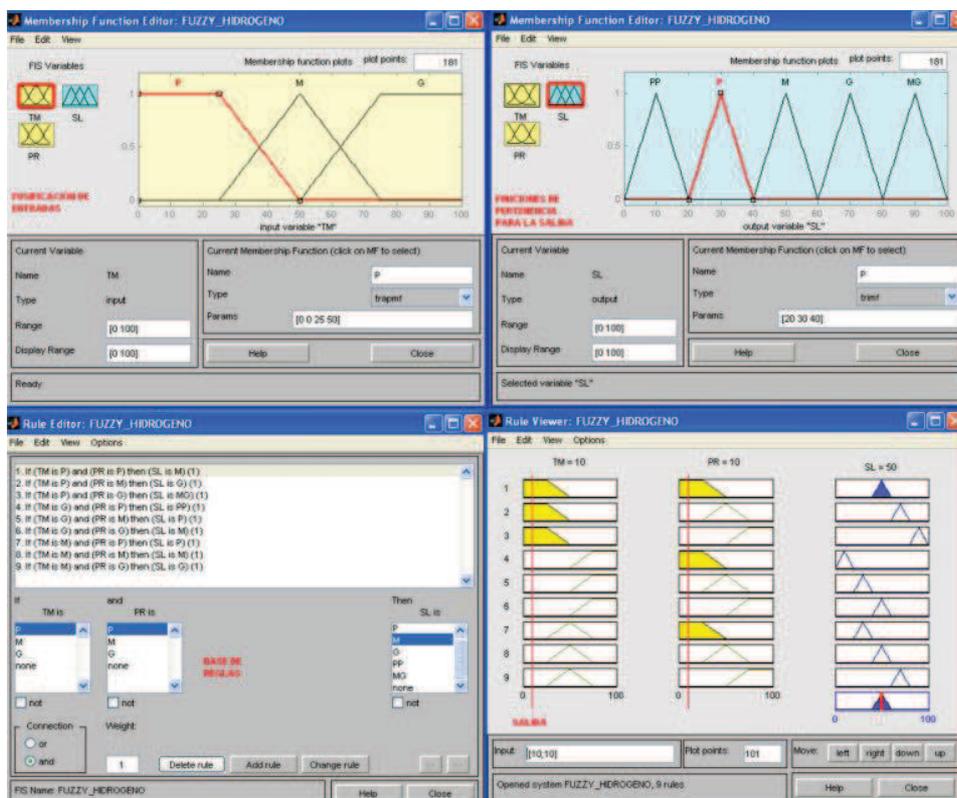


Figura 5.2 Aplicación creada en toolbox FUZZY de MATLAB.

### 5.2.1 Medición de parámetros

Para la medición de parámetros se definieron valores de temperatura y presión a fin de cubrir todo el rango y todas las posibles combinaciones para dichos rangos, los valores establecidos se muestran en la Tabla 5.2

**Tabla. 5.2. Medición de parámetros para las diferentes aplicaciones creadas.**

TEMPERATURA	PRESIÓN	TOOLBOX	PLC	FUZZY.m
10	10	50	50	50
10	40	61.4	61.2998	62
10	60	78.6	78.7381	78
10	80	90	90.0122	90
0	0	50	50	50
30	10	44.5	44.4703	46
50	20	30	30.0147	30
30	40	55.2	55.0786	55.7
45	49	54.1	53.8814	52.96
30	60	73	73.1147	72.85
35	70	75.2	75.1764	75.71
35	90	81.4	81.3238	82
60	10	21.4	21.3988	22
60	40	31.9	31.8926	32.2
55	45	38.57	36.9271	37.1
60	60	50	49.9904	50
55	70	57.1	57.0272	58.57
60	90	61.4	61.2998	62
80	10	10	10.0247	10
80	30	15.5	15.5259	14
80	65	41.4	41.351	42
80	80	50	50	50
95	95	50	50	50

## 5.2.2 Análisis de las salidas obtenidas

El análisis de las salidas obtenidas mostrado en la Tabla 5.3, se realizó mediante el cálculo de la desviación estándar para el conjunto de datos obtenidos en cada caso, para los valores de temperatura y presión seleccionados.

Tabla. 5.3. Análisis de las salidas mediante la desviación estándar.

TEMPERATURA	PRESIÓN	TOOLBOX	PLC	FUZZY.m	DESVIACIÓN ESTANDAR
10	10	50	50,0000	50	<b>0,0000</b>
10	40	61.4	61,2998	62	<b>0,4951</b>
10	60	78.6	78,7381	78	<b>0,5219</b>
10	80	90	90,0122	90	<b>0,0070</b>
0	0	50	50,0000	50	<b>0,0000</b>
30	10	44.5	44,4703	46	<b>1,0817</b>
50	20	30	30,0147	30	<b>0,0085</b>
30	40	55.2	55,0786	55,7	<b>0,4394</b>
45	49	54.1	53,8814	52,96	<b>0,6515</b>
30	60	73	73,1147	72,85	<b>0,1327</b>
35	70	75.2	75,1764	75,71	<b>0,3773</b>
35	90	81.4	81,3238	82	<b>0,4781</b>
60	10	21.4	21,3988	22	<b>0,4251</b>
60	40	31.9	31,8926	32,2	<b>0,2174</b>
55	45	38.57	36,9271	37,1	<b>0,1223</b>
60	60	50	49,9904	50	<b>0,0055</b>
55	70	57.1	57,0272	58,57	<b>1,0909</b>
60	90	61.4	61,2998	62	<b>0,4951</b>
80	10	10	10,0247	10	<b>0,0143</b>
80	30	15.5	15,5259	14	<b>1,0790</b>
80	65	41.4	41,3510	42	<b>0,4589</b>
80	80	50	50,0000	50	<b>0,0000</b>
95	95	50	50,0000	50	<b>0,0000</b>

El cálculo de la desviación estándar representa una medida de la dispersión, que nos permite visualizar cuanto se alejan los valores de la salida obtenidos respecto de la media entre ellos, es decir la variabilidad entre los datos de salida obtenidos

Mediante el análisis de los valores obtenidos podemos determinar entre que rangos de temperatura y presión puede variar mayormente el valor de la salida, estimar los valores de entrada donde tendremos una mejor respuesta así como que valor de entrada pueden producir mayores diferencias en la salida.

Mientras más alto sea el valor de la desviación estándar, mayor variabilidad habrá en las salidas obtenidas. Si la desviación estándar es cero significará que no existe variación e la salida, lográndose obtener el mismo valor de salida, cualquiera sea la aplicación utilizada para la obtención de la salida.

### **5.3 Protocolo de pruebas**

Las pruebas para el controlador fuzzy desarrollado contempla la verificación del valor de la salida mediante las aplicaciones creadas bajo TIA Portal, Toolbox Fuzzy de MATLAB y el archivo programado en MATLAB, FUZZY.m. Para cada una de estas aplicaciones es posible establecer diferentes valores de temperatura y presión de forma que se cubran todas las posibilidades de combinaciones de rangos para las entradas y cada combinación obtener un valor de salida.

Los programas creados tanto el TIA Portal como en MATLAB, realizan todo el proceso de control fuzzy como es: fuzzificación de entradas, cálculo de la membresía de valor de entrada ingresado, evaluación de base de reglas en base a diseño realizado, y defuzzificación de la señal de salida utilizando el método de promedio ponderado. La aplicación creada con el Toolbox de MATLAB cumple con los mismos pasos para el control fuzzy, tanto para la fuzzificación como para la base de reglas, sin embargo para la obtención de la salida, el método utilizado es el de Mandani. Para probar cualquiera de las aplicaciones será necesario abrir software

correspondiente y ejecutar el programa; sin embargo para el caso del programa desarrollado en TIA Portal será necesario además seguir los pasos descritos en la sección 4,6 “Procedimiento de Operación”.

#### 5.4 Análisis de resultados

Para el análisis de resultados mostrado en la Tabla 5.4, se realizó una comparación entre los resultados teóricos obtenidos mediante el Toolbox FUZZY de Matlab y los resultados obtenidos en la nueva aplicación creada para el PLC bajo TIA Portal, para diferentes valores de temperatura y presión, utilizando para ello el cálculo de error entre los resultados obtenidos. La siguiente Tabla muestra los datos comparados y los resultados obtenidos.

**Tabla. 5.4. Análisis de resultados mediante % de error.**

TEMPERATURA	PRESIÓN	TOOLBOX	PLC	%ERROR
10	10	50	50,0000	0,0000
10	40	61,4	61,2998	0,1632
10	60	78,6	78,7381	-0,1757
10	80	90	90,0122	-0,0136
0	0	50	50,0000	0,0000
30	10	44,5	44,4703	0,0667
50	20	30	30,0147	-0,0490
30	40	55,2	55,0786	0,2199
45	49	54,1	53,8814	0,4041
30	60	73	73,1147	-0,1571
35	70	75,2	75,1764	0,0314
35	90	81,4	81,3238	0,0936
60	10	21,4	21,3988	0,0056
60	40	31,9	31,8926	0,0232
55	45	38,57	36,9271	4,2595
60	60	50	49,9904	0,0192
55	70	57,1	57,0272	0,1275
60	90	61,4	61,2998	0,1632
80	10	10	10,0247	-0,2470
80	30	15,5	15,5259	-0,1671
80	65	41,4	41,3510	0,1184
80	80	50	50,0000	0,0000
95	95	50	50,0000	0,0000

Como podemos observar el error obtenido es mínimo y en ninguno de los casos supera el 5% aceptado. El porcentaje más alto obtenido se presenta cuando las condiciones de entradas se encuentran alrededor del 50% y con una membresía compartida entre las funciones mediana y grande para la temperatura y mediana y pequeña para la presión, esto puede deberse a que este es el caso donde el promedio ponderado varía en mayor grado respecto del centroide.

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 Conclusiones

En base al desarrollo realizado, se puede concluir lo siguiente:

- Mediante la ecuación de estado de los gases fue posible relacionar la temperatura y presión, variables que intervienen en el proceso de producción de hidrógeno, a fin de obtener la relación necesaria que permite el control fuzzy de la variable de salida del proceso.
- El escalamiento porcentual de las variables de entrada permitió abarcar todo el rango de variación de dichas variables, lográndose un óptimo desarrollo del control fuzzy.
- Utilizando el método de promedios ponderados se logró diseñar e implementar los algoritmos de control fuzzy para el proceso de producción de hidrógeno en un PLC siemens, bajo la plataforma TIA Portal.
- El desarrollo de un controlador fuzzy bajo la plataforma TIA Portal, representa una solución innovadora, dado que dicha plataforma no cuenta con aplicaciones para el desarrollo de sistemas fuzzy.
- La implementación de un controlador fuzzy de las mismas características utilizando tanto Matlab como Toolbox FUZZY de Matlab permitió obtener la salida del proceso con otros métodos.
- La comparación de la salida obtenida mediante el software desarrollado en el PLC y los otros métodos realizados en este proyecto, dio como resultado un porcentaje de error inferior al 5% en todos los casos analizados.
- El desarrollo del proyecto dio como resultado final una aplicación operativa y versátil para el control fuzzy del tiempo necesario para realizar la electrólisis de vapor sobrecalentado, en función de la temperatura y la presión. Dicha aplicación

incluye todos los requerimientos necesarios para lograr el control, demostrándose de esta forma, el cumplimiento de los objetivos y metas planteados en el proyecto de tesis.

## 6.2 Recomendaciones

- Instalar el paquete TIA Portal Profesional V11 o superior para programar PLCs SIEMENS de gama alta como S7-300, S7-400 y S7-1500 así como el seleccionado en esta aplicación ET200S.
- Para la creación de una aplicación de control fuzzy es necesario tener instalado la versión profesional de TIA Portal, la cual funciona únicamente bajo Windows 7.
- A fin de poder realizar la comprobación de la programación del PLC se recomienda instalar por separado el Simulador PLCSim V12.
- Los archivos generados en la V11 del TIA Portal tienen un formato diferente a los creados en la V12, por lo que debido a que cuando se instala la V12, la V11 no se desinstala, se recomienda mantener las dos versiones, pues esta acción no ocasiona ningún conflicto.
- Para probar cualquiera de las aplicaciones creadas en este proyecto será necesario abrir software correspondiente y ejecutar el programa desarrollado; sin embargo para el caso del programa desarrollado en TIA Portal será necesario además seguir los pasos descritos en la sección 4,6 “Procedimiento de Operación”.
- La información generada y resultados obtenidos en el presente proyecto podrían ser utilizadas en futuras investigaciones, debido a que representan la base para el desarrollo de aplicaciones que requieran control difuso bajo TIA Portal.

## CAPÍTULO 7

### 7. BIBLIOGRAFÍA Y ANEXOS

#### 7.1 Bibliografía

- [1] T. C. especialista en Vapor., “Types of steam.” [Online]. Available: <http://www.tlv.com/global/LA/steam-theory/types-of-steam.html>.
- [2] Y. A. Cengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: an engineering approach*, Fourth Edi. McGraw Hill, 2004.
- [3] Crisisen Ergetica.org, “Tecnología del hidrógeno.” [Online]. Available: <http://www.crisisenergetica.org/saticpages/hidro-tecno-polit.htm>.
- [4] S. C. Acosta German, “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN ELECTROLIZADOR DE CORRIENTE CONTINUA DE 200 WATIOS CON ENERGÍA SOLAR E INSTRUMENTACIÓN NECESARIA PARA MEDIR LA PRODUCCIÓN DE HIDRÓGENO,” Escuela Politécnica Nacional, 2010.
- [5] Q. H. Cando Hugo, “CONSTRUCCION Y ADAPTACION DE UN SISTEMA GENERADOR DE GAS DE HIDROGENO PARA SUMINISTRARLO A UN MOTOR DE COMBUSTION INTERNA,” Universidad Técnica del Norte, 2012.
- [6] J. MONTBRUN DI FILIPPO, “Control Fuzzy,” 2008. [Online]. Available: <http://prof.usb.ve/montbrun/ps2320/fuzzy/fuzzy.html>.
- [7] Siemens, *Fuzzy Control*. 2008, p. 5.
- [8] G. D. Bravo Yadira, “ESTUDIO Y APLICACIÓN DE LOS MODELOS ANFIS EN MATLAB,” Escuela Politécnica Nacional, 202AD.
- [9] M. Roque, “Tareas Inteligentes Control Fuzzy,” 2006. [Online]. Available: <http://perseo.dif.um.es/~roque/ti/Material/Tema3.ppt>.
- [10] U. Na. de Colombia, “Fuzzy Comp.,” 2006. [Online]. Available: <http://www2.unalmed.edu.co/dyna2005/135/fuzzycomp.pdf>.
- [11] V. J. Pérez Marco, “Sistemas de Lógica Difusa,” pp. 1–14.

- [12] I. A. Portal, "SIMATIC WinCC en Totally Integrated Automation Portal SIMATIC WinCC en el Totally Integrated Automation Portal," 2011.
- [13] I. Technologies, "FuzzyControl ++ for efficient automation of technical processes," 2008.

## 7.2 Anexos

- Anexo A: Módulo del PLC.
- Anexo B: Código de programa en TIA Portal
- Anexo C: Código de programa en MATLAB
- Anexo d: Código de programa en Toolbox FUZZY de Matlab.