

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMATICO DE pH EN LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DE LA EMPRESA  
TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P.**

**HERMES HERNANDO OSORIO LUGO Código: 9904017**

**RODRIGO ADOLFO VARGAS DIAZ Código: 9904072**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2005**

**DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE pH EN LA  
PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA RESIDUALES DE LA EMPRESA  
TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P.**

**HERMES HERNANDO OSORIO LUGO Código: 9904017**

**RODRIGO ADOLFO VARGAS DIAZ Código: 9904072**

**Proyecto de trabajo de grado presentado como requisito parcial para  
optar el título de Ingeniero Electricista e Ingeniero Electrónico.**

**Director**

**DAVID SENIOR ELLES**

**INGENIERO ELECTRONICO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLIVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRICA Y ELECTRÓNICA  
CARTAGENA DE INDIAS**

**2005**

NOTA DE ACEPTACIÓN:

---

---

---

---

Presidente del jurado

---

Jurado

---

Jurado

Cartagena de Indias, 08 de Noviembre del 2005

**Rodrigo A. Vargas Díaz**

A Dios, a mis queridos padres Rodrigo A. Vargas Vargas y Carmen C. Díaz Cano que me brindaron todo su apoyo, de igual forma mis hermanos y a mi novia Margarita L. Beltrán Cano que me acompañó en todo estos momentos.

**Hermes Osorio Lugo.**

A mis queridos padres que me brindaron todo su apoyo, de igual forma a mis hermanos y todas aquellas personas que me acompañaron en este momento.

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores expresan sus agradecimientos a:

Juan Contreras Montes, Ingeniero Eléctrico y asesor del trabajo de grado, por sus prontas sugerencias y valiosas colaboración durante el desarrollo del trabajo.

El área de mantenimiento de la empresa Termocartagena S.A E.S.P por todo el apoyo logístico que nos brindo para la ejecución del proyecto.

David Señor, Ingeniero electrónico por sus sugerencias y recomendaciones para el desarrollo del trabajo

Muy especial al profesor e ingeniero electrónico Francisco Trespalacio Vergara por la información valiosa que nos brindo para la elaboración del trabajo de grado.

## CONTENIDO

	Pág.
<b>INTRODUCCION</b>	<b>1</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN</b>	<b>9</b>
<b>1.1. TEORIA DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN</b>	<b>9</b>
1.1.1. Ionización	9
1.1.2. Producto iónico del agua	10
1.1.3. Ionización de ácidos y bases	11
1.1.4. El concepto de “p”: pH, pOH, pK.	11
1.1.5. Disociación de ácidos y bases débiles	14
1.1.5.1. Ácidos	14
1.1.5.2. Bases	14
1.1.6. Balance de carga del ión	18
1.1.7. Soluciones búfer	20
1.1.8. Curvas de neutralización	22
1.1.8.1. Ácido fuerte mas base fuerte	23
1.1.8.2. Ácido débil mas base fuerte	24
1.1.8.3. Ácido fuerte mas base débil	26
1.1.8.4. Ácido débil mas base débil	27
1.1.8.5. Sistemas de múltiples ácidos y bases débiles	27
1.1.9. Generación de la curva de neutralización de la planta	28
<b>2. REQUERIMIENTOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO</b>	<b>32</b>
<b>3. SELECCIÓN Y CONCEPTOS DEL SISTEMA DE CONTROL</b>	<b>35</b>
<b>3.1. CONCEPTOS BASICOS DE CONTROL DE LOGICA DIFUSA</b>	<b>36</b>
<b>3.2. ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR DIFUSO</b>	<b>37</b>
3.2.1. Pre-procesamiento	38
3.2.2. Fuzzificación	38
3.2.3. Bases de reglas	39
3.2.3.1. Conectividad	40
3.2.3.2. Modificadores	41

3.2.3.3. Universo	42
3.2.3.4. Función de pertenencia	43
3.2.4. Motor de inferencia	45
3.2.4.1. Agregación	46
3.2.4.2. Activación	47
3.2.4.3. Acumulación	48
3.2.5. Defuzzificación	48
3.2.5.1. Centro de gravedad (COG)	49
3.2.5.2. Centro de gravedad para singlents (COGS)	49
3.2.5.3. Bisectriz de área (BOA)	50
3.2.5.4. MOM	50
3.2.5.5. Máximo a la izquierda (LM) y máximo a la derecha (RM)	50
3.2.6. Post-procesamiento	51
3.2.7. Ejemplo de un controlador difuso	51
4. MODELAMIENTO DIFUSO DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACIÓN DE Ph	59
4.1. ERROR DE INFERENCIA	60
4.2. DETECCIÓN DE CLASES	63
4.3. GENERACIÓN DE REGLAS	64
4.4. GENERACIÓN DE LA PARTICIÓN DE ANTECEDENTE	65
4.5. METODO DE INFERENCIA	66
4.6. RESUSLTADOS	67
5. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO	70
6. SELECCION DE LA INSTRUMENTACION	73
7. DISEÑO DEL HARDWARE DE INTERFASE ENTRE EL PC Y LA PLANTA	79
7.1. PROCESAMIENTO DE DATOS	80
7.1.1. Características generales del microcontrolador PIC 16f877	81
7.1.2. Diagrama de pines	82
7.1.3. Arquitectura del PIC16F877	84
7.2. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL	84

<b>7.2.1. Calculo del sumador</b>	<b>86</b>
<b>7.2.2. Calculo del Amplificador</b>	<b>88</b>
<b>7.3. ENTRADA ANALOGA DEL SENSOR DE pH.</b>	<b>92</b>
<b>7.3.1. Requisitos de la adquisición</b>	<b>96</b>
<b>7.3.2. Configuración de las entradas análogas</b>	<b>99</b>
<b>7.3.2.1. Pasos para realizar una conversión</b>	<b>99</b>
<b>7.3.2.2. Interrupción del módulo A/D</b>	<b>100</b>
<b>7.4. ENTRADAS DIGITALES</b>	<b>101</b>
<b>7.5. SALIDAS DIGITALES</b>	<b>103</b>
<b>7.6. PUERTO DE COMUNICACIÓN SERIAL RS232 y RS485</b>	<b>104</b>
<b>7.7. FUENTE DE VOLTAJE DEL HARDWARE.</b>	<b>117</b>
<b>7.7.1. Calculo del transformador</b>	<b>118</b>
<b>8. ETAPA DE ACCIONAMIENTO</b>	<b>120</b>
<b>9. SOFTWARE</b>	<b>124</b>
<b>9.1. MICROCONTROLADOR 16F877</b>	<b>124</b>
<b>9.2. P.C.</b>	<b>134</b>
<b>10. CONCLUSIONES</b>	<b>146</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS</b>	<b>148</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>152</b>

## LISTA DE TABLA

- Tabla .1 Concentración de Ion hidrogeno e Ion hidroxilo y el pH de varias soluciones.
- Tabla 2. Constantes de ionización de ácidos y bases débiles
- Tabla 3. Representación de la base de regla de un controlador difuso
- Tabla 4. Representación de la base de regla de un controlador difuso
- Tabla 5. Base de regla del controlador
- Tabla 6. Cálculo de los valores de activación.
- Tabla 7. Tabla de verdad
- Tabla 8. Base de Reglas del modelamiento del controlador difuso.
- Tabla 9. Valores límites entregados por el sensor de pH.
- Tabla 10. Configuración de canales de entradas análogos y digitales.
- Tabla 11. Valores de configuración para el tiempo de conversión.
- Tabla 12. Correspondencia entre las entradas digitales y las señales de realimentación.
- Tabla 13. Fórmulas para Calcular la Taza de Transmisión.
- Tabla 14. Registro asociados al Generador de Taza de Transmisión.
- Tabla 15. Registros asociados con la Transmisión Asíncrona Serial, Receptor Asíncrono del USART.
- Tabla 16. Registros asociados con la Recepción Asíncrona Serial.

## LISTA DE FIGURA

- Figura 1. Curva de neutralización para ácido fuerte / base fuerte, ácido débil / base débil, ácidos fuertes / base débil.
- Figura 2. Curva de neutralización para ácido débil / base fuerte y múltiples ácidos / múltiples bases
- Figura 3. Curva de neutralización de la planta, generada en el laboratorio.
- Figura 4. Datos obtenidos en la prueba 1.
- Figura 5. Datos obtenidos en la prueba 2.
- Figura 6. Diagrama de bloques de un controlador difuso.
- Figure 7. Ejemplo de funciones de reglas: (a) función-S, (b) función – gaussiana, (c) función-Z, (d-f) versión triangular, (g-i) versión trapezoidal, (j) función- $\pi$ , (k) rectangular, (l) singlenton.
- Figura 8. Grafica de la señal de control en un controlador difuso.
- Figura 9. Grado de pertenencia o fuerza de activación.
- Figura 10. Aplicación de un controlador de pH.
- Figura 11. Controlador difuso.
- Figura 12. Error.
- Figura 13. Derivada del error.
- Figura 14. Voltaje de salida.
- Figura 15. Efecto de disparo de todas las reglas.
- Figura 16. Muestra los conjuntos difusos de las variables de entrada y los conjuntos singlenton de la variable de salida.
- Figura 17. Muestra la comparación entre la curva del modelo y la curva real.
- Figura 18. Respuesta deseada del sistema.
- Figura 19. Señal de entrada del sistema para alcanzar pH de 7.
- Figura 20. Señal de salida del sistema controlado para alcanzar pH de 7.
- Figura 21. Diagrama de bloque de la tarjeta de adquisición y control.
- Figura 22. Diagrama general del microcontrolador.
- Figura 23. Diagrama de pines del PIC16F874.

- Figura 24. Curva de comportamiento de la sensor de pH, para un rango entre 0 pH Y 14 pH.
- Figura 25. Circuito Sumador Inversor de ganancia 1.
- Figura 26. Prototipo del amplificador de la señal del Sensor de PH.
- Figura 27. Diagrama esquemático del circuito amplificador.
- Figura 28. Circuito regulador.
- Figura 29. Diagrama esquemático del circuito de acople entre el sensor y el conversor Análogo a Digital.
- Figura 30. Diagrama de bloques del conversor análogo-digital.
- Figura 31. Registro INTCON.
- Figura 32. Registro ADCON1.
- Figura 33. Justificación del resultado de la conversión.
- Figura 34. Modelo análogo de la entrada del conversor.
- Figura 35. Registro PIR1.
- Figura 36. Registro PIE1.
- Figura 37. Diagrama esquemático de conexión de las entradas digitales.
- Figura 38. Diagrama esquemático del sistema de los relay.
- Figura 39. Diagrama a bloques del Transmisor en modo asíncrono del USART.
- Figura 40. Diagrama de tiempos de la Transmisión asíncrona del USART.
- Figura 41. Transmisión asíncrona del USART en forma "espalda con espalda".
- Figura 42. Diagrama a bloques del Receptor en modo asíncrono del USART.
- Figura 43. Diagrama de tiempos de la Recepción asíncrona del USART.
- Figura 44. Esquema de muestreo del pin RX.
- Figura 45. Diagrama de conexión del MAX 232.
- Figura 46. Diagrama de conexión del MAX 485.
- Figura 47. Conversor de RS232 A RS485.
- Figura 48. Diagrama de comunicación.
- Figura 49. Esquema del circuito de filtrado.
- Figura 50. Circuito esquemático completo del sistema de filtrado y regulado de la señal de alimentación del la Tarjeta de adquisición.
- Figura 51. Diagrama esquemático del transformador.
- Figura 52. Trama de comunicación serial.

## LISTA DE ANEXO

- Anexo A. Programa de modelamiento del controlador empleado en Matlab.
- Anexo B. Datos técnicos de la bomba principal.
- Anexo C. Datos técnicos de las bombas dosificadoras de ácido y soda.
- Anexo D. Datos técnicos de las válvulas eléctricas de recirculación y descarga.
- Anexo E. transmisor de nivel tipo radar serie Rosemount 5600.
- Anexo F. Datos técnicos del pH-metro.
- Anexo G. Hoja característica del microcontrolador 16f774.
- Anexo H. Hoja característica del Amplificador Operacional LF353.
- Anexo I. Hoja característica del transistor NPN 2N3904.
- Anexo J. Hoja característica del MAX-232.
- Anexo K. Hoja característica del MAX-485.
- Anexo L. Hoja característica del transistor NPN TIP120
- Anexo M. Hoja característica del regulador de voltaje serie uA7800.
- Anexo N. Hoja característica del regulador de voltaje serie MC79L00.
- Anexo O. Diagrama eléctrico de control.
- Anexo P. característica de los elementos de control.
- Anexo Q. Programa del microcontrolador
- Anexo R. Programa del PC en Java.
- Anexo S. Tabla de correspondencia de valores de tiempo vs. pH.
- Anexo T. Diagrama operativo de la planta de tratamientos de aguas residuales.
- Anexo U. Diagrama esquemático del sistema de ácido y soda.
- Anexo V. Circuito esquemático e impreso de la tarjeta de adquisición de datos.
- Anexo X. Manual operativo de la pileta de tratamiento de aguas residuales u: 1, 2 y 3.

## **RESUMEN**

En este trabajo se presentan los resultados del automatismo de la planta para el tratamiento de aguas residuales (control de pH) de la empresa TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. Se utiliza una técnica innovadora de modelamiento difuso llamada error de inferencia presentada por el ingeniero Juan Contreras (2005), El cual nos permite realizar el cálculo del controlador de forma eficiente. Al inicio del proyecto se planteó diseñar un controlador difuso pero debido a las condiciones económicas de la empresa patrocinadora y de acuerdo a los equipos con que se disponen, se diseña un controlador ON-OFF basado en el modelamiento difuso. Para aplicaciones futuras se explican los criterios para el diseño del controlador difuso.

Para el automatismo de la planta se desarrolla un software de monitoreo y control del proceso, capaz de mostrar las variables que actúan en el proceso y controlar la variable de pH, de igual forma se diseña una tarjeta de adquisición de datos utilizando la nueva tecnología de microcontroladores.

Se presenta los criterios de diseño para la elaboración de cada una de las etapas (Instrumentación, Accionamiento y Control) que componen el proceso, del mismo modo se hace claridad del comportamiento de la variable a controlar que es el pH, se presentan todas las características químicas y se realizó un estudio de laboratorio para conocer la curva de comportamiento del proceso.

En este trabajo se entrega toda la documentación requerida por el personal de operación y de mantenimiento (Planos, manual de operación y manual de mantenimiento) para un mejor funcionamiento del sistema.

## INTRODUCCION

TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. es una planta generadora de energía eléctrica (térmica) que en su máxima producción genera 200MW/h. Este proceso de generación se realiza por la inyección de vapor de agua (temperatura de 510°C y una presión de 88Kg/cm<sup>2</sup>) a la turbina. Para la producción del vapor de agua se necesita desmineralizar el agua cruda proveniente del canal del dique, este proceso se realiza con el objetivo de aumentar el rendimiento y la vida útil de los elementos que actúan en la generación de la energía eléctrica.

Para la desmineralización del agua se realiza los siguientes pasos:

- Eliminación de las partículas en suspensión del agua.
- Filtración del agua (Filtro de arena y de carbón).
- Circulación del agua filtrada por los trenes de regeneración con el fin de eliminar las partículas aniónicas y catiónicas.

De este proceso se produce aguas residuales las cuales no son reutilizable y se necesita descargarlas a la bahía de Cartagena, con los mínimos requerimientos que establecen las autoridades del medio ambiente\*. Debido a esto TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. cuenta con un sistema de neutralización de aguas residuales.

El proceso de neutralización es el siguiente:

- Preparación del sistema: En esta el operador debe verificar las condiciones necesarias de la puesta en marcha del sistema.

---

\* Decreto 1954 de 1984

- Cebado de la bomba principal: Se hace con el fin de que la bomba no trabaje en vacío, este proceso se realiza con agua filtrada.
- Después de haber realizado la acción de cebado se procede a recircular el agua contaminada para tomar muestra de pH.
- De acuerdo a la muestra que se tomen se adiciona ácido o soda para la neutralización.
- Se procede a descargar el agua neutralizada a la bahía de Cartagena.
- Después de realizar la descarga se procede al lavado y lubricación de sello mecánico de la bomba (se realiza con agua filtrada), por 15 minutos para asegurar el lavado de la cámara del sello mecánico, desalojando cualquier traza de ácido que hayan podido penetrar durante la operación de circulación o descarga del agua.

La pileta de neutralización de aguas residuales se encontró con los siguientes problemas:

- El sistema no funcionaba por causa de daños en el controlador de pH y de las válvulas eléctricas y mecánica de descargas a la bahía.
- El sistema de neutralización que se implementaba anteriormente es ineficiente ya que se realizaba en forma manual.
- Los elementos que se estaban utilizando para el proceso de neutralización de aguas residuales no son los adecuados, debido que se requiere un constante mantenimiento (cada 15 días).
- En el proceso de neutralización existen pérdidas monetarias causadas por la sobre dosificación de ácido y soda, ya que estos productos son costosos.

Con el diseño del sistema de control automático de la planta de tratamiento de aguas residuales se pretende que la empresa TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. lo implemente para la puesta en marcha de este proceso con el objetivo de:

- Evitar las sanciones por la contaminación del medio ambiente.
- Menor costo en el proceso de neutralización.
- Optimización del proceso.
- Más tiempo de vida y menos mantenimiento a los elementos de control a utilizar.

## OBJETIVOS

### GENERAL

- Diseñar el sistema de control automático de pH de la planta de tratamiento de agua residuales de la empresa TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P., mediante la utilización de tecnologías modernas de microcontroladores, instrumentación, software de supervisión y control asistido por computador.

### ESPECIFICOS

- Analizar el estado actual de la planta neutralizadora de aguas residuales con el propósito de establecer las modificaciones necesarias para su automatización.
- Caracterizar el proceso de tratamiento de aguas residuales en la empresa TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. con el fin de determinar las variables a controlar y las especificaciones del proceso.
- Seleccionar los sensores adecuados para el sistema de control y monitoreo del pH, la dosificación de ácido y soda, nivel de la pileta neutralizadora y presión del agua filtrada en la tubería.
- Realizar experiencias de laboratorio que permitan obtener modelos aproximados de cada una de las regiones en que se dividen los procesos de pH ( zona de alto pH, zona de medio pH y zona de bajo pH), así como el conocimiento suficiente de la dinámica del proceso para diseñar el controlador *fuzzy logic*.
- Seleccionar los actuadores eléctricos (válvulas). Con base en las especificaciones del sistema de control.
- Diseñar la estrategia de control de neutralización de aguas residuales.

- Seleccionar el microcontrolador adecuado para la realización del control automático del sistema.
- Diseñar el software para el microcontrolador y para el monitoreo del proceso.
- Diseñar los manuales de operación del sistema de control y monitoreo del proceso.
- Diseñar los manuales de los software del microcontrolador y del monitoreo del proceso.
- Diseñar los diagramas eléctricos y planos del sistema de control.

## ESTADO DEL ARTE

La actividad principal de la empresa TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P. Es la producción de la energía eléctrica. Esta empresa cuenta con una pileta de neutralización que se utiliza para neutralizar el pH de las aguas residuales que vienen de los trenes de regeneración de la planta de tratamiento de agua de alimentación de caldera, que después es descargada a la bahía de Cartagena. Normalmente en una regeneración, se deposita  $36\text{m}^3$  en la pileta. Cuando el nivel llega a 0.8m se debe arrancar automática o manualmente la bomba Principal, haciendo recircular el agua de la pileta. En la tubería de descarga de la Bomba Principal está instalado el electrodo del pH-metro, el cual está graduado para valores preestablecidos. Cuando el pH es mayor de 8 éste le da la señal al dosificador de ácido para que suministre el ácido necesario para mejorar el pH de la pileta. Si el pH es menor de 6, la señal la recibe el dosificador de soda para que suministre la soda necesaria para mejorar el pH de la pileta. Cuando el pH está entre 6 y 8 el agua de la pileta está en condiciones para descargarla a la bahía, siempre y cuando el nivel preestablecido, que es de 1.5 metro dentro de la pileta, se haya alcanzado. Entonces en la línea que va a la bahía se abre la válvula eléctrica de descarga, permitiendo que desagüe la pileta, simultáneamente Se cierra la válvula eléctrica de recirculación que está en la línea de recirculación.

Cuando la pileta está desaguando, hasta llegar a un nivel de 40cm, el sensor de nivel debe dar la señal de apagar la bomba principal, evitando que ésta funcione en vacío y el sistema debe quedar en condiciones de empezar un nuevo ciclo.

## **CARACTERISTICAS DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN EN LA EMPRESA TERMOCARTAGENA S.A. E.S.P.**

### ➤ **PILETA.**

Es un tanque de concreto que tiene una capacidad aproximadamente de 45m<sup>3</sup>, la cual es la encargada de almacenar el agua residual proveniente del proceso de desmineralización del agua y que se desea descargar a la bahía con los mínimos requerimientos necesarios establecidos por las autoridades ambientales.

### ➤ **BOMBA DE RECIRCULACIÓN Y DESCARGA.**

La función de esta es la de succionar el agua almacenada en la pileta para la toma de muestra del pH, homogenizar el agua y descargar esta a la bahía cuando este neutralizada. La bomba de recirculación y descarga tiene una capacidad de 50 M<sup>3</sup>/Hora (220GPM) a una velocidad de 3500RPM.

### ➤ **MOTOR**

Es el que tiene la tarea de proporcionarle la energía mecánica a la bomba de recirculación y descarga, este motor proporciona una velocidad de 3500RPM para obtener la máxima capacidad de la bomba de recirculación y descarga.

### ➤ **ELECTRODO DE pH**

Tiene como finalidad medir el pH de la solución tomada en la tubería de descarga, para luego enviar la señal de esta muestra al controlador de pH.

➤ **pH-METRO**

Es el encargado de recibir la señal proporcionada por el sensor de pH, para luego enviar la señal al controlador y de ese modo activar la bomba dosificador de ácido o soda según se requiera para la neutralización del agua.

➤ **BOMBA DOSIFICADORA DE ACIDO Y SODA.**

Son las encargadas de permitir el flujo de ácido y soda según la señal transmitida por el controlador de pH, para la neutralización de las aguas residuales.

Al automatizar el proceso de pH de las aguas residuales se tendrá una mejor optimización y una mayor eficiencia del proceso por lo tanto aumentara el tiempo de vida de los instrumentos a utilizar.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN.**

### **1. 1. TEORIA DEL PROCESO DE NEUTRALIZACIÓN DE pH.**

El pH es una magnitud de mucha importancia en un sin número de procesos biotecnológicos, como por ejemplo en la neutralización de alimentos. También ha cobrado gran relevancia en la minería y en el control de la contaminación, como es el caso de la neutralización de tratamiento de aguas residuales. El control de esta variable es en general difícil de realizar.

La dificultad del proceso de neutralización radica en los siguientes factores:

- El proceso es altamente no lineal.
- Es muy sensible a perturbaciones cerca al punto de neutralidad.
- Es difícil para formular e identificar un modelo matemático para el proceso de pH.

Para tener más claridad de la naturaleza de este proceso a continuación se describirán sus características y aspectos básicos.

#### **1.1.1. Ionización**

La teoría de ionización proviene de una disertación doctoral de SVANTE ARRHENIUS en 1887. De acuerdo con la teoría original de Arrhenius, todos los ácidos, bases y sales se disocian en iones cuando están en soluciones

acuosas. Él notó que soluciones equivalentes<sup>†</sup> de diferentes compuestos tienen un grado de conductividad muy diferente.

Arrhenius atribuyó este fenómeno al diferente grado de disociación o ionización de cada sustancia, y esta teoría explica apropiadamente muchos de los fenómenos observados en las soluciones acuosas.

### 1.1.2. Producto iónico del agua

Una de las relaciones de equilibrio más importante en materia de soluciones acuosas es la disociación del agua en ion hidrógeno, o protón, y el ion hidróxido.



En el equilibrio químico la concentración de hidrógeno  $H^+$  e iones de hidróxido  $OH^-$  son dados por la fórmula.

$$\frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]} = K_w \quad (2)$$

Solo una pequeña fracción de moléculas de agua es dividida en los iones. La actividad del agua es parcialmente unitaria y se ha encontrado experimentalmente, que a 25 °C,  $K_w = 10^{-14}$  por lo tanto conseguimos que:

$$[H^+][OH^-] = K_w = 10^{-14} \text{ a } 25 \text{ °C} \quad (3)$$

---

<sup>†</sup> Una solución equivalente se define como la solución que contiene un peso equivalente de una sustancia por litro de solución.

Al satisfacer este equilibrio, los valores numéricos de  $[H^+]$  y  $[OH^-]$  incluyen todos los iones  $H^+$  y  $OH^-$  presentes, sin tener en cuenta que estos iones son producto únicamente del agua, o de otros constituyentes en el agua.

### **1.1.3. Ionización de ácidos y bases**

Según la definición clásica, un ácido es un compuesto que genera un ion hidrógeno ( $H^+$ ) al adicionar agua, y una base es un compuesto que, en agua, cede un ion hidróxido ( $OH^-$ ). El producto de la actividad (o aproximadamente la concentración molar) de estos dos iones permanecen constante a una temperatura dada y es igual a  $K_w$ . La teoría de Arrhenius sobre la ionización ayuda a explicar cuando una base o un ácido son fuertes o débiles. Se considera que la ionización de todos los ácidos y bases fuertes se aproxima al 100% cuando están en soluciones diluidas, es decir, se ionizan y se disocian completamente.

Los ácidos y bases débiles se ionizan en escasa proporción y la expresión de concentración de hidrógeno en términos de concentración molar o actividad es bastante laboriosa, por eso se desarrolló otro método de expresión, que es el pH.

### **1.1.4. El concepto de “p”: pH, pOH, pK.**

En 1909 Sorensen propuso expresar la concentración de hidrogeniones en términos de su logaritmo negativo y designó este valor como  $pH^+$ . Su símbolo ha sido remplazado por la designación más simple de pH. El subíndice “p” designa la relación matemática entre el ion y la variable como una función de potencia; la “H” designa el ion como hidrógeno.

Estos términos se pueden representar por:

$$pH = -\log\{H^+\} \quad (4)$$

$$pH = \log \frac{1}{\{H^+\}} \quad (5)$$

Donde  $[H^+]$  denota la concentración de iones de hidrógeno. La ecuación 4 no es descrita correctamente, ya que  $[H^+]$  tiene la dimensiones de la concentración, la cual es medida en unidades de  $M = \text{mol} / L$ . La versión correcta de la ecuación 4 es entonces  $pH = -\log ([H^+] * fH)$ , donde  $fH$  es una constante de dimensiones de litros por mol. La formula 4 será usada sin embargo por que es universalmente aceptada en los libros de química.

Para el agua, en ausencia de materiales extraños, la actividad es igual a la concentración molar,  $[H^+]$  es igual  $[OH^-]$  – como lo requiere la electroneutralidad y el producto, a 25 °C es igual a  $K_w$  o  $10^{-14}$ . Estas condiciones implican que  $[H^+] = [OH^-] = 10^{-7}$ , que es considerado el pH neutro del agua. Debe recordarse que el punto neutro depende de la temperatura, por ejemplo: el  $\log K_w$ . Varía de aproximadamente -14.9 a 0°C, -13.3 a 50 °C, -12.1 a 100°C.

La escala del pH usualmente se presenta en el rango de 0 a 14. Valores menores que 7 indican que la concentración de hidrogeniones es más alta que la concentración de ion hidróxido, y el agua se denomina ácida; en condiciones opuestas, en la que el pH excede a 7, el agua se denomina básica. Se debe notar que cuando el pH se mide con electrodo de pH, lo que se mide es la actividad del Ion hidrógeno y no la concentración molar.

En la tabla 1 Note que la concentración del ión hidrógeno decrece en un factor de 10 por cada unidad de incremento de pH y muestra que la concentración del ión hidróxido se incrementa por un factor de 10 por cada unidad de incremento de pH.

## VALORES DE pH DE VARIAS SOLUCIONES

	pH	Concentración H+ Mols/litro	Concentración OH- Mols/litro	pH de productos alimenticios comunes	pH	pH de varios productos químicos a 25 °C
	0	1	0.0000000000000001		0	Ácido sulfúrico
	1	0.1	0.000000000000001		1	Ácido hidroclicóric
	2	0.01	0.00000000000001	Jugo limón	2	
	3	0.001	0.0000000000001	Jugo naranja	3	Ácido acético
<b>Ácidos</b>	4	0.0001	0.000000000001	Cerveza	4	
	5	0.00001	0.0000000001	Queso	5	Ácido hodrocicánico
	6	0.000001	0.00000001	Leche	6	
<b>Neutro</b>	7	0.0000001	0.0000001	Agua pura	7	
	8	0.00000001	0.000001	Huevos blancos	8	Bicarbonato sodico
	9	0.000000001	0.00001	Bórax	9	Acetato de potasio
	10	0.0000000001	0.0001	Magnesia	10	Amoniaco
<b>Básico</b>	11	0.00000000001	0.001		11	
	12	0.000000000001	0.01		12	Soda cáustica 0.04%
	13	0.0000000000001	0.1		13	
	14	0.000000000000001	1		14	Soda cáustica 4%

**Tabla .1 Concentración de Ion hidrogeno e Ion hidroxilo y el pH de varias soluciones.**

De igual forma, la expresión correspondiente para la concentración del Ion OH<sup>-</sup> es pOH, definida como:

$$pOH = \log \frac{1}{[OH^-]} = -\log[OH^-] \quad (6)$$

$$[OH^-] = 10^{-pOH} \quad (7)$$

La relación entre el pH y el pOH se puede ver de la expresión

$$[H^+][OH^-] = K_w = 10^{-14} \quad (8)$$

Tomando logaritmo en ambos lados y cambiando de signo (recordando que el  $\log AB = \log A + \log B$  ).

$$\begin{aligned} \log[H^+] + \log[OH^-] &= \log 10^{-14} = -14 \\ -\log[H^+] - \log[OH^-] &= 14 \\ pH + pOH &= 14 \end{aligned} \quad (9)$$

En general se ha adoptado un logaritmo negativo o escala “p” con la siguiente interpretación: cuando una cantidad este precedida de la letra p la combinación significa  $-\log$ aritmo que sigue a la letra p.

Con frecuencia se emplea el  $pK_a$  para definir la fuerza de un ácido o una base y esta dado por:

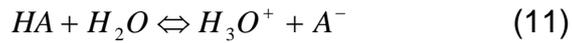
$$pK_a = \log \frac{1}{K_a} = -\log K_a \quad (10)$$

Donde  $K_a$  es la constante de disociación de un ácido, cuando se trata de base se denota con la letra  $K_b$ .

### **1.1.5. Disociación de ácidos y bases débiles**

#### **1.1.5.1. Ácidos**

Un ácido típico, HA, al disolverse en el agua, transfiere un protón de la molécula del ácido a la molécula de agua, dando una solución ácida:



La donación de un protón de la molécula de ácido a la molécula de agua produce un ión negativo A, que se llama anión.

Al recibir la constante de equilibrio para la reacción anterior se puede omitir  $[H_2O]$ , que es un valor constante como también se puede hacer una simplificación al escribir  $[H^+]$  en lugar de  $[H_3O^+]$ , lo cual da

$$K_a = \frac{[H^+][A^-]}{[HA]} \quad (12)$$

$K_a$  es una constante llamada constante de ionización del ácido HA y representa una constante de equilibrio para la ecuación simplificada de la disociación de un ácido o ecuación de ionización:



Los términos de “ionización” y “disociación” generalmente se usan indistintamente, pero hablando en términos más precisos, la ionización es un caso especial de disociación.

El valor de  $K_a$  nos permite entender con más precisión los términos de ácidos “fuertes” y “débiles”. Un ácido fuerte es uno que está bastante desasociado en solución y tendrá en consecuencia una constante de ionización,  $K_a$ , relativamente grande, esta constante indica la fuerza del ácido, a mayor valor de  $K_a$ , mas fuerte es el ácido. Un ácido débil tiene una tendencia menor a desasociarse y por tanto tendrá un valor de  $K_a$  mas pequeño.

Los ácidos fuertes comunes usados en el laboratorio, tales como HCL,  $HNO_3$ ,  $H_2SO_4$ , etc. Están completamente disociados en soluciones y sus valores de  $K_a$  son muy altos. Se les conoce también como “electrolitos fuertes”. Sin embargo,

la mayoría de los ácidos se clasifican como “débiles” y no están totalmente disociados en solución; su valor de  $K_a$  varía desde medianamente grande (por ejemplo  $\text{HIO}_3$ ,  $K_a = 1.7 \cdot 10^{-1}$ ) pasando por pequeños (por ejemplo, ácido acético,  $K_a = 1.8 \cdot 10^{-5}$ ) hasta demasiado pequeños (por ejemplo,  $\text{HCN}$ ,  $K_a = 4.9 \cdot 10^{-10}$ ).

En la tabla 2 se dan las constantes de disociación de varios ácidos en el agua. Estos valores se pueden usar para calcular el grado de disociación, la  $[\text{H}^+]$  y el pH que resulta en las soluciones de los ácidos. El grado de disociación es un término muy usado y se define como la razón entre el número de moles disociados y el número de moles totales. Por lo general se multiplica por 100 para expresarlo en porcentaje:

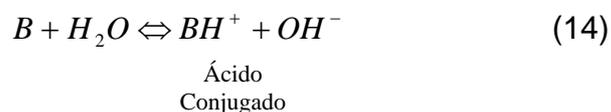
$$\text{Grado de porcentaje de disociación} = \frac{\text{Números de moles que se disocian}}{\text{Números de moles totales}} \cdot 100$$

### 1.1.5.2. Bases

Los mismos principios se pueden aplicar a las soluciones de las bases. Al definir una base como una sustancia que es capaz de aceptar un protón, (concepto de Bronsted), la concentración del ión  $\text{H}^+$  decrecerá en soluciones y aumentará la concentración del ión hidróxido,  $\text{OH}^-$ . Los hidróxidos iónicos de los metales como el  $\text{LiOH}$ ,  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Ba}(\text{OH})_2$ , etc., son compuestos que contienen iones hidróxido en estado sólido y al disolverse en el agua, los iones  $\text{OH}^-$  van a la solución. Debido a que estos hidróxidos están completamente ionizados, se les denomina “bases fuertes” y constituyen un ejemplo de electrolitos fuertes.

Existe una segunda clase de base, bases débiles formadas por moléculas neutras que al reaccionar con el agua dan iones  $\text{OH}^-$  para dar una solución ligeramente básica.

La constante de equilibrio para esta reacción se designa por  $K_b$ , se pueden escribir en forma general, para una base débil B, donde la reacción con el agua no es completa:



y la constante de equilibrio,  $K_b$ , será:

$$K_b = \frac{[BH^+] * [OH^-]}{[B]} \quad (15)$$

El valor pequeño de  $K_b$  nos dice que el equilibrio esta desplazado hacia la izquierda y que solamente una pequeña cantidad de base reacciona con el agua. Por lo tanto, la base se clasifica como débil. Al conocer  $K_b$  se puede calcular la posición del equilibrio. Los problemas con  $K_b$  se manejan de la misma forma que los que incluyen  $K_a$ . Entre mas grande sea el valor de  $K_b$  mayor es la fuerza de la base.

## CONSTANTES DE IONIZACION DE ACIDOS Y BASES DEBILES A 25 °C

Nombres	Constantes
<b>Ácidos débiles</b>	
	<b>K<sub>a</sub></b>
Acético	1.8 * 10E-5
Benzoico	6.4 * 10E-5
Cloroacético	1.4 * 10E-3
Fórmico	1.8 * 10E-4
Cianhídrico	4.9 * 10E-10
Fluorhídrico	6.7 * 10E14
Yódico	0.17
Nitroso	4.5 * E-4
Propiónico	1.3 * 10E-5
<b>Bases débiles</b>	
	<b>K<sub>b</sub></b>
Amoníaco	1.8 * 10E-5
Anilina	4 * 10E-10
Etilamina	4.3 * 10E-4
Piridina	1.7 * 10E-9
Metilamina	4.4 * 10E-4

**Tabla .2 Constantes de ionización de ácidos y bases débiles**

### 1.1.6. Balance de carga del Ión.

En las soluciones neutras no es posible la existencia de un solo tipo de Ión. Por ello, no se puede decir que la medición de pH es la medida únicamente del Ión hidrógeno. En las soluciones acuosas, los iones hidrógenos estarán acompañados por los iones hidróxidos según el producto iónico de la constante de agua pK<sub>w</sub>.

Para que exista neutralidad de carga en soluciones que solo tienen iones [H+] e iones [OH-], se requiere que la cantidad de mili equivalente de ión hidrógeno sea igual a la cantidad de mili equivalente de ión hidróxido. Si existen otros iones en la solución, la suma de mili equivalente de cada ión, multiplicado por su carga (normalidad), debe ser igual a 0. La ecuación de balance de carga es la suma de todas las normalidades de todos los iones presentes en la solución igualada a 0. O sea que, un ácido o base fuerte se ioniza completamente de forma tal que, el número de equivalentes catiónicos es igual al número de equivalentes de aniónicos. Un ácido o base débil se ioniza parcialmente. Las concentraciones de los iones pueden calcularse de las relaciones de las constantes de disociación combinadas en una expresión basada en la concentración del ácido o base.

$$N1 = \frac{1}{(1 + p1)} * s * N \quad (16)$$

$$N2 = \frac{(1 + 0.5 * P2)}{\{1 + P2 * (1 + P1)\}} * s * N \quad (17)$$

$$N3 = \frac{[1 + 0.33 * P3 * (2 + P2)]}{\{1 + P3 * [1 + P2 * (1 + P1)]\}} * s * N \quad (18)$$

$$P1 = 10^{[s*(pH-pK1)]} \quad (19)$$

$$P2 = 10^{[s*(pH-pK2)]} \quad (20)$$

$$P3 = 10^{[s*(pH-pK3)]} \quad (21)$$

$$Nb - Na + 10^{-pH} - 10^{(pH-pKw)} = 0 \quad (22)$$

$$\frac{1}{(1 + P1b)} * Nb - \frac{1}{(1 + p1a)} * Na + 10^{-pH} - 10^{(pH-pKw)} = 0 \quad (23)$$

Donde:

N = concentración del ácido o base (normalidad)

N1 = concentración de iones de una sola disociación (normalidad)

N2 = concentración de iones de una disociación doble (normalidad)

N3 = concentración de iones de una triple disociación (normalidad)

Na = concentración del ácido (normalidad)

Nb = concentración de la base (normalidad)

pK1 = constante de primera disociación

pK2 = constante de la segunda disociación

pK3 = constante de la tercera disociación

PKw = producto iónico para el agua.

S = signo del ión (s = -1 para ácidos y s = +1 para bases)

Las anteriores ecuaciones establecen las relaciones en las que se basan los programas de simulación del proceso de pH y los cálculos numéricos de las curvas de neutralización.

### **1.1.7. Soluciones búfer.**

En el “agua pura”, o en una solución acuosa neutra, el pH es 7, indicando que  $[H^+] = 10^{-7} = 0.0000001$ . Al agregar 0.001 mol de  $H^+$  a una solución neutra se eleva  $[H^+]$  a 0.0010001, ó  $10^{-3}/10^{-7} = 10^4 = 10000$ .

La adición de 0.001 mol de  $OH^-$  a una solución neutra cambia el pH de 7 a 11,0 o sea que  $[H^+]$  ha disminuido 10000 veces. Sin embargo, algunas soluciones tienen la capacidad de “consumir”  $H^+$  y  $OH^-$  en grandes cantidades sin experimentar un cambio apreciable en el pH. Estas soluciones reciben el nombre de soluciones “buffer”, tampón, amortiguadoras o reguladoras.

Un buffer es una mezcla de un ácido débil y una base débil la cual se puede obtener mezclando un ácido débil con una disolución de una sal de su base

conjugada, “buffer ácido”, puesto que el anión del ácido es una base débil. También se puede preparar la solución buffer mezclando una disolución de una base débil con otra de una sal de su ácido conjugado “buffer básico”. El ácido débil reacciona con cualquier cantidad de  $\text{OH}^-$  agregado, mientras que el papel de la base débil es consumir el  $\text{H}^+$  que pueda haberse introducido. Esto impide que se perturbe en mayor grado el equilibrio de  $\text{HOH} \Leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$  y el cual depende el pH de la solución.

La estabilización del pH por acción de una solución buffer se puede explicar al despejar  $[\text{H}^+]$  de la expresión de  $K_a$  para el equilibrio de un ácido débil,



$$K_a = \frac{[\text{H}^+][\text{A}^-]}{[\text{HA}]} \quad (25)$$

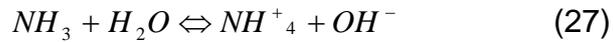
En donde

$$[\text{H}^+] = K_a \frac{[\text{HA}]}{[\text{A}^-]} = K_a \frac{[\text{ÁCIDO}]}{[\text{SAL}]} \quad (26)$$

Esta es la ecuación que se usa para cualquier buffer ácido, puesto que  $K_a$  es un valor constante, se deduce que  $[\text{H}^+]$  depende totalmente de la razón de la concentración del ácido, HA, a la concentración de la base,  $\text{A}^-$ . Una vez establecida esta razón, se puede determinar al pH de la solución.

El problema práctico que se presenta con las soluciones buffer es decir que cantidades se necesita de ácido y de base débil para “amortiguar” o regular la solución a un pH predeterminado y es la relación de los constituyentes la que fija el pH.

Para un buffer básico, por ejemplo,  $NH_3 + NH_4Cl$ , la expresión es muy semejante



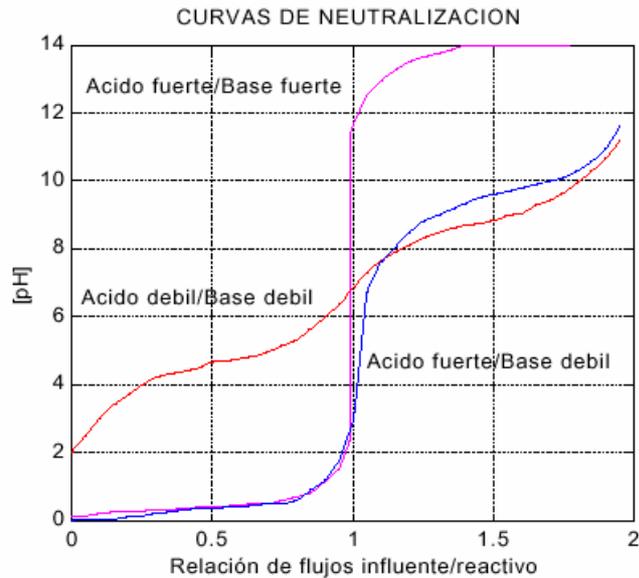
$$K_b = \frac{[NH_4^+] * [OH^-]}{[NH_3]} \quad (28)$$

$$[OH^-] = K_b \frac{[NH_3]}{[NH_4^+]} = K_b \frac{[BASE]}{[SAL]} \quad (29)$$

### 1.1.8. Curvas de neutralización.

La curva de neutralización es un diagrama con pH para el eje Y y la relación de ácido a base o diferencia entre las concentraciones de ácido y base, volumen o flujo, para el eje X. La curva de neutralización es la pieza mas importante de información para el diseño, *commissioning* y solución de problemas para los sistemas de control de pH.

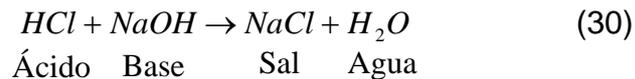
La sensibilidad de un sistema de control y la ganancia de un proceso de pH se incrementa cuando la pendiente de la curva de neutralización se incrementa. En la Figura 1 vemos los cambios en la curva de neutralización para 3 posibles combinaciones de ácidos y bases fuertes y débiles.



**Figura 1. Curva de neutralización para ácido fuerte / base fuerte, ácido débil / base débil, ácidos fuertes / base débil**

### 1.1.8.1. Ácido fuerte más base fuerte

¿Qué ocurre cuando se mezcla una solución de ácido fuerte como HCl con la solución de una base fuerte como NaOH? El resultado es el siguiente:



Tanto HCl como NaOH son electrolitos fuertes desasociados en 100%; NaCl es una sal neutra. En consecuencia, se puede considerar que en realidad se añade es una solución de OH<sup>-</sup> a otra de H<sup>+</sup> que se neutraliza según la reacción



Esta reacción a menudo se llama reacción de neutralización ya que si se añade la cantidad suficiente de base para reaccionar con todo el ácido, la solución se vuelve neutra.

Si por ejemplo se mezcla exactamente 100 mml de HCl 0.5M con exactamente 100 mml de NaOH, 0.5M, el Ion  $H^+$  del ácido se neutraliza exactamente por el Ion  $OH^-$  de la base y la solución final tendrá un pH igual a 7 (solución neutra). Naturalmente no es necesario que se mezclen cantidades iguales de ácido y base para que ocurra una reacción. En muchos casos se usa uno u otro en exceso.

Si se va agregando poco a poco NaOH (una base) a la solución de HCl (un ácido), el pH de la solución aumenta con cada adición de la base se observa en la grafica .1, se puede apreciar que se produce un cambio muy rápido en el pH de la solución a medida que se llega al “punto de equivalencia”, en donde el ácido esta neutralizado exactamente.

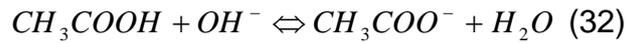
Esta curva de ácido fuerte mas base fuerte se distingue por su pendiente vertical en casi todo el rango de la escala de pH. El punto de neutralización ocurre a un valor de pH igual a la mitad de  $pK_w$  es decir la localización depende de la temperatura de la solución, el punto de equivalencia coincide con el punto neutral.

La pendiente de la curva de neutralización es vertical en el punto de equivalencia.

La sensibilidad del sistema de control y la ganancia del sistema de pH es importante para cualquier setpoint del pH exceptuando los de los extremos del rango de la escala del pH.

#### **1.1.8.2. Ácido débil más base fuerte**

Si se titula una solución de un ácido débil con una base fuerte, el cambio de pH al irse agregando la base difiere del caso del ácido y base fuerte. Consideremos, por ejemplo, la titulación del ácido acético (ácido débil) con una solución de NaOH (base fuerte):

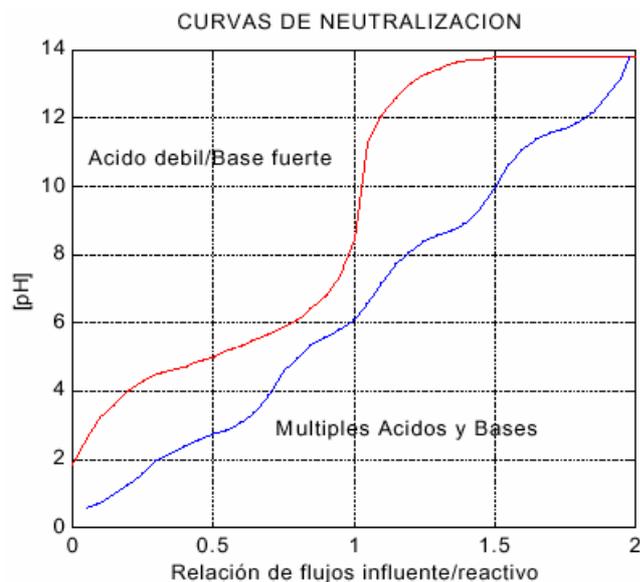


La diferencia con el caso anterior se debe a que: (1) El  $CH_3COOH$  esta parcialmente desasociado, mientras que el HCL esta totalmente ionizado; (2) el producto en el punto de equivalencia  $CH_3COOH$  , no es una sal neutra como el NaCL. En la figura 2 se muestra la curva de titulación típica para este caso.

Este sistema se distingue por una pendiente precipitada en el rango superior de la escala de pH. El centro de esta pendiente precipitada es la localización del punto de equivalencia que depende de la constante de disociación del ácido débil.

La sensibilidad del sistema de control y ganancia del proceso de pH es de interés para el setpoint de pH mayores a una unidad de pH por encima del pKa del ácido débil y una unidad de pH por debajo del pKb de la base fuerte o el pKw del agua.

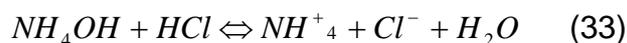
La sensibilidad y ganancia es de menos importancia para el setpoint de pH igual al pKa el cual es el punto medio de la porción plana inferior. Las porciones planas de los extremos superiores e inferiores, del rango de pH, están fuera del rango práctico del setpoint de pH.



**Figura 2. Curva de neutralización para ácido débil / base fuerte y múltiples ácidos / múltiples bases**

### 1.1.8.3. Ácido fuerte mas base débil

La complicación encontrada en el caso anterior también aparece cuando se añade una base débil, amoníaco, por ejemplo a una solución de un ácido fuerte, como HCL. La reacción ácido base es:



La solución en el punto de equivalencia contiene sólo  $NH_4^+$ . Cl y es ácida debida a la presencia del Ion  $NH_4^+$ . El pH en el punto de equivalencia es aproximadamente de 5. Los cálculos sobre pH en este caso son semejantes a los de ácidos débiles mas base fuerte.

De acuerdo a la Fig. 1 Este sistema se distingue por una pendiente precipitada en la parte inferior del rango de la escala de pH. El centro de esta pendiente es la localización del punto de equivalencia que depende de la constante de

disociación de la base débil. La sensibilidad y ganancia del proceso de pH son importantes para setpoint de pH mayores a 1 unidad de pH por debajo de la  $pK_b$  de la base débil y 1 unidad de pH por encima de la  $pK_a$  del ácido fuerte. La sensibilidad y ganancia son menores para un setpoint de pH igual al  $pK_a$ , la cual es el punto medio de la porción plana superior. Al igual que el caso anterior, los extremos están por fuera del rango del setpoint de pH práctico.

#### **1.1.8.4. Ácido débil mas base débil.**

Este sistema se distingue por carecer de una pendiente precipitada a través del rango. La pendiente de la curva de neutralización es mayor en el punto de equivalencia pero es suave y relativamente pequeña comparada con los sistemas anteriores.

El punto de equivalencia señalado, depende de la constante de disociación del ácido y base, mientras que la magnitud de la ganancia del proceso de pH es baja la ganancia es suave no lineal. El sistema podría considerarse difícil de controlar.

#### **1.1.8.5. Sistemas de múltiples ácidos y bases débiles.**

Una concepción equivocada de una curva de neutralización es la de creer que consiste de una sola curva en forma de S. En la Figura .2, un ácido débil con  $pK_a$  constante de 2.5 y 5.5 pH se neutraliza con una base débil con  $pK_b$  constante de 8.5 y 11.5 pH.

Nótese que se forman tres curvas de neutralización con formas de S, con un punto de equivalencia en el punto de mayor pendiente para cada S. Las constantes de disociación han de tener más de 2 unidades de pH de diferencia entre ellas para que se presenten múltiples curvas S.

Las curvas son simétricas porque las concentraciones y las distancias entre las constantes de disociación son iguales, pero normalmente las curvas de neutralización de pH no son simétricas.

### 1.1.9. Generación de la curva de neutralización de la planta.

Para tener un conocimiento exacto del comportamiento de la planta se realiza la generación de la curva de neutralización, este procedimiento se hizo tomando una muestra en un vaso de volumen conocido del proceso, posteriormente se le adicionó un volumen fijo de reactivo desde una bureta y luego los cambios de la de pH fueron medidos por un pHMETRO y registrados de forme manual para que finalmente se obtuviera una curva representativa del comportamiento de la planta, como se observa en la figura 3.

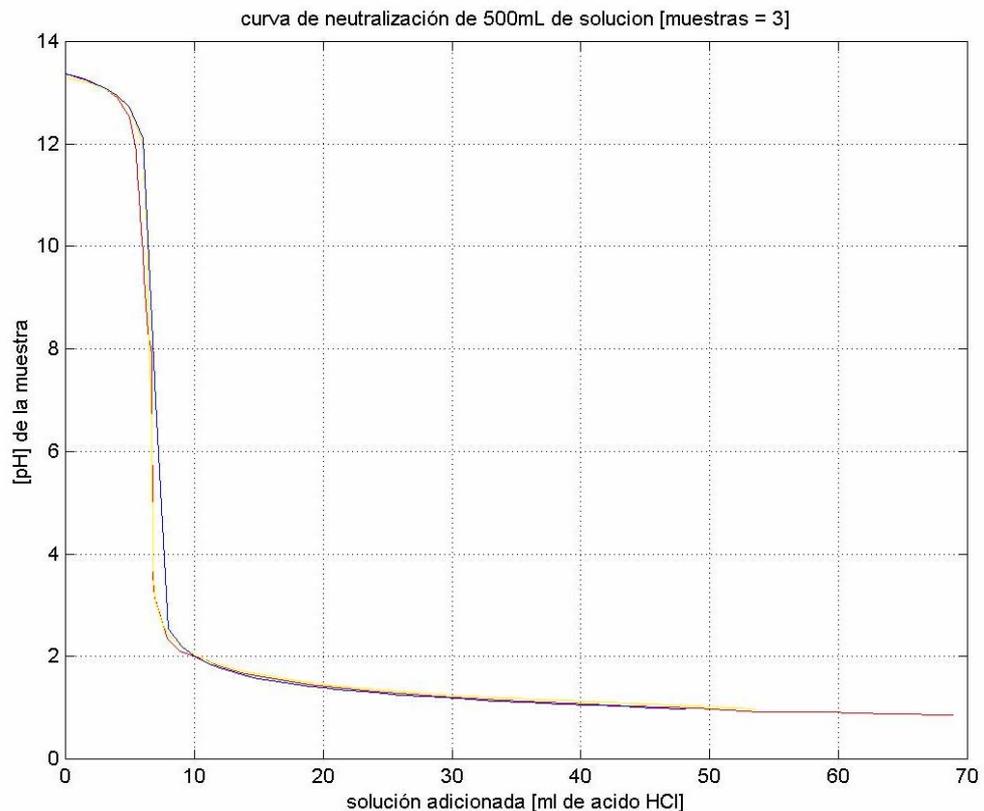
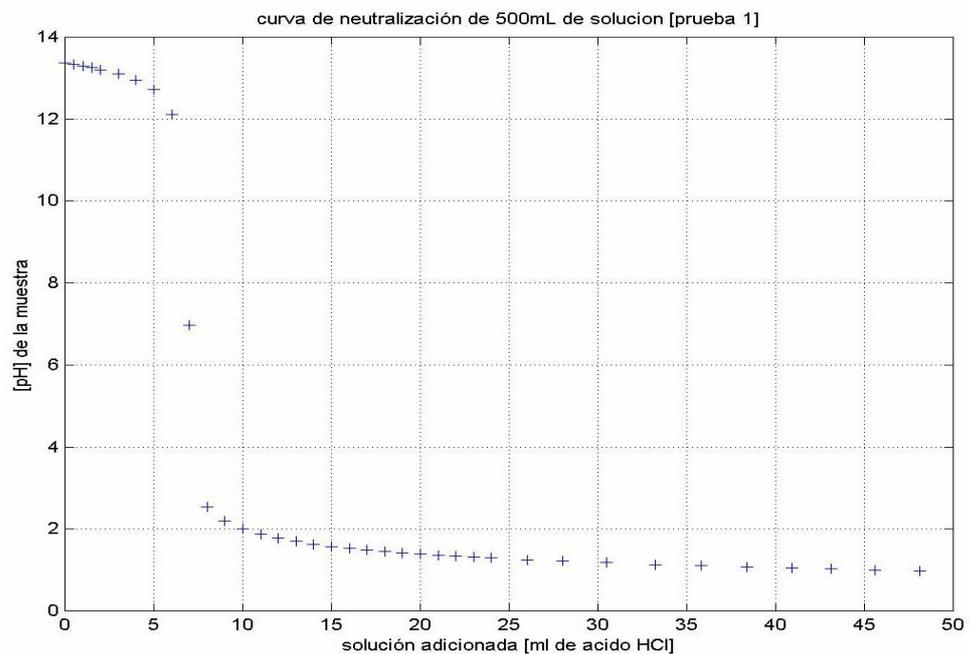


Figura 3. Curva de neutralización de la planta, generada en el laboratorio.

En la figura 3 se observa la alta no linealidad del proceso, el cual muestra una pendiente casi vertical en la zona de neutralidad por lo que lo hace ser sensible en esta zona.

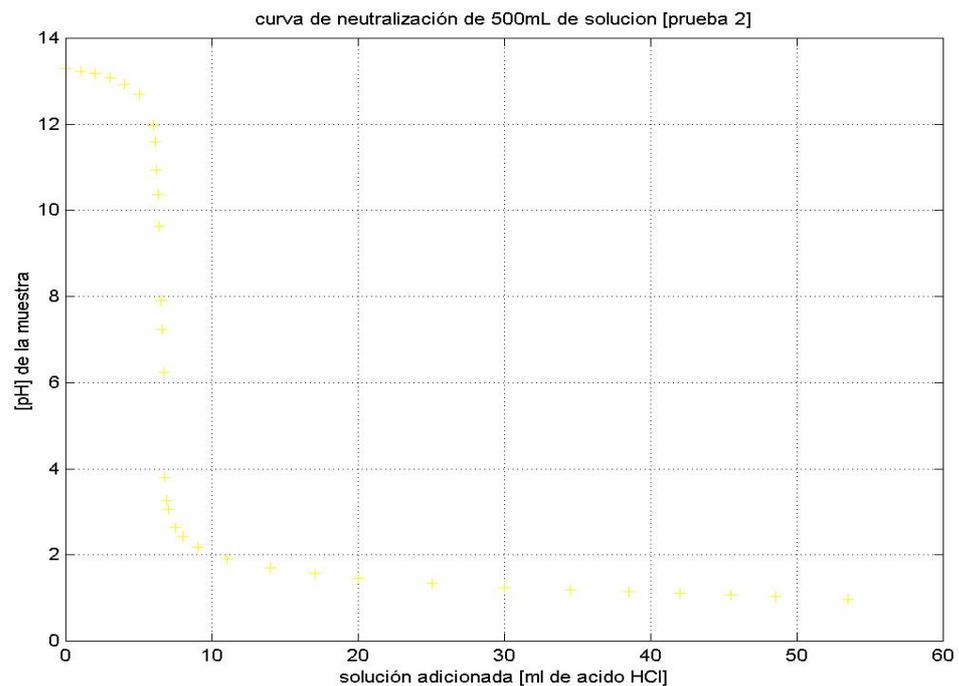
El valor de pH inicial de las muestras de 500 mL del proceso esta comprendido entre 13.379 y 13.62 lo cual indica que es una solución alcalina de valor elevado y por tal motivo se decidió a suministrar ácido (HCl).

La primera prueba se realizó con un flujo constante de 1 mL, se observa en la figura 4 que al inicio del proceso de adición las variaciones de pH de la muestra no eran tan significativas, hasta llegar a un valor de 12.107 el cual al adicionar 1mL de HCl el pH bajo a un valor de 6.98 y al adicionar la siguiente cantidad de HCl el pH bajo a 2.5 donde posteriormente al adicionar HCl los cambios de pH no eran significativos.



**Figura 4. Datos obtenidos en la prueba 1**

Debido a lo sucedido en la prueba anterior que solo se pudo tomar un dato en la zona de neutralidad se decidió suministrar gran cantidad de HCL en la zona de pH comprendida entre 13.62 - 12.107 y reducir la dosis hasta llegar al valor de pH de 2.1 y luego aumentar la dosis, como se observa en la figura 5 de acuerdo a esto los resultados obtenidos fueron mas ilustrativos debido a que se pudo obtener mas valores de pH en la zona de neutralidad.



**Figura .5 Datos obtenidos en la prueba 2**

La tercera prueba se realizó para comprobar que el comportamiento de la figura del proceso era real; el resultado obtenido fue positivo debido a que el comportamiento del proceso se asemeja a las pruebas anteriores.

La curva de color rojo de la figura 3 representa el resultado de esta última prueba.

Otra de las características observadas que es de gran importancia en la hora de seleccionar el controlador son los retardos del pH-METRO en estabilizar la medida, los retardos de mayor duración ocurrieron en la zona de neutralidad, la

diferencia del retardo con las otras dos zonas es considerable.

Los tiempos de estabilización del pH-METRO en las zonas donde la variación de pH no es tan sensible es del orden de 1 – 3 minutos y la zona de mayor sensibilidad es del orden de 20 – 40 minutos.

De acuerdo a las características mencionadas anteriormente la grafica de este proceso clasifica en las reacciones de base fuerte y ácido fuerte.

De acuerdo a las pruebas realizadas se llega a la conclusión de que el proceso de neutralización de esta planta es muy complejo debido a la alta no linealidad y gran sensibilidad que existe en la zona de neutralidad, debido a esto se debe utilizar un controlador que sea capaz de identificar la zonas del proceso de neutralización para realizar la acción correspondiente con un tiempo determinado y de esta forma minimizar las cantidades de ácidos y bases que se utilizan en el proceso.

## 2. REQUERIMIENTOS Y CONSIDERACIONES DE DISEÑO.

El sistema de control automático que se diseñó está limitado a las condiciones técnicas y económicas de la planta. Las limitaciones económicas actuales imposibilitan la consecución de actuadores que permitan la implementación de una estrategia de control más precisa (PID, control difuso, etc.), como por Ej. Electro-válvulas proporcionales. Las válvulas solenoides adquiridas por la compañía son del tipo ON/OFF, lo que obligó a buscar una estrategia de control que cumpliera con las siguientes características, exigidas por el personal que opera la planta:

1. Se contará con un software de visualización y control del proceso. Donde el operario seleccionará la acción de encendido o apagado del proceso, y a su vez visualizar las variables más importantes que intervienen en este como son las medidas de pH, nivel, presión y de los estados de las válvulas.
2. Al realizar la acción de encendido el sistema de control verificará que todas las condiciones para la puesta en marcha del proceso de neutralización estén dadas, en caso de que falte alguna de esta se emitirá una señal de alarma y pueda ser visualizada en el computador.
3. Al cumplir con los requerimientos de las condiciones iniciales y haber alcanzado el nivel requerido, el sistema automáticamente deberá realizar la acción de cebado de la bomba principal, con el fin de evitar averías en esta.
4. Cuando la medida de pH indique un valor entre 6 y 8 (medida deseada) el controlador automáticamente deberá dar la orden de apagados de las bombas dosificadoras (ácido y soda) y a su vez recircular el agua por un determinado tiempo, con el fin de homogenizar la solución y garantizar que la medida este entre rango deseado. Si durante el tiempo de recirculación el pH se desvía de los valores deseados el controlador

automáticamente mandará una señal ordenando la dosificación de ácido y soda según se requiera.

5. Una vez transcurrido el tiempo de homogenización del pH de la pileta. El controlador mandará automáticamente la señal de abrir a la válvula de descarga y cerrar la válvula de recirculación simultáneamente.
6. Si durante la descarga en la pileta, la muestra alcanza valores de pH por encima o por debajo del valor definido, el controlador automáticamente ordenara abrir la válvula de recirculación y cerrar la válvula de descarga simultáneamente.
7. En el proceso de descarga, cuando la pileta llegue a un nivel de 40cm, el controlador debe mandar una orden de parada a la bomba principal.
8. después de terminado el proceso se realizará el lavado de forma automática de la cámara del sello mecánico de la bomba desalojando cualquier traza de ácido que haya podido penetrar durante la operación de recirculación o descarga.

Este control se realiza de la siguiente manera:

➤ **CONTROL DE pH.**

Se contarán con dispositivos de medición del pH el cual envía al controlador una señal de voltaje proporcional al pH de la solución. El controlador le enviará la información a través del puerto de comunicación al microcontrolador para realizar la acción correspondiente de acuerdo con el **set point**. Esta medida podrá ser visualizada en tiempo real en el computador mediante el software de visualización y control. Contaremos con un diseño de un controlador **Fuzzy Logic** el cual tiene una gran eficiencia para este tipo de procesos.

➤ **CONTROL DE NIVEL.**

Se hace con el fin de tener un control exacto sobre el nivel de la pileta. Este se realizará a través de un sensor de nivel que manda señales de voltaje o corriente al controlador el cual dependiendo de esta, el realizará

los cálculos correspondiente para adicionar más ácidos y sodas según requiera y a su vez mandará las señales de acción de encendido o apagado de la bomba principal y la señal de apertura o cierre de la válvula de descarga. El nivel de la pileta se tendrá en cuenta para relacionar la cantidad de químicos de la mezcla (ácido o soda según se requiera), que se realizará a través de las bomba dosificadora.

➤ **SENSORES DE PRESIÓN.**

En el proceso se utilizará un manómetro indicador de presión para poder determinar el suministro de agua filtrada que se utiliza para el cebado de la bomba principal y otro manómetro con un contacto normalmente abierto para indicador y protección por baja presión de agua de lavado y lubricación de la bomba principal.

### **3. SELECCIÓN Y CONCEPTOS DEL SISTEMA DE CONTROL.**

El control de pH es un tema al cual los investigadores y especialistas han dedicado mucho tiempo a través de los años debido a sus características especiales y la importancia que reviste en los procesos químicos y de tratamiento de aguas residuales. Algunas de esas características se han ido mencionando a largo de este trabajo, de las cuales vale destacar: la variación de la curva de respuesta, en forma de "S", a la adición de reactivo dependiendo la composición de la solución influente y la temperatura. Para manejar la variabilidad en el tiempo algunos han propuesto esquemas complejos de medición y control con múltiples puntos de medición de pH e inyección de reactivo con los cuales pueden reconocer los cambios en la forma de respuesta y adaptar los controles en concordancia [9].

Otros problemas que presenta el control de pH tienen que ver con los elementos de medición y actuación, que por lo regular requieren de una especial atención en las rutinas de mantenimiento.

Para este tipo de proceso existe una variedad de técnicas de control que se han venido utilizando a lo largo de este tiempo como son: Control adaptativo, control por ganancia programada, controladores Fuzzy Logic, PID (no es muy óptimo), etc. Debido a los resultados que se han obtenidos en los diferentes trabajos que hemos investigado, el control de pH con lógica difusa es uno de los más eficientes y relativamente fáciles de implementar [11].

En este trabajo se implementará el controlador por lógica difusa (FLC), debido a que en este tipo de controlador no es necesario obtener un modelo preciso del comportamiento del proceso pero sí algún conocimiento previo de las reglas que lo gobiernan.

La escogencia de la técnica FLC se basó en: su enorme versatilidad para trabajar en ambientes no lineales; la robustez para manejar cambios de dinámica y perturbaciones; y la familiaridad de los pocos parámetros que eventualmente tendría que ajustar un técnico, para sintonizar el lazo de control.

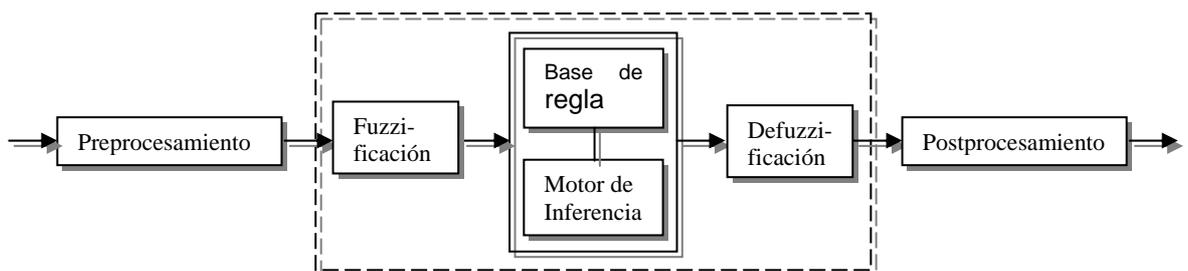
### **3.1 CONCEPTOS BÁSICOS DE CONTROL DE LOGICA FUZZY**

La *lógica difusa* ha cobrado una gran importancia en aplicaciones de procesos industriales. Se ha considerado de manera general que el concepto de lógica difusa apareció en 1965, en la Universidad de California en Berkeley, introducido por Lotfi A. Zadeh. Las lógicas difusas, pues de hecho hay que hablar de ellas en plural, son esencialmente lógicas multi-evaluadas que extienden a las lógicas clásicas. Estas últimas imponen a sus enunciados únicamente valores *falso* o *verdadero*. Bien que éstas han modelado satisfactoriamente a una gran parte del razonamiento "natural", es cierto que el razonamiento humano utiliza valores de verdad que no necesariamente son "tan deterministas". Por ejemplo, al calificar que "el cielo es azul" uno está tentado a graduar qué tan "azul", en efecto, es el cielo, e igualmente, si "un vehículo se mueve rápido", también se está obligado a considerar qué tan rápido es el vehículo, aunque esto último no implique necesariamente cuantificar la velocidad del vehículo con toda precisión. Las lógicas difusas procuran crear aproximaciones matemáticas en la resolución de ciertos tipos de problemas. Pretenden producir resultados exactos a partir de datos imprecisos, por lo cual son particularmente útiles en aplicaciones electrónicas o computacionales. El adjetivo "difuso" aplicado a ellas se debe a que los valores de verdad no-deterministas utilizados en ellas tienen, por lo general, una connotación de incertidumbre. Un vaso medio lleno, independientemente de que también esté medio vacío, no está lleno completamente ni está vacío completamente. Qué tan lleno puede estar, es un elemento de incertidumbre, es decir, de difusidad, entendida esta última como una propiedad de indeterminismo. Ahora bien, los valores de verdad asumidos por enunciados

aunque no son deterministas, no necesariamente son desconocidos. Por otra parte, desde un punto de vista optimista, lo difuso puede entenderse como la posibilidad de asignar más valores de verdad a los enunciados que los clásicos “falso” o “verdadero”. Así pues, reiteramos, las lógicas difusas son tipos especiales de lógicas multi-evaluadas. El objetivo de todo sistema manejador de una lógica difusa es describir los grados de los enunciados de salida en términos de los de entrada. Más aún, algunos sistemas son capaces de refinar los grados de veracidad de los enunciados de salida conforme se refinan los de los de entrada. Por estas propiedades es que ciertos sistemas de lógica difusa aparentan una labor de aprendizaje, y son excelentes mecanismos de control de procesos. Desde el punto de vista tecnológico, las lógicas difusas se encuadran en el área de la llamada Inteligencia Artificial y han dado origen a sistemas expertos de tipo difuso y a sistemas de control automático.

### 3.2 ESTRUCTURA DEL CONTROLADOR DIFUSO

Un control difuso está compuesto por las diferentes partes especificadas en el siguiente diagrama de bloque:



**Figura 6. Diagrama de bloques de un controlador difuso.**

A continuación se especifica detalladamente cada uno de estos bloques con el objetivo de entender su funcionamiento.

### 3.2.1. Pre-procesamiento

Las entradas son por lo general medidas por un equipo de medición, en lugar de ser lingüística. Un pre-procesador, es el primer bloque en la figura 6 la función de este bloque es la de acondicionar la medida antes de que esta entre en el controlador. Ejemplos de pre-procesamiento son:

- Cuantización en relación con redondear números
- Normalización del rango
- Filtro para eliminar ruido
- Promediando para obtener término largo o cortos
- Multiplexación de varias medidas
- Diferenciación y integración o sus equivalencias discretas.

Una cuantización es necesaria para convertir los valores entrantes en un valor entero. Por ejemplo, asuma que el error de la variable es 4.5, pero los valores del error son = (-5, -4, ...0, ...4, 5). La cuantización redondea a 5 para obtener el valor más cercano. La cuantización es un medio para reducir datos, pero si la cuantización es demasiado brusca puede hacer que el controlador oscile alrededor del punto de referencia o incluso volverse inestable.

### 3.2.2. Fuzzificación

El primer bloque dentro del controlador es la fuzzificación que convierte cada dato de entrada en sus respectivos grados de pertenencia de las funciones de un sistema difuso. El bloque de fuzzificación recoge los datos de entrada y con las condiciones de las reglas determinar qué grado de pertenencia tiene esa entrada en particular. Hay un grado de pertenencia para cada término lingüístico que aplica a esa variable de entrada.

### 3.2.3. Base de regla

Las reglas pueden usar diferentes variables. Los controladores pueden aplicarse por consiguiente a problemas de multi-entrada-multi-salida (MIMO) o problemas de una sola entrada una sola salida (SISO). Los problema típicos de SISO consisten en regular una señal de control basado en una señal de error.

El controlador puede utilizar el error, la derivada del error y el error acumulado como entradas, pero nosotros lo llamaremos lazo de control, porque en principio los tres se forman de la medida del error. Para simplificar, se asume que el objetivo del control es regular una variable del proceso alrededor de un Set Point o referencia.

Estructura de la base de regla: Básicamente un controlador lingüístico contiene reglas si -entonces, pero estas se pueden representar de diferentes formas. Una forma de presentar las reglas es la siguiente:

Entradas		Salida
Error	Derivada del error	
Neg	Pos	Cero
Neg	Cero	NM
Neg	Neg	NG
Cero	Pos	PM
Cero	Cero	Cero
Cero	Neg	NM
Pos	Pos	PG
Pos	Cero	PM
Pos	Neg	Cero

**Tabla 3. Representación de la base de regla de un controlador difuso**

Cada fila representa una regla del controlador. Este formato se satisface quizás mejor para un usuario experimentado que quiere conseguir una apreciación global de la base de la regla rápidamente. El formato está ciertamente preparado para guardar de forma organizada en una base de datos. Se debe

especificar que en este formato correlativo se asume implícitamente que la operación lógica entre las entradas siempre es and u OR.

Un segundo formato es el siguiente:

Derivada de error				
Error		$\Delta_{neg}$	$\Delta_{cero}$	$\Delta_{positivo}$
	E <sub>neg</sub>	NG	NM	CERO
	E <sub>cero</sub>	NM	CERO	PM
	E <sub>pos</sub>	CERO	PM	PG

**Tabla 4. Representación de la base de regla de un controlador difuso**

Este formato es aun más conciso. Las variables de la entrada se colocan a lo largo del eje, y la variable de la salida está dentro de la tabla. En caso de que la tabla tenga una celda vacía, es una indicación de falla de regla. Este formato es útil para verificar integridad.

Cuando las variables de entrada es el error y la deriva del error, este formato es también llamado plano de fase lingüístico. En caso de que la variable de entradas involucradas sea  $n > 2$ , la tabla crece a una serie de matriz n-dimensional.

### 3.2.3.1. Conectividad

En matemática, existen operadores lógicos que son and, OR, implicación y doble implicación. A estas se le conoce con el nombre de *conectividad*. La lógica difusa dispone de unas normas para efectuar esas operaciones: los operadores para la operación lógica AND son llamados t-normas (min., producto, etc.) y los empleados para la operación lógica OR son llamados t-conorma (ma, suma algebraica, etc.). El método de implicación más empleado en control de procesos es la implicación de Mamdani (min.).

$a \text{ and } b = \min(a,b)$	Mínimo
$a \text{ or } b = \max(a,b)$	Maximo
$o$	
$a \text{ and } b = a*b$	Multiplicación algebraica
$a \text{ or } b = a + b - a*b$	Suma probabilística o algebraica

### 3.2.3.2. Modificadores

Un modificador lingüístico, es una operación que modifica el sentido de los términos. Por ejemplo en la frase “Muy cerrado a 0” la palabra muy modifica cerrado a 0, lo cual es difuso. Un modificador es así entonces una operación difusa. El modificador muy puede definirse como el cuadrado de la función de pertenencia subsecuente, que es:

$$\text{Muy } a = a^2$$

El mismo ejemplo para otros modificadores son

$$\text{Extremadamente } a = a^3$$

$$\text{Levemente } a = a^{1/3}$$

$$\text{Un poco } a = \text{mas o menos } a \text{ y no levemente } a$$

Una familia entera de modificadores es generada por  $a^p$  donde  $p$  puede estar entre cero e infinito. Con  $p = \text{infinito}$  el modificador de podría llamar exactamente, porque suprimiría todos los número de pertenencia menores que 1.0.

### 3.2.3.3. Universo

Los elementos de un sistema difuso se toman del universo de discurso o un universo específico. El universo contiene todos los elementos que pueden entrar en consideración. Antes de diseñar la función de pertenencia, es necesario considerar el universo para las entradas y salidas.

Tome por ejemplo la regla:

Si el error es Negativo y la derivada del error es positiva entonces la salida es 0. Naturalmente, la función de pertenencia para el Negativo y Positivo debe ser definida para todos los posibles valores de error y derivada del error. Los siguientes universos pueden ser convenientes:

- El controlador de Smith, por ejemplo, usa el universo de números reales  $[-1,1]$ .
- Los primeros autores de los artículos en control difuso usaban el universo de  $[-6,6]$ .
- Un universo de  $[-100,100]$  correspondiente a un porcentaje de una escala.
- El universo de  $[0, 4095]$  correspondiente a la salida de un convertidor analógico a digital de 12 bits.

Otra consideración es que las funciones de pertenencia de entrada pueden ser continuas o discretas. Una función de pertenencia continua se define en un universo continuo por medios de parámetros. Una función de pertenencia discreta se define en términos de un vector con un número finito de elementos.

En el caso anterior es necesario especificar el rango del universo y el valor de cada punto. La opción entre la resolución fina y ancha es un oficio fuera de la exactitud, velocidad y demandas de espacio. La cuantización toma tiempo para

ejecutar, y si este tiempo también es precioso, la función de pertenencia continuas harán las cuantización obsoleta.

Si una entrada del controlador principalmente usa un sólo término, el factor de escala puede colocarse tal que el rango entero sea usado. Una ventaja es que esto permite un intervalo normal y elimina la necesidad de agregar más términos.

#### **3.2.3.4. Función de pertenencia**

Cada elemento en el intervalo de disertación es miembro de un sistema difuso en cierto grado, incluso puede ser cero. El grado de pertenencia para todos estos miembros describe un sistema difuso. En un sistema difuso los elementos se le asignan un grado de pertenencia, tal que la transición de pertenencia a no pertenencia sea gradual en lugar de abrupto. Los puntos de los elementos de pertenencia que sean diferente de cero se llaman soporte del sistema difuso (*support fuzzy set*). La función que represente un número a cada elemento de  $x$  del intervalo se llama función de pertenencia  $\mu(x)$ .

El diseñador se enfrenta inevitablemente con la pregunta de cómo construir el término del sistema difuso. Hay dos preguntas específicas para considerar:

1. ¿Cómo determinar una forma para el sistema?
2. ¿Cuántos puntos son necesarios y suficientes?

Por ejemplo, en el controlador, el error usa una familia de términos: Negativo, Cero y Positivo. De acuerdo con la teoría del sistema difuso el diseñador elige la forma, el ancho es subjetivo.

Un término debe ser suficientemente ancho para permitir ruido en la medida.

Un cierto traslape es deseable; ya que de otra forma el controlador puede ejecutarse dentro de los estados definidos pobremente, donde quizás la salida no sea la apropiada.

Una respuesta preliminar a las preguntas 1 y 2 es que el número necesario y suficiente de reglas dependan del ancho de estas, y viceversa. Una solución podría ser pedirles a los operadores del sistema que hagan una curva de pertenencia del proceso; pero los operadores también encuentran dificultad para establecer una curva en particular.

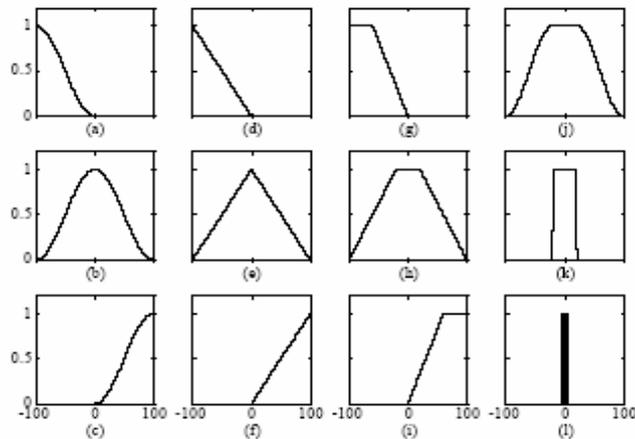
El manual para el producto de TILShell\* recomienda lo siguiente:

- *Comience con triangulares.* Toda función de pertenencia para una entrada o salida en particular debe ser triángulos simétricos del mismo ancho. Deben llevarse a los más izquierdo y derecho de las rampas.
- *El traslape debe ser por lo menos 50%.* El ancho debe escogerse inicialmente para que cada valor del intervalo pertenezca por lo menos a dos reglas, posiblemente excepto para los elementos de los extremos. Si, por otro lado, hay una abertura entre dos reglas que ninguna de esta se enciende para valores en esa abertura. Por consiguiente la función del controlador no se define.

Las funciones de pertenencia pueden ser trapezoidal, rectangular, o rampas horizontales etc. La Figura 7 se muestra algunas formas típicas de funciones pertenencia.

---

\* Hill, Horstkotte & Teichrow, 1990

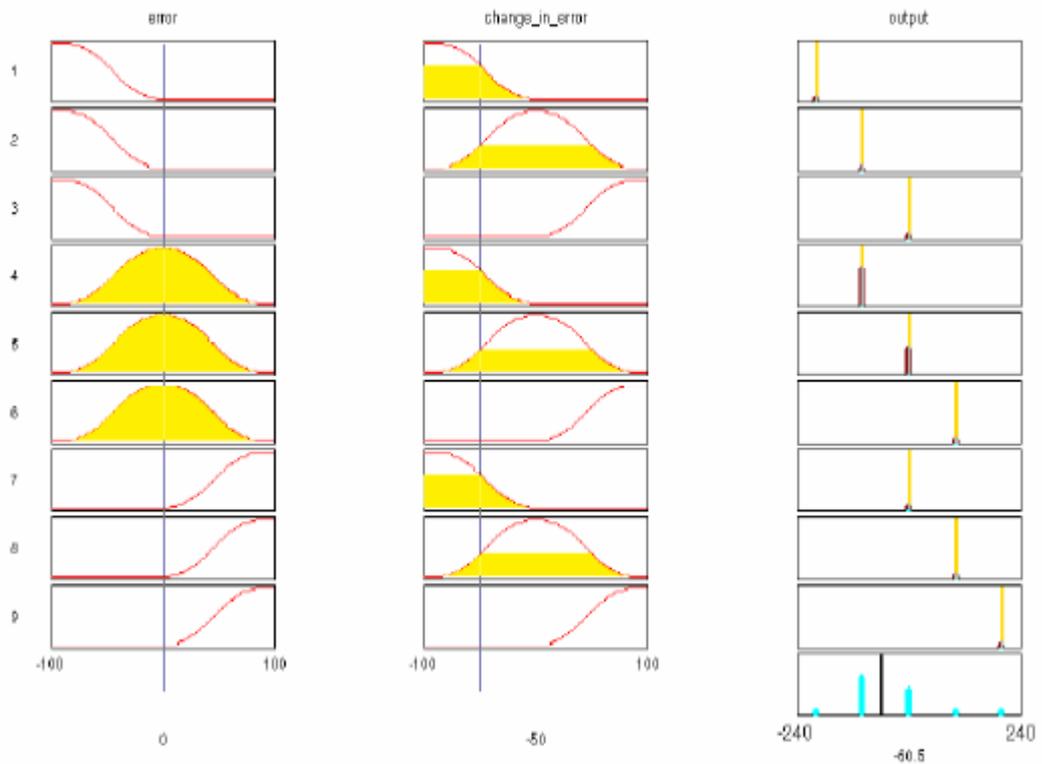


**Figure 7. Ejemplo de funciones de reglas: (a) función-S, (b) función – gaussiana, (c) función-Z, (d-f ) versión triangular, (g-i) versión trapezoidal, (j) función- $\pi$ , (k) rectangular, (l) singlenton.**

### 3.2.4. Motor de inferencia

Las figuras 8 y 9 son ambas una construcción gráfica del algoritmo de controlador difuso. En Fig. 8, cada uno de las nueve filas se refiere a una regla.

Por ejemplo, la primera fila dice que si el error es negativo (fila 1, columna 1) y la derivad del error es negativa (fila 1, columna 2) entonces la salida debe ser negativa grande (fila 1, columna 3). La grafica corresponde a la base de la regla en 1. Las reglas reflejan la estrategia que la señal de control debe tener una combinación del error y la derivada del error, un controlador difuso proporcional-derivativo. El error y la derivada del error son indicados por las líneas verticales en la primera y segunda columna de la grafica. Para cada regla, el motor de inferencia busca los valores del número de pertenencia en la condición de la regla.



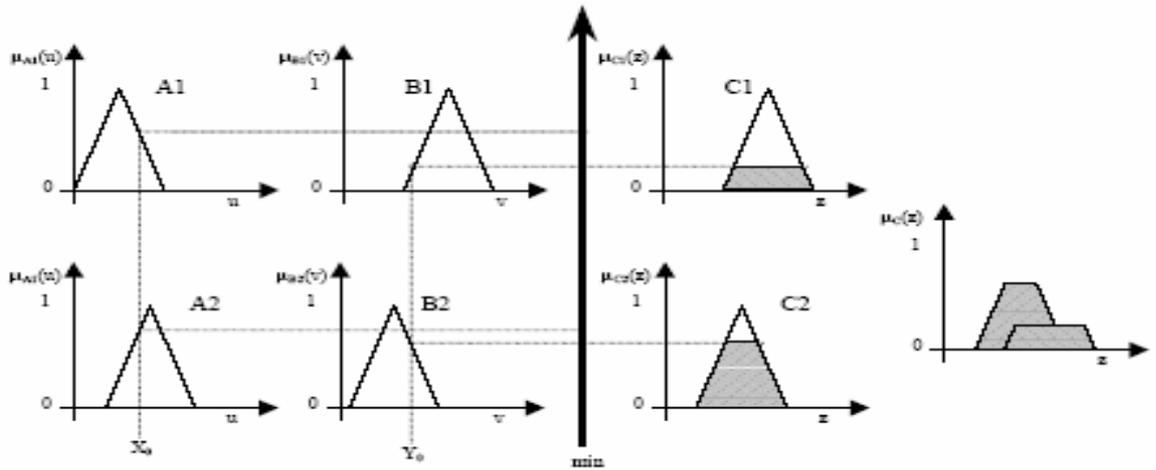
**Figura 8. Grafica de la señal de control en un controlador difuso**

### 3.2.4.1. Agregación

La operación de agregación es usada cuando se calcula el grado de pertenencia o fuerza de encendido  $\alpha_k$ , de la condición de la regla k. Una regla, generará un valor de pertenencia E1 que proviene de la señal de error y un valor de pertenencia  $\Delta E1$  que proviene de la señal de derivada del error. La agregación es la combinación,

$$\alpha_{e1} \text{ and } \alpha_{de1}$$

De igual forma para las otras reglas. La agregación es equivalente a la fuzzificación, cuando hay sólo una entrada al controlador. La agregación a veces se llama también cumplimiento de la regla o fuerza de activación.



**Figura 9. Grado de pertenencia o fuerza de activación**

### 3.2.4.2. Activación

La activación de una regla es la deducción de la salida, posiblemente reducido por su fuerza de encendido. Las líneas en la tercera columna de la figura 9 indican la fuerza de encendido de cada regla. Sólo la parte sombreadas del singletons se activa, y el min. o producto (\*) se usa como operador de activación. No hay diferencia en este caso, después que las funciones de pertenencia de la salida sea singletons, pero en el caso general (función  $s$ ,  $\pi$  y  $z$ ) sustituyendo estas en la tercera columna de la figura 8, el operador producto conserva la forma inicial de la grafica de pertenencia, en lugar de recortar la figura como lo hace la función de activación min. Ambos métodos trabajan bien en general, aunque la multiplicación produce una señal de control ligeramente más uniforme. En Figura 8, sólo la reglas cuatro y cinco son activadas.

Una regla  $k$  puede ser el anterior peso por un factor de peso  $w_k \in [1,0]$  que este es el grado de seguridad. En este caso la fuerza de encendido se modifica a:

$$\alpha_k^* = w_k \cdot \alpha_k. \quad (34)$$

El grado de seguridad es determinado por el diseñador, o un programa de aprendizaje que intenta adaptar las reglas a alguna relación de entrada-salida.

### 3.2.4.3. Acumulación

Todos los resultados activados son acumulados, usando el operador **máx.**, como se puede observar en la parte inferior de la tercera columna (Fig. 8). Adicionalmente a esto, la acumulación **sum** cuenta las áreas que son traslapadas más de una vez (Figura 9), de la salida singleton (Figura 8) y la acumulación **sum** se obtiene la siguiente salida:

$$\alpha_1*s_1+\alpha_2*s_2+\dots+\alpha_n*s_n \quad (35)$$

Los alphas son las fuerzas de activación de las n reglas y los S1... Sn son la salidas singleton ser calculados como un vector producto, este tipo de inferencia es relativamente rápido en una matriz orientado al lenguaje.

### 3.2.5. Defuzzificación

El sistema difuso resultante (Figura 8, en la tercera columna en la parte inferior y en la figura 9, el extremo derecho) debe convertirse en un valor de salida que puede enviarse al proceso como una señal de control. Este procesamiento se llama defuzzificación. En la Figura 9 se observa en la coordenada X marcada por una línea blanca vertical la señal de salida de control. El sistema difuso resultante es así defuzzificado. Hay varios métodos del defuzzificación:

### 3.2.5.1. Centro de gravedad (COG):

El valor de salida **U** (línea blanca en Figura 9) es la abscisa bajo el centro de gravedad del sistema difuso,

$$u = \frac{\sum_i \mu(x_i)x_i}{\sum_i \mu(x_i)} \quad (36)$$

Aquí el  $x_i$  está un punto del universo discreto,  $\mu(x_i)$ , es su valor de pertenencia en la función de pertenencia. La expresión puede ser interpretada como el promedio de los pesos de los elementos en sistema. En el caso de valores continuos reemplace la integral por la sumatoria.

Este es un método muy utilizado aunque su complejidad computacional es relativamente alta. Este método también se llama centro de área.

### 3.2.5.2. Centro de gravedad para singlents (COGS):

Si la función de pertenencia de la salida es singlenton (Fig. 8), el valor de salida es:

$$u = \frac{\sum_i \mu(s_i)s_i}{\sum_i \mu(s_i)} \quad (37)$$

Aquí  $s_i$  es la posición de singlenton "i" en el universo,  $\mu(s_i)$ , es igual a la fuerza de encendido  $\alpha_i$  de regla "i." y  $u$  es diferenciable con respecto a la singlenton  $s_i$ . Este método tiene una complejidad computacional relativamente buena y es utilizado más en sistemas neuro-difuso.

### 3.2.5.3. Bisectriz de área (BOA):

Este método selecciona la abscisa de la línea vertical que divide el área bajo la curva en dos mitades iguales. En el caso continuo,

$$u = \left\{ \int_{\min}^x \mu(x) dx = \int_x^{\max} \mu(x) dx \right\} \quad (38)$$

Aquí  $x$  es el punto en el universo,  $\mu(x)$  es la función de pertenencia, *Min.* es el menor valor de la izquierda de la función, y *Máx.* es el mayor valor de la derecha. Este método tiene una complejidad computacional relativamente alta, y puede ser ambiguo. Por ejemplo, si el sistema difuso consiste en dos singlenton cualquier punto entre los dos habría dividido el área en dos mitades; por consiguiente este es mejor utilizarlo en funciones continua que en funciones discretas, por tal razón la BOA no se define para este tipo de funciones.

### 3.2.5.4. (MOM):

Puede suceder, no obstante, que varios puntos existentes se asemejen, en este caso la mejor elección es escoger el MOM, que consiste es seleccionar en una aproximación intuitiva el punto de mayor posibilidad, i.e. número de pertenencia máximo. Este método indiferente a la forma de la grafica del sistema difuso. La complejidad computacional es relativamente buena.

### 3.2.5.5. Máximo a la izquierda (LM) y máximo a la derecha (RM):

Otra posibilidad es elegir el máximo a la izquierda (LM), o el máximo a la derecha (RM). En el caso de un robot, por ejemplo, el debe elegir entre ir a la izquierda o derecha para eludir un obstáculo delante de él. El defuzzificador

debe entonces seleccionar uno u otro. Este método es indiferente a la forma de la grafica del sistema difuso. La complejidad computacional es relativamente pequeña.

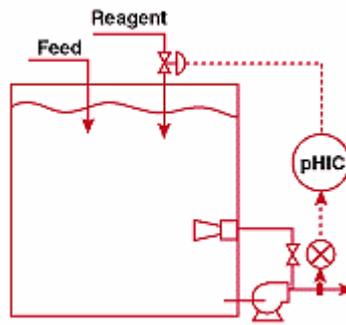
### **3.2.6. Post-procesamiento**

La escala de la salida es importante. En el caso de que la salida esta definida en un intervalo normalizado esta debe representarse en unidades de ingeniería, por ejemplo, voltios, metros, o toneladas por hora. La función de este bloque es convertir por ejemplo la escala normalizada  $[-1,1]$  a las unidades físicas  $[-10,10]$  voltios.

El bloque del post-procesamiento contiene una ganancia de salida que puede ser sintonizada, y a veces también contiene un integrador.

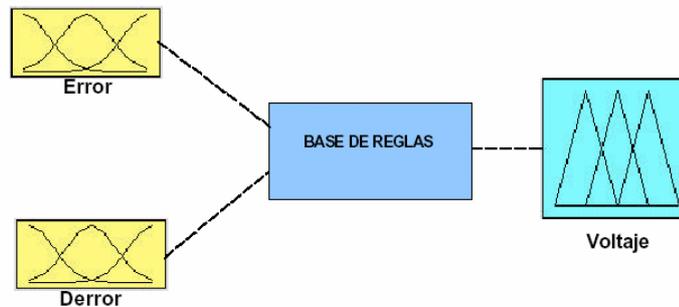
### **3.2.7. Ejemplo De Un Controlador Difuso**

Se desea diseñar un controlador difuso de pH para mantener la medida de este a un valor de 7 pH. La figura muestra una pileta que tiene la función almacenar el producto que se desea controlar, en dicha pileta consta de dos entradas de tuberías estos son: la alimentación (feed) o producto que se desea controlar el pH y la del reactivo (reagent) el cual es manipulado por una válvula de control cuyo rango de entrada es de 4 – 20 mA, en la figura 10 observamos que el controlador se encuentra el la salida de la bomba de recirculación.



**Figura 10. Aplicación de un controlador de pH.**

Diseño del controlador difuso

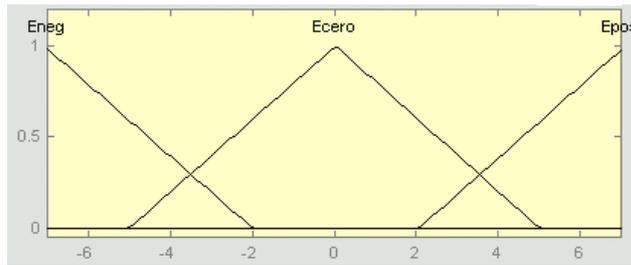


**Figura 11. Controlador difuso.**

Se podrían definir según las funciones de pertenencia cuya grafica y expresión analítica se muestran a continuación:

Para el **error**:

Se selecciona el universo del discurso del error entre  $[-7 \ 7]$  debido a que el  $\pm 7$  es el máximo error que se puede obtener en el proceso, se toma como función la triangular para mayor facilidad en los cálculos.



**Figura 12. Error**

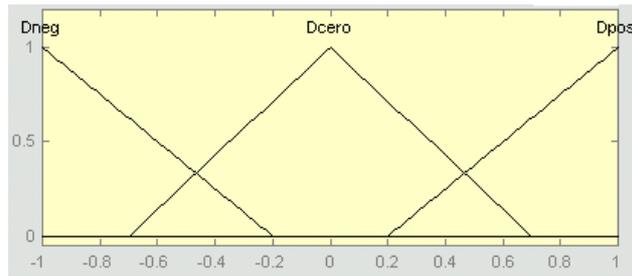
$$E_{neg}(E) = \begin{cases} 1 & \text{si } X < -7 \\ -\frac{(X+2)}{5} & \text{si } -7 \leq X \leq -2 \\ 0 & \text{si } X > -2 \end{cases}$$

$$E_{zero}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq -5 \\ \frac{(X+5)}{5} & \text{si } -5 < X \leq 0 \\ \frac{(5-X)}{5} & \text{si } 0 < X \leq 5 \\ 0 & \text{si } X > 5 \end{cases}$$

$$E_{pos}(E) = \begin{cases} 0 & \text{si } X < 2 \\ \frac{(X-2)}{5} & \text{si } 2 \leq X \leq 7 \\ 1 & \text{si } X > 7 \end{cases}$$

Para la **derivada del error**:

Se selecciona el universo del discurso de la derivada del error entre [-1 1] debido a que la velocidad de cambio del error es +/- 1 pH/minutos, es decir el cambio de 1 pH de la medida del proceso con la válvula totalmente abierta y en la zona de neutralidad la cual es mas sensible se realiza en 1 minuto.



**Figura 13. Derivada del error**

$$Dneg(De) = \begin{cases} 1 & \text{si } X < -1 \\ -\frac{(X+0.2)}{0.8} & \text{si } -1 \leq X \leq -0.2 \\ 0 & \text{si } X > -0.2 \end{cases}$$

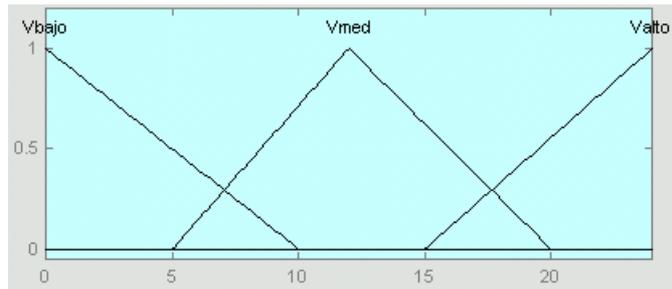
$$Dcero(De) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq -0.7 \\ \frac{(X+0.7)}{0.7} & \text{si } -0.7 < X \leq 0 \\ -\frac{(X-0.7)}{0.7} & \text{si } 0 < X \leq 0.7 \\ 0 & \text{si } X > 0.7 \end{cases}$$

$$Dpos(De) = \begin{cases} 0 & \text{si } X < 0.2 \\ \frac{(X-0.2)}{0.8} & \text{si } 0.2 \leq X \leq 1 \\ 1 & \text{si } X > 1 \end{cases}$$

Para voltaje de salida:

El universo del discurso del voltaje de salida del controlador es de [0 24] debido a que la válvula tiene un rango de entrada de 4 -20 mA.

El universo de la salida de la válvula no se selecciono de 4 a 20 debido a que en los conjuntos difusos los valores extremos nunca se podrían dar en la salida ya que se usa para la desfuzzificación el método del centro de gravedad y por tal motivo nunca se obtendría la válvula totalmente cerrada (4mA) o totalmente abierta (20mA)



**Figura 14. Voltaje de salida**

$$Vbajo(V) = \begin{cases} 1 & \text{si } X < 0 \\ -\frac{(X-10)}{10} & \text{si } 0 \leq X \leq 10 \\ 0 & \text{si } X > 10 \end{cases}$$

$$Vmed(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } X \leq 5 \\ \frac{(X-5)}{7} & \text{si } 5 < X \leq 12 \\ -\frac{(X-20)}{8} & \text{si } 12 < X \leq 20 \\ 0 & \text{si } X > 20 \end{cases}$$

$$Valto(V) = \begin{cases} 0 & \text{si } X < 20 \\ \frac{(X-15)}{9} & \text{si } 20 \leq X \leq 24 \\ 1 & \text{si } X > 24 \end{cases}$$

Se considera la siguiente base de reglas

Derivada de error				
Error		Dneg	Dcero	Dpositivo
	Eneg	Valto	Vmed	Vmed
	Ecero	Vmed	Vbajo	Vbajo
	Epos	Vmed	Vbajo	Vbajo

**Tabla 5. Base de regla del controlador**

Los valores que el sistema determina para las variables de entradas son los siguientes:

$$\text{Error} = -3$$

$$\text{Derror} = 0.3$$

La solución sería

Paso 1. Fuzzificación. Si se aplican las funciones de pertenencia de las figuras anteriores se obtiene:

$$E_{neg}(E) = -\frac{(X+2)}{5} = -\frac{(-3+2)}{5} = 0.2$$

$$E_{cero}(E) = \frac{(X+5)}{5} = \frac{(-3+5)}{5} = 0.4$$

$$D_{cero}(De) = -\frac{(X-0.7)}{0.7} = -\frac{(0.3-0.7)}{0.7} = 0.57$$

$$D_{pos}(De) = \frac{(X-0.2)}{0.8} = \frac{(0.3-0.2)}{0.8} = 0.125$$

Paso 2. Cálculo de los valores de activación.

Para cada regla se elige el menor de los valores obtenidos por las funciones de pertenencia para los elementos de su antecedente y se obtiene la siguiente tabla:

Derivada de error				
Error		Dneg	Dcero	Dpositivo
	Eneg	0	min (0.2 y 0.57)=0.2	min (0.2 y 0.125) = 0.125
	Ecero	0	min (0.4 y 0.57)=0.4	min (0.4 y 0.125) = 0.125
	Epos	0	0	0

**Tabla 6. Cálculo de los valores de activación.**

### Paso 3. Disparo de reglas

$$V_{med} = 0.2$$

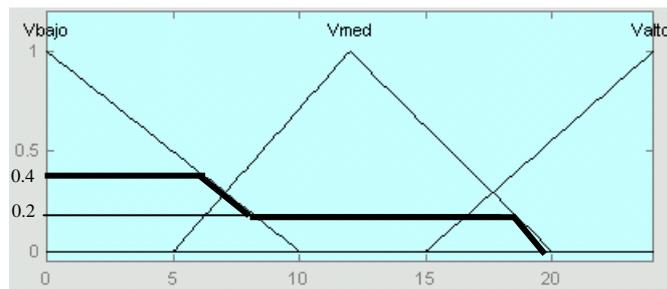
$$V_{med} = 0.125$$

$$V_{bajo} = 0.4$$

$$V_{bajo} = 0.125$$

Como se está utilizando como t-norma el mínimo, utilizamos como t-conorma el máximo y el resultado es el máximo de la aplicación.

Por tanto, se dispara las dos y se da como resultado el supremo como se muestra en la figura 15.



**Figura 15. Efecto de disparo de todas las reglas**

La expresión analítica de la función resultado es la siguiente:

$$\mu_{(C)}(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x < 0 \\ 0.4 & \text{si } 0 \leq x < 6 \\ -\frac{(x-10)}{10} & \text{si } 6 \leq x < 8 \\ 0.2 & \text{si } 8 \leq x < 18.4 \\ -\frac{(x-20)}{8} & \text{si } 18.4 \leq x \leq 20 \\ 0 & \text{si } x > 20 \end{cases}$$

Donde x es el valor numérico nítido de la acción de control C.

Paso 4. **Defuzzificación.**

Para el cálculo de la salida del controlador hallamos el centro de gravedad:

$$X_G = \frac{\int_{DOM(X)} x \cdot f(x) dx}{\int_{DOM(X)} f(x) dx}$$

Según la expresión analítica anterior, se tiene que realizar los siguientes cálculos para obtener el valor nítido (valor de abscisa) del centro de gravedad de la región rodeada por la función de pertenencia. Si se llama respectivamente R1, R2, R3, R4, R5, R6 y R7 a las siete regiones distintas en las que se divide el plano en la definición de la función de pertenencia tendremos los siguientes cálculos:

$$\begin{aligned} \int_{DOM(X)} x \cdot f(x) dx &= \int_{X < 0} 0 + \int_0^6 0.4 \cdot x dx + \int_6^8 -\frac{(x-10)}{10} \cdot x dx + \int_8^{18.4} 0.2 \cdot x dx + \int_{18.4}^{20} -\frac{(x-20)}{8} \cdot x dx + \int_{x > 20} 0 \\ &= 0 + 7.2 + 4.13 + 27.45 + 3.06 + 0 = 41.84 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \int_{DOM(X)} f(x) dx &= \int_{X < 0} 0 + \int_0^6 0.4 dx + \int_6^8 -\frac{(x-10)}{10} dx + \int_8^{18.4} 0.2 dx + \int_{18.4}^{20} -\frac{(x-20)}{8} dx + \int_{x > 20} 0 \\ &= 0 + 2.4 + 0.6 + 2.08 + 0.16 = 5.24 \end{aligned}$$

Donde el centro de gravedad o salida del controlador es  $X_G = \frac{41.84}{5.24} = 7.9$

#### 4. MODELAMIENTO DIFUSO DE LA PLANTA DE NEUTRALIZACION DE pH.

Los primeros sistemas basados en reglas difusas se basaban en la información suministrada por experto; sin embargo, para el caso de sistemas complejos como el de la neutralización de pH, las reglas así construidas no permitían una simulación aceptable del sistema. En la búsqueda de sistemas difusos que aproximen de manera aceptable la dinámica sistemas complejos ha conllevado al desarrollo de investigación en técnicas de extracción de reglas difusas a partir de datos de entrada y salida, es decir al desarrollo de técnicas de identificación difusa. Entre los autores que han aportado a este tipo de técnicas tenemos: Wang y Mendel 1992, Sugeno y Yasukawa 1993, Nauck y Kruse 1995, Espinosa y Vandewalle 2000, Antonio salas 1998, entre otros.

El método principal que han empleado estos investigadores son llamadas técnicas neuro-difusas, que es simplemente la combinación de las redes neuronal con la lógica difusa, estos son algoritmos de agrupamiento para obtener un modelo matemático a partir de unos datos de entrada y salida.

Las técnicas que han tenidos mayores éxito convergen en unos métodos de *clustering* llamadas *fuzzy-clustering* o de agrupamiento difuso, estas técnicas permiten aproximar una función mediante un sistema basado en reglas borrosa, por decir uno puede aproximar una ecuación sencilla  $x = y$  por un conjunto de reglas, es decir. Si  $x$  es bajo entonces  $y$  es bajo, si  $x$  es medio entonces  $y$  es medio y si  $x$  es alto entonces  $y$  es alto, donde  $x$  se evalúan en un conjunto difuso y se evalúan las reglas mediante un mecanismo de inferencia, no es eficiente modelar sistema que tenga una función de transferencia tan sencilla como es  $x = y$ , pero para procesos que tiene una dinámica mas compleja no lineal sí resulta eficientes en comparación con las reglas de modelación no lineales que existen.

Los algoritmos desarrollados por los investigadores son probados en problemas clásico llamado *benkmarch classic* (los mas usados son los de *Box-jenkins*, *Gas Furnace* y Serie de *Mackey-Glass*), donde los resultados obtenidos sirven como referencia para medir la eficiencia y eficacia del método utilizado, Las prueban que se tiene en cuenta para medir los parámetros antes mencionados son: error cuadrático medio (u otra medida de error), el número de parámetros a sintonizar y la interpretabilidad.

La metodología empleada en este trabajo para la obtención del modelo difuso de la planta de neutralización de pH esta basado en el método de error de inferencia de Antonio Salas de su tesis doctoral (1998) llamado error de inferencia. Juan Contreras retomó la técnica (2005) y, luego de realizar algunas modificaciones, desarrolló un algoritmo nuevo con el cual ha obtenido mejor resultado que los planteados anteriormente, tanto en precisión como en interpretabilidad.

Las técnicas neuro-difusas tienen problema de interpretabilidad ya que, en la mayoría de los casos de aproximación, en el resultado final se solapan hasta tres conjunto al mismo tiempo, es decir, pierde la filosofía de la lógica difusa la cual se basa en el razonamiento humano. Por ejemplo, no es interpretable que un dato de temperatura tenga pertenencia en tres conjuntos al mismo tiempo, como: caliente, tibia y fría, lo cual no compagina con la realidad o con la interpretación humana. En este algoritmos se garantizan que los conjuntos que se van a utilizar van a ser triangular y partición suma 1, que la suma de los grados de partencia en cualquier punto va a ser igual a 1, por lo que se garantiza interpretabilidad.

#### **4.1. ERROR DE INFERENCIA**

En lógica borrosa es común tratar con reglas del tipo “Si  $u$  es  $A$ , entonces  $y$  es  $B$ ”, donde  $u$  y  $y$  representan dos variables numéricas, y  $A \subset U$  y  $B \subset Y$ , son

dos conjuntos difusos de entrada y salida respectivamente, definidos en los universos U y Y. La regla mencionada es equivalente a la inecuación

$$\mu_A(u) \leq \mu_B(y) \quad (39)$$

La inecuación  $\mu_A(u) \leq \mu_B(y)$  para probar el equivalente recordemos la tabla de verdad que  $\mu_A(u) \Rightarrow \mu_B(y)$  y lo comparamos  $\mu_A(u) \leq \mu_B(y)$ , Para la inecuación  $\mu_A(u) \Rightarrow \mu_B(y)$  tenemos que la implicación solamente es falsa cuando el antecedente es verdadero y el consecuente es falso.

A	B	$\mu_A(u) \Rightarrow \mu_B(y)$	$\mu_A(u) \leq \mu_B(y)$
0	0	1	1
0	1	1	1
1	0	0	0
1	1	1	1

**Tabla 7. Tabla de verdad**

El algoritmos basado en error de inferencia trabaja de una manera muy elemental, si el error de inferencia es cero solamente cuando el grado de pertenecía en A o en el antecedente es menor o igual al grado de pertenencia del consecuente, al ser menor tengo un infinito número de valores, lo que se hace es igualar los grados de pertenencia garantizando que el error de inferencia sea igual a cero.

El error de inferencia  $\varepsilon$ , es concebido como la distancia conceptual al conjunto conclusión de la regla, está dado por:

$$\varepsilon \approx \begin{cases} 0 & \dots \dots \dots \mu_A(u) \leq \mu_B(y) \\ \mu_A(u) - \mu_B(y) & \dots \dots \dots \mu_A(u) > \mu_B(y) \end{cases} \quad (40)$$

El conjunto conclusión de la regla está definido por

$$C(u) = \{y^* \in Y | u_B(y^*) \geq u_A(u)\} \quad (41)$$

La distancia conceptual de un  $y \in Y$  al conjunto conclusión está dada por

$$d_{u_B}(y, C(u)) = \min_{y^* \in C(u)} |u_B(y) - u_B(y^*)| \quad (42)$$

Para una base de reglas  $N$ , todas con antecedentes conjuntos difusos definidos en un universo  $U$  y consecuentes conjuntos difusos definidos en un universo  $Y$ , la función de error de inferencia global está dada por

$$\epsilon(u, y) = \left( \sum_{i=1}^N \phi_i(u, y) \epsilon_i(u, y)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (43)$$

Al conjunto  $C^*(u) \subseteq Y$  que minimiza el error de inferencia global (5) se le denomina conjunto conclusión de la inferencia ideal.

El método propuesto para crear un sistema difuso basado en reglas que se aproxime a una función de una entrada una salida, con un error de inferencia nulo, como se menciono anteriormente debe cumplir con la condición

$$u_A(x) = u_B(y) \quad (44)$$

En el caso de una regla del tipo “Si  $u$  es  $A$ , entonces  $y$  es  $B$ ”. Si el sistema tiene  $n$  entrada se debe representar por una regla del tipo “Si  $u_1$  es  $A_1$ ,  $u_2$  es  $A_2$ , ...,  $u_N$  es  $A_n$ , entonces  $y$  es  $B$ ”, por lo cual el sistema generado deberá cumplir con la condición.

$$((u_{A_1}(x_k) \wedge u_{A_2}(x_k) \wedge \dots \wedge u_{A_n}(x_k))) = u_B(y) \quad (45)$$

Donde  $\wedge$  representa una t-norma de la lógica borrosa.

## 4.2. DETECCIÓN DE CLASES

El número de clases o agrupamientos posibles de los datos experimentales de entrada salida determina el número de reglas de sistema difuso. Para obtener el número de clases posibles en los datos se propone un nuevo algoritmo basado en la extensión cilíndrica de los valores modales de los conjuntos del antecedente (o conjunción de los valores modales de los conjuntos de los antecedentes) en el espacio de datos de salida. Los datos resultantes de la proyección estarán todos sobre la recta  $z = 1$ , lo que facilita la detección de las clases mediante un algoritmo de agrupamiento jerárquico. El algoritmo requiere previamente: un conjunto de datos experimentales de entrada salida  $\{u_k, y_k\}$ , una partición inicial suma 1 de la(s) variable(s) de entrada mediante  $n$  conjuntos triangulares normales distribuidos uniformemente sobre el espacio de entrada (definido por el vector de datos experimentales de entrada).

### Algoritmo 1. Detección de agrupamientos

Dado una colección de datos experimentales  $\{u_k, y_k\} U \times V; k = 1, \dots, N_p$

- (a) Crear una partición triangular suma 1 del antecedente  $A \subset U$  en el rango establecido por los valores mínimo y máximo de los datos de entrada, con un número  $n$  de conjuntos difusos
- (b) Determinar las posiciones en el arreglo de datos de entrada para el cual los valores de pertenencia son iguales a 1 (valores modales)
- (c) Crear una tabla de datos  $(y_j, 1)$ , donde  $j$  corresponde a una posición del vector de entrada tal que  $u_A(x_j) = 1$
- (d) Determinar las clases o grupos existentes en los datos (cluster jerárquico)
- (e) Incrementar el número de conjuntos  $n$  de la(s) variable(s) de entrada y volver al punto (a) Seguir incrementando hasta que las clases determinadas no varíen con el incremento de  $n$ .

El algoritmo entrega el número  $m$  de clases que será igual el número de reglas necesarias para aproximar la función

### 4.3. GENERACIÓN DE REGLAS

El número clases detectadas representan el número de reglas que debe tener el sistema difuso. Se puede presentar casos, para sistemas de más de una entrada, en que el número de clases es inferior al número de posibles combinaciones de los conjuntos de las entradas, lo cual indica que existirán combinaciones que producen el mismo conjunto conclusión. Por lo tanto, las reglas con igual consecuente se deben resumir en una sola regla mediante la disyunción de las conjunciones de sus antecedentes.

**Algoritmo 2. Generación de reglas Dada  $m$  clases y el rango de los universos de entrada y salida.**

(a) Hallar el número  $n$  de conjuntos para cada una de las  $q$  variables de entrada aproximándolo al valor superior más cercano en caso de que el valor resultante sea un fraccionario

$$n = \sqrt[q]{m} \quad (46)$$

(b) Si el número posible de reglas  $q^n$  es igual a  $m$  entonces conformar las reglas según las clases a las que quede asignada cada combinación de entrada (ir a algoritmo 1). En caso de que el número posible de reglas sea superior a  $m$  indicaría que al menos dos reglas tienen la misma conclusión por lo que se deben resumir en una regla cuyo antecedente sea la disyunción de los antecedentes de las reglas en cuestión. Este caso no se presenta en el caso de sistemas de una sola entrada una sola salida

#### 4.4. GENERACIÓN DE LA PARTICIÓN DE ANTECEDENTE

El algoritmo anterior nos permite hallar el número de conjuntos de cada variable de entrada pero no la distribución ni las funciones de pertenencia. El algoritmo propuesto realiza una extensión de los conjuntos de la variable de entrada en el universo de salida, asignando el grado de pertenencia de cada elemento  $x_k$  a su respectiva imagen  $y_k$ . Las funciones de pertenencia discreta definitivas de los conjuntos difusos de entrada y la distribución en el universo de entrada se generan haciendo una redistribución de los intervalos de evaluación considerados para las funciones discretas triangulares inicialmente supuestas de acuerdo a los intervalos de los datos de salida. Esto, en principio, limita el algoritmo a funciones biyectivas; sin embargo, se puede emplear en caso de funciones no biyectivas dividiendo el problema en modelos locales.

##### **Algoritmo 3. Generación y distribución de funciones de pertenencia**

Dado el número  $n$  de conjuntos por variables y los rangos de los universos de entrada y salida de los datos experimentales

(a) Crear una partición triangular suma 1 del antecedente  $A \subset U$  en el rango establecido por los valores mínimo y máximo de los datos de entrada, con un número  $n$  de conjuntos difusos (valor  $n$  obtenido en el algoritmo 2). Cada conjunto se define mediante un arreglo del tamaño del vector de datos experimentales de entrada  $u_{A_i}(x_k)$

(b) Proyectar los conjuntos de entrada en el universo de salida mediante la ecuación (6)

$$u_B(y_k) = u_{A_i}(x_k) \quad (47)$$

Creando una tabla de datos  $(y_k, u_B(y_k))$

(c) Determinar el conjunto de singletons de salida de los valores  $y_k$  con grado de pertenencia asociado de 1. Estas serán las ubicaciones de los singletons de salida.

$$y_m = \{y_k | u_B(y_k) = 1\} \quad (48)$$

(d) Redistribuir los intervalos de evaluación de acuerdo a los intervalos en que están distribuidos los datos de salida, estableciendo previamente los valores mínimo ( $y_{\min}$ ) y máximo ( $y_{\max}$ ) de la variable de salida

$$x_k = \frac{(y_k - y_{\min})}{(y_{\max} - y_{\min})} \quad (49)$$

(e) Asignar a cada valor de entrada  $x_k$  el correspondiente grado de pertenencia de  $y_k$ ; o sea

$$u_{A_i}(x_k) = u_B(y_k) \quad (50)$$

Creando una tabla de datos  $(x_k, u_{A_i}(y_k))$  para cada uno de los conjuntos de cada variable de entrada

La partición generada para el antecedente es suma 1 aunque muy posiblemente no sea triangular.

#### 4.5. MÉTODO DE INFERENCIA

Métodos de inferencia como el del centro de gravedad no son apropiados para aproximación funcional, como se puede apreciar si se trata de aproximar una función tan sencilla como la recta  $y = x$ . Por lo tanto se tomará la inferencia propuesta por Sala [13].

$$y^*(u) = \frac{\sum_{k=1}^n u_k^i(u) y_m(i)}{\sum_{k=1}^n u_k^i(u)} \quad (51)$$

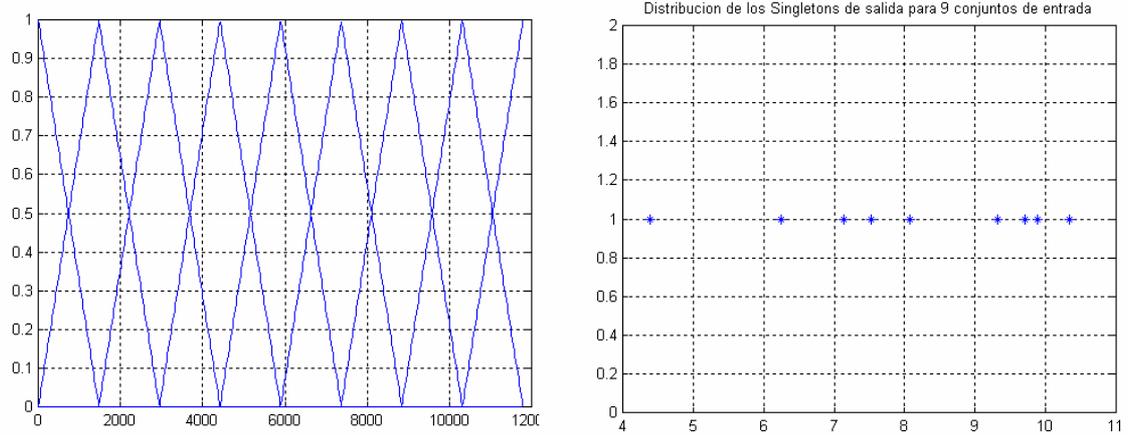
donde  $u_{ik}^i(u)$  es el grado de pertenencia del dato de entrada en el antecedente  $i$  (en el caso de sistemas con más de una entrada corresponderá a la conjunción de las entradas),  $y_m(i)$  es el valor del singleton correspondiente a la salida  $i$ . El denominador siempre arroja un valor igual a 1 cuando se trata particiones suma 1, el cual es el caso del método de aproximación propuesto.

#### 4.6. RESULTADOS

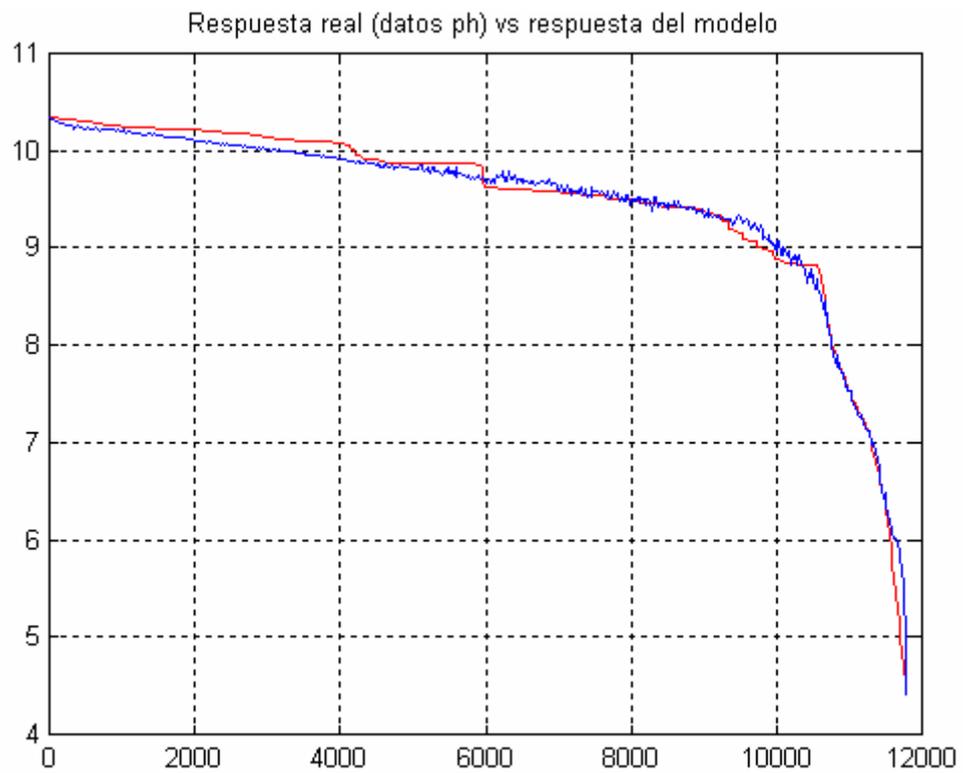
Los resultados obtenidos por esta técnica fueron satisfactorios, debido a que el modelo es interpretable y tiene un error cuadrático medio pequeño. El programa de modelamiento empleado en Matlab se presenta en el anexo A.

El proceso de modelación empleando técnicas de identificación borrosa presentó inconvenientes en la toma de datos, por lo que se limitó a los datos tomados en un proceso normal de operación, en la cual la inyección se hace a flujo constante y nivel constante.

Al aplicar las técnicas de identificación borrosa fue posible obtener un modelo aproximado con un error medio cuadrático (mse) de 0.015. La figura 16 muestra los conjuntos difusos de las variables de entrada y los conjuntos singleton de la variable de salida.



**La figura 16. Muestra los conjuntos difusos de las variables de entrada y los conjuntos singleton de la variable de salida.**



**La figura 17. Muestra la comparación entre la curva del modelo y la curva real.**

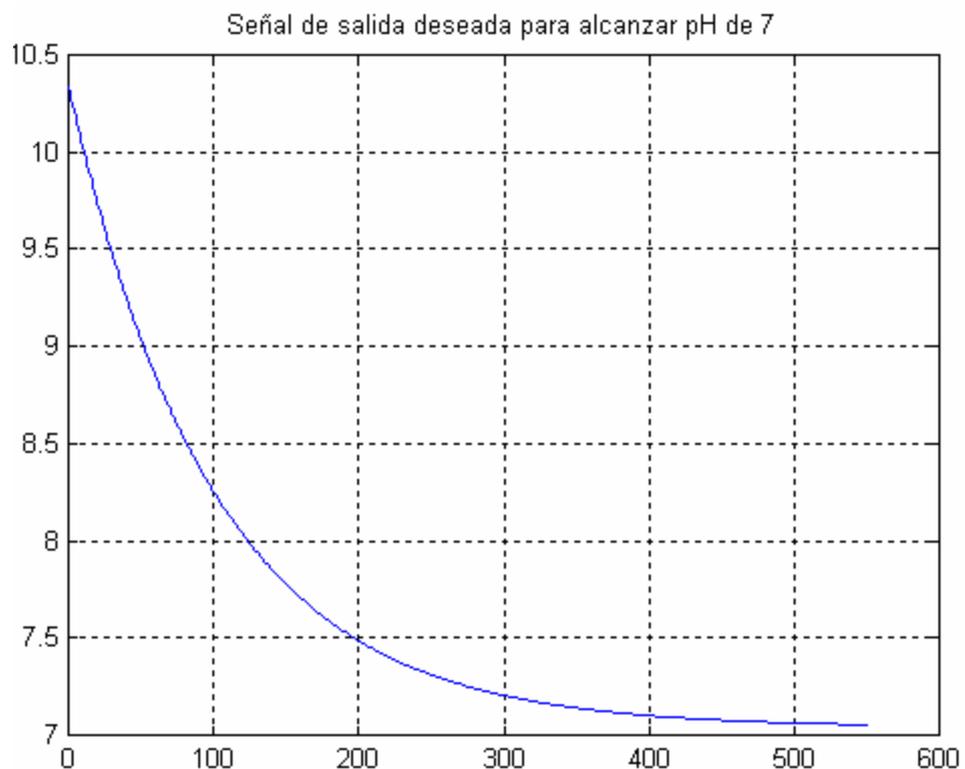
La base de reglas del modelo difuso está dada por:

Regla N°	DESCRIPCIÓN
1	Si x es A1, entonces y es 10.34
2	Si x es A2, entonces y es 9.88
3	Si x es A3, entonces y es 9.71
4	Si x es A4, entonces y es 9.32
5	Si x es A5, entonces y es 8.08
6	Si x es A6, entonces y es 7.53
7	Si x es A7, entonces y es 7.13
8	Si x es A8, entonces y es 6.25
9	Si x es A9, entonces y es 4.39

**Tabla 8. Base de Reglas del modelamiento del controlador difuso.**

## 5. DISEÑO DEL CONTROLADOR DIFUSO

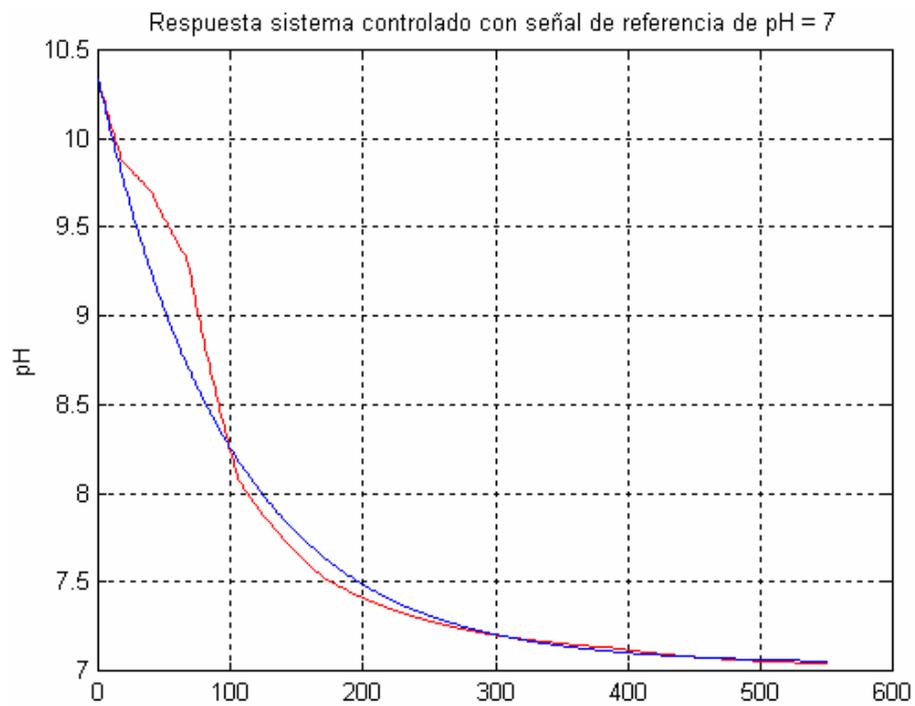
Para diseñar el control difuso se acudió a la estrategia basada en el modelo inverso, con el fin de determinar la señal de entrada que debía aplicarse al modelo difuso para obtener una salida previamente estipulada, tanto en valor final como en tiempo de respuesta. La señal de salida deseada fue diseñada como una exponencial decreciente de manera tal que estuviera acorde con los tiempos apreciados en los procesos reales y que alcanzara, partiendo de un valor de pH de 10.34, el valor de pH neutro o pH 7. Esta señal es mostrada en la figura 18 y se aplicó al modelo difuso de manera inversa arrojando la señal de entrada mostrada en la figura 19, con lo cual se obtiene una salida muy similar a la deseada, como se observa en la figura 20.



**Figura 18. Respuesta deseada del sistema.**



**Figura 19. Señal de entrada del sistema para alcanzar pH de 7.**



**Figura 20. Señal de salida del sistema controlado para alcanzar pH de 7.**

En vista de las limitaciones existentes en la planta para instalar el control difuso, especialmente por la falta de recursos para adquirir las electro-válvulas proporcionales necesaria, se procedió a implementar un control ON/OFF para lo cual ha sido muy valiosa la información suministrada por el modelo difuso y el control difuso ya que ha permitido definir los tiempos de operación (ON y OFF) para alcanzar la respuesta deseada.

## 6. SELECCIÓN DE LA INSTRUMENTACIÓN.

Debido a las condiciones económicas por la que atraviesa la empresa TERMOCARTAGENA S.A E.S.P, la instrumentación requerida para la puesta en marcha e implementación del controlador difuso ideal no pudo ser adquirida, por tal motivo para la puesta en marcha del proceso se utilizó la instrumentación que anteriormente se venia usando, la estrategia de control que se usa en este proyecto es la especificada en el capítulo anterior es decir ya conocido el modelo de la planta y la salida que se desea obtener, se calcula la señal de entrada.

Los equipos que se encontraban averiados fueron reemplazados por otro de la misma característica y a los otros se le realizó mantenimiento.

A continuación se describe cada uno de elementos que intervienen en el proceso:

- Bomba de recirculación y descarga.

La bomba que se instaló es fabricada por Metro Corporation – Fibroc Division, esta tiene una capacidad de 50 M<sup>3</sup> / Hora (220 GPM) a una velocidad de 3500 RPM, el materia es de Vinil Ester – reforzado con fibra de vidrio, Optimo para ambientes corrosivos y donde se trabajan con soluciones ácidas y básicas.

Los datos técnicos de la bomba de succión se observan con mas detalles en el anexo B.

- Bomba de dosificación de ácido y soda.

Las bombas dosificadoras de ácido y soda son fabricadas por BLUE WHITE INDUSTRIES, Están diseñadas bajo especificación del producto a utilizar, estas bombas manejan una precisión de +/- 2% y trabajan a una presión de 80 PSIG.

Los datos característicos se pueden observar con mas detalles en el anexo C.

- Electro válvula de recirculación.

La válvula son fabricadas por ASAHIAVALVE, Estas se divide en dos partes: el cuerpo de la válvula y un actuador eléctrico. El cuerpo de la válvula utilizada es tipo Bola en PVC de 4", temperatura máx. 120°F y una presión de 150 Lbs, material del sello EPDM seleccionada de acuerdo a las especificaciones del producto. Por otra parte el actuador tiene un motor eléctrico de 1/8 HP a 110 V y dos interruptores finales de carrera, estos tiene la finalidad de girar la bola a 90° hacia delante y atrás para abrir o cerrar la válvula según se requiera. Esta se encuentra en la línea de recirculación y los datos técnicos se observan con mas detalles en el anexo D.

- Electro válvula de descarga.

Las especificaciones de esta válvula son las misma de la válvula de recirculación, se encuentra en la línea de descarga a la bahía y los detalles de esta se observan en el anexo D.

- Presóstato.

Es un interruptor de presión que contiene un contacto normalmente abierto que se activa a una presión pre-ajustada (25PSI) con un rango de 10 – 50 PSI.

- Válvula solenoide agua de sello.

El cuerpo de la válvula es de material PVC, la válvula tiene un diámetro de ½",El actuador esta compuesto por una solenoide con alimentación de 110 V AC. Esta válvula se utiliza para suministrarle agua filtrada al sello mecánico de la bomba con el objetivo de mantenerlo sin ninguna traza de ácido o soda.

- Sensor de nivel.

El sensor de nivel es marca CGU modelo LC-1020A, tiene un voltaje de alimentación de 110/220 V AC, el sensor de nivel es tipo electrodos el cual tiene 4 electrodos (tres activos y una tierra), este tipo de sensor limita que la estrategia de control sea mas optima debido a que es un sensor ON/OFF. Para una estrategia de control mas eficiente se recomienda un sensor de nivel continuo como es el caso del ultra sonido o radar ya que son los indicados porque no tiene contacto directo con las soluciones que actúan en el proceso. Se recomienda utilizar el *Rosemount 5600 Series Radar Level Transmitter*, los datos técnicos se observan con mayor detalle en el anexo E.

- pH-metro.

El pH-metro utilizado es marca GEORGE FISHER +GF+, modelo SIGNET, serie 9030 INTELEK – PRO con una alimentación de 120 VAC a 60 Hz, el cual esta compuesto por: Electrodo de pH, tipo plano, 3-2714, y el preamplificador el cual tiene una alimentación de 10 VDC y genera una señal de –414 mV (pH=0) y +414 mV (pH=14). Este es compensado por temperatura. Los datos técnicos se observan en el anexo F.

Debido a que la señal de mV que tiene el sensor se recomienda utilizar un sensor con salida de 4 – 20 mA, debido a que esta señal es estándar y los niveles de ruido son menores que una señal de milivoltios entre los recomendados encontramos el analizador de pH marca YOKOGAWA, 4 hilos, 110-220V AC con señal de salida de 4-20mA, autodiagnóstico, 4 contactos de salida, contacto integral con PT 100 (2- 12 pH) –5 a 105 grados centígrados, sensor de ¾" NPT .

- Válvula manual de recirculación.

La válvula es fabricada por American Valve AV, el cuerpo de la válvula utilizada es tipo diafragma de material PVC y tiene una volante que mueve un vástago acoplado a el diafragma para abrir o cerrar la válvula, seleccionada de acuerdo a las especificaciones del producto. Esta se encuentra en la línea de recirculación.

- Válvula manual de descarga.

Esta válvula tienen las mismas características de la válvula de recirculación.

- Válvula manual de corte de agua filtrada.

La válvula es de 1" de diámetro, tipo bola, PVC, esta es utilizada para el suministro de agua filtrada al sistema de la bomba de recirculación y descarga.

- Válvula reguladora de flujo de agua de sello.

La válvula es de ½" de diámetro, Tipo bola, PVC, esta es utilizada para regular el flujo de agua por el sello.

- Válvula de toma de muestra.

La válvula es de ½" de diámetro, tipo bola, PVC, esta se utiliza para tomar muestras del agua de la pileta, para el análisis en laboratorio.

- Válvula manual de ácido.

Válvula es de ½" de diámetro, tipo bola, PVC, esta se utiliza para permitir el flujo de ácido hacia la tubería de recirculación y descarga.

- Válvulas manuales de soda.

Válvula es de ½" de diámetro, tipo bola, P.V.C, esta se utiliza para permitir el flujo de soda hacia la tubería de recirculación y descarga.

- Válvula manual de corte de descarga de la bomba.

Válvula de 2" de diámetro, tipo bola, P.V.C, esta es utilizada para cebado de la bomba, esta ubicada en línea de descarga de la bomba principal.

- Válvula manual de cebado de la tubería de succión.

Válvula de 1" de diámetro, tipo bola, P.V.C., Esta es utilizada para suministrar el agua para cebado de la tubería de succión de la bomba principal con el fin que esta no succione aire y se pueda dañar.

- Válvula manual de llenado del tanque de ácido.

Válvula de ½" de diámetro, tipo bola, en P.V.C., esta se encuentra en la línea de llenado del tanque de consumo de ácido y se utiliza para llenar el tanque de ácido cuando el nivel de este se encuentre bajo.

- Válvula de llenado de tanque de soda.

Válvula de ½" de diámetro, tipo bola, en P.V.C., esta se encuentra en la línea de llenado del tanque de consumo de soda y se utiliza para llenar el tanque de soda cuando el nivel de este se encuentre bajo.

- Manómetro indicador de presión suministro de agua filtrada.

Manómetro de presión. Rango de 0 – 100 PSI, tamaño de la carátula 2”, conexión de ¼” por debajo en P.V.C. Se utiliza para indicación local de la presión del suministro de agua filtrada al sistema. Para mayor optimización de la planta se recomienda un transmisor electrónico de presión con el mismo rango de medida que el indicador de presión.

- Manómetro indicador de presión agua de sello.

Manómetro de presión. Rango de 0 – 60 PSI, tamaño de la carátula 2.5”, conexión de ¼” por debajo en P.V.C. Se utiliza para indicación local de la presión de agua en el sello mecánico de la bomba. Para mayor optimización de la planta se recomienda un transmisor electrónico de presión con el mismo rango de medida que el indicador de presión.

## 7. DISEÑO DEL HARDWARE DE INTERFASE ENTRE EL PC Y LA PLANTA

La tarjeta se utiliza como interfase entre el mundo real y la maquina (computador), ya que todo el proceso de control lo realiza el software implementado en el PC, el PC le envía la orden correspondiente a la tarjeta para activar o desactivar el dispositivo que corresponda dicha orden y este a su vez le envía la realimentación.

En la figura 20 se observa el diagrama de bloques de la interfase y de acuerdo a estos los módulos que la componen son los siguientes:

- Procesamiento de datos.
- Etapa de acondicionamiento de la señal de pH.
- Entrada análoga del sensor de pH (-414mV a 414mV).
- Entradas digitales.
- Salidas digitales.
- Puerto de comunicación serial RS232 y RS485
- Fuente de voltaje.
- Interfase de visualización del valor de pH.

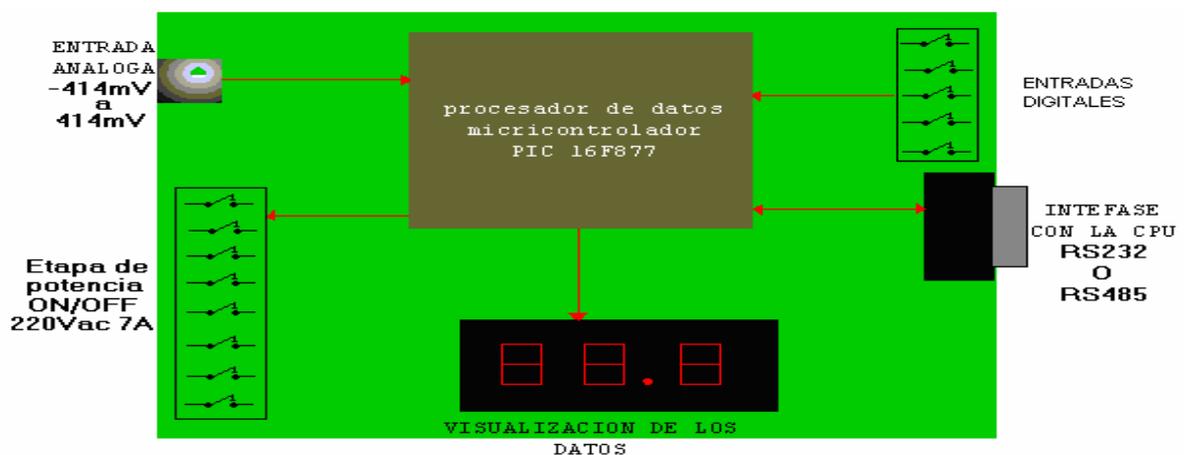


Figura 21. Diagrama de bloque de la tarjeta de adquisición y control

A continuación describiremos detalladamente cada uno de los bloques ya definidos

### 7.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

El cerebro de la tarjeta de interfase entre el PC y la planta es el microcontrolador, de acuerdo a los requerimientos de diseño (números de entradas y salidas tanto análogas como digitales, conversor análogo a digital, puerto de comunicación RS-232, etc.) encontramos que en el mercado existe un microcontrolador capaz de brindarnos las características necesarias para el diseño y ejecución del proyecto, dicho microcontrolador es de referencia PIC 16F877, cuya hoja de características la encontramos en el anexo G.

Un **microcontrolador** es un circuito integrado que contiene toda la estructura (arquitectura) de un microcomputador, o sea CPU, RAM, ROM, circuitos de entrada y salida. En la figura 21 se observa un diagrama general del microcontrolador.

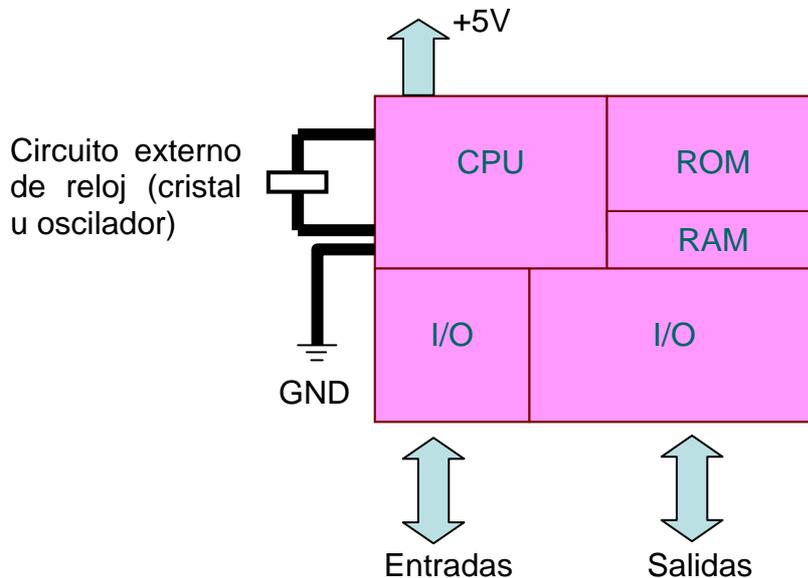


Figura 22. Diagrama general de un microcontrolador

El microcontrolador esta encargado de:

- Conversión analógica a digital con el propósito de convertir la señal que envía el sensor de pH en una señal digital.
- La visualización del valor del pH correspondiente a los datos leídos por el conversor.
- La comunicación entre la tarjeta y el PC es a través del puerto serial RS232 o RS485.
- La activación de las salida ON - OFF basado en relay, los cuales se activan dependiendo de una orden que le envié el sistema de control implementado en software del PC o la orden que envié un usuario.
- Reaccionar a las ordenes de entrada digitales ON – OFF realimentada por los dispositivos de la planta.

#### **7.1.1. Características generales del microcontrolador PIC 16f877**

El PIC16F877 es miembros de la familia PIC16F8X, la cual se deriva a su vez de la familia PIC16C8X. Son microcontroladores CMOS de 8 bits de bajo costo y alto desempeño.

Emplean una avanzada arquitectura RISC y se caracterizan por su pila de 8 niveles y las múltiples fuentes de interrupciones con las que cuenta. Las características más sobresalientes de estos microcontroladores se destacan a continuación:

- Operan desde DC hasta 20 MHz.
- Solo 35 instrucciones.
- Todas las instrucciones se ejecutan en un ciclo de reloj, excepto las de saltos que son de dos ciclos.
- El PIC16F877 cuenta con 8K de memoria de programa.
- 368 bytes de memoria RAM.

- 256 bytes de memoria EEPROM.
- Palabra de instrucción de 14 bits de ancho.
- Pila de ocho niveles.
- Circuito de vigilancia (Watchdog) para recuperación por fallas de programa.
- Modo de operación para ahorro de potencia "sleep".
- Gran cantidad de pines de entrada/salida direccionables y controlables individualmente.
- Maneja corrientes considerables (hasta 25 mA por pin en modos sumideros y fuentes).
- Capacidad de protección de código.
- Diversos periféricos.
- Direccionamientos en modos directo, indirecto y relativo para datos e instrucciones.
- Alta inmunidad al ruido.

### 7.1.2. Diagrama de pines

El microcontrolador PIC16F877 es un chip que, como puede apreciarse en la figura 23, dispone de 40 pines. Este microcontrolador tiene consumo de potencia bajo y es completamente estático; el reloj puede detenerse y los datos de memoria no se pierden. Seguidamente se describirán cada uno de los pines.

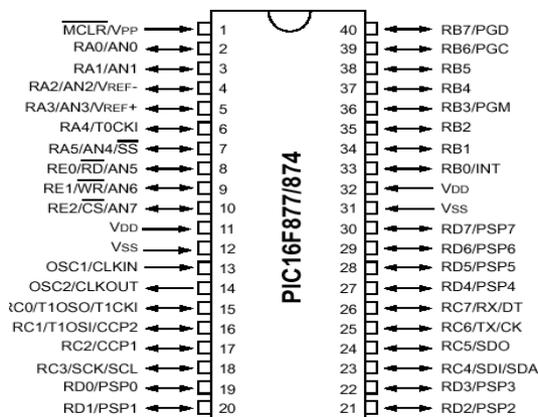


Figura 23. Diagrama de pines del PIC16F874

- **VDD:** (pines 11 y 32) son los pines de alimentación. Está comprendida entre 2V y 5.5V.
- **VSS:** (pines 12 y 31) son los pines de tierra o referencia.
- **OSC1/CLKIN y OSC2/CLKOUT:** (pines 13 y 14) son los pines de la entrada de cristal/ fuente externa de reloj y salida de oscilador a cristal respectivamente. Los microcontroladores PIC, permiten cuatro tipos de osciladores externos para aplicarles la frecuencia de funcionamiento.
- **MLCR /Vpp: (pin 1)** Entrada de **Reset** si está a nivel bajo y entrada de la tensión de programación cuando se está programando el dispositivo.
- **RA0-RA5/:** (Pines 2, 3, 4, 5, 6 y 7 respectivamente) Corresponden a cinco líneas bidireccionales de E/S del puerto A (PORTA). Es capaz de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación aplicada en VDD es de  $5V \pm 5\%$ . El pin RA4/TOCKI, si se programa como salida es de colector abierto. Como entrada puede programarse en funcionamiento normal o como entrada del contador/temporizador TMR0. Los pines del puerto A también sirven como entradas análogas para el conversor análogo – digital.
- **RB0-RB7:** (Pines 33 a 40) Corresponden a ocho líneas bidireccionales de E/S del puerto B (PORTB). Es capaz de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación aplicada en VDD es de  $5V \pm 5\%$ . RB0 puede programarse además como entrada de interrupciones externas INT. Los pines RB4 a RB7 pueden programarse para responder a interrupciones por cambio de estado. Las patillas RB6 y RB7 corresponden con las líneas de entrada de reloj y entrada de datos respectivamente, cuando está en modo programación.
- **RC0 - RC7:** (Pines 15, 16, 17, 18, 23, 24, 25 y 26 respectivamente) Corresponden a ocho líneas bidireccionales de E/S del puerto C (PORTC). Es capaz de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación aplicada en VDD es de  $5V \pm 5\%$ . Estos pines pueden cumplir funciones adicionales, tales como salidas de PWM, recepción y transmisión serial, puerto I<sup>2</sup>C, etc.

- **RD0 - RD7:** (Pines 19, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30 respectivamente) Corresponden a ocho líneas bidireccionales de E/S del puerto D (PORTD). Es capaz de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación aplicada en VDD es de  $5V \pm 5\%$ . Adicionalmente, este puerto puede programarse como puerto paralelo esclavo, con el fin de trabajar con dispositivos periféricos que utilicen interfaz paralela.
- **RE0 - RE2:** (Pines 8 al 10) Corresponden a tres líneas bidireccionales de E/S del puerto E (PORTC). Es capaz de entregar niveles TTL cuando la tensión de alimentación aplicada en VDD es de  $5V \pm 5\%$ . También se pueden programar como entradas análogas para el conversor análogo - digital.

### 7.1.3. Arquitectura del PIC16F877

El PIC 16F877 al igual que los demás miembros de su familia, se caracterizan porque:

- Su procesador es segmentado, "pipe-line".
- Su procesador es tipo RISC
- Tiene una arquitectura HARVARD
- El formato de las instrucciones es ortogonal
- Todas las instrucciones tienen la misma longitud (14 bits)
- La arquitectura está basada en banco de registros

## 7.2. ETAPA DE ACONDICIONAMIENTO DE LA SEÑAL

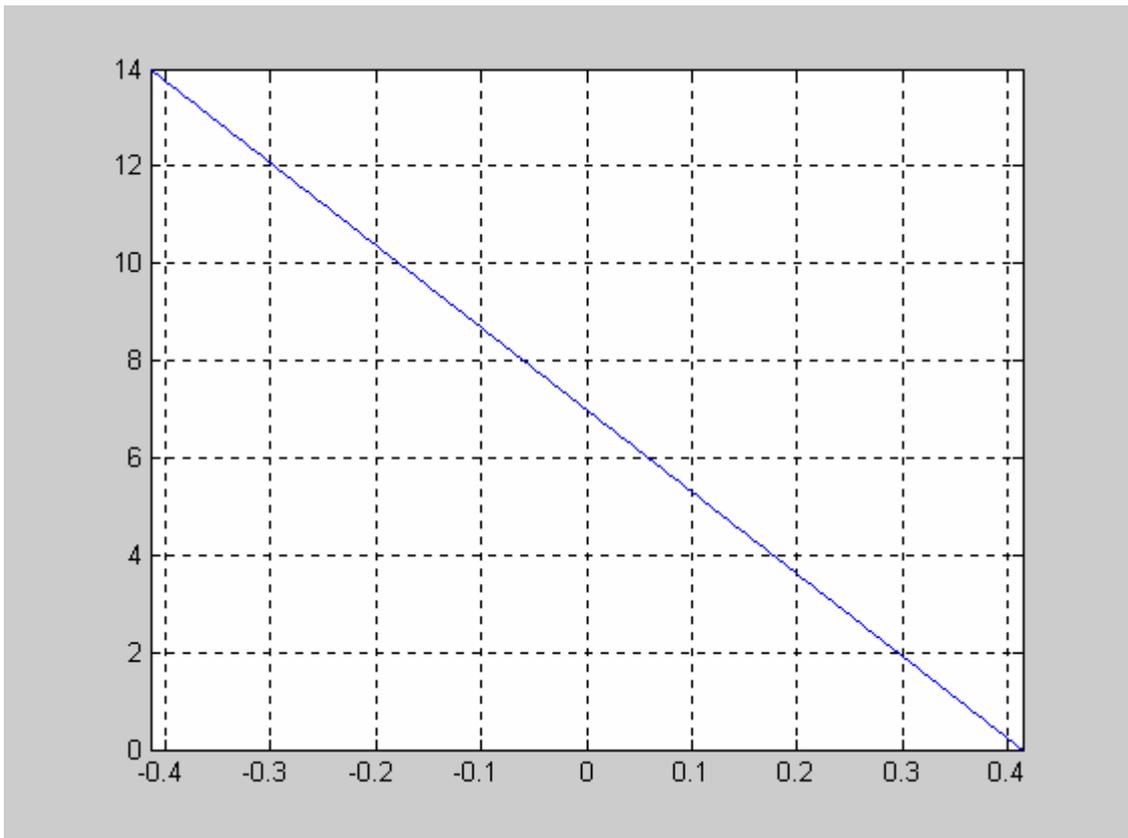
Para la medición del pH utilizaremos un dispositivo diseñado con transmisor interno el cual tiene un comportamiento casi lineal. La grafica se observa en la hoja característica del fabricante en el capítulo de anexos, uno de estos datos se muestran a continuación

pH	Voltaje (mV)
0	414
7	9
14	-414

**Tabla 9. Valores límites entregados por el sensor de pH.**

Con la ayuda del software de matemática Laboratorio Matrices (Matlab) se grafica la curva que muestra el comportamiento del sensor. Por medio del siguiente algoritmo.

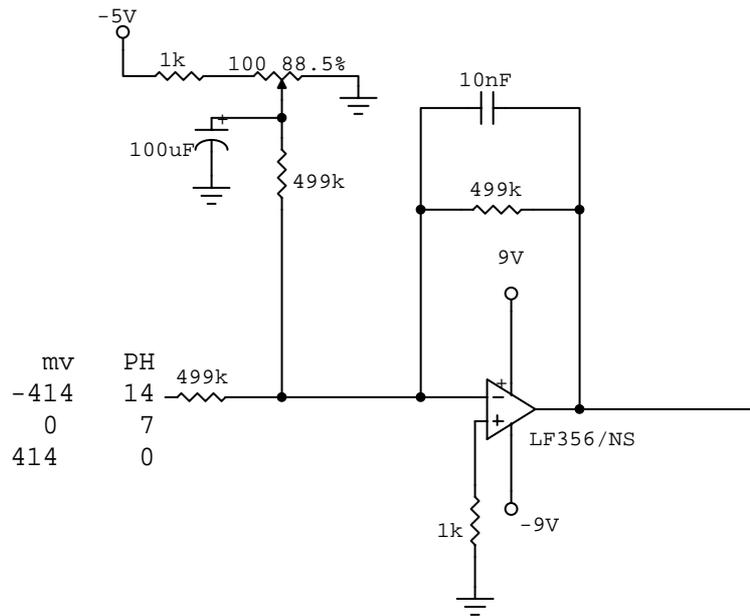
```
X2=-0.414;  
y2=14  
x1=0.414;  
y1=0  
m=(y2-y1)/(x2-x1);  
b=7;  
x=x2:0.001:x1;  
y=m*x+b  
plot(x,y)  
grid on  
axis([-0.414 0.414 0 14])
```



**Figura 24. Curva de comportamiento de la sensor de pH, para un rango entre 0 pH Y 14 pH.**

### 7.2.1. Calculo del sumador

Como se observa la salida del sensor maneja voltajes negativos y el conversor solo acepta voltajes que van de cero voltios mínimo a 5 voltios máximo. Por tal razón es necesario primero que todo corregir este valor sumándole un voltaje de  $-0.414V$  al la señal entregada por el sensor, además de esto se debe invertir la señal ya que se asume que para el valor máximo de PH se debe obtener en la salida el valor máximo de Voltaje, el circuito encargado de estas operaciones es el siguiente:



**Figura 25. Circuito Sumador Inversor de ganancia 1.**

Como se mencionó anteriormente este circuito solo es un sumador inversor, no realiza ninguna operación de amplificación, el dispositivo dispone de resistencias que deben ser de precisión para asegurar que las entradas no estén descompensadas y la operación de suma sea correcta, además deben ser de un valor alto para que la impedancia que vea el sensor de PH sea alta y no exista ninguna caída de voltaje por desacoplamiento, El operacional que se utilizó es de instrumentación contiene dos Amplificadores en su encapsulado de 8 pines, tiene compensación interna y una alta ganancia de entrada, la referencia de este dispositivo es LF353, la hoja característica se puede ver en el anexo H.

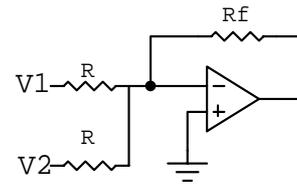
La salida de este circuito nos entrega una señal que va de 0 a 0.824 V, esta señal es la que se debe amplificar para llevarla al conversor análogo a digital. Esto se puede demostrar matemáticamente ya que este circuito cumple con las definiciones teóricas del inversor obteniendo que:

$$A_V = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{R_f}{R} \quad (52)$$

$$V_{IN} = V_1 + V_2 \quad R_f = R = 499k\Omega \quad (53)$$

$$V_{OUT} = V_{IN} \frac{R_f}{R} = (V_1 + V_2) \frac{R}{R} = \quad (54)$$

$$V_{OUT} = V_1 + V_2 \quad (55)$$



### 7.2.2. Calculo del Amplificador

El convertor análogo del PIC es de 10 Bit, esto nos indica que el valor máximo decimal que entrega el convertor es de 1023 cuando en la entrada del convertor es de 5V y el mínimo valor es 1 cuando en la entrada del convertor hay :

$$V_{IN\ BAJO} = \frac{5}{1023} = 0,004887V \quad (56)$$

Este es el voltaje mínimo que ve el convertor. Se utiliza la resolución máxima del convertor para aprovechar lograr la máxima precisión posible.

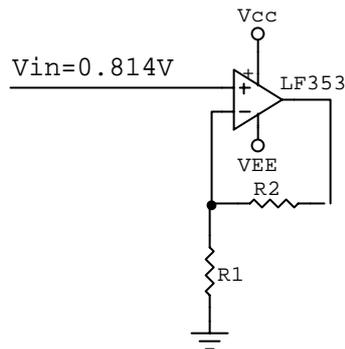
Como el máximo valor decimal que entrega el convertor es de 1023 y la lectura máxima que debe leer el sensor es (14 PH), lo que se hace es tomar la medida máxima 1023 y multiplicar la por 1,37 obteniendo un nuevo valor máximo de 1401 y lo dividimos entre 100 obteniendo el valor máximo del PH 14.01 todo este proceso se realiza por software, por tanto la nueva resolución del convertor será de 0.0137 esta es el mínimo valor que puede arrojar el convertor. Se prosigue a calcular el amplificador de la señal del sensor por medio de los siguientes parámetros.

Voltaje máximo en la entrada del convertor=5V

Voltaje máximo en la entrada del amplificador = 0.828V

$$A_v = \frac{V_{Salida}}{V_{Entrada}} = \frac{5V}{0.828V} = 6,038 \quad (57)$$

Para obtener esta ganancia se implementa un amplificador no inversor como el que se muestra en la figura 26.



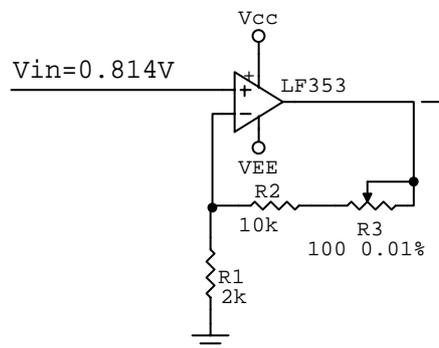
**Figura 26. Prototipo del amplificador de la señal del Sensor de PH**

Asumiendo que  $R_1 = 2k\Omega$  tenemos que :

$$A_v = \frac{R_2}{R_1} + 1 \quad (58)$$

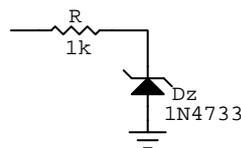
$$R_2 = (A_v - 1)R_1 = (6.038 - 1)2k = 10077,29468\Omega$$

$R_2$  se construirá a partir de una resistencia física de 10K de precisión y una resistencia variable 100 Ohm. Para lograr el valor deseado. El circuito completo se muestra en la figura 6.



**Figura 27. Diagrama esquemático del circuito amplificador**

La señal que entrega el circuito de la figura 5 en teoría va de 0 a 5 (Vdc), pero puede existir la posibilidad que suministre mas o menos de este valor, por tal razón se colocara un circuito regulador en la salida que nos asegure que el voltaje que llegue del conversor sea de  $-0.7(V)$  a  $5(V)$ , se utilizara un zener como elemento regulador y una resistencia como elemento limitador de corriente como se muestra en la figura 28.



**Figura 28. Circuito regulador.**

Asumimos el valor del zener es de  $5.1V$  y el de la resistencia es de  $1k\Omega$  por tanto el valor máximo que puede suministrar el Amplificador es de:

$$I_R = I_{DZT} = \frac{V_{OUT OP} - V_{IN CAD}}{R}$$

$$V_{OUT OP} = R \times I_{DZT} + V_{IN CAD} = 1k\Omega \times 20mA + 5V$$

$$V_{OUT OP} = 25V \quad (59)$$

$$P_R = \frac{(V_{OUT OP} - V_{IN CAD})^2}{R} = \frac{(20V)^2}{1K\Omega} = 0,4W \text{ se toma de } 1/2W$$

$$P_{DZ} = V_{DZ} I_{DZ MAX} = 5.1 \times 30mA = 0,153 \text{ se toma de } 1/2W$$

Las entradas digitales también utilizan este sistema de protección

El voltaje con que se deben alimentar los operacionales se calcula mediante la siguiente expresión.

$$V_{Sal} = V_{alimentacion}^+ - 2 \quad (60)$$

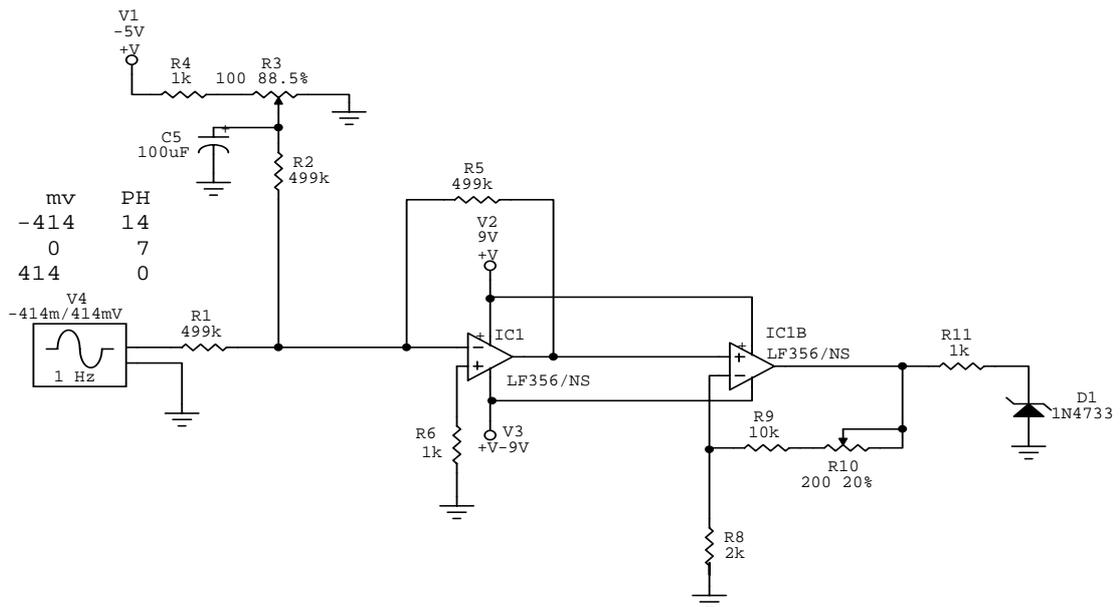
Como el voltaje en la salida máximo debe ser de 5 voltios tenemos que el

voltaje de alimentación será:

$$V_{a\text{alimentacion}}^+ = V_{Sal} + 2V = 5V + 2V = 7 \quad (61)$$

Se decide alimentar el operacional con un voltaje de  $\pm 9$  voltios que lo obtendremos de dos regulador integrado los cuales a su vez se alimentarán con un voltaje de  $\pm 12$  (V), para asegurar que el voltaje que suministren los reguladores se de 9 (V) por si ocurre una variación del voltaje la red eléctrica domestica. .

El circuito de acople del sensor al conversor análogo a digital se muestra a continuación:



**Figura 29. Diagrama esquemático del circuito de acople entre el sensor y el conversor Análogo a Digital**

### 7.3. ENTRADA ANALOGA DEL SENSOR DE pH.

El módulo conversor análogo-digital incorporado en el PIC16F877 tiene 8 canales de entrada multiplexados con resolución de 10 bits. El número de entradas se puede definir por software por medio de los bits apropiados en el registro de control del conversor, así como el canal a convertir. Este módulo funciona por medio del principio de aproximaciones sucesivas. El diagrama de bloques del conversor se muestra en la figura 29.

La entrada análoga carga un condensador, el cual muestrea la señal de entrada y mantiene su carga. La salida del condensador de muestreo y retención es la entrada para el conversor. Con esta carga el conversor genera un resultado digital de 10 bits correspondiente al valor análogo. El módulo A/D puede utilizar como voltaje de referencia para la conversión el voltaje  $V_{DD}$  de la fuente o bien usar como referencias los voltajes aplicados en los pines RA2 y RA3 (voltajes alto y bajo). Además, este conversor ofrece la particularidad de operar mientras el dispositivo se encuentra en modo SLEEP. Para que pueda operar en modo SLEEP se debe seleccionar como reloj de la conversión el oscilador interno RC.

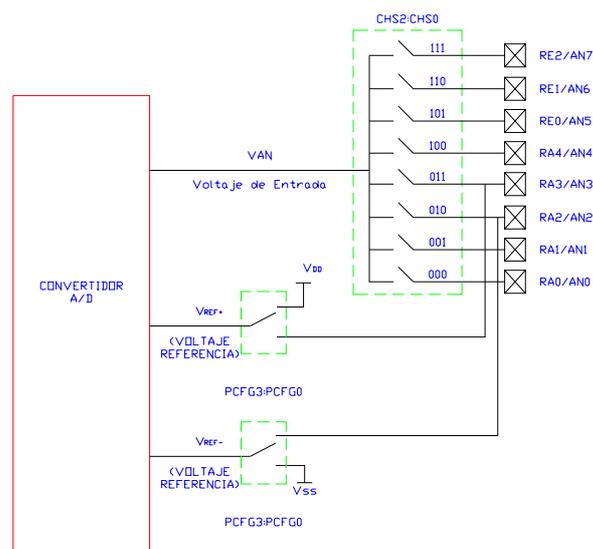


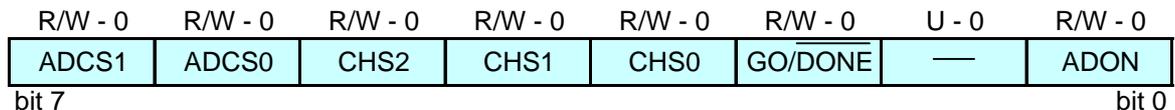
Figura 30. Diagrama de bloques del conversor análogo-digital

El módulo conversor A/D tiene cuatro registros:

- ADRESH: Almacena la parte alta del resultado de conversión de 10 bits.
- ADRESL: Almacena la parte baja del resultado de conversión de 10 bits.
- ADCON0: Controla la operación del conversor A/D.
- ADCON1: Configura los pines de los puertos como I/O digitales o como entradas análogas.

### Registro ADCON0 (1Fh en RAM)

Este registro, mostrado en la figura 30, controla la operación del módulo A/D. Este registro permite configurar las funciones de los pines del puerto A y E, los cuales pueden funcionar como entradas análogas o como entradas/salidas digitales. A continuación se describen cada uno de sus bits:



**Figura 31. Registro INTCON.**

**Bits 7-6 ADCS1:ADCS0:** Bits de selección de reloj de conversión A/D.

00 = FOSC/2

01 = FOSC/8

10 = FOSC/32

11 = FRC (reloj derivado del módulo oscilador RC para el conversor A/D)

**Bits 5-3 CHS2:CHS0:** Bits de selección del canal análogo a convertir.

000 = canal 0, (RA0/AN0)

001 = canal 1, (RA1/AN1)

010 = canal 2, (RA2/AN2)

011 = canal 3, (RA3/AN3)

100 = canal 4, (RA5/AN4)

- 101 = canal 5, (RE0/AN5)
- 110 = canal 6, (RE1/AN6)
- 111 = canal 7, (RE2/AN7)

**Bit 2 GO/DONE:** Bit de estado de la conversión A/D

Si ADON = 1:

- 1 = Conversión A/D en progreso (activando este bit inicia la conversión A/D).
- 0 = No se está realizando conversión (este bit se borra automáticamente por hardware cuando la conversión A/D finaliza)

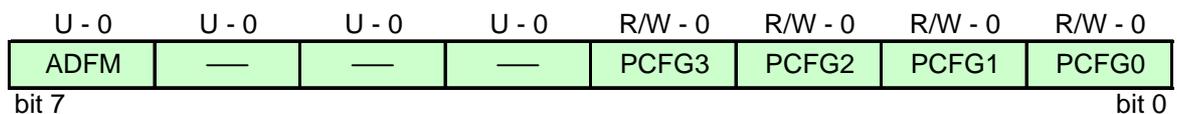
**Bit 1 Sin implementar:** Se lee como '0'

**Bit 0 ADON:** Bit de encendido del conversor A/D

- 1 = El módulo conversor A/D está en operación
- 0 = El módulo conversor A/D no está en operación.

**Registro ADCON1 (9Fh en RAM)**

Este registro, mostrado en la figura 31, permite configurar cada uno de los pines de los puertos A y E como canales análogos o como pines de E/S digital. También permite seleccionar el formato de entrega del resultado de conversión. A continuación se describen las funciones de cada uno de sus bits:



**Figura 32. Registro ADCON1.**

**Bit 7 ADFM:** Bit de selección del formato de resultado

- 1 = Justificado a la derecha. Los 6 bits más significativos de ADRESH se leen como '0'.
- 0 = Justificado a la izquierda. Los 6 bits menos significativos de ADRESL se leen como '0'.

**Bits 6 - 4 Sin implementar:** Leídos como '0'.

**Bits 3 - 0 PCFG3:PCFG0:** Bits de control de configuración de los canales análogos:

PCFG3: PCFG0	AN7 RE2	AN6 RE1	AN5 RE0	AN4 RA5	AN3 RA3	AN2 RA2	AN1 RA1	AN0 RA0	VREF+	VREF-	CAN/ Refs <sup>(1)</sup>
0	A	A	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	8/0
1	A	A	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	07-Ene
10	D	D	D	A	A	A	A	A	VDD	VSS	5/0
11	D	D	D	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	04-Ene
100	D	D	D	D	A	D	A	A	VDD	VSS	3/0
101	D	D	D	D	VREF+	D	A	A	RA3	VSS	02-Ene
011	D	D	D	D	D	D	D	D	VDD	VSS	0/0
1000	A	A	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	06-Feb
1001	D	D	A	A	A	A	A	A	VDD	VSS	6/0
1010	D	D	A	A	VREF+	A	A	A	RA3	VSS	05-Ene
1011	D	D	A	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	04-Feb
1100	D	D	D	A	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	03-Feb
1101	D	D	D	D	VREF+	VREF-	A	A	RA3	RA2	02-Feb
1110	D	D	D	D	D	D	D	A	VDD	VSS	1/0
1111	D	D	D	D	VREF+	VREF-	D	A	RA3	RA2	01-Feb

**TABLA 10. Configuración de canales de entradas análogos y digitales.**

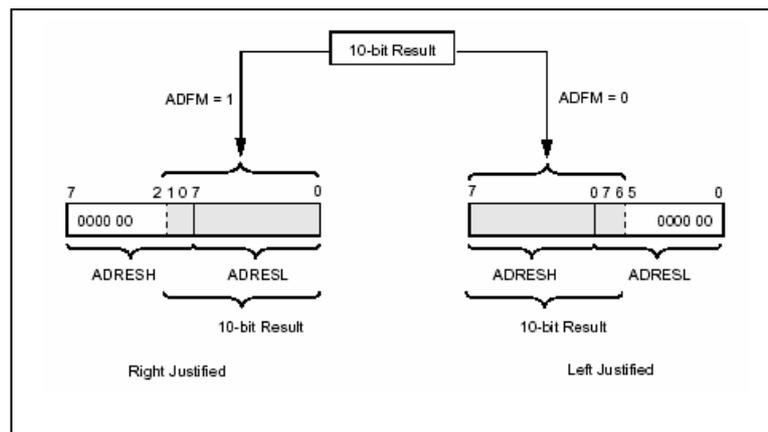
A = Entrada análoga D = E/S Digital

**Nota 1:** Esta columna indica el número de canales análogos disponibles y el número de canales análogos usados como entradas de voltaje de referencia.

#### **Registros de resultado ADRESH (1Eh) : ADRESL (9Eh)**

Esta pareja de registros almacenan el resultado de 10 bits de la conversión A/D. Cuando la conversión finaliza, el resultado se carga en este par de registros, el bit  $\overline{\text{GO/DONE}}$  del registro ADCON0 (bit 2) se borra y el bit bandera de interrupción A/D ADIF (bit 6 del registro PIR1) se activa. El módulo

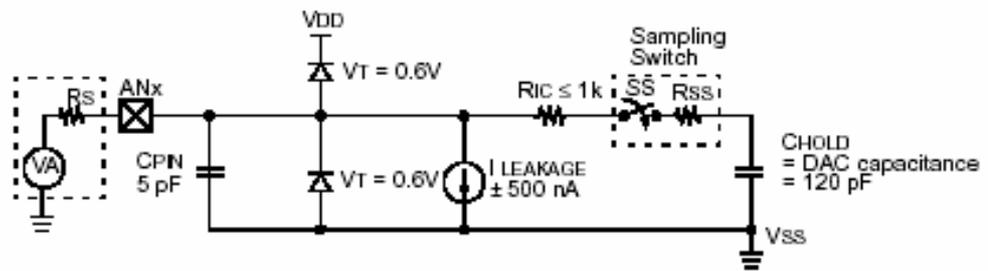
conversor brinda la flexibilidad de justificar a la izquierda o a la derecha el resultado de 10 bits dentro de los 16 bits del par de registros. El formato del resultado se selecciona con el bit de control ADFM del registro ADCON1 (bit 7). La figura 32 ilustra la operación de justificación del resultado de la conversión. Los bits adicionales se cargan con '0's. Mientras no se esté utilizando el conversor, estos registros se pueden usar como registros de propósito general.



**Figura 33. Justificación del resultado de la conversión**

### 7.3.1. Requisitos de la adquisición

Con el fin de asegurar la precisión especificada del conversor, se debe permitir que el condensador de carga en la entrada (CHOLD) cambie completamente su nivel de voltaje antes de realizar otra conversión. El circuito equivalente de la entrada se muestra en la figura 33. En este modelo se puede observar la señal análoga de entrada, representada por medio de una fuente VA y una resistencia interna  $R_S$ ; el pin RAX ó REX correspondiente al canal seleccionado para la conversión, un condensador de entrada  $C_{PIN}$  que funciona como el contenedor del voltaje análogo y el circuito equivalente de un transistor PNP que actúa como buffer. También se observan las corrientes de fuga (leakage) de la base del transistor, el interruptor de muestreo SS con su respectiva resistencia equivalente  $R_{SS}$ , y el condensador de retención.



**Figura 34. Modelo análogo de la entrada del conversor**

La impedancia de la fuente de entrada  $R_S$  y la del interruptor interno  $R_{SS}$  afectan directamente el tiempo requerido para la adquisición completa de la señal de entrada. La máxima impedancia recomendada para fuentes análogas es de  $10\text{ K}\Omega$ . A medida que la impedancia decrece, el tiempo de adquisición necesario también disminuye.

Después de seleccionar el canal análogo a convertir, la adquisición de la señal se debe realizar antes de que el proceso de conversión se inicie. Para calcular el mínimo tiempo de adquisición se debe utilizar la siguiente ecuación :

$$T_{ACQ} = (\text{Tiempo de actuación del transistor}) + (\text{Tiempo de carga del condensador de retención CHOLD}) + (\text{Coeficiente de temperatura})$$

Donde el tiempo de actuación del transistor es igual a  $2\mu\text{seg}$ , y el tiempo de carga del condensador de retención queda definido por la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} T_C &= \text{CHOLD} (R_{IC} + R_{SS} + R_S) \ln(1/2047) \\ &= -120\text{pF} (1\text{K}\Omega + 7\text{K}\Omega + 10\text{K}\Omega) \ln (0.0004885) \\ &= 16.47 \mu\text{s} \end{aligned}$$

Y el coeficiente de temperatura  $T_{COFF}$  se calcula de la siguiente forma:

$$T_{COFF} = [(\text{Temperatura de trabajo} - 25^\circ\text{C})(0.05\mu\text{s}/^\circ\text{C})]$$

Asumiendo una temperatura de trabajo de 50° C, el tiempo mínimo de adquisición es:

$$\begin{aligned}
 T_{ACQ} &= 2\mu\text{s} + 16.47\mu\text{s} + (50^{\circ}\text{C} - 25^{\circ}\text{C})(0.05\mu\text{s}/^{\circ}\text{C}) \\
 &= 19.72\mu\text{s}
 \end{aligned}$$

### Tiempo de conversión $T_{AD}$ y reloj de conversión

El tiempo de conversión por bit se define como  $T_{AD}$ . El proceso de conversión A/D requiere un tiempo mínimo de  $12T_{AD}$  para 10 bits de resultado. Este tiempo  $T_{AD}$  depende de la máxima frecuencia de operación del microcontrolador. El reloj de conversión se selecciona por software, y puede ser una de las posibles cuatro opciones siguientes:

- 2TOSC
- 8TOSC
- 32TOSC
- Oscilador RC interno para el módulo A/D (2-6  $\mu\text{s}$ )

Con el fin de realizar correctamente la conversión A/D, se debe seleccionar un reloj de conversión (con los bits ADCS1:ADCS0 del ADCON0) que asegure un mínimo tiempo  $T_{AD}$  de 1.6 $\mu\text{s}$ . A continuación se muestra la tabla que relaciona el reloj de conversión con la frecuencia de operación:

Reloj de conversión A/D ( $T_{AD}$ )		Frecuencia del dispositivo
Período de operación	ADCS1:ADCS0	Máxima frecuencia
2Tosc	0	1.25 MHz
8Tosc	1	5 MHz
32Tosc	10	20 MHz
RC <sup>1 2</sup>	11	<b>Nota 1</b>

**TABLA 11. Valores de configuración para el tiempo de conversión.**

**Nota 1:** El reloj RC tiene un típico  $T_{AD}$  de 4  $\mu$ s, pero puede variar entre 2 y 6  $\mu$ s.

**Nota 2:** Cuando la frecuencia de operación del dispositivo es mayor de 1MHz, no se recomienda usar el reloj RC, salvo para modo SLEEP.

### **7.3.2. Configuración de las entradas análogas**

Los registros ADCON1, TRISA y TRISE controlan la operación de los pines como entradas análogas. Si un pin se desea configurar como entrada análoga, se debe activar su correspondiente bit de configuración en el registro TRIS. Por ejemplo, si se desea usar el pin RA0 como canal análogo, se debe borrar el bit 0 del registro TRISA. De igual forma, por medio del registro ADCON1, con los bits PCFG3:PCFG0 se selecciona el funcionamiento de cada uno de los pines como E/S digital o como entradas análogas.

#### **7.3.2.1. Pasos para realizar una conversión**

Los siguientes son los pasos necesarios para realizar una conversión A/D:

##### **1. Configurar el módulo A/D:**

- Configurar los pines que se utilizarán como entradas análogas, referencias de voltaje y entrada/salida digital en el registro ADCON1.
- Seleccionar el canal de entrada para la conversión A/D en el ADCON0.
- Seleccionar el reloj de la conversión A/D en el ADCON0.
- Activar el módulo conversor A/D ADCON0.

##### **2. Configurar la interrupción A/D (si se desea):**

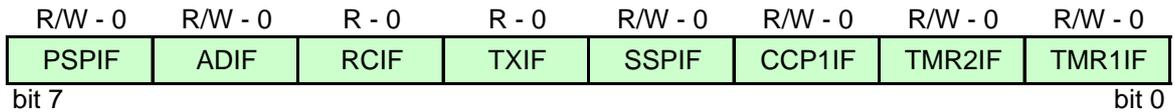
- Borrar el bit ADIF del registro PIR1.
- Activar el bit ADIE en el registro PIE1.
- Activar el bit PEIE en el registro INTCON.

- Activar el bit GIE en el registro INTCON.
3. Esperar el tiempo de adquisición requerido:
    - Iniciar la conversión:
    - Activar el bit  $\overline{\text{GO/DONE}}$  en el registro ADCON0
  4. Esperar la finalización de la conversión A/D, por medio de alguno de los siguientes métodos:
    - Escaneando el bit  $\overline{\text{GO/DONE}}$  hasta que pase a '0'.
    - O esperar por la interrupción A/D
  5. Leer el par de registros de resultado de conversión A/D ADRESH:ADRESL y borrar el bit ADIF si se requiere (para cuando se usa interrupción)
  6. Para la próxima conversión saltar a los pasos 1 o 2 según se requiera. Se debe esperar un mínimo de  $2T_{AD}$  antes de iniciar la próxima conversión.

#### 7.3.2.2. Interrupción del módulo A/D

El módulo A/D puede utilizarse con interrupciones. Si la interrupción del convertidor está habilitada, cada vez que finalice el proceso de conversión se generará. La interrupción del convertidor se configura por medio de los bits ADIF del registro PIR1 y ADIE del registro PIE1. A continuación se muestran esos registros:

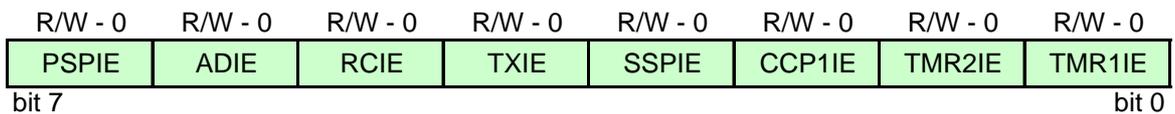
**a). Registro PIR1:** Posee los bits bandera de las interrupciones periféricas. Para el convertidor, solo interesa el bit ADIF (bit número 6).



**Figura 35. Registro PIR1.**

Cuando la conversión finaliza, el bit ADIF se activa, generando una interrupción por finalización del conversor. Una vez la interrupción es atendida, este bit de borrarse por software.

**b). Registro PIR2:** Posee los bits de habilitación de las interrupciones periféricas. Para el conversor, solo interesa el bit ADIE (bit número 6).

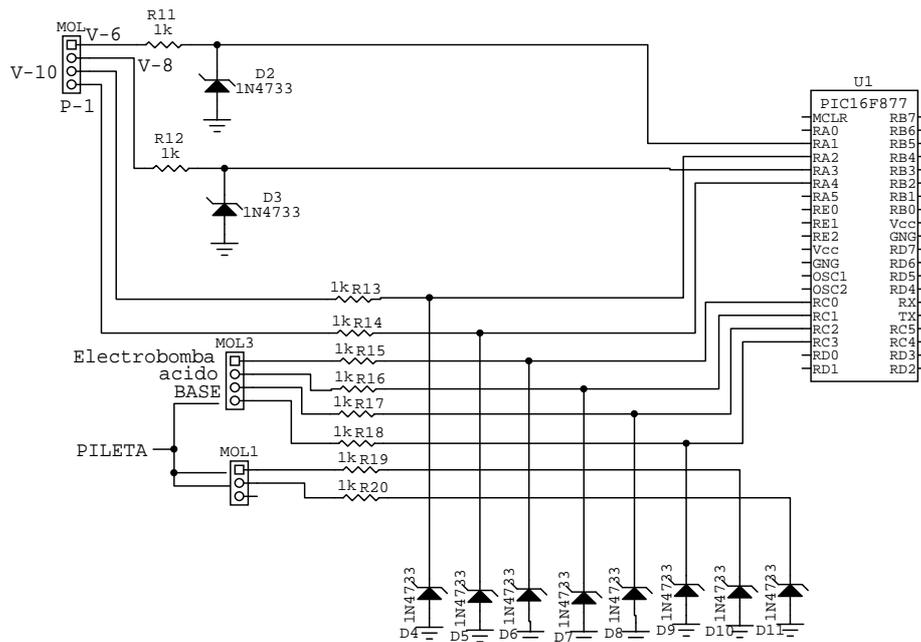


**Figura 36. Registro PIE1.**

Para habilitar la interrupción del conversor, se deben activar los bits PEIE y GIE del registro INTCON, y el bit ADIE del registro PIE1.

#### 7.4. ENTRADAS DIGITALES

La tarjeta dispone de 10 entradas digitales con voltaje TTL (0 y 5 Voltios), el propósito de estas entradas es permitir ver el estado de las Bombas, las válvulas, el presóstato y el nivel de la pileta. De esta forma tendremos una realimentación que nos indica si el dispositivo que hemos activado o desactivado recibió la orden de la tarjeta. El circuito nos indica las entradas digitales y al dispositivo que corresponden.



**Figura 37. Diagrama esquemático de conexión de las entradas digitales.**

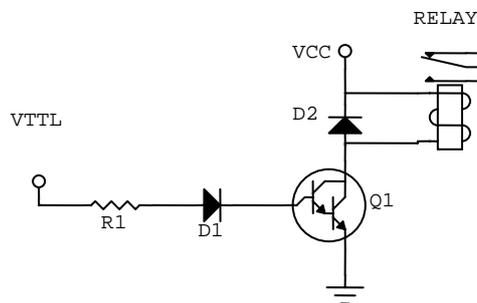
El diagrama de la figura 37. Indica las conexiones correspondientes a las diferentes entradas digitales, cada una de ellas posee un circuito de protección al cual se hizo referencia en la ecuación 5. En la tabla 12 se muestra la correspondencia entre la entrada digital y señales de realimentación que se quieren censar

Dispositivo	Puerto	Entrada
Válvula de recirculación	RA1	IN0
Válvula de descarga	RA3	IN1
Válvula Solenoide	RA2	IN2
Presóstato	RA4	IN3
Electrobomba	RC0	IN4
Bomba de Ácido	RC1	IN5
Bomba de Soda	RC2	IN6
Sensor de nivel 1	RC3	IN7
Sensor de nivel 2	RC3	IN8
Sensor de nivel 3	RC4	IN9

**Tabla 12. Correspondencia entre las entradas digitales y las señales de realimentación.**

## 7.5. SALIDAS DIGITALES

Las salidas digitales son los encargados de activar o desactivar el dispositivo que indique la orden del controlador, esta etapa se realizó a base de relay. Los cuales son manejados por medio del puerto paralelo del microcontrolador. Pero como la señal de entrega por este puerto es de baja corriente y de entrega un voltaje relativamente bajo al rededor de los 5 Voltios, es necesario una etapa amplificadora de corriente. Como la que se muestra en la figura 38.



**Figura 38. Diagrama esquemático del sistema de los relay**

Los relés a utilizar poseen una bobina que maneja 12V dc y una corriente de 10mA. El puerto del microcontrolador puede suministrar un voltaje de 5V y una corriente 100uA. Conocidos estos parámetros proseguimos a calcular los componentes del circuito.

$$\beta = \frac{I_C}{I_E} = \frac{10mA}{100\mu A} = 100$$

$$\beta = 100$$

(62)

$$P_{Q_1} = V_{CE_{MAX}} \times I_C = 12 \times 10mA = 0,12W$$

$$P_{Q_1} = 0,12W$$

Transistor a utilizar debe manejar una corriente mínima de 10mA, una potencia mínima de 100W y una ganancia mínima de 100, el dispositivo que cumple con estas especificaciones es el transistor NPN 2N3904, cuya hoja características se puede ver en el anexo I.

$$R_1 = \frac{V_{TTL} - V_{D1} - V_{BE}}{I_B} = \frac{5 - 0.7 - 0.7}{100\mu A} = 36000\Omega \quad (63)$$

$$P_{R1} = I_B (V_{TTL} - V_{D1} - V_{BE}) = 100\mu A \times (5 - 0.7 - 0.7) = 0,00036W$$

La resistencia R1 será de 36 (KOhm) a 1/4W

D1 se utiliza como protección ante corrientes inversas que se puedan generar en la bobina del Relay también se utiliza como dispositivo de protección para eliminar la posibilidad de que se active el transistor por voltaje bajo, alrededor de 1 (V), D2 se utiliza como diodo de rueda libre con el propósito de eliminar las corrientes inversas que se generan en la bobina del Relay, este diodo es de alto Switchero.

## 7.6. PUERTO DE COMUNICACIÓN SERIAL RS232 y RS485

El microcontrolador cuenta con dos modos de transmisión serial que son:

**USART:** Transmisor Receptor Universal Síncrono Asíncrono. También conocido como Interfase de Comunicación Serial SCI.

**SSP:** Puerto Serial Síncrono

El USART puede ser configurado en lo siguientes modos:

Asíncrono (*full duplex*)

Síncrono - Maestro (*half duplex*)

Síncrono - Esclavo (*half duplex*)

### **USART en Modo Asíncrono.**

En este modo, el USART usa el formato estándar Sin regreso a Cero (NRZ) que consiste en un bit de inicio, ocho bits de datos y un bit de paro. El formato de datos mas común es de 8 bits, sin embargo es posible generar

transmisiones y recepciones de 9 bits. La paridad no está soportada por el hardware, pero pueden ser implementadas por software (almacenado como un noveno bit de transmisión). El USART transmite y recibe primero el bit menos significativo (LSB).

La selección del modo la realiza el **bit SYNC**, que se encuentra en el registro TXSTA, en la posición 4 (TXSTA<4>), **SYNC = 0 selecciona modo asíncrono**. Un generador de tasa de transmisión dedicado de 8 bits puede ser usado para derivar frecuencias estándar a partir del oscilador. **La transmisión y recepción del USART son funcionalmente independientes**, sin embargo usan el mismo formato de datos y la misma tasa de transmisión.

El módulo USART en modo asíncrono consiste de los siguientes elementos:

- Generador de Taza de Transmisión
- Transmisor Asíncrono
- Receptor Asíncrono
- Circuito de Muestreo

A continuación se explica detalladamente los anteriormente items mencionados:

- **Generador de Taza de Transmisión del USART (BRG)**

El BRG soporta ambos modos del USART: síncrono y asíncrono. El BRG es un generador dedicado de 8 bits que consiste de un *timer* en constante incremento. El **registro de función especial SPBRG** controla el periodo de este *timer*. Adicionalmente, en el modo asíncrono únicamente, el **bit BRGH** (TXSTA<2>) también controla la tasa de transmisión, contando con velocidades de transmisión bajas (BRGH = 0) y velocidades altas (BRGH = 1).

Dada una deseada tasa de transmisión y una frecuencia de oscilación (Fosc), se puede calcular el valor entero mas cercano usando la fórmula de la tabla 13, donde X es el valor del registro SPBRG (de 0 a 255).

SYNC	BRGH = 0 (Low Speed)	BRGH = 1 (High Speed)
0	(Asynchronous) Baud Rate = $Fosc/(64(X+1))$	Baud Rate = $Fosc/(16(X+1))$
1	(Synchronous) Baud Rate = $Fosc/(64(X+1))$	NA

**Tabla 13. Fórmulas para Calcular la Taza de Transmisión.**

Debido al redondeo, se genera un error en la tasa de transmisión, este error puede reducirse en algunos casos seleccionando BRGH = 1 para altas velocidades, ya que la frecuencia de oscilación se divide en 16.

**Ejemplo 1** Muestre los cálculos de la tasa de transmisión para las siguientes condiciones:

$$Fosc = 20 \text{ MHz}$$

$$\text{Taza de transmisión (BR)} = 9,600 \text{ bps}$$

$$BRGH = 0 \text{ (baja velocidad)}$$

$$SYNC = 0 \text{ (asíncrono).}$$

$$BR = Fosc / (64 (X + 1)) \quad (64)$$

Despejando:

$$X = [Fosc / (BR) (64)] - 1$$

$$X = [20 \text{ MHz} / (9600) (64)] - 1$$

$$X = 32.5521 - 1$$

$$X = 32$$

$$BR \text{ calculado} = 20 \text{ MHz} / (64 (32 + 1)) = 9469.7 \text{ bps}$$

$$\text{Error} = (BR \text{ calculado} - BR \text{ deseado}) / BR \text{ deseado} = (9647 - 9600) / 9600 = - 0.49 \%$$

La tabla 14 muestra los registros y bits de los registros asociados a la generación de la taza de transmisión:

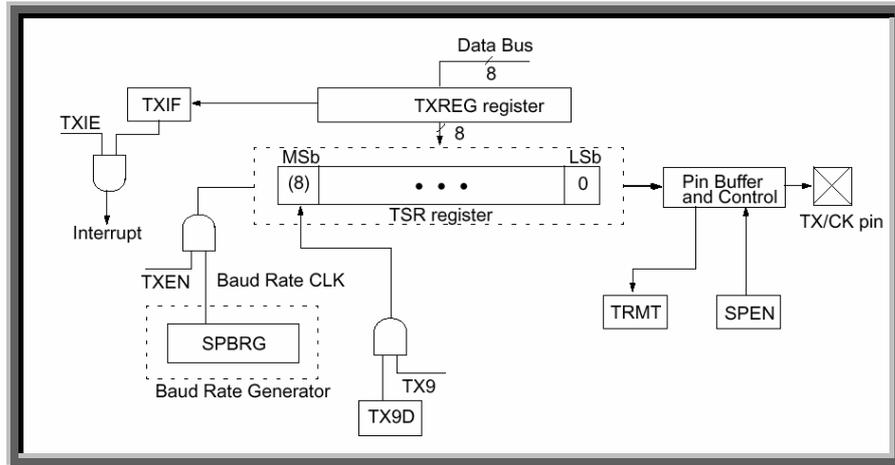
NAME	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0
TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D
RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	—	FERR	OERR	RX9D
SPBRG	Baud Rate Generator Register							

**Tabla 14. Registro asociados al Generador de Taza de Transmisión.**

El bit SPEN (RCSTA<7>) debe habilitarse (SPEN = 1) para permitir la transmisión recepción de datos, además de configurar los pines RX/DT y TX/CK como pines del puerto serial.

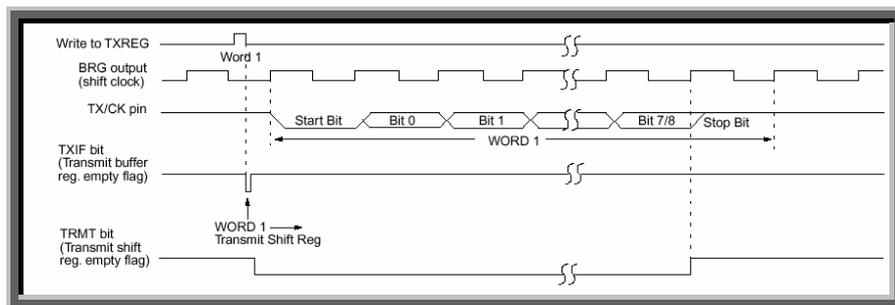
➤ **Transmisor Asíncrono del USART.**

La transmisión en modo asíncrono del módulo USART está comprendido según el diagrama a bloques del la figura 39. El registro de corrimiento serial (TSR) es el encargado de generar la transmisión alimentado por el generador de taza de transmisión (BRG). La transmisión se inicia simplemente escribiendo al registro **TXREG**, el cuál forma parte de los registros de función especial. Inmediatamente después el contenido del TXREG es copiado al TSR, provocando que la bandera TXIF se encienda indicando que el TXREG ha quedado vacío. El TSR no es un registro de función especial y no se encuentra disponible al usuario.



**Figura 39. Diagrama a bloques del Transmisor en modo asíncrono del USART.**

El reloj que recorre los datos (BRG) se debe habilitar a través del bit TXEN (TXEN<5>). El TSR comienza a recorrer los datos hacia el pin TX/CK agregando automáticamente el bit de inicio y el bit de paro, cuando el TSR se vacía se enciende el bit TRMT (TXSTA<1>), el TRMT es un bit de sólo lectura y no hay lógica de interrupción atada a este bit, por lo que se debe muestrear para determinar cuando se ha vaciado el TSR.



**Figura 40. Diagrama de tiempos de la Transmisión asíncrona del USART.**

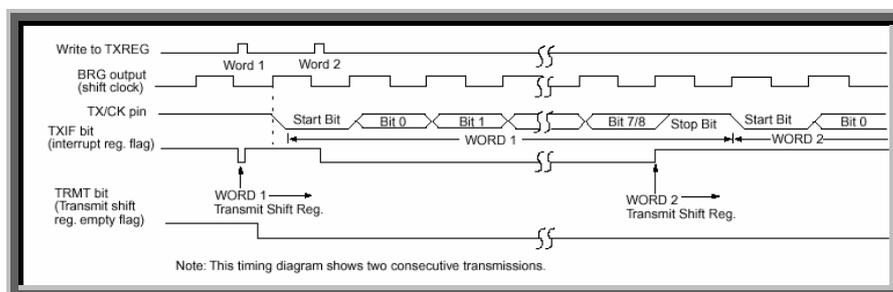
Limpiar el bit TXEN durante la transmisión ocasionará abortarla, mandando el pin TX/CK a alta impedancia. Para la transmisión de 9 bits, debe encenderse el bit TX9 (TXSTA<6>) y escribir al noveno bit en la posición TX9D (TXSTA<0>).

En modo de ahorro de energía (SLEEP) la transmisión serial asíncrona se detiene.

Los pasos para programar la transmisión serial asíncrona son los siguientes:

- 1) Inicializar el SPBRG para la apropiada tasa de transmisión. Si se desea una tasa de alta velocidad, deberá encenderse el bit BRGH.
- 2) Habilitar el puerto serial asíncrono limpiando el bit SYNC y encendiendo el bit SPEN.
- 3) Si se desea manejar interrupciones encender los bits TXIE, GIE y PEIE.
- 4) Encender el bit TX9 si se desea una transmisión de 9 bits.
- 5) Habilitar la transmisión encendiendo el bit TXEN (no olvidar que este enciende el bit TXIF)
- 6) Si se ha escogido una transmisión de 9 bits, cargar primero el bit TX9D.
- 7) Cargar los datos a transmitir al registro TXREG (lo cual inicia la transmisión).

Se puede realizar una transmisión llamada “espalda con espalda” escribiendo el registro TXREG antes de que el TSR haya terminado de transmitir la palabra antes escrita, no permitiendo que el bit TMTR no se encienda. Esto es posible solamente monitoreando el bit TXIF, ya que este bit se enciende cuando una nueva palabra se escribe al TXREG y no puede borrarse por software, sólo se limpia cuando esta palabra se escribe al registro TSR, según se muestra en la figura 41.



**Figura 41. Transmisión asíncrona del USART en forma “espalda con espalda”.**

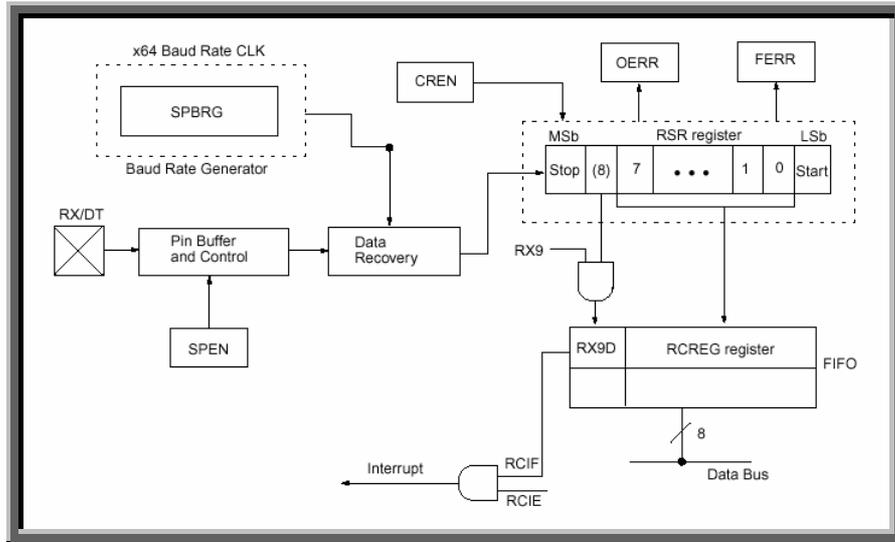
La tabla 15 muestra los registros y los bits asociados con la transmisión serial asíncrono.

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
PIR	TXIF <sup>(1)</sup>								0	0
RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	—	FERR	OERR	RX9D	0000 -00x	0000 -00x
TXREG	TX7	TX6	TX5	TX4	TX3	TX2	TX1	TX0	0000 0000	0000 0000
PIE	TXIE <sup>(1)</sup>								0	0
TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	0000 -010
SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	0000 0000

Legend: x = unknown, - = unimplemented locations read as '0'.  
 Shaded cells are not used for Asynchronous Transmission.  
 Note 1: The position of this bit is device dependent.

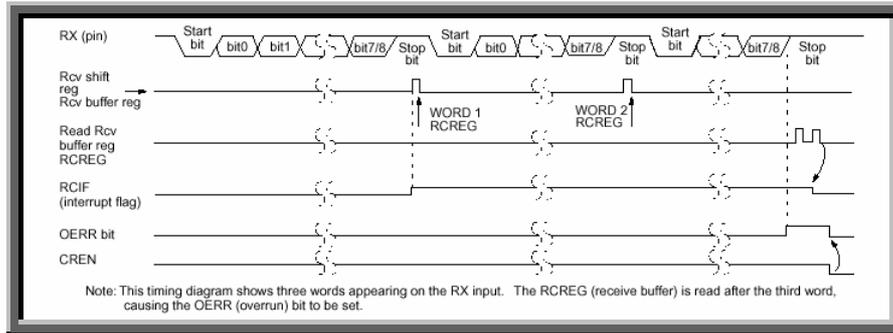
**Tabla 15. Registros asociados con la Transmisión Asíncrona Serial.  
Receptor Asíncrono del USART.**

La recepción en modo asíncrono del módulo USART está comprendido según el diagrama a bloques del la figura 42. Los datos son recibidos a través del pin RX/DT y los drivers del bloque de recuperación de datos sí el **bit CREN** (RCSTA<4>) es habilitado. El registro de recepción de corrimiento (RSR) copia su contenido al registro RCREG después de que se halla recibido el bit de paro y encendiendo al termino la bandera de interrupción **RCIF**. Este bit es de sólo lectura y limpiado sólo por hardware cuando el registro RCREG es leído y se encuentra limpio.



**Figura 42. Diagrama a bloques del Receptor en modo asíncrono del USART.**

Para evitar la pérdida de datos al recibir las palabras, el registro RCREG tiene una arquitectura *FIFO* con una profundidad de 2 registros, permitiendo recibir 2 bits en el RCREG mas otro siendo recibido en el RSR. Si aún así el registro RCREG no es leído a tiempo, la palabra recién llegada se perderá y se encenderá al mismo tiempo el **bit OERR** (RCSTA<1>), que es el bit de error de sobre ejecución. Este bit debe ser borrado por software. Cuando este bit se enciende se inhiben las transferencias del RSR al RCREG, por lo que es importante limpiar el bit OERR. Para borrar este bit es necesario apagar y encender el bit de habilitación de recepción continua, el **bit CREN** (RCSTA<4>). El **bit FERR** (RCSTA<2>) se enciende al detectar que el bit de paro se recibió en cero, este bit junto con noveno de datos se reciben en el registro RCSTA por lo que primero se deben leer estos bits antes de leer el registro RCREG o de otra forma se perderán por la estructura *FIFO* cuando llegue otra palabra.



**Figura 43. Diagrama de tiempos de la Recepción asíncrona del USART.**

Los pasos para programar la recepción serial asíncrona son los siguientes:

- 1) Inicializar el SPBRG para la apropiada taza de transmisión. Si se desea una taza de alta velocidad, deberá encenderse el bit BRGH.
- 2) Habilitar el puerto serial asíncrono limpiando el bit SYNC y encendiendo el bit SPEN.
- 3) Si se desea manejar interrupciones encender los bits RCIE, GIE y PEIE.
- 4) Encender el bit RX9 si se desea una transmisión de 9 bits.
- 5) Habilitar la transmisión encendiendo el bit CREN.
- 6) Cuando la recepción se complete se encenderá el bit RCIF y si se encuentra habilitada la interrupción ésta se generará.
- 7) Leer primero el registro RXSTA para obtener el noveno bit si este modo está habilitado y determinar si no hubo algún error durante la transmisión revisando los bits OERR y FERR.
- 8) Leer los 8 bits de datos del registro RCREG.
- 9) Si se presentó algún error limpiar los bits de error al limpiar el bit CREN. Si hubo error, llamar a la rutina adecuada para corregirlo.

Como puede apreciarse, los pasos 1-4 son muy parecidos tanto para la transmisión como la recepción. Los pasos 1 y 2 sólo requieren ser realizados una vez y será suficiente para la recepción y como para la transmisión. La tabla 16 muestra los registros y los bits asociados con la recepción serial asíncrono.

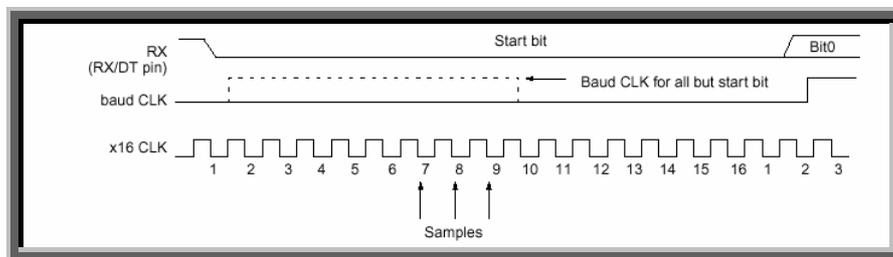
Normalmente estos registros se encuentran en el **banco 1**, excepto el registro RCSTA.

Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Value on: POR, BOR	Value on all other Resets
PIR	RCIF <sup>(1)</sup>								0	0
RCSTA	SPEN	RX9	SREN	CREN	—	FERR	OERR	RX9D	0000 -00x	0000 -00x
RCREG	RX7	RX6	RX5	RX4	RX3	RX2	RX1	RX0	0000 0000	0000 0000
PIE	RCIE <sup>(1)</sup>								0	0
TXSTA	CSRC	TX9	TXEN	SYNC	—	BRGH	TRMT	TX9D	0000 -010	0000 -010
SPBRG	Baud Rate Generator Register								0000 0000	0000 0000

Legend: x = unknown, - = unimplemented locations read as '0'.  
 Shaded cells are not used for Asynchronous Reception.  
 Note 1: The position of this bit is device dependent.

**Tabla 16. Registros asociados con la Recepción Asíncrona Serial.**

El bloque de recuperación de datos opera a 16 veces la tasa de transmisión para muestrear correctamente el valor del dato leído. El valor del pin leído lo determina a través de 3 lecturas realizadas durante las transiciones negativas 7, 8 y 9.

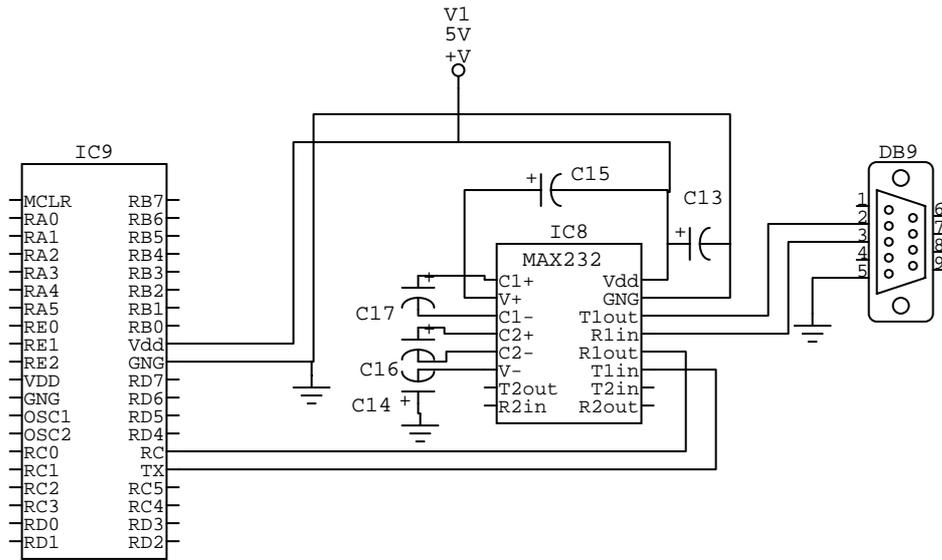


**Figura 44 Esquema de muestreo del pin RX**

## CONEXIÓN RS232 Y RS485.

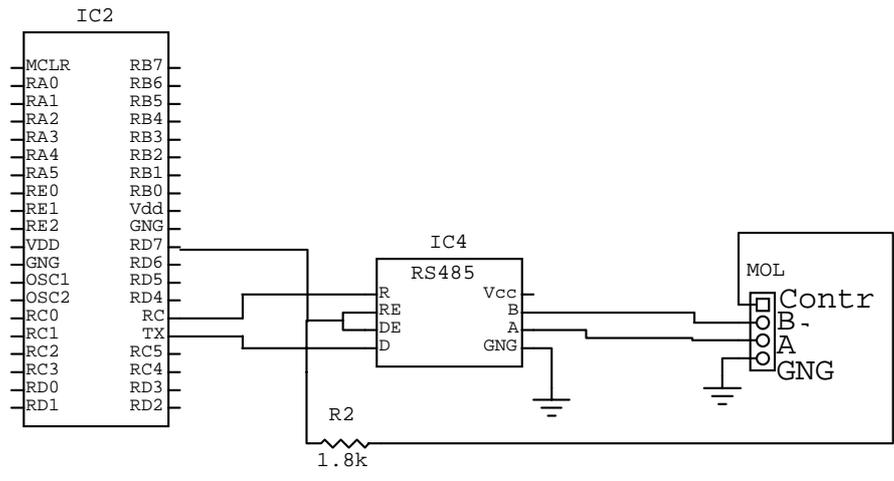
La tarjeta consta de dos sistemas de comunicación con el PC, la primera por RS232 en la cual solo se puede conectar una sola tarjeta, a una distancia de algunos pocos metros (máximo 15) con un cable normal. Este es posible por medio de integrado MAX232 (ver anexo J para mayor información), el cual convierte la señales de 0 a 5, enviadas por el microcontrolador a señales de –

10V para indicar que hay un uno y de 10 para indicar que hay un cero, este integrado contiene en su interior un sistema multiplicador de voltaje a base de capacitores y diodos. Para elevar el voltaje de 5 voltios a 20 voltios aproximadamente. El diagrama esquemático de conexión de esta se muestra en la figura 45.



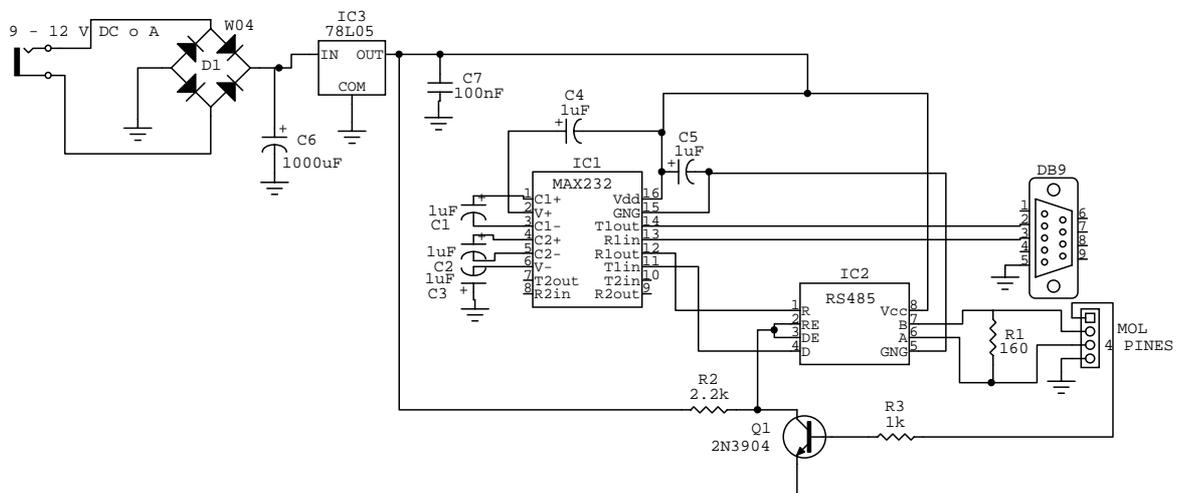
**Figura 45. Diagrama de conexión del MAX 232**

El otro sistema de interconexión es por el puerto RS485, la conversión a este sistema es posible gracias al integrado MAX485, este dispositivo envía la señales de igual manera que las recibe del PIC 5 para decir que es un bit alto y 0 para decir que es un bit bajo, pero en la salida de este componente encontramos un circuito de alta impedancia con el propósito de recorrer grandes distancia sin que se caiga la señal. Ver anexo K para mayor información, este dispositivo necesita un señal de control la cual le indica al microcontrolador que se ponga en estado de recepción (RE = 0V DE = 0V) o en estado de transmisión (RE = 5V DE = 5V), este control lo realizamos por software y se refleja en el pin RD7 del puerto D del micro, como se muestra en la figura 46.



**Figura 46. Diagrama de conexión del MAX 485**

Como los computadores no poseen el puerto RS485 es necesario utilizar uno de los puertos seriales disponibles, en nuestro caso se utiliza el RS232, al cual fue necesaria conectarle un circuito conversor. Como se muestra en la figura 47.



**Figura 47. Conversor de RS232 a RS485**

Este circuito convierte la señales del puerto RS232 a señales RS485, pero necesita una señal de control que este en sincronización con la tarjeta, pero de estado invertido, esto quiere decir que cuando la señal de control en la tarjeta este en uno la señal de control en este dispositivo debe estar en 0. Por tal razón se habilito la salida de control que vemos en la figura 46. Que se conecta

en la entrada de control que se muestra en la figura 47.

En el siguiente diagrama se muestra como es la conexión entre tarjetas.

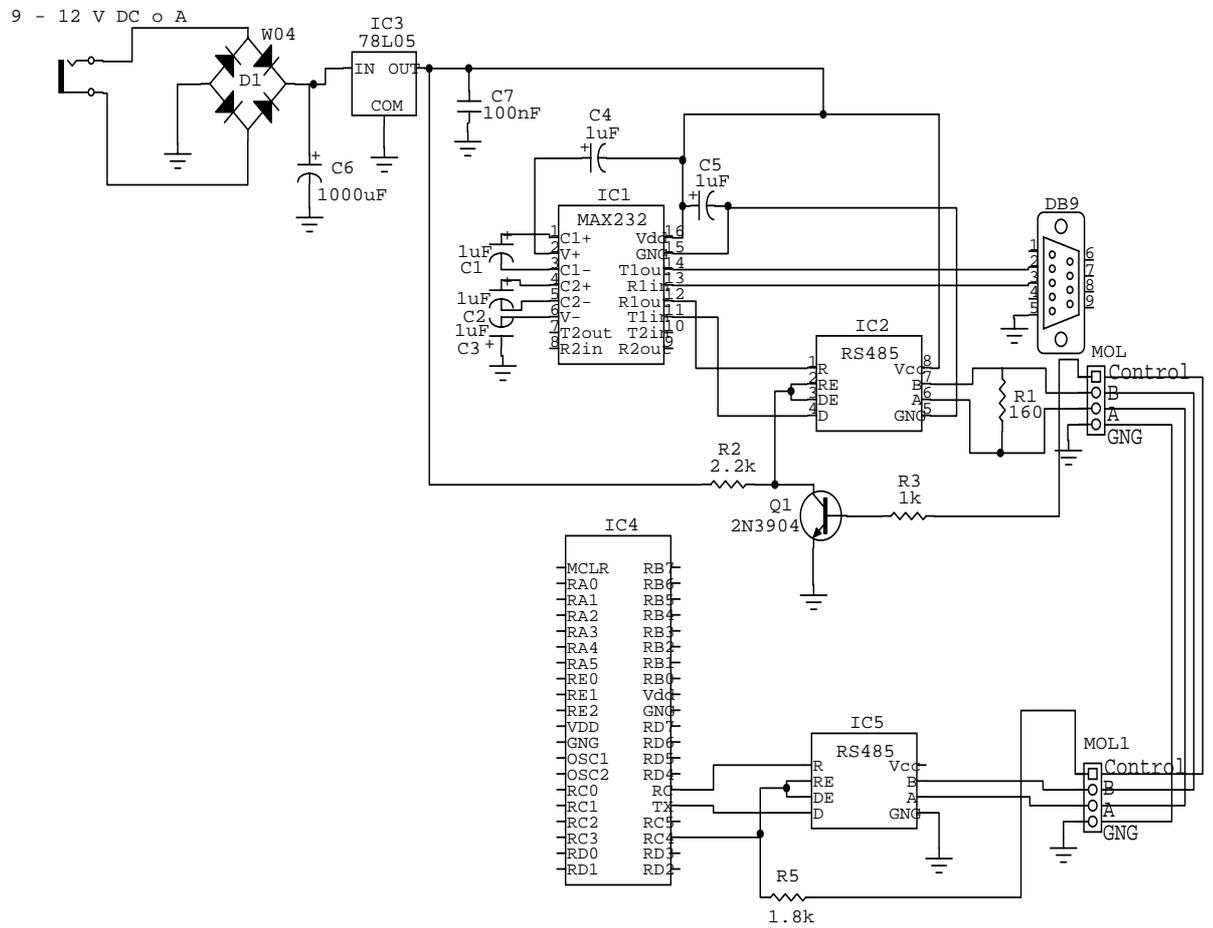
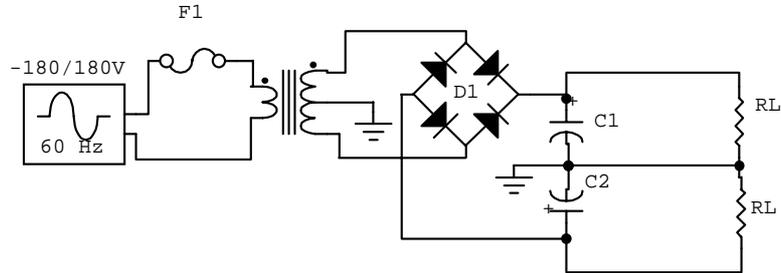


Figura 48. Diagrama de comunicación.

## 7.7. FUENTE DE VOLTAJE DEL HARDWARE.



**Figura 49. Esquema del circuito de filtrado.**

La fuente que se diseñó entrega un voltaje de 12 Voltios para alimentar un regulador de 9 Voltios y otro de  $-9$  V, que son los encargados de suministrar la energía a los operacionales, los cuales a su vez alimentan un regulador de 5 Voltios que alimenta al microcontrolador y al circuito encargado de la transmisión serial. También alimenta al regulador de  $-5$  V, para generar el voltaje negativo  $-0.414$  V para adicionarlo a la señal del Sensor. Por tal razón la señal rectificada y filtrada debe suministrar un voltaje mayor o igual a 12 voltios con un rizado menor de 1% ya que se alimentaran circuitos digitales de dicha fuente. El valor de los condensadores se calcula por medio de la siguiente expresión basada en la resistencia de carga que va a tener la fuente y el rizado de señal.

$$C_1 = \frac{0.24}{\% r R_L} \quad (65)$$

$$R_L = \frac{V_{sal}}{I_{Carga}} \quad (66)$$

$$\frac{12V}{100mA} = 120\Omega$$

$$\% r = 1\%$$

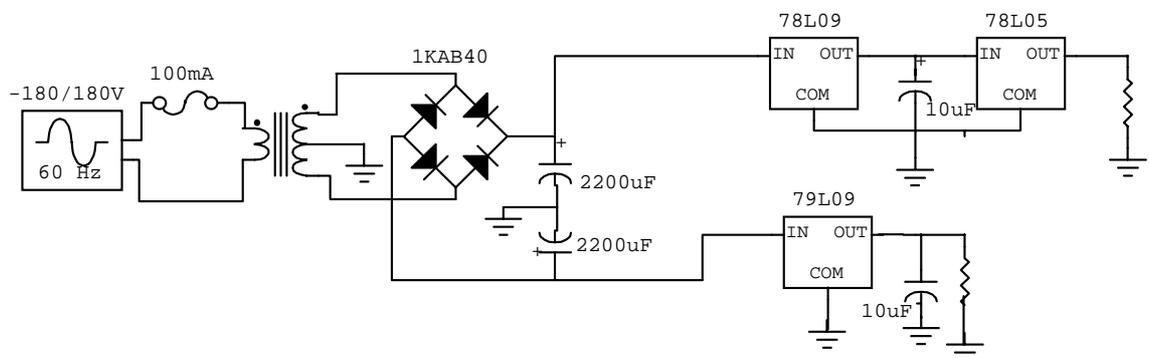
$$C_1 = \frac{0.24}{1 \times 120} = 2000\mu f$$

Se tomara el valor inmediatamente Superior comercial que es de  $2200\mu F$   
 Se procede a verificar si el valor del capacitor que escogimos es el adecuado

$$\%r = \frac{0.24}{C_1 R_L} = \frac{0.24}{2200\mu f \times 120} = 0.9$$

El circuito puede suministrar un rizado menor al 1% para corrientes menores o igual a 100mA.

El circuito completo del sistema de filtrado y regulación es el siguiente:



**Figura 50. Circuito esquemático completo del sistema de filtrado y regulado de la señal de alimentación del la Tarjeta de adquisición.**

### 7.7.1. Calculo del transformador



**Figura 51. Diagrama esquemático del transformador**

Este dispositivo es el encargado de acoplar el circuito a la red eléctrica, se encarga de tomar la señal de voltaje de la red eléctrica que tiene un voltaje (RMS) de 120Vac y bajarlo al voltaje necesario para nuestro propósito, Este dispositivo trabajo por el principio de inducción magnética. Esto nos indica que

el dispositivo esta compuesto por dos bobinas una llamada bobina primaria que es donde se conecta la red eléctrica y otra donde se induce el voltaje o bobina secundaria. Si queremos reducir el voltaje de la entrada la bobina primaria debe ser mayor que el de la bobina secundaria y si lo queremos elevar se debe hacer lo contrario. Después de esta introducción se realizan los cálculos.

$$V_{sec(P)} = V_{filtrado} + 2 * V_D = V_{DC} + V_{pRIZ} + 2 * V_D = 12 + 12 * 0.01 + 1.4 = 13.52 \quad (67)$$

$$V_{sec(pico)} = 13.52 V$$

$$V_{SEC(RMS)} = \frac{13.52}{\sqrt{2}} = 9.56 V_{RMS}$$

Se toma de  $10 V_{rms}$

$$V_{prim(pico)} = 170 V$$

$$V_{prim RMS} = \frac{170}{\sqrt{2}} = 120.2 V_{rms}$$

$$a = \frac{120.2}{10} = 12.02$$

El Transformador debe soportar en el primario un voltaje de  $120 V_{RMS}$  y en el secundario debe proporcionar un voltaje de  $10 V_{RMS}$  y una corriente mayor a los  $100mA$

## 8. ETAPA DE ACCIONAMIENTO

De acuerdo a los requerimientos de operación se desea que el sistema eléctrico accione de la siguiente manera:

- Se debe dar la opción de apagado y encendido general al sistema.
- El sistema debe tener dos modo de operación Local y Remoto.
- Al inicio del proceso se debe activar la solenoide con el fin de suministrar agua al sello mecánico de la bomba principal.
- Accionar las válvulas de recirculación y descarga según se desee con un enclavamiento eléctrico entre ella para que en ningún momento estén abierta o cerrada al mismo tiempo.
- Prender las bombas dosificadoras de ácido y soda según lo requerido por el sistema o la señal del controlador. Se debe realizar un enclavamiento eléctrico entre las dos bombas para que en ningún momento estén abierta o cerrada al mismo tiempo. Por costo y debido a que no sufren por succionar en vacío no se le coloca protección por bajo nivel, pero se recomienda para un mejor funcionamiento y vida útil de estas.
- Arrancar la bomba principal para recircular y comenzar el control automático. Se debe arrancar con protección por nivel, presión de agua del sello mecánico y sobre carga en el motor para prevenir daños en esta. Antes de arrancar la bomba principal se debe dar la condición de cebado de la bomba en caso tal no se podría dar arranque.

El diseño del diagrama de control se realizó en base a los requerimientos anteriores y las consideraciones de diseño descritas en el capítulo 2.

A continuación se describe el funcionamiento detallado del diagrama esquemático de control que se observa en el anexo O.

El primer paso para dar arranque al proceso es seleccionar la opción ON del selector I1, en este instante el sistema esta habilitado para que operador seleccione la opción entre local y remoto con el selector I2.

➤ Funcionamiento del sistema en mando local

Al seleccionar mando local el sistema esta habilitado para recibir la orden de Start (pulsador Start1), al pulsar este acciona el relay R, el cual esta enclavado eléctricamente con un contacto normalmente cerrado del relay R2 que a su vez es accionado por un contacto normalmente abierto R1 y este es accionado por un contacto normalmente abierto del contactor BP de la bomba principal. Este enclavamiento se utiliza para el lavado del sello mecánico de la bomba principal después de finalizado el proceso.

Al accionarse el relay R energiza la bobina del temporizador off delay T1 que a su vez con un contacto normalmente abierto (instantáneo al cierre y temporizado a la desenergización) energiza la válvula solenoide para el suministro de agua al sello mecánico de la bomba principal, si la presión del agua de sello es mayor e igual a 25 PSI se activa una contacto normalmente abierto del Presóstato el cual activa el contactor P1 que se utiliza para habilitar el encendido de la bomba principal.

Cuando la pileta alcanza un nivel de 0.8 M se cierra el contacto NO2 del sensor de nivel activando la bobina del relay R3 que a su vez cierra un contacto normalmente abierto que habilita el encendido de la bomba principal. El relay R3 lo deshabilita el relay R4 con un contacto normalmente cerrado con el fin de que la bomba principal se habilite por alto nivel o nivel de trabajo normal independientemente.

Cuando la pileta alcanza un nivel de 1.5 M se cierra el contacto NO1 Del sensor de nivel el cual energiza el relay R4, este tiene un contacto normalmente abierto que habilita el encendido de la bomba principal, es decir

cuando el nivel baja menor de 0.8 M el contacto normalmente abierto del relay R3 que mantiene habilitado el funcionamiento del motor se abre debido a que el contacto de NO2 es deshabilitado, pero el contacto R4 continua cerrado, EL contacto R4 solo se deshabilita cuando la pileta llega a un nivel de 0.4 M e inmediatamente se apaga la bomba principal.

Si las condiciones para el arranque de la bomba principal se cumplen el operador puede dar orden de encendido de esta presionando el pulsador A1 el cual acciona el contactor BP que tiene 3 contactos normalmente abierto para el arranque de la bomba principal y uno auxiliar para retener la señal de pulso.

De igual forma el operador puede dar orden accionar válvula de recirculación o descarga con los pulsadores A4 y A5 respectivamente y a las bombas dosificadoras de ácido o soda según lo requiera con los pulsadores A2 y A3.

Para dar orden de parada de la bomba principal, válvula de recirculación y descarga, bomba de dosificación de ácido y soda, se utiliza los pulsadores S1, S4, S2, S3 respectivamente.

➤ **Funcionamiento del sistema en mando remoto**

Al seleccionar con el selector I2 la opción de mando remoto inmediatamente se energiza los Contactores E1 y E2 que son utilizados para deshabilitar el mando local del proceso. En este instante el proceso esta habilitado para que se pueda controlar a través de computador mediante la interfase de adquisición de datos. Esta interfase interviene en la lógica de control con las distintas entradas y salidas digitales que se detallan a continuación.

**ENTRADAS DIGITALES:**

- IN0 : Realimentación del estado de la válvula de recirculación
- IN1: Realimentación del estado de la válvula de descarga
- IN2: Realimentación de estado de la válvula solenoide
- IN3: Indica que la presión de la línea agua de sello de la bomba es la

deseada para arrancar el proceso.

- IN4: Indicación de nivel deseado para iniciar el proceso de neutralización
- IN5: Realimentación del estado de la válvula de dosificación de ácido
- IN6: Realimentación del estado de la válvula de dosificación de soda.
- IN7: Realimentación del estado de la bomba principal
- IN8: Indicación de alto nivel y bajo nivel

### **SALIDAS DIGITALES:**

- OUT0: Se utiliza para accionar el contactor VR de la válvula de recirculación.
- OUT1: Se utiliza para accionar el contactor VD de la válvula de descarga.
- OUT2: Se utiliza para energizar la válvula solenoide para el suministro de agua de sello.
- OUT3: Se Utiliza para energiza el contactor BP de la bomba de recirculación y descarga.
- OUT4: Se utiliza para energizar el contactor BA de la bomba de dosificación de ácido.
- OUT5: Se utiliza para energizar el contactor BS de la bomba de dosificación de soda.

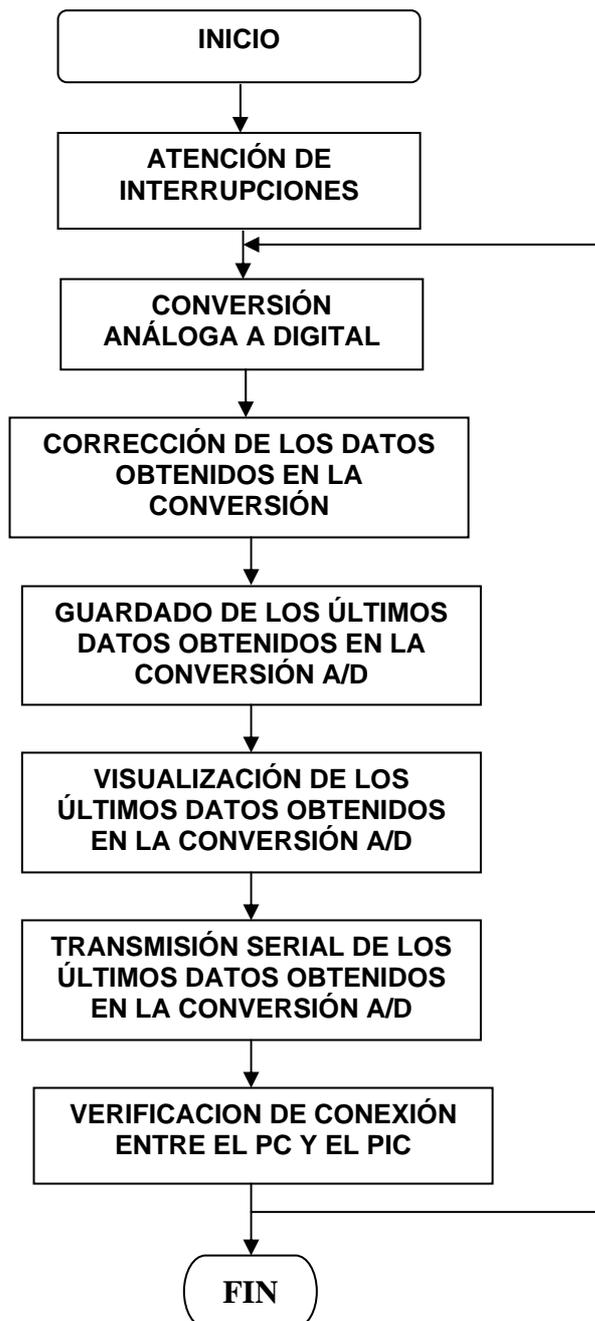
La lógica de control en mando remoto es descrita en el capítulo 9. La selección de cada una de las protecciones y elementos se realizó en base a las características eléctricas del sistema de potencia ya existente.

Las características de cada uno de los elementos que intervienen en el diagrama eléctrico de control y de potencia se observan en el anexo P.

## 9. DISEÑO DEL SOFTWARE.

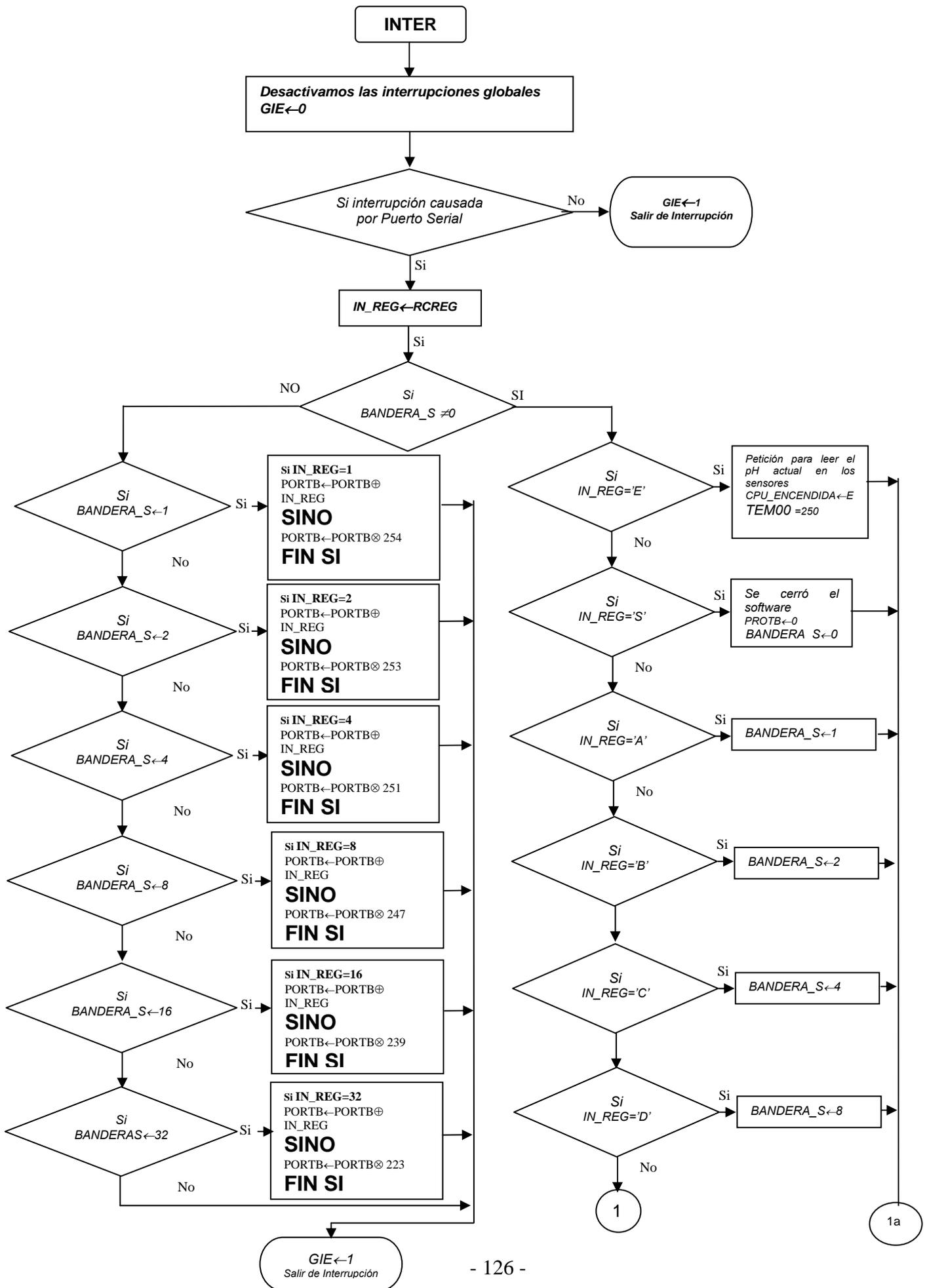
### 9.1. MICROCONTROLADOR 16F877.

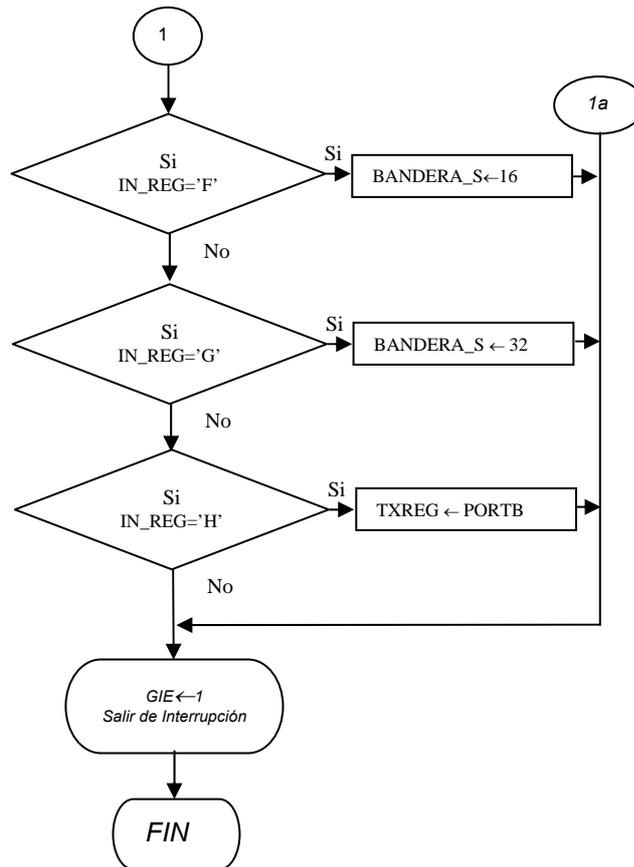
Diagrama de flujo físico del software implementado en el microcontrolador.



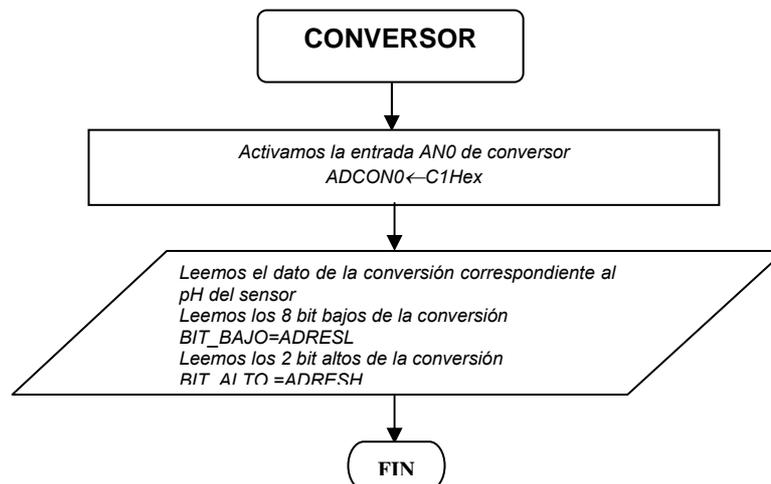
## ➤ ATENCIÓN DE LAS INTERRUPCIONES

El programa maneja las interrupciones de recepción del puerto serial (RCREG), las cuales son atendidas inmediatamente se produzcan en la subrutina de nombre (INTER). Cuando se recibe un dato por el puerto serial se debe mirar para ver que quiere el software del PC que haga la tarjeta.





- **CONVERSIÓN ANÁLOGA DIGITAL**



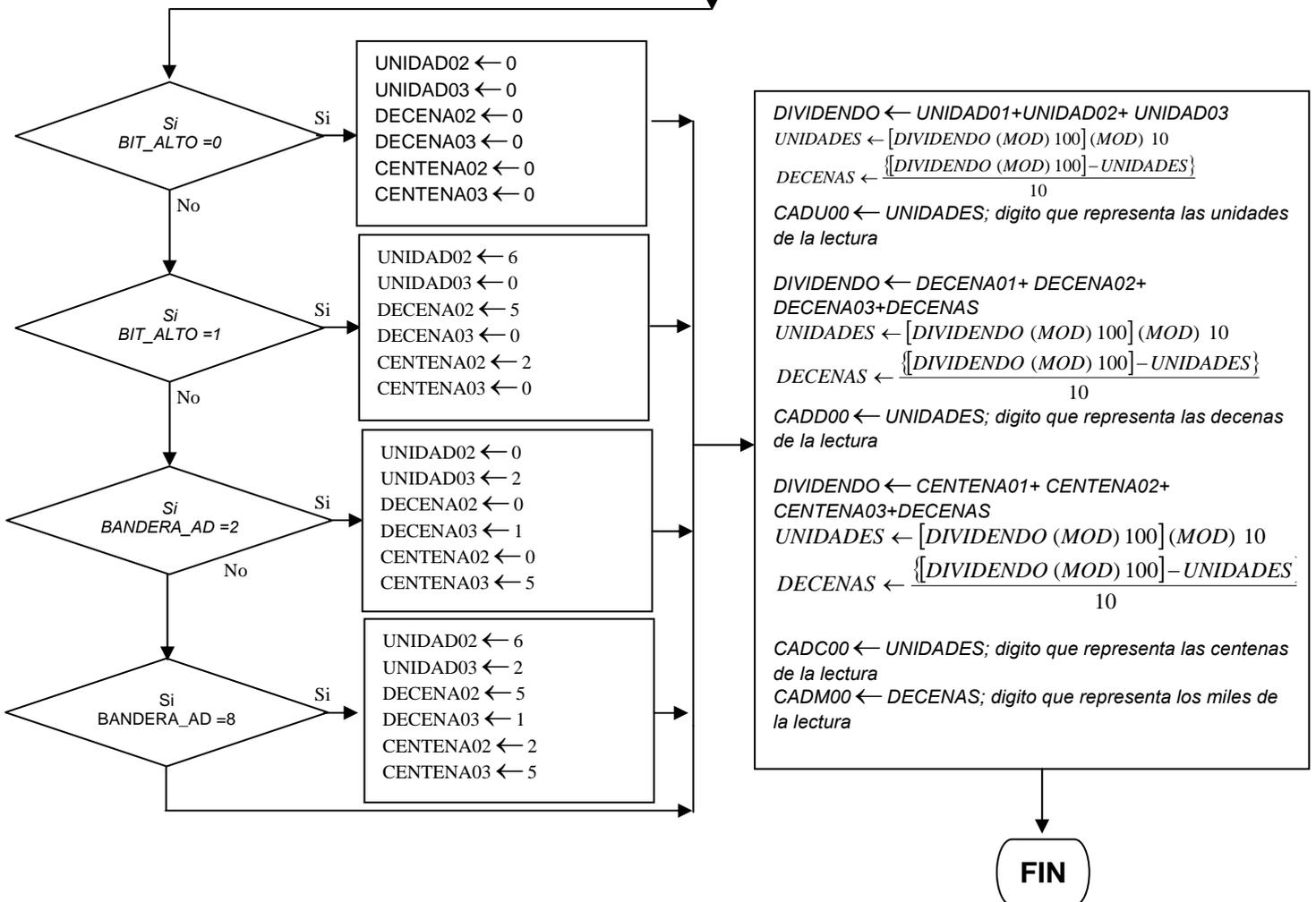
➤ **CORRECIÓN DE LECTURA DE LOS DATOS DEL CONVERTOR ANALOGO A DIGITAL.**

El conversor análogo a digital del microcontrolador tiene una resolución de 10bit los cuales están repartidos en dos registros uno que contiene los ocho bit bajos y otro que contiene los 2 bit mas altos. Esta lectura debe ser representada como un número decimal normal que varia de 0 a 1023 por tal razón se optó en dividir el dato en dígitos que representan la unidad, decenas, centenas y miles como se muestra a continuación.

**CORRECCIÒN**

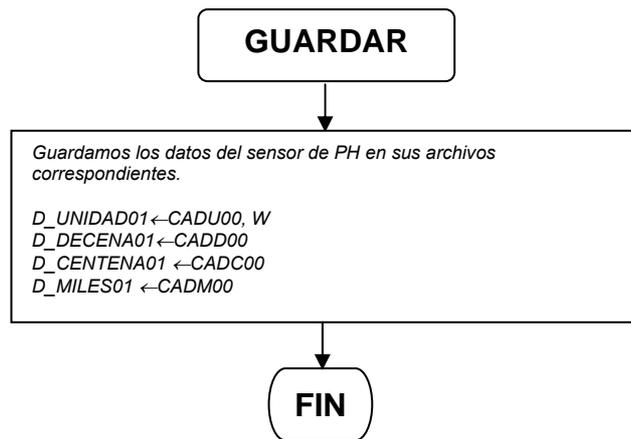
Se divide los 8 bit menos significativos en unidades decenas y centenas

$DIVIDENDO \leftarrow BIT\_BAJO * 1.37$   
 $UNIDADES \leftarrow [DIVIDENDO (MOD) 100] (MOD) 10$   
 $PUENTE \leftarrow DIVIDENDO (MOD) 100$   
 $DECENAS \leftarrow \frac{\{PUENTE - UNIDADES\}}{10}$   
 $CENTENA \leftarrow \frac{[DIVIDENDO - PUENTE]}{100}$   
 $UNIDAD01 \leftarrow UNIDAD$   
 $DECENA01 \leftarrow DECENA$   
 $CENTENA01 \leftarrow CENTENA$

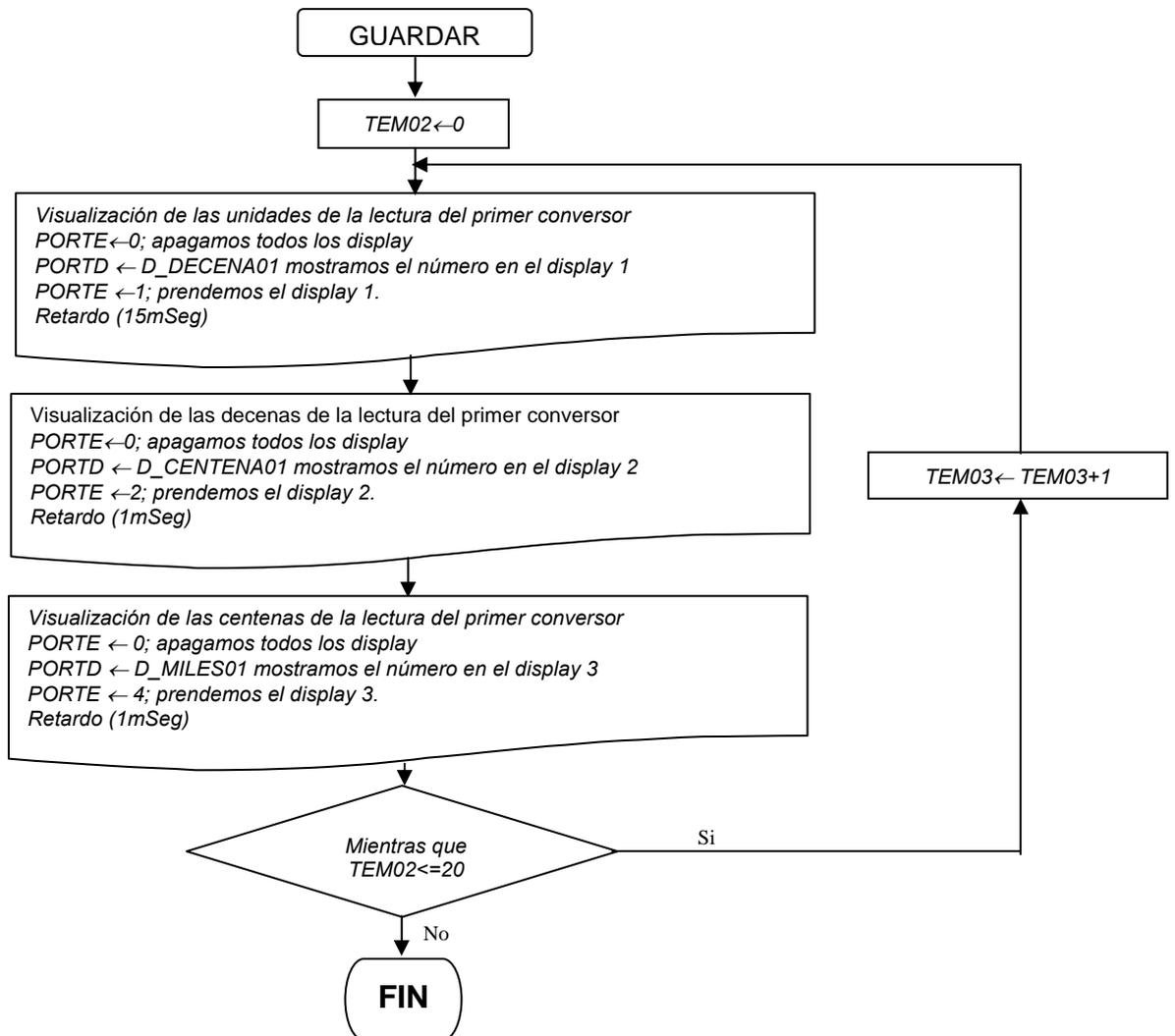


➤ **GUARDAR DATOS ACTUALES DE LA CONVERSIÓN A/D**

Los datos obtenidos en la lectura del conversor se corrigen y luego se guardan en sus archivos correspondientes para su posterior visualización en el display o su envío por el puerto serial.



➤ **VISUALIZACIÓN DE LOS ÚLTIMOS DATOS OBTENIDOS EN LA CONVERSIÓN A/D.**



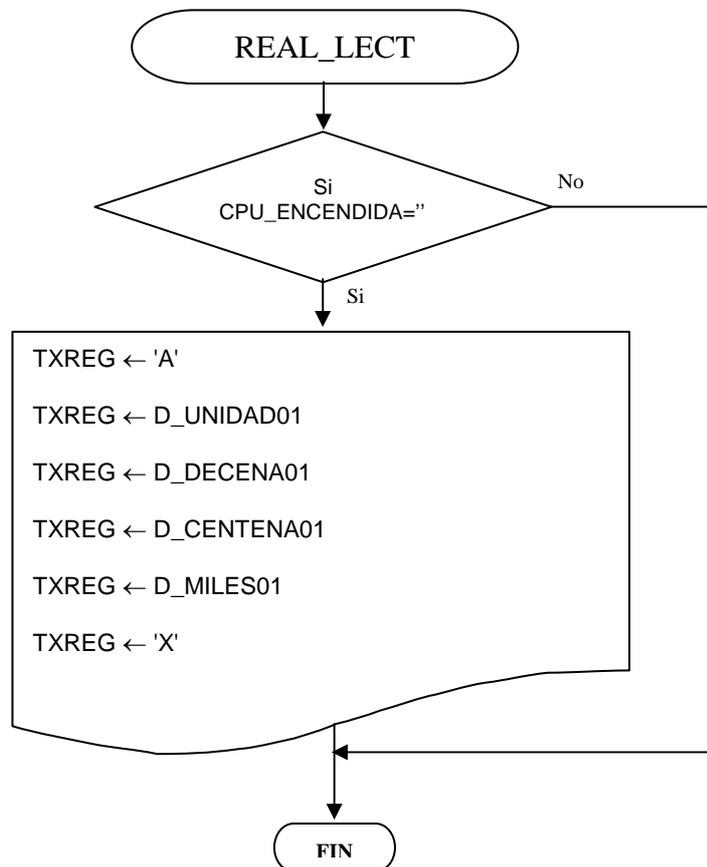
➤ **TRANSMISIÓN SERIAL DE LOS ÚLTIMOS DATOS OBTENIDOS EN LA CONVERSIÓN A/D.**

Cuando el computador solicita los datos de la lectura del sensor enviá el número 69 y se carga en la variable CPU\_ENCENDIDA, por tal razón si en el momento de llegar a la subrutina REAL\_LECT esta variable esta cargada con ese valor se efectúa el proceso de envío sino, no se hace nada y se continua con otro proceso.

Al mover al registro TXREG cualquier valor lo estamos enviando por el puerto serial RS232, Como anteriormente se habían guardo los datos obtenidos en la conversión, se sigue a cargar el contenido de estos archivos al Registro TXREG para su envió por el puerto Seria RS232, formando así una trama la cual se inicia con un registro de Start en nuestro caso es el numero 65 y se finaliza con el numero 88. Quedando la trama compuesta por 6 registros así.

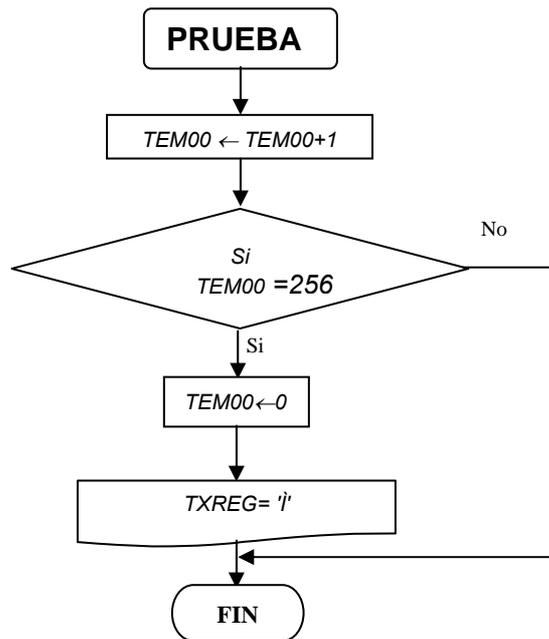
'A'	U1	D1	C1	M1	'X'
-----	----	----	----	----	-----

La lógica para enviar esta trama es la siguiente



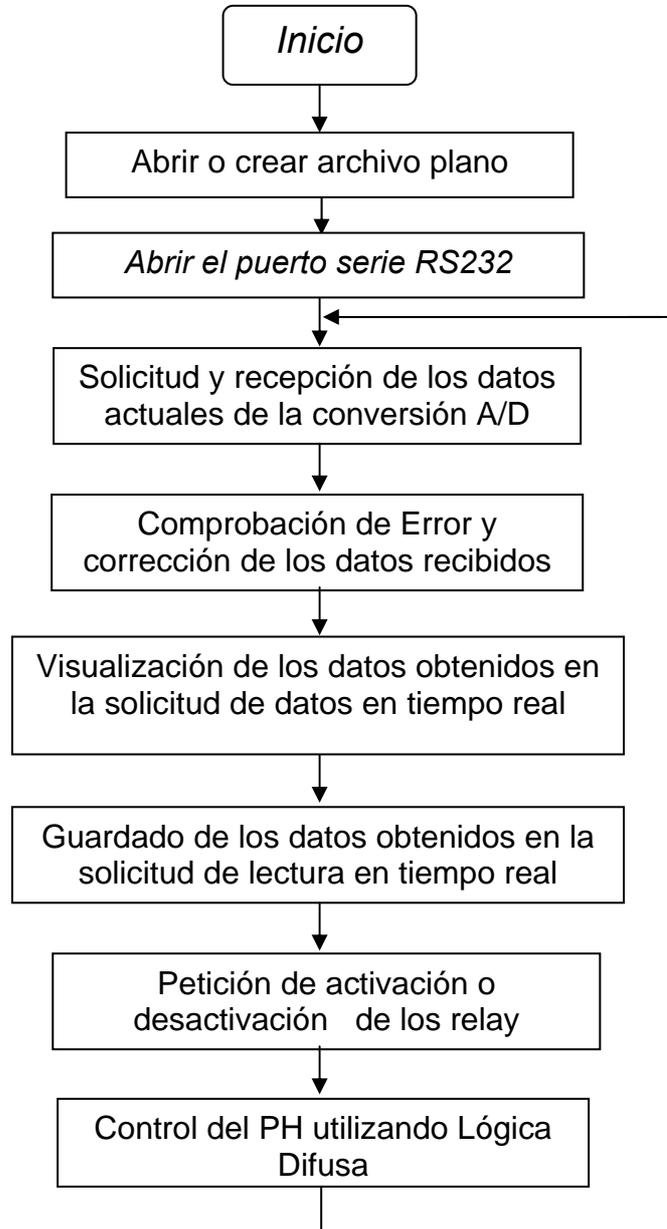
➤ **COMPROBACIÓN DE CONEXIÓN POR MEDIO DEL PUERTO SERIAL CON EL COMPUTADOR.**

La tarjeta cuenta con un sistema de recuperación de trama el cual le manda un código al PC y si este esta encendido debe responder con alguna solicitud esta comprobación se hace cada 15 segundos aproximadamente.



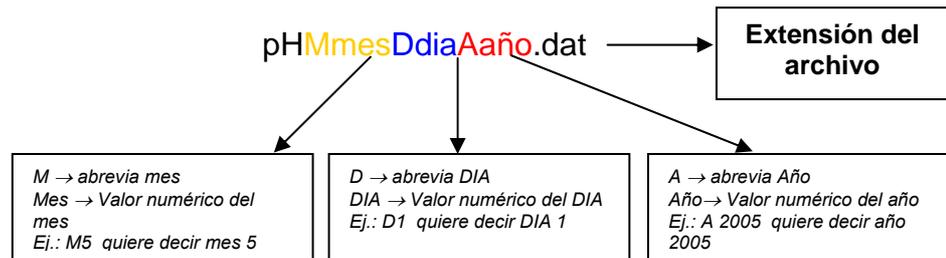
## 9.2. SOFTWARE DEL PC.

Diagrama físico del software del PC.



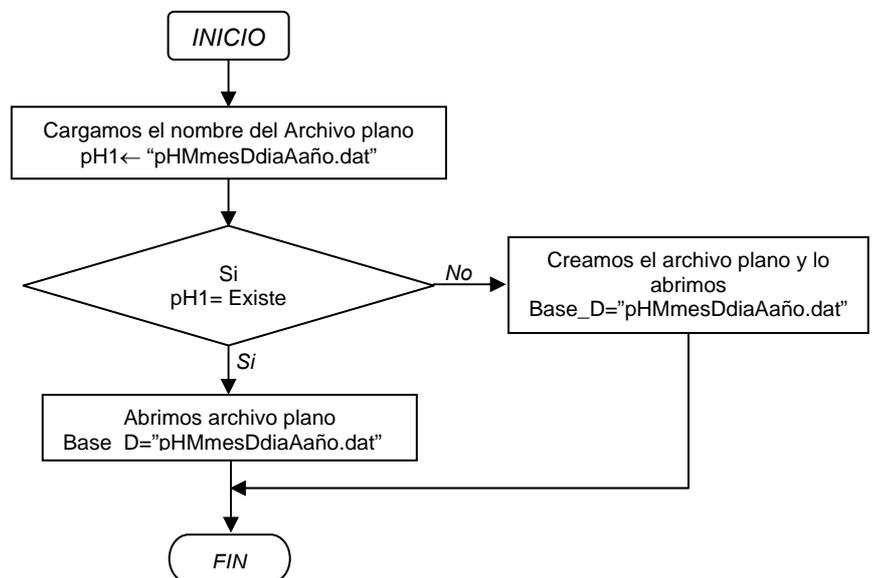
➤ **ABRIR O CREAR ARCHIVO PLANO**

El Software cuenta con una rutina que verifica si el archivo plano existe si esto es verdadero solamente se abre el archivo si no se crea un nuevo archivo de extensión .dat y el nombre tiene las siguientes especificaciones:



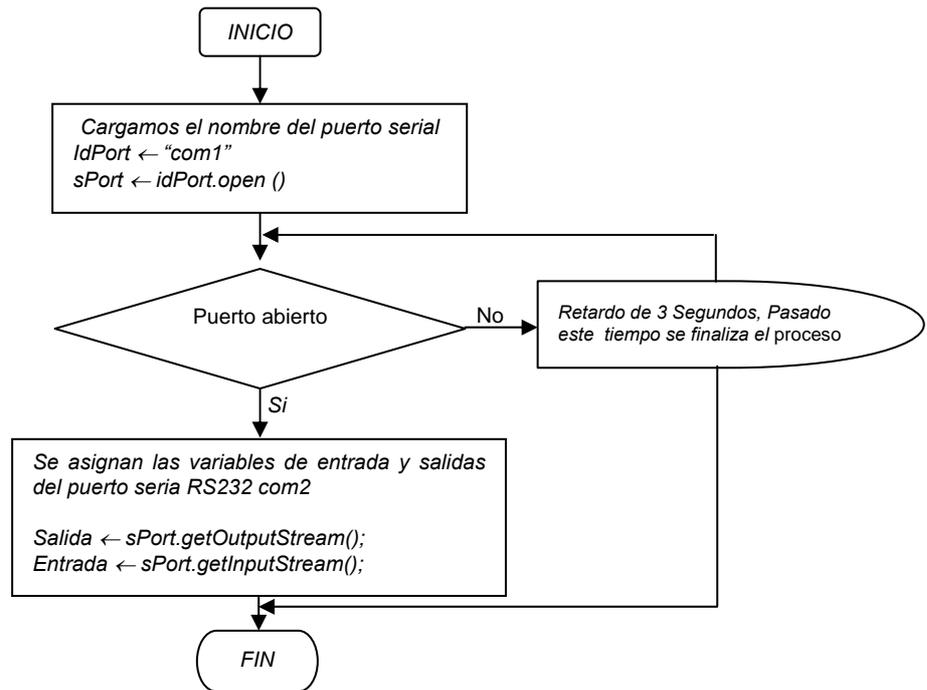
Por tanto el archivo plano correspondiente al primero de mayo del 2005 será:

pHM5D1A2005.dat



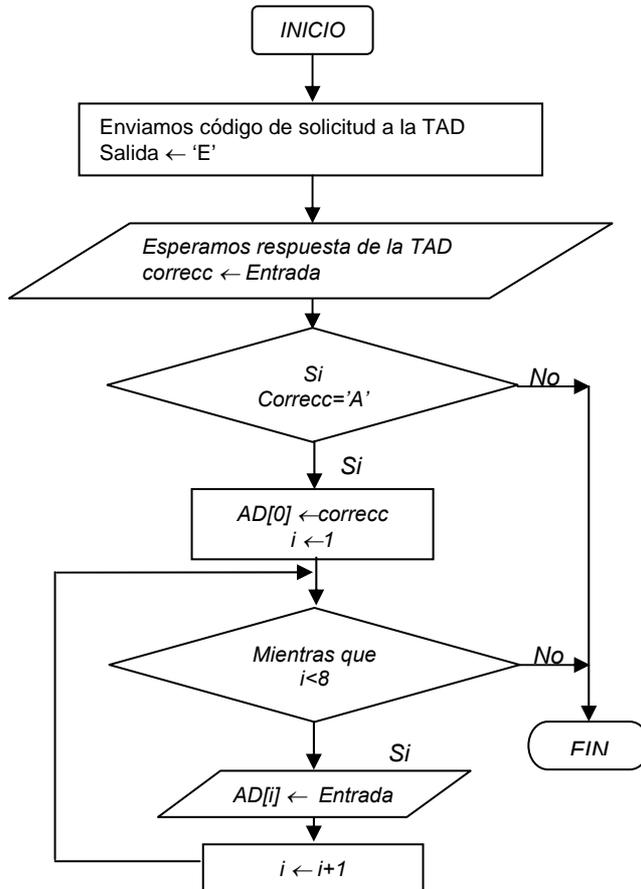
### ➤ ABRIR EL PUERTO SERIAL RS232

Para abrir el puerto primero hay que especificar cual puerto serial es el que vamos a usar en nuestro caso será el COM2. Luego se prosede a abrir y configura el puerto Serie RS232.



### ➤ SOLICITUD DE LOS DATOS ARROJADOS EN LA LECTURA DE LOS CONVERTORES A/D.

Cuando se solicita un dato a la tarjeta hay que enviarle un código para que ella reconozca que es lo que se esta preguntando. Para la solicitud de datos de la conversión análogo a digital se enviá el carácter 'E'. La tarjeta inmediatamente recibe este valor y lo carga en la bandera CPU \_ ENCENDIDA = 'E' con este valor le indica al microcontrolador que envié los datos actuales de la lectura del conversor análogo a digital (A/D).

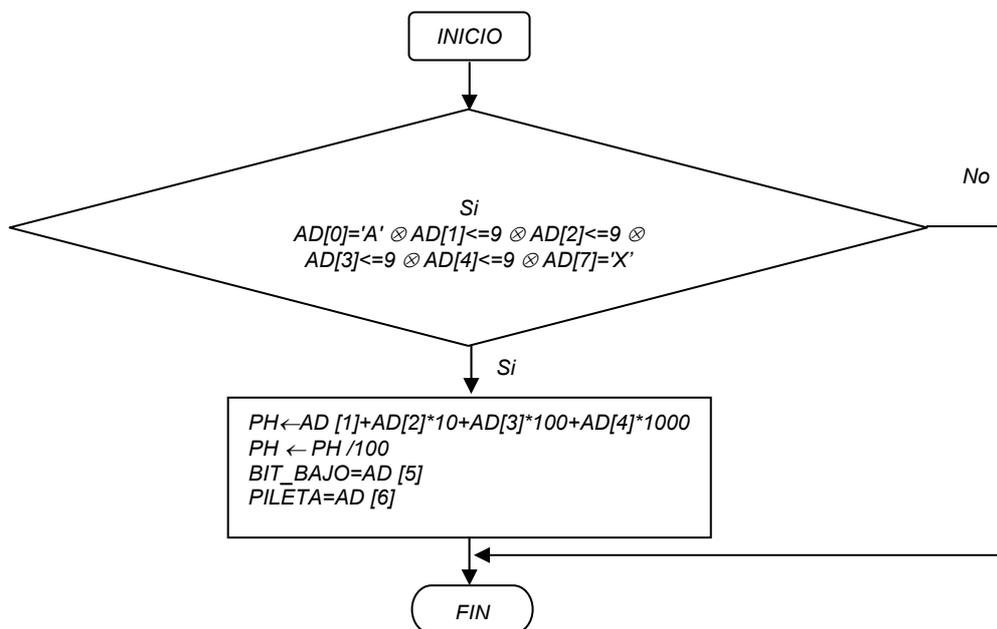


➤ **COMPROBACIÓN DE ERROR Y CORRECCIÓN DE LOS DATOS RECIBIDOS**

El microcontrolador envía una trama compuesta por 8 elementos. Iniciamos con un BYTE de Start que contiene el número 65, le sigue el contenido de la trama y finaliza con un BYTE de Stop que contiene el número 88

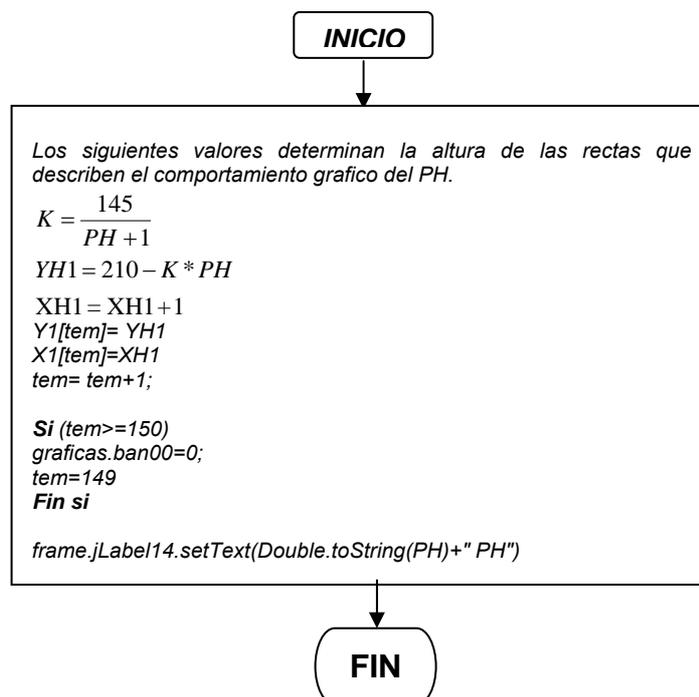
<b>Start</b>	Unidades	Decenas	Centenas	Miles	Estado de las Entradas digitales	Estado de la pileta	<b>Stop</b>
--------------	----------	---------	----------	-------	----------------------------------	---------------------	-------------

Los cuatro registros que se encuentran después del start (65), contiene los datos de la lectura de la conversión A/D, divididos en unidades, decenas, Centenas y miles. Con el propósito de ayudar a comprobar el error, se tiene en cuenta que estos no superan el valor de 9 y por tal razón si en algún momento se recibe un valor mayor a 9 en este campo existe un error y se decide abortar este proceso de lectura para hacer una nueva solicitud.



➤ **VISUALIZACIÓN DE LOS DATOS OBTENIDOS EN LA SOLICITUD DE DATOS EN TIEMPO REAL**

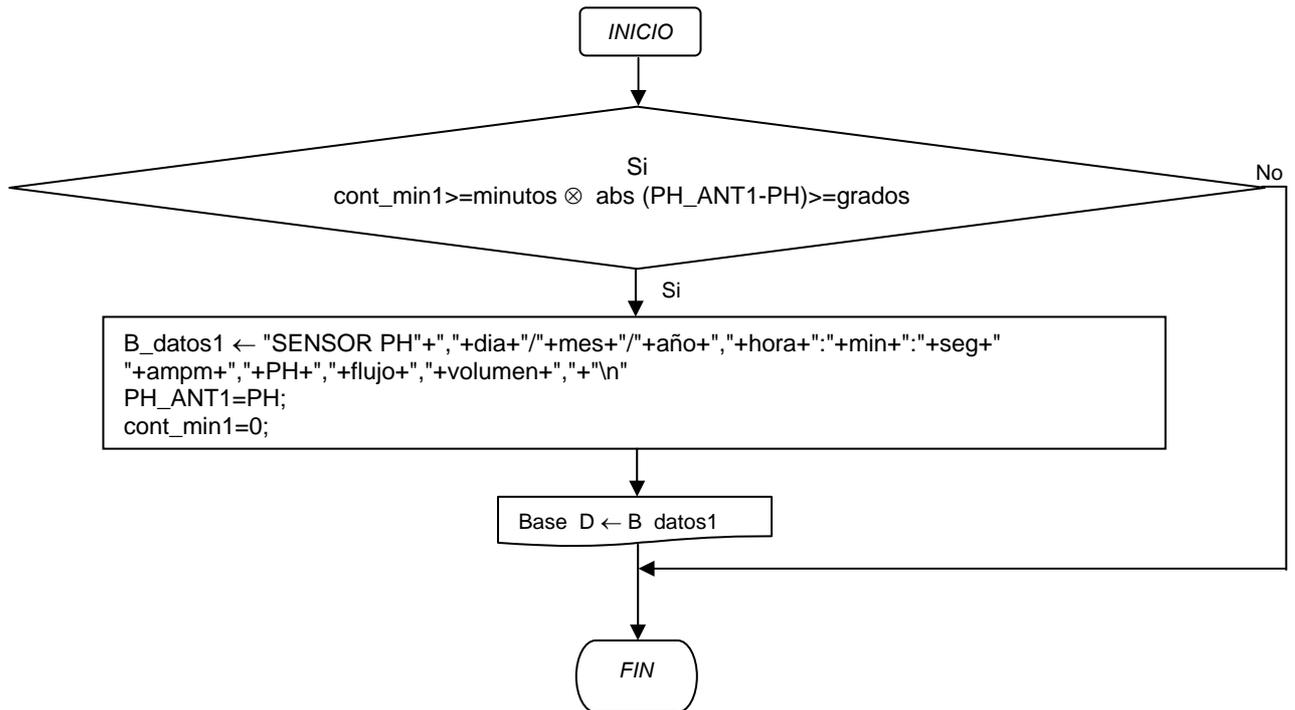
Para la visualización, lo único que se hace es hallar la relación entre el PH y la altura a la cual se dibujara la línea que describe el comportamiento de dicho pH.



➤ **GUARDAR LOS DATOS OBTENIDOS EN LA SOLICITUD DE LECTURA EN TIEMPO REAL**

Para guardar los datos se crea la cadena de caracteres que queremos guardar, separada cada variable que compone la cadena con comas y se finaliza con (/n). La cadena de caracteres se observa a continuación:

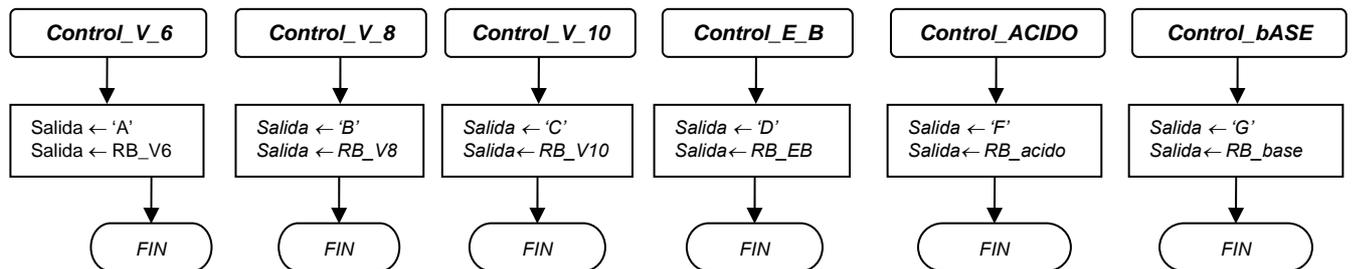
```
"SENSOR PH"+", "+día+"/"+"mes+"/"+"año+", "+hora+": "+min+": "+seg+"
"+ampm+", "+PH+", "+flujo+", "+volumen+", "+\n"
```



➤ **PETICIÓN DE ACTIVACIÓN O DESACTIVACIÓN DE LOS RELAY**

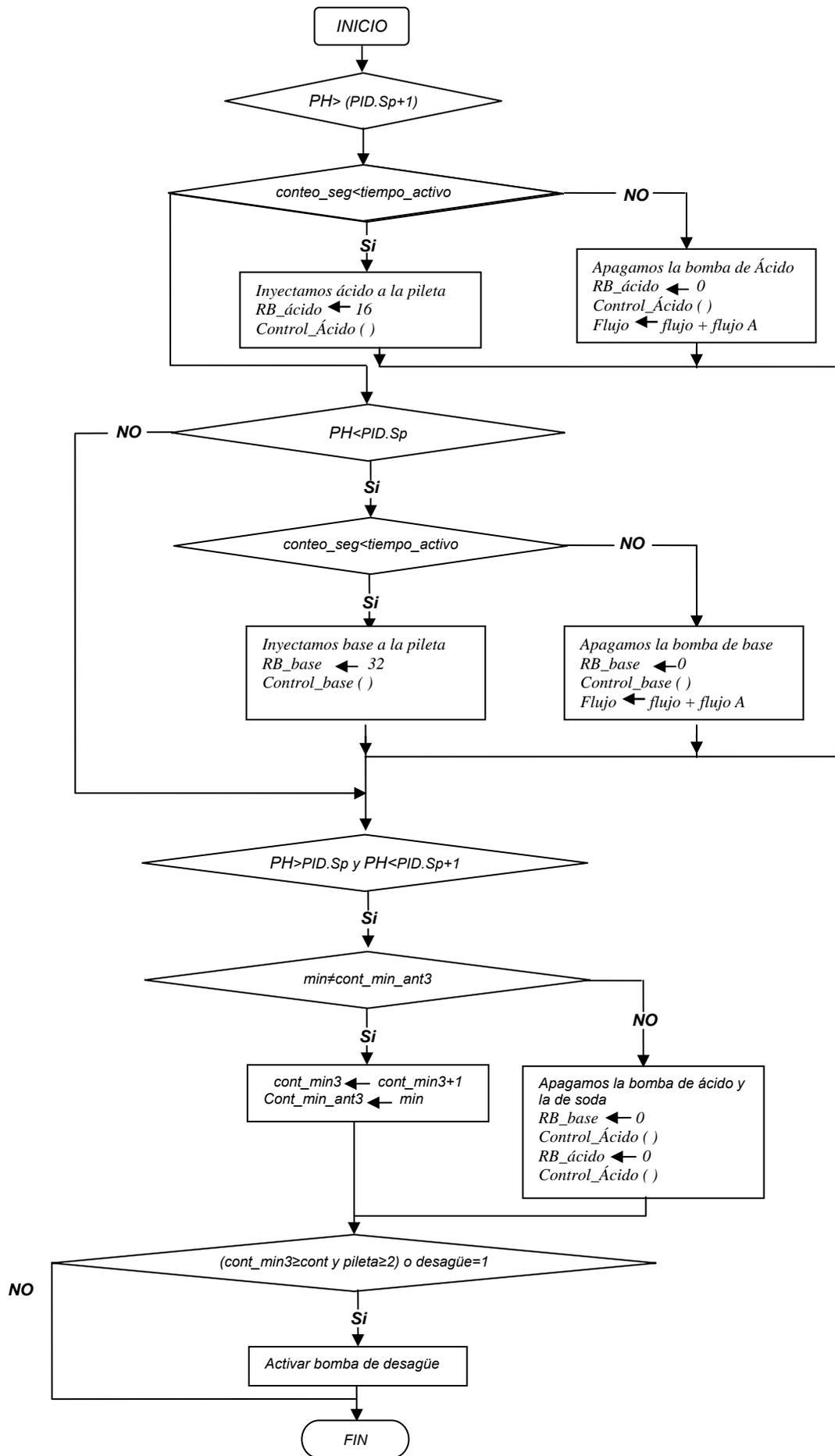
Cuando se desea accionar un relay se debe enviar un BYTE indicando cual relay deseamos manipular y un byte que indique si lo queremos activar o desactivar. Esto se realiza de la siguiente manera.

Relay	Byte indicador	Activa	Desactivar
Válvula de recirculación V6	A	RB_v6=1	RB_v6=0
Válvula de descarga V8	B	RB_v8=2	RB_v8=0
Válvula solenoide V10	C	RB_v10=4	RB_v10=0
Electrobomba EB	D	RB_EB=8	RB_EB=0
Bomba de ácido	F	RB_acido=16	RB_acido=0
Bomba de Base	G	RB_base=32	RB_base=0



## ➤ CONTROL DEL pH UTILIZANDO

Para el control de pH lo que hacemos es suministrar ácido a la pileta en el caso de que el PH este por encima del deseado o base si esta por debajo. La cantidad exacta de ácido que se debe suministrar depende de la medida de pH, Esta cantidad esta establecida en una tabla que fue realizada de acuerdo a la grafica de señal de entrada que se requiere para obtener una medida de pH de 7, dicha grafica se explica en el capitulo 5 del controlador. Los valores de la tabla corresponden a la cantidad de ácido o base que hay que agregar dependiendo del PH actual en la pileta de neutralización. El dato se guarda en la variable **tiempo\_activo** para su posterior manipulación en el sistema de control.

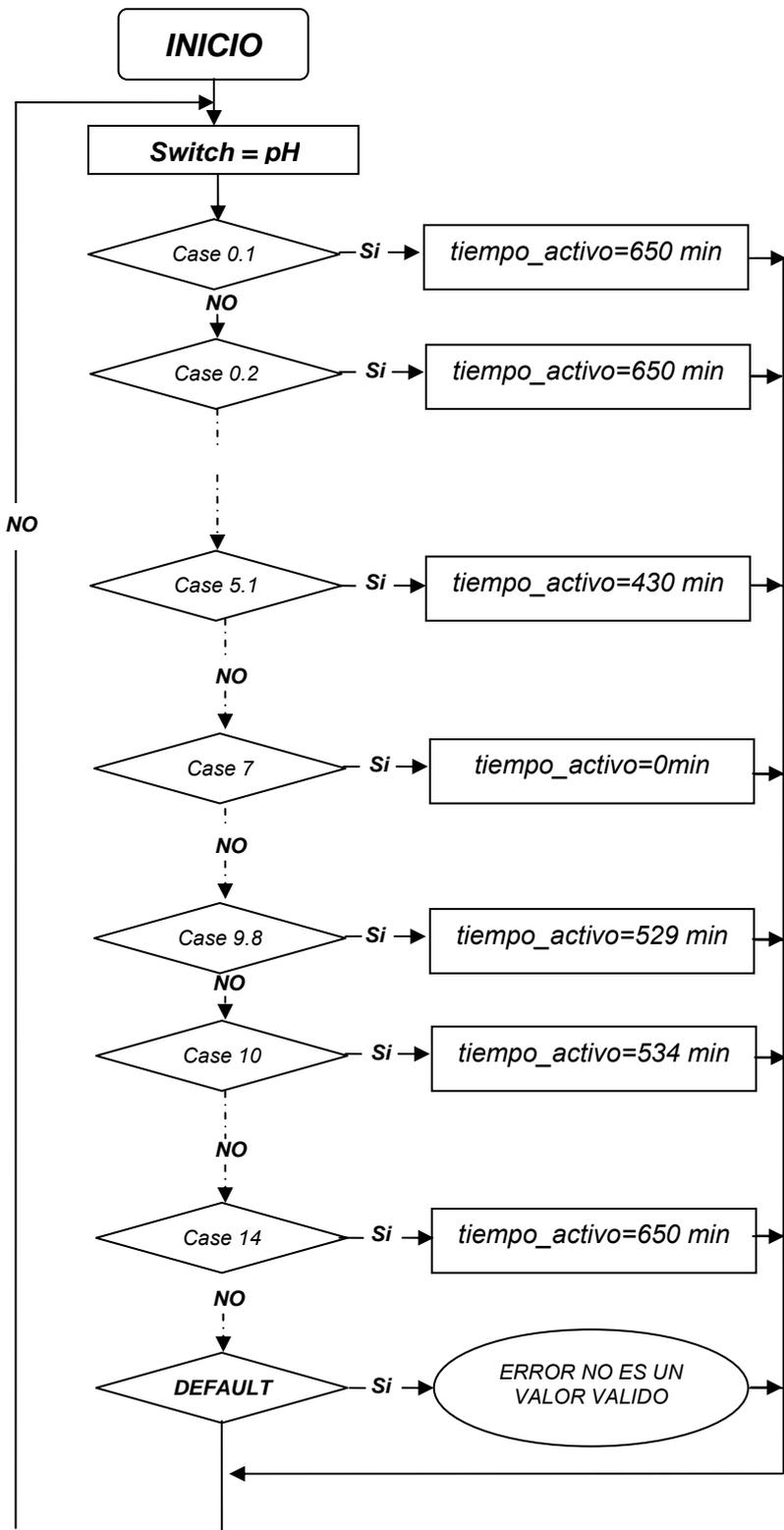


➤ **TABLA DE LA CORRESPONDENCIA ENTRE EL PH Y LA CANTIDAD DE ACIDO O BASE QUE SE LE AGREGA AL AGUA**

La tabla se encuentra en un hilo (Tabla) que trabaja independientemente del flujo del programa principal, el cual constantemente esta leyendo el valor del PH. Y asignando el valor correspondiente a la variable **tiempo\_activo**. Para este propósito se trabajo con la estructura de sentencia switch la cual se trata de una alternativa a la bifurcación **if elseif else** cuando se compara la misma expresión con distintos valores. Su forma general es la siguiente:

```
Switch (expression) {  
case valor 1: sentencia 1; break;  
case valor 2: sentencia 2; break;  
case valor 3: sentencia 3; break;  
.  
.  
.  
case valor n: sentencia n; break;  
  
default: "error por defecto"; }
```

A continuación se muestra el diagrama de flujo que muestra la lógica con que se realice la asignación del tiempo de activación. Para ver la correspondencia entre todos los valores del pH y su respectivo tiempo e activación se observa en el anexo S.



## CONCLUSIONES

En el presente trabajo hemos realizado la aplicación de técnicas y tecnologías modernas, como es el caso del desarrollo de la tarjeta de adquisición de datos a través de microcontroladores, software de visualización utilizando el lenguaje JAVA de programación y técnica de modelamiento difuso que nos permitió ajustar los tiempos de suministro de ácido o soda según sea lo requerido, La técnica de modelamiento seleccionada de acuerdo con los resultados obtenidos y a pruebas experimentales que se comparan con otras técnicas ah resultado ser mas efectiva y sencilla de aplicar para procesos de comportamiento altamente no lineales.

Mediante el método utilizado para el modelamiento se pueden determinar los agrupamientos en los datos experimentales, lo cual permite el cálculo de reglas borrosas y la generación del número de conjuntos posibles en cada antecedente.

Se ha logrado obtener un controlador óptimo teniendo en cuenta los requerimientos y restricciones que tuvimos con los equipos e instrumentación utilizada en el proyecto.

Se muestra las posibilidades que brinda el uso de la lógica difusa. De igual forma queda claro cada uno de los requerimientos de diseño de un controlador difuso para aplicaciones futuras.

La importancia de este trabajo radica en la capacidad de adaptarse a otro proceso diferente el cual se desee controlar el pH, ya que se presentan las bases para realizar tanto el modelamiento como el controlador, de igual forma el hardware y software de adquisición, monitoreo y control del proceso.

Con la puesta en marcha del proyecto la empresa se ahorra tiempo de operación debido a que se realizaba de forma manual que de acuerdo al tiempo obtenido experimentalmente es un proceso largo, de igual forma el suministro de ácido y soda es menor. Los objetivos y las tareas que se plantearon en el anteproyecto fueron cumplidos no al 100% debido a las condiciones anteriormente mencionadas pero si a satisfacción de la empresa.

En este trabajo queda claro cada uno de los factores químicos que intervienen en el proceso de pH y que son muy importantes en la hora de seleccionar la instrumentación y tener en cuenta para aspectos de calibración.

Factores como la temperatura la cual afecta la medidas del pH, las soluciones búfer que se utilizan para la calibración del controlador o transmisor de pH y la curva de comportamiento de pH. Se puede apreciar que para cada tipo de proceso que se desea controlar el pH puede existir curvas de comportamiento diferente de acuerdo a la clasificación ya sea ácidos (fuertes y débiles) o bases (fuertes y débiles) este aspecto es determinante para obtener un mayor éxito en el diseño del controlador.

Queda clara la capacidad que tiene el microcontrolador PIC16F877 para este tipo de utilidades, la disponibilidad de entradas y salidas análogas, como digitales de igual forma el puerto de comunicación serial RS232 y lo más importante el bajo costo.

Un aspecto positivo de la realización del proyecto fue el bajo costo en la consecución de los materiales para la tarjeta de adquisición de datos y la realización del software de monitoreo y control.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] McMillan G. K., "*pH Measurement and Control*". Instrument Society of America. North Carolina: Segunda edición, 1994.
- [2] Gulley N. y Jang J. R., "*Fuzzy Logic Toolbox User's Guide*", The Math Works, (1995).
- [3] Tres palacio F. y Vargas G., "Aplicación de las técnicas modernas de control en la regulación del pH", Tesis, Tecnológica de Bolívar 1998.
- [4] Maloney, T. Electrónica Industrial Moderna. 3<sup>a</sup> Ed. México: Prentice may, 1997.
- [5] García, Antonio. Química teorías y problemas. México: Alfa omega, 2000.
- [6] Creus, Antonio. Instrumentación Industrial. 6<sup>a</sup> Ed. México: Alfa omega Grupo editor S.A. de C.V.
- [7] Trotta A. y Barolo M., "*Dynamic Modeling and Control of pH*",  
<http://hp9.irc.na.cnr.it/GNIC/papers/trotta/trotta/napo3.html>.
- [8] Choy J. Y., Pandit H. G. y Rhinehart R. R., "*A Process Simulator for pH Control Studies*". *Computer chem. Engng*, vol 19, No. 5, pag. 527-539, (1995).
- [9] Riggs J. B. y Rhinehart R. R., "*Method for pH Control*". U. S. Patent 4,940,551, July, 1990.

- [10] Tadeo F., Holohan A., Vega P., *I1-Optimal Regulation of a pH Control Plant*, Universidad de Valladolid, 2002
- [11] Qin S. J. y Borders G., "*A Multiregion fuzzy Logic Controller for Nonlinear Process Control*", IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 2, No. 1, (February 1994).
- [12] Jantzen J., "*Fuzzy Control*". *Technical University of Denmark: Electric Power Eng. Dept.*, (rev. 4, 1994).
- [13] Sala, A. Validación y Aproximación Funcional en Sistemas de Control Basados en Lógica Borrosa. Universidad Politécnica de Valencia. Tesis Doctoral, 1998.
- [14] Krejei S., Kaspar J., Fuzzy control of pH processes, University of Pardubice, 2001.
- [15] Varela Olivas J., La lógica borrosa y sus aplicaciones, universidad de castilla, 2001.
- [16] Universidad Pontificia de Salamanca en Madrid, ESQUEMA DE LOGICA BORROSA, Diciembre 2001.
- [17] Peter Bauer y Stephan Nouak, Roman Winkler, Breve curso de Lógica borrosa y control difuso.
- [18] Jan Jantzen, DESIGN OF FUZZY CONTROLLERS, Technical University of Denmark, Department of Automation, Bldg 326, DK-2800 Lyngby, DENMARK. Tech. Report no 98-E 864 (design), 19 Aug 1998.

- [19] *J. Galindo Gómez*, conjuntos y sistemas difusos, Departamento de Lenguajes y Ciencias de la Computación Universidad de Málaga.
- [21] Antonio P. Martins, Adriano S. CONTRIBUTION OF FUZZY LOGIC TO CONTROL AN INDUSTRIAL PROCESS. *Carvalho. Faculty of Engineering of the University of Porto Institute of Systems and Robotics*. IEEE 1997
- [22] Jens Alex, Ulrich Jumar and Ralf Tschepetzki. A FUZZY CONTROL APPLICATION TO WASTE WATER TREATMENT PLANTS. IEEE 1994.
- [23] Leonid Reznik, fuzzy controllers, Victoria University of technology, Melbourne Australia, first published 1977.
- [24] Dora María Calderón Nepomuceno, *Control Difuso Adaptable de un Servomecanismo No Lineal*, CENTRO de INVESTIGACIÓN y de ESTUDIOS AVANZADOS del IPN, Noviembre de 2003
- [25] Reza Langari. PAST,PRESENT AND FUTURE OF FUZZY CONTROL : A CASE FOR APPLICATION OF FUZZY LOGIC IN HIERARCHICAL CONTROL.IEEE 1999.
- [26] Stephen Chiu. *USING FUZZY LOGIC IN CONTROLAPPLICATIONS: BEYOND FUZZY PID CONTROL*. IEEE Control Systems.

Web sites:

[www.ieee.org](http://www.ieee.org)

IEEE Transaction on Fuzzy Systems

IEEE Transaction on Automatic Control

IEEE Transaction on Control Systems Technology

IEE Control Theory and Applications

[http://www.fuzzytech.com/e/e\\_a\\_dek.html](http://www.fuzzytech.com/e/e_a_dek.html) : Aplicaciones varias.

<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA259215> : Artículo que comprara técnicas de control convencional con Fuzzy.

<http://www.manufacturing.net/ctl/article/CA372359> Temperatura PID Vs Fuzzy

ANEXO A. PROGRAMA DE MODELAMIENTO DEL CONTROLADOR  
EMPLEADO EN MATLAB.

ANEXO B. DATOS TÉCNICOS DE LA BOMBA PRINCIPAL.

ANEXO C. DATOS TÉCNICOS DE LAS BOMBAS DOSIFICADORAS DE  
ÁCIDO Y SODA.

ANEXO D. DATOS TÉCNICOS DE LAS VÁLVULAS ELÉCTRICAS DE  
RECIRCULACIÓN Y DESCARGA.

ANEXO E. TRANSMISOR DE NIVEL TIPO RADAR SERIE ROSEMOUNT  
5600.

ANEXO F. DATOS TÉCNICOS DEL PH-METRO.

ANEXO G. HOJA CARACTERÍSTICA DEL MICROCONTROLADOR 16F774.

ANEXO H. HOJA CARACTERÍSTICA DEL AMPLIFICADOR OPERACIONAL  
LF353.

ANEXO I. HOJA CARACTERÍSTICA DEL TRANSISTOR NPN 2N3904.

ANEXO J. HOJA CARACTERÍSTICA DEL MAX-232.

ANEXO K. HOJA CARACTERÍSTICA DEL MAX-485.

ANEXO L. HOJA CARACTERÍSTICA DEL TRANSISTOR NPN TIP120

ANEXO M. HOJA CARACTERÍSTICA DEL REGULADOR DE VOLTAJE SERIE  
UA7800.

ANEXO N. HOJA CARACTERÍSTICA DEL REGULADOR DE VOLTAJE SERIE  
MC79L00.

ANEXO O. DIAGRAMA ELÉCTRICO DE CONTROL.

ANEXO P. CARACTERÍSTICA DE LOS ELEMENTOS DE CONTROL.

ANEXO Q. PROGRAMA DEL MICROCONTROLADOR

ANEXO R. PROGRAMA DEL PC EN JAVA.

ANEXO S. TABLA DE CORRESPONDENCIA DE VALORES DE TIEMPO VS.  
PH.

ANEXO T. DIAGRAMA OPERATIVO DE LA PLANTA DE TRATAMIENTOS DE  
AGUAS RESIDUALES.

ANEXO U. DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DEL SISTEMA DE ÁCIDO Y SODA.

ANEXO V. CIRCUITO ESQUEMÁTICO E IMPRESO DE LA TARJETA DE  
ADQUISICIÓN DE DATOS.

ANEXO X. MANUAL OPERATIVO DE LA PILETA DE TRATAMIENTO DE  
AGUAS RESIDUALES U: 1, 2 Y 3.