



**EDUCACIÓN**

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

“2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata”

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

OPCIÓN I.- TESIS

**TRABAJO PROFESIONAL**

**“DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE PH  
PARA EFICIENTAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGAS  
EN BIOREACTORES”.**

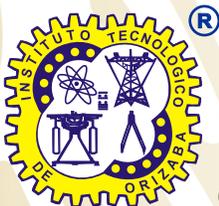
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:  
**MAESTRO EN INGENIERÍA  
ELECTRÓNICA**

PRESENTA:

*Ing. Luis Alberto Báez Rodríguez*

DIRECTOR DE TESIS:

*Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin*



ORIZABA, VERACRUZ, MÉXICO.

OCTUBRE 2019



# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



## TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA: 09/10/2019  
DEPENDENCIA: POSGRADO  
ASUNTO: Autorización de Impresión  
OPCIÓN: I

**C. LUIS ALBERTO BAEZ RODRIGUEZ**  
CANDIDATO A GRADO DE MAESTRO EN:  
**INGENIERIA ELECTRONICA**

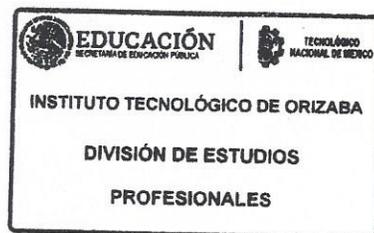
De acuerdo con el Reglamento de Titulación vigente de los Centros de Enseñanza Técnica Superior, dependiente de la Dirección General de Institutos Tecnológicos de la Secretaría de Educación Pública y habiendo cumplido con todas las indicaciones que la Comisión Revisora le hizo respecto a su Trabajo Profesional titulado:

**"DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE PH PARA EFICIENTAR LA PRODUCCION DE BIOGAS EN BIOREACTORES".**

Comunico a Usted que este Departamento concede su autorización para que proceda a la impresión del mismo.

A T E N T A M E N T E

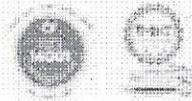
**MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ**  
JEFE DE LA DIV. DE ESTUDIOS DE POSGRADO



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx





# EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

Instituto Tecnológico de Orizaba

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"

FECHA : 19/09/2019

ASUNTO: Revisión de Trabajo Escrito

**C. MARIO LEONCIO ARRIJOJA RODRIGUEZ**  
JEFE DE LA DIVISION DE ESTUDIOS  
DE POSGRADO E INVESTIGACION.  
P R E S E N T E

Los que suscriben, miembros del jurado, han realizado la revisión de la Tesis del (la) C. :

**LUIS ALBERTO BAEZ RODRIGUEZ**

la cual lleva el título de:

**"DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE CONTROL DE PH PARA EFICIENTAR LA PRODUCCION DE BIOGAS EN BIOREACTORES".**

Y concluyen que se acepta.

A T E N T A M E N T E

PRESIDENTE : DR. JOSE PASTOR RODRIGUEZ JARQUIN

SECRETARIO : DR. ALBINO MARTINEZ SIBAJA

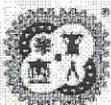
VOCAL : M.C. BLANCA ESTELA GONZALEZ SANCHEZ

VOCAL SUP. : DR. GERARDO AGUILA RODRIGUEZ

\_\_\_\_\_  
FIRMA  
\_\_\_\_\_  
FIRMA  
\_\_\_\_\_  
FIRMA  
\_\_\_\_\_  
FIRMA

EGRESADO(A) DE LA MAESTRIA EN INGENIERIA ELECTRONICA

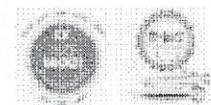
OPCION: I **Tesis**



Avenida Oriente 9 Núm. 852, Colonia Emiliano Zapata, C.P. 94320 Orizaba, Veracruz, México

Tel. 01 (272) 7 24 40 96, Fax. 01 (272) 7 25 17 28 e-mail: orizaba@itorizaba.edu.mx

www.orizaba.tecnm.mx



## **Agradecimientos.**

Gracias a dios, el cual se ve reflejado en cada una de las personas que me brindan su apoyo incondicional: familiares, maestros, amigos y compañeros en la maestría de ingeniería electrónica.

A mi esposa Jasmin por haber confiado una y otra vez en mí, sobre todo al inicio de nuestro matrimonio y cursando el propedéutico para el ingreso de esta maestría, por el cual en ocasiones salía de casa desde las 6 de la mañana y regresaba hasta las 10 de la noche, gracias mi amor por tu apoyo y comprensión para lograr este anhelado grado de estudio de maestría en ingeniería electrónica.

A mis padres Eloy y Ángeles los cuales siempre me han impulsado a continuar con mis estudios, ustedes siempre me brindan lo mejor para transmitirlo a la sociedad como hijo, como docente y ahora como maestro en ingeniería electrónica, mil gracias por educarme de esa forma. Los amo papás.

A mi abuela Ignacia Guerra, a mis hermanas Adriana y Sulli Báez, son las mujeres que más admiro por su fortaleza, dedicación y trabajo, ustedes son un pilar importante en mi vida, gracias por entenderme e impulsarme en cursar este estudio de posgrado.

Mi respeto y agradecimiento a mi asesor Dr. José Pastor Rodríguez Jarquin por haber confiado en mí para la realización de este proyecto de investigación, gracias asesor, deseo que esta amistad quede para el resto de la vida.

Gracias a los M.C. Oscar Marín y M.C. Christian Chávez por el trabajo en equipo que realizamos para la operación del Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo Paralelo, mil gracias por el intercambio de conocimientos.

Gracias a CONACYT por el apoyo a cada proyecto de la maestría de ingeniería electrónica de nuestro querido Instituto Tecnológico de Orizaba. En especial por el apoyo como estudiante con la beca CONACYT-SENER, para realizar el sistema automatizado de medición de pH, muchas gracias.

A cada uno de los doctores del programa de maestría en ingeniería electrónica, a la M.C Blanca Estela González Sánchez, por el trabajo que desempeña para apoyarnos como estudiantes de MIE, muchas gracias.

## CONTENIDO

Lista de Figuras.....	7
Lista de tablas.....	11
RESUMEN .....	12
ABSTRACT .....	13
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....	14
1.1 INTRODUCCIÓN .....	14
1.2 PROBLEMÁTICA .....	15
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.4 HIPÓTESIS .....	17
1.5 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.7 METODOLOGÍA.....	19
1.7.1 Requerimientos para la medición de pH en el RLFIAP .....	20
1.7.1.1 Sensor para la medición de pH .....	23
1.7.1.2 Acondicionamiento de señal del sensor de pH.....	23
1.7.1.3 Microcontrolador .....	24
1.7.1.4 Compensación de temperatura .....	25
1.7.1.5 Módulos de memoria micro SD y módulo de reloj. ....	26
1.7.1.6 Interfaz hombre máquina para la medición y control de pH.....	27
1.7.1.7 Instrumentación para el sistema automatización de medición pH. ....	29
1.7.1.8 Bombas peristálticas .....	29
1.7.1.9 Soluciones tampón o buffers de calibración.....	30
1.7.1.10 Secado del sensor.....	30
1.7.1.11 Tanque para la toma de muestra.....	31
1.7.1.12 Las tuberías .....	31
1.7.1.13 Válvula de entrada .....	32
1.7.1.14 Válvula de salida.....	32
1.7.1.15 Fuentes de alimentación eléctrica. ....	33
1.7.1.16 Ubicación de elementos del sistema en gabinete .....	34
1.8 ESTADO DEL ARTE .....	36
1.8.1 La Biomasa Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030 .....	36

1.8.2 Generalidades de la instrumentación y automatización .....	37
1.8.2.1 Sistemas automatizados.....	38
1.8.2.2 El término sistema.....	39
1.8.2.3 El sistema de control .....	39
1.8.2.4 Elementos en un sistema en lazo abierto .....	40
1.8.2.5 Elementos básicos de un sistema en lazo cerrado.....	41
1.8.2.6 Sensor.....	42
1.8.2.7 Los transductores.....	43
1.8.2.8 El elemento final .....	44
1.8.2.9 Interfaz Hombre-Máquina (HMI) .....	44
1.8.3 Generalidades de pH.....	45
1.8.3.1 Ácidos y bases .....	45
1.8.3.2 pH.....	45
1.8.3.3 La autoionización .....	46
1.8.4 Sensores para la medición de pH.....	48
1.8.4.1 Electrodo de vidrio .....	48
1.8.4.2 Electrodo ISFET .....	49
1.8.4.3 Sensores de fibra óptica.....	50
1.8.4.4 Partes del sensor de pH electrodo de vidrio .....	51
1.8.4.5 Efectos de la temperatura en la medida de pH .....	52
1.8.5 Digestión anaerobia .....	56
1.8.5.1 La Hidrolisis .....	57
1.8.5.2 Acidogénesis.....	57
1.8.5.3 Acetogénesis .....	58
1.8.5.4 Metanogénesis.....	59
1.8.5.5 Sistemas anaerobios .....	59
1.8.6 Parámetros de control en la digestión anaerobia.....	60
1.8.6.1 Materia prima .....	60
1.8.6.2 Pretratamiento.....	61
1.8.6.3 Temperatura .....	61
1.8.6.4 Sólidos totales y sólidos volátiles.....	61
1.8.6.5 El pH.....	62

1.8.6.6 Ácidos Grasos Volátiles .....	62
1.8.6.7 Tiempo de Retención Hidráulico y Carga Volumétrica Aplicada.....	63
1.8.6.8 Nutrientes.....	63
1.8.6.9 Inhibición .....	63
1.8.7 El Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo .....	64
1.8.8 Biogás.....	65
1.9 ESTADO DEL CAMPO .....	66
1.9.1 Medidores de mesa de pH .....	66
1.9.2 Medidores de pH portátiles .....	70
1.9.3 Sondas o Electrodo de pH.....	73
1.9.4 TRANSMISORES DE pH .....	76
1.9.5 Análisis comparativo de trabajos relacionados.....	81
CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SENSOR DE PH .....	85
2.1 Procedimiento para la medición de pH.....	85
2.2 Caracterización del sensor de pH con el amplificador de instrumentación.....	88
2.3 Diseño del sistema electrónico para el sistema de medición de pH.....	91
2.3.1 Sensores para el sistema automatizado de medición de pH .....	91
2.3.1.1 El sensor de pH.....	92
2.3.1.2 Acondicionamiento de señal del sensor de pH con el Adapter 1130 .....	94
2.3.2 Programación del sensor de pH en el microcontrolador Arduino mega 2560 .....	95
2.3.2.1 Programación de la fórmula de pH sin corrección por temperatura.....	96
2.3.2.2 Programación de la fórmula de pH con corrección por temperatura CAT .....	99
2.3.2.3 Conexión del sensor de temperatura DS18B20 .....	102
2.3.3 Integración de los módulos electrónicos al microcontrolador ATmega2560 .....	105
2.3.3.1 Visualización de las variable pH y temperatura .....	105
2.3.3.2 Módulo de reloj DS3231 .....	106
2.3.3.3 Módulo de Memoria SD .....	108
2.3.4 Etapa de control y potencia del sistema automatizado de la medición de pH.....	109
2.3.4.1 Conexión de las salidas digitales .....	109
2.3.4.2 Conexiones de los elementos finales de control.....	110
2.2.3 Shield para módulos electrónicos y Arduino mega 2560.....	112
CAPÍTULO III. Construcción del sistema automatizado de medición de pH .....	115

3.2 Diseño y construcción del gabinete que contendrá la instrumentación .....	116
3.2.1 Diseño en software CAD del sistema hidráulico. ....	116
3.2.3 Diseño y construcción del tanque de muestreo .....	119
3.2.3 Válvula para la entrada de la muestra .....	119
3.2.4 Bombas peristálticas .....	120
3.2.5 Tuberías y Accesorios para el sistema automatizado de medición de pH .....	121
CAPÍTULO IV. Desarrollo de la HMI para el sistema automatizado de medición de pH .....	126
4.1 Generalidades de la pantalla HMI Nextion .....	126
4.1.1 Área de trabajo del software Nextion.....	127
4.1.2 Creación de un programa en el editor de Nextion.....	128
4.1.3 Creación de fuente.....	128
4.1.3 Agregar una imagen .....	129
4.1.4 Agregar componentes al área de trabajo .....	130
4.1.4 Cargar un archivo TFT a la pantalla Nextion mediante memoria micro SD .....	132
4.1.5 Conexión de la pantalla HMI con el microcontrolador AT mega 2560 .....	133
4.2 Programación de las entradas y salidas digitales.....	133
4.2 Programación de la interfaz del sistema automatizado de medición de pH .....	136
4.2.1 Programación de la activación de las válvulas de entrada y salida.....	137
4.2.2 Activación de la bomba peristáltica para la limpieza del tanque de muestreo .....	138
4.2.3 Programación de los ventiladores y agitador.....	139
4.3 Pantalla para la calibración pH 4 y pH 10.....	140
4.3 Resultados.....	142
CONCLUSIONES .....	146
TRABAJO FUTURO .....	147
REFERENCIAS.....	148

## Lista de Figuras

Figura 1.1 Calibración del sensor de pH.....	20
Figura 1.2 RLFIAP en plantas piloto del ITO. ....	20
Figura 1.3 Toma de muestra del RLFIAP.....	21
Figura 1.4 Medición de la muestra con pHmetro Oakton.....	21
Figura 1.5 Metodología para la creación del proyecto. ....	22
Figura 1.6 Sensor de pH PC2121-5M Phidgets.....	23
Figura 1.7 Sensor de pH, Adapter 1130 y transmisor Phidgets.....	24
Figura 1.8 Microcontrolador Arduino ATmega2560. ....	25
Figura 1.9 Sensor DS18B20.....	26
Figura 1.10 Lector de micro SD. ....	27
Figura 1.11 Módulo de reloj DS3231.....	27
Figura 1.12 Acondicionamiento para la medición de pH. ....	28
Figura 1.13 Pantalla Nextion HMI. ....	29
Figura 1.14 Soluciones buffer o tampón .....	30
Figura 1.15 Ventilador para computadora.....	31
Figura 1.16 Base para el piso del taque de muestreo. ....	31
Figura 1.17 Electroválvula solenoide 12v, 1/2” .....	32
Figura 1.18 Válvula de bola motorizada ½” .....	33
Figura 1.19 Fuentes de alimentación para el sistema.....	33
Figura 1.20 Vista frontal del sistema automatizado de medición de pH. ....	35
Figura 1.21 Capacidad instalada y generación bruta de electricidad con bagazo de caña, 2005-2015(MW, GWh). ....	36
Figura 1.22 Capacidad efectiva instalada y generación bruta de energía eléctrica a partir de biogás, 2005 – 2015 (MW, GWh). ....	37
Figura 1.23 Hardware de comunicación PLC, PC y HMI .....	39
Figura 1.24 Sistemas a) una estación de generación de energía b) un motor eléctrico. ....	39
Figura 1.25 Sistema de calefacción central .....	40
Figura 1.26 Subsistemas en un sistema de lazo abierto .....	40
Figura 1.27 Subsistemas en un sistema de control en lazo cerrado. ....	42
Figura 1.28 Sensores y elementos primarios. ....	43
Figura 1.29 Transmisores. ....	43

Figura 1.30 Elemento final de control.....	44
Figura 1.31 Scada de la Célula de Fabricación Flexible MPS2000 de Festo. ....	44
Figura 1.32 Escala de colores de pH y logarítmica. ....	46
Figura 1.33 Funcionamiento del electrodo de vidrio. ....	49
Figura 1.34 Funcionamiento Electrodo ISFET. ....	50
Figura 1.35 Diagrama de bloques del sistema para medir absorbancia óptica. ....	50
Figura 1.36 Electrodo y potenciales en la medida del pH .....	51
Figura 1.37 Pendiente en mV por unidad de pH según la temperatura. ....	52
Figura 1.38 Error en la medida de pH sin compensación de temperatura entre 0 y 100 °C.....	54
Figura 1.39 Respuesta la medición de pH con y sin agitación.....	55
Figura 1.40 Etapas en el proceso de digestión anaerobia.....	56
Figura 1.41 Molienda de materia prima para la etapa de Hidrólisis.....	57
Figura 1.42 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo. ....	65
Figura 2.1 pHmetro de mesa OAKTON 700.....	85
Figura 2.2 Calibración con tampón pH 4. ....	86
Figura 2.3 Limpieza del sensor de pH con agua destilada.....	86
Figura 2.4 Electrodo en pH 4.00.....	87
Figura 2.5 Medición de pH de una muestra del reactor. ....	88
Figura 2.6 Diagrama del amplificador de instrumentación AD620.....	88
Figura 2.7 Conexiones del amplificador de instrumentación y sonda de pH.....	89
Figura 2.8 Conexión del sensor de pH al amplificador de instrumentación AD620. ....	90
Figura 2.9 Simulación de Voltaje con AD620. ....	90
Figura 2.10 Diagrama bloques de los componentes eléctricos y electrónicos. ....	91
Figura 2.11 Sensor PC2121-5M pH BNC.....	92
Figura 2.12 Módulo Adapter 1130 . ....	94
Figura 2.13 Cable Molex para el Adapter 1130.....	95
Figura 2.14 Conexión del sensor de pH, Adapter 1130 y tarjeta de interfaz USB.....	96
Figura 2.15 Diagrama de programación para el sensor de pH.....	97
Figura 2.16 Conexión del Adapter 1130 y Arduino mega 2560. ....	98
Figura 2.17 Medición de la solución tampón 6.86. ....	98
Figura 2.18 Medición de la solución tampón 6.86.....	99

Figura 2.19 Valores con solución tapón pH 8.86.....	100
Figura 2.20 Mediciones efectuadas con solución tapón pH 9.7 .....	100
Figura 2.21 Limpieza del sensor de pH con agua destilada.....	101
Figura 2.22 Sensor de pH con solución de almacenamiento. ....	101
Figura 2.23 Mediciones de temperatura con el LM35 y pH.....	102
Figura 2.24 Sensor de temperatura DS18B20 . ....	103
Figura 2.25 Conexiones del sensor DS18B20 y microcontrolador. ....	103
Figura 2.26 Mediciones de temperatura y pH. ....	104
Figura 2.27 Conexión del 1130 con fuente externa. ....	105
Figura 2.28 Conexión de la pantalla LCD 4X16.....	105
Figura 2.29 Módulo de reloj en tiempo real DS3231. ....	106
Figura 2.30 Conexiones del módulo de reloj DS3231 y Arduino mega 2560.....	107
Figura 2.31 Conexiones del módulo de memoria micro SD con Arduino mega 2560. ....	109
Figura 2.32 Conexiones digitales para la activación de los elementos finales.....	110
Figura 2.33 Juego de 8 relevadores con entrada 5 VCD.....	110
Figura 2.34 Conexión de las fuentes de voltaje para los elementos finales de control.....	111
Figura 2.35 Conexionado de sensores y módulos en Arduino mega 2560.....	112
Figura 2.36 Conexiones en Multisim para la shield Arduino mega 2560.....	113
Figura 2.37 PCB para la shield de Arduino mega 2560. ....	113
Figura 2.38 Placa para los componentes electrónicos del sistema.....	114
Figura 3. 1 Esquema del sistema automatizado de medición de pH. ....	116
Figura 3.2 Dibujo en 3D del gabinete metálico.....	116
Figura 3.3 Vista de los tanques ubicados en el gabinete. ....	117
Figura 3. 4 Orificios rectangulares en la parte frontal del gabinete. ....	118
Figura 3.5 Orificios en la parte trasera del gabinete metálico.....	118
Figura 3. 6 Piso para el taque de muestreo. ....	119
Figura 3. 7 Electroválvula Válvula Agua ½ Solenoide 12 V.....	120
Figura 3. 8 Bomba peristáltica 12 V.....	121
Figura 3.9 Tubería de PVC. ....	122
Figura 3. 10 Codo a 90 grados.....	122
Figura 3.11 Manguera FESTO poliuretano azul 4x2.5 mm.....	123

Figura 3.12 Montaje de tanque de muestreo y ventiladores. ....	123
Figura 3.13 Montaje de bombas peristálticas en el gabinete. ....	124
Figura 3. 14 Instalación de la electroválvula solenoide. ....	124
Figura 3.15 Sistema automatizado de medición de pH. ....	125
Figura 4.1 Software o editor de Nextion. ....	127
Figura 4 2 Selección del modelo de pantalla Nextion. ....	128
Figura 4.3 Ventana del generador de fuente. ....	129
Figura 4.4 Ventana picture. ....	129
Figura 4.5 Componentes botón y texto en el área de trabajo. ....	130
Figura 4. 6 Atributos para la programación del componente. ....	130
Figura 4. 7 Selección de enviar componente. ....	131
Figura 4.8 Carpeta bianyi. ....	131
Figura 4.9 Parte trasera de la pantalla Nextion. ....	132
Figura 4 10 Alimentación eléctrica pantalla Nextion. ....	133
Figura 4.11 Conexión de microcontrolador y pantalla Nextion. ....	133
Figura 4.12 Modificación del archivo NexConfig. ....	134
Figura 4.13 Botones entradas y salidas digitales. ....	136
Figura 4 14 Pantalla HMI principal para uso manual o automático. ....	136
Figura 4.15 HMI configuración del tiempo para válvula de salida. ....	137
Figura 4.16 HMI configuración del tiempo para válvula de entrada. ....	138
Figura 4 17 HMI configuración del tiempo para válvula de entrada. ....	139
Figura 4.18 HMI activación y apagado de ventiladores. ....	139
Figura 4.19 HMI opciones para operación manual. ....	140
Figura 4.20 HMI del sistema automatizado de medición de pH. ....	142
Figura 4.21 Lectura de las mediciones de pH en el RLFAP. ....	143
Figura 4.22 Gráfica de los pH en el RLFAP de febrero a mayo 2019. ....	144
Figura 4 23 Medición de sustrato. ....	144
Figura 4.24 Producción de biogás de febrero a mayo 2019. ....	145

## Lista de tablas

Tabla 1.1 Características de Arduino mega 2560.....	25
Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los procesos anaerobios .....	60
Tabla 1.3 Características generales del biogás.....	65
Tabla 1.4 pHmetros de mesa. ....	68
Tabla 1.5 Medidores de pH portátiles.....	71
Tabla 1.6 Sondas o sensores de pH.....	74
Tabla 1.7 Transmisores de pH (multiparametros) .....	77
Tabla 1.8 Artículos relacionados con la medición y control de pH. ....	81
Tabla 2.1 Características técnicas del sensor de pH PC2121-5M.....	93
Tabla 2. 2 Especificaciones del Adapter 1130 .....	94
Tabla 2. 3 Conexiones de las terminales del módulo de memoria micro SD a Arduino mega. ....	108

## RESUMEN

En este proyecto de investigación se realiza el diseño y construcción de un sistema automatizado de medición y control de pH, para un reactor de lecho fluidizado inverso con arreglo paralelo por sus siglas RLFIAF, ubicado en plantas piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba. Para la fabricación de este sistema se describen la etapa de digestión metanogénica y las variables involucradas en el cambio del pH.

En la parte del diseño del sistema, se verificaron los mecanismos utilizados para medir y controlar dicha variable, haciendo uso de perfiles de calibración que consideren perturbaciones por la temperatura, revisando la correcta correlación de esta con la finalidad de incrementar la producción de biogás en el reactor.

Para la fabricación del sistema, se realizaron los esquemas para el diseño en el software AutoCAD Y y fusión 360, para visualizar la colocación de los tanques de almacenamiento de agua destilada, las soluciones tampón pH 4 y pH 10 para la calibración, el tanque de muestreo, el montaje del sensor de pH, la válvula de entrada y tubería de descarga de la muestra proveniente del reactor y de los demás líquidos, considerando disminuir el consumo eléctrico del sistema.

En la medición de la variable de pH, se utilizó el sensor de pH de membrana de vidrio, el cual tiene una mayor precisión y exactitud al medir dicha variable. Acompañado con el sensor de temperatura DS18B20. Se efectúan las mediciones de pH y temperatura para la corrección de esta última variable y así determinar el valor exacto de pH en cada muestra.

Se realizó la interfaz de medición y control de las variables pH y temperatura, para la dinámica del sistema se realizó una HMI con la pantalla táctil Nextion, la cual cumple con los requerimientos para incorporar el microcontrolador ATmega2560 y realizar el control del sistema

Para la parte final de esta tesis se muestran los resultados de funcionamiento manual y automático del sistema mediante la HMI, Así como los resultados de esta medición de pH efectuadas en el RLFIAF.

En los trabajos futuros se recomienda el monitoreo y control vía internet y el almacenamiento de los datos en la nube, para así tener mayor respaldo e incorporar otras variables involucradas para el control del pH.

## ABSTRACT

In this research project, the design and construction of an automated pH measurement and control system for a reverse fluidized bed reactor with parallel arrangement by its acronym RLFIAP, located in pilot plants of the Technological Institute of Orizaba, is carried out. For the manufacture of this system, the stage of methanogenic digestion and the variables involved in the pH change are described.

In the part of the system design, the mechanisms used to measure and control said variable were verified, using calibration profiles that consider temperature disturbances, reviewing the correct correlation of this with the purpose of increasing the production of biogas in the reactor.

For the manufacturing of the system, the schemes were designed for the design in the AutoCAD Y and fusion 360 software, to visualize the placement of the distilled water storage tanks, buffer solutions pH 4 and pH 10 for calibration, the tank of sampling, the assembly of the pH sensor, the inlet valve and discharge pipe of the sample from the reactor and other liquids, considering reducing the electrical consumption of the system.

In the measurement of the pH variable, the glass membrane pH sensor was used, which has greater precision and accuracy when measuring said variable. Accompanied with the DS18B20 temperature sensor. The pH and temperature measurements are made for the correction of this last variable and thus determine the exact pH value in each sample.

The interface of measurement and control of the pH and temperature variables was performed, for the dynamics of the system an HMI was performed with the Nextion touch screen, which meets the requirements to incorporate the ATmega2560 microcontroller and perform system control

For the final part of this thesis, the results of manual and automatic operation of the system through the HMI are shown, as well as the results of this pH measurement carried out in the RLFIAP.

In future work, monitoring and control via the internet and the storage of data in the cloud is recommended, in order to have greater support and incorporate other variables involved for pH control.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1 INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas en el RLFAP, es el monitoreo del valor de la variable de pH, esto provoca que las bacterias metanogénicas no logren la producción óptima de biogás, ya que los niveles comprensivos de pH en los que estas realizan su mejor función para la producción de biogás es de 6.5 a 7.2 [1].

Para medir pH con los sensores o electrodos de membrana de vidrio se tiene que realizar los procedimientos de limpieza y calibración, para la limpieza del sensor de pH debe remojarlo o inyectar a chorro agua destilada, posteriormente se debe secar con servilletas o paños de papel evitando presionar la membrana de vidrio para no dañarla [2]. Una vez realizadas las acciones de limpieza es conveniente calibrar a dos puntos debido a que en el reactor pueden medirse valores de pH desde 6 a 8 en casos extremo [1]. La calibración consiste en poner el sensor en un depósito con una solución tampón de pH 4, conectar el pHmetro e introducir el sensor de temperatura para realizar la corrección por temperatura, alcanzando el valor de pH 4.01. Dependiendo que solución tampón este en el depósito, el pHmetro indicara que la medición es correcta [3].

Con base a esta metodología se construyó el sistema, este tiene la funcionalidad de brindar al usuario las opciones de automático y manual. En la primera se realiza las acciones de limpieza, calibración y medición sin necesidad de la intervención del operador, además de guardar los datos del valor de pH y temperatura. Para la opción manual el usuario puede realizar las acciones de manera individual cuantas veces sean necesarias partiendo desde la limpieza, calibración, medición de pH y temperatura, además de guardar datos de ambas variables o solo de una. Cada una de estas opciones fueron programadas en el microcontrolador ATmega2560, pueden ser operadas y visualizadas desde la interfaz HMI de la pantalla táctil Nextion. El sistema automatizado de medición de pH proporcionará el valor correcto de pH en el RLFAP, guardará datos de la variable temperatura y pH, con la fecha y la hora exacta, lo que permitirá tener un registro del comportamiento del reactor a lo largo del día, esto permitirá tener un impacto en la seguridad del operador y la confiabilidad de la lectura del valor de pH, además de incrementar la producción de biogás.

## 1.2 PROBLEMÁTICA

En la mayoría de los procesos metanogénicos, algunas mediciones sólo se realizan mediante sistemas de toma de muestra del sustrato de manera manual, por lo que es necesario estar en contacto con la biomasa, considerando la falta de seguridad al operador y exactitud en la medición de pH, ya que esta variable depende en gran parte de la temperatura. Al tomar una muestra y llevarla al exterior, ésta no representa la temperatura dentro del bioreactor, por lo tanto hay una variación en el valor pH, por lo que se recomienda que la medición de pH sea realizada en línea.

La falta de un sistema de medición automatizado de medición y control de pH, en el Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo Paralelo en plantas piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba; ocasiona que la medición de pH se lleve a cabo por el personal de manera manual, provocando riesgos y poca confiabilidad en la medición de pH. La muestra es llevada al laboratorio para medirla en un pHmetro de mesa, por lo tanto la temperatura varía y el valor de pH. Esto provoca que las bacterias metanogénicas no logren la producción óptima de biogás, ya que los niveles comprensivos de pH en los que estas realizan la mejor función para la producción de biogás son de 6.5 a 7.2 de pH.

### 1.3 JUSTIFICACIÓN

Las energías limpias son necesarias en la etapa del cambio climático del planeta, debido a la urbanización e industrialización, estas generan grandes cantidades de contaminantes para el agua, el aire y el suelo, el país tiene estos efectos consecuencia de estos factores de contaminación [4].

La región de las altas montañas zona centro del estado de Veracruz, desde hace algunas décadas se encuentra industrializada y en los últimos años empieza a sobre poblarse, debido al comercio y lugares turísticos, es productora de una gran cantidad de desechos orgánicos e inorgánicos, producidos en restaurantes y cocinas de los mercados aledaños al Instituto Tecnológico de Orizaba, por esta razón se propone el presente proyecto, con la finalidad de aprovechar la materia orgánica de uno de los principales mercados de la ciudad de Orizaba.

Una de las soluciones para aprovechar la biomasa es el uso de bioreactores que contribuyen al tratamiento de aguas residuales, el tratamiento de materia orgánica, ayuda a disminuir la contaminación y generar un producto de valor, como lo es la producción de biogás, el cual es un combustible para múltiples usos como: la cocción de alimentos, calentamiento de agua para caldera y en motores de combustión interna [5]. El correcto monitoreo y control de la variable pH en este tipo de sistemas aumentarán su eficiencia y confiabilidad, lo que permitirá que se implementen en un mayor número de industrias, esto terminaría por tener un impacto ambiental positivo además del económico debido a la generación de energía eléctrica renovable.

#### 1.4 HIPÓTESIS

Es posible conocer el nivel de pH en un RLFIAP mediante el proceso de automatización de los mecanismos utilizados para medir dicha variable, haciendo uso de perfiles de calibración que consideren perturbaciones en el sensor por temperatura, conocer esta información permitirá generar una estrategia de control para dicha variable.

## 1.5 OBJETIVO GENERAL

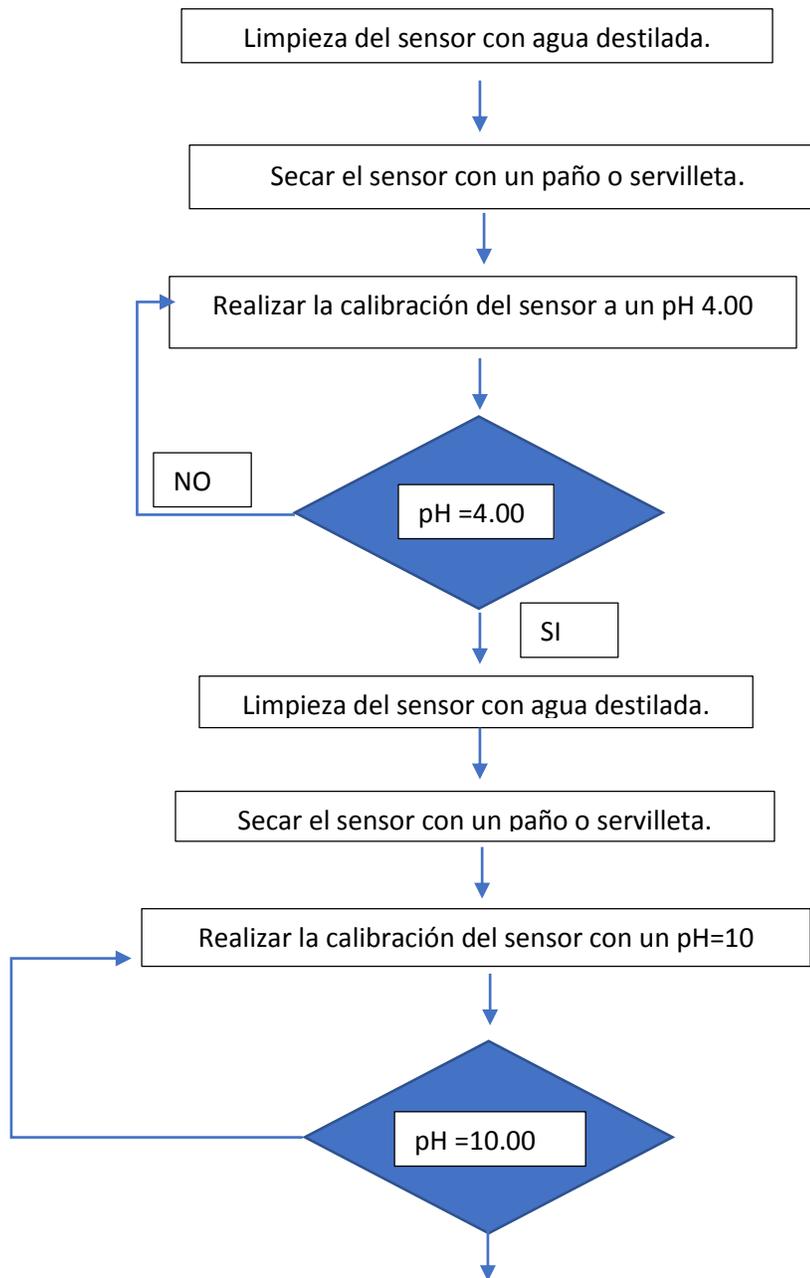
Realizar la automatización de la medición del potencial de hidrógeno (pH) en un RLFAP, que permitan realizar una estrategia de control, para mejorar los niveles de producción de biogás.

## 1.6 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el sensor de pH PC2121-5M/BNC y el módulo Adapter 1130 de conversión de milivolt a pH mediante el sistema Arduino y la HMI Nextion.
- Diseñar mediante software CAD, el conexionado hidráulico, neumático entre la toma de muestra del reactor y el sensor pH PC2121-5M, para realizar el sensado periódico y la limpieza del sensor.
- Construir el diseño mecánico para el conexionado hidráulico y neumático entre el reactor y el sensor pH PC2121-5M, con material pertinente.
- Realizar la interfaz HMI para la medición y control de la automatización de pH en el reactor.
- Determinar la correlación de pH y la temperatura en el RLFAP, mediante el muestreo del sustrato.
- Determinar la acción de control para implementar el control electrónico (lazo de control).
- Construir el circuito electrónico y neumático para controlar el nivel de pH óptimo en el RLFAP.

## 1.7 METODOLOGÍA

La metodología para el proyecto parte del procedimiento de standar methos para la medición de pH, este involucra desde la toma de muestra, la limpieza del sensor, la calibración y la medición del pH, en la figura 1.1 se muestra el procedimiento para la calibración del sensor de pH de membrana de vidrio [6].



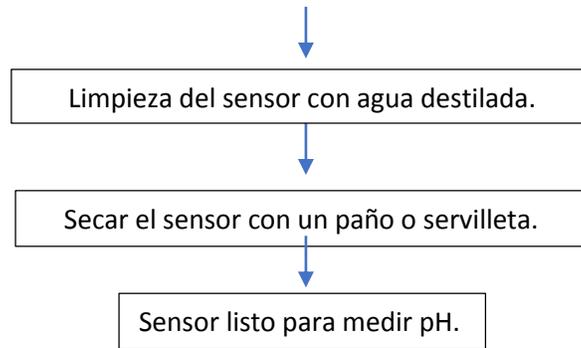


Figura 1.1 Calibración del sensor de pH.

### 1.7.1 Requerimientos para la medición de pH en el RLFIAPI

El reconocimiento de la planta y la verificación del proceso de biodigestión son de suma importancia para la implementación del proyecto de automatización de la medición y control de pH en el RLFIAPI, debido a que no cuenta con dicho sistema automatizado de medición.

La figura 1.2 muestra el Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo (RLFIAPI) instalado en plantas piloto del Instituto Tecnológico de Orizaba (ITO).



Figura 1.2 RLFIAPI en plantas piloto del ITO.

Una vez identificado la problemática en la medición de pH, la cual es realizada de manera manual, esto provoca riesgos al operador y una baja confiabilidad en la medición del pH y la temperatura. La figura 1.3 corresponde a la toma de muestra de salida proveniente del reactor para efectuar la medición de pH.



Figura 1.3 Toma de muestra del RLFIAP

En mayoría de ocasiones la muestra es llevada al laboratorio de ingeniería química, ubicado aproximadamente a 600 metros del RLFIAP, para ser medida en un pHmetro de mesa, ocasionando un cambio de temperatura y por lo tanto del valor exacto de pH.

La figura 1.4 indica la medición realizada con el pHmetro OAKTON 700, con el sensor de pH y de temperatura, para la corrección de esta última variable [7].



Figura 1.4 Medición de la muestra con pHmetro Oakton [7].

La figura 1.5, indica la metodología llevada a cabo para realizar el proyecto diseño y construcción de un sistema automatizado de medición y control de pH, para hacer eficiente la producción de biogás en bioreactores en el Instituto Tecnológico de Orizaba dentro del área de plantas piloto.

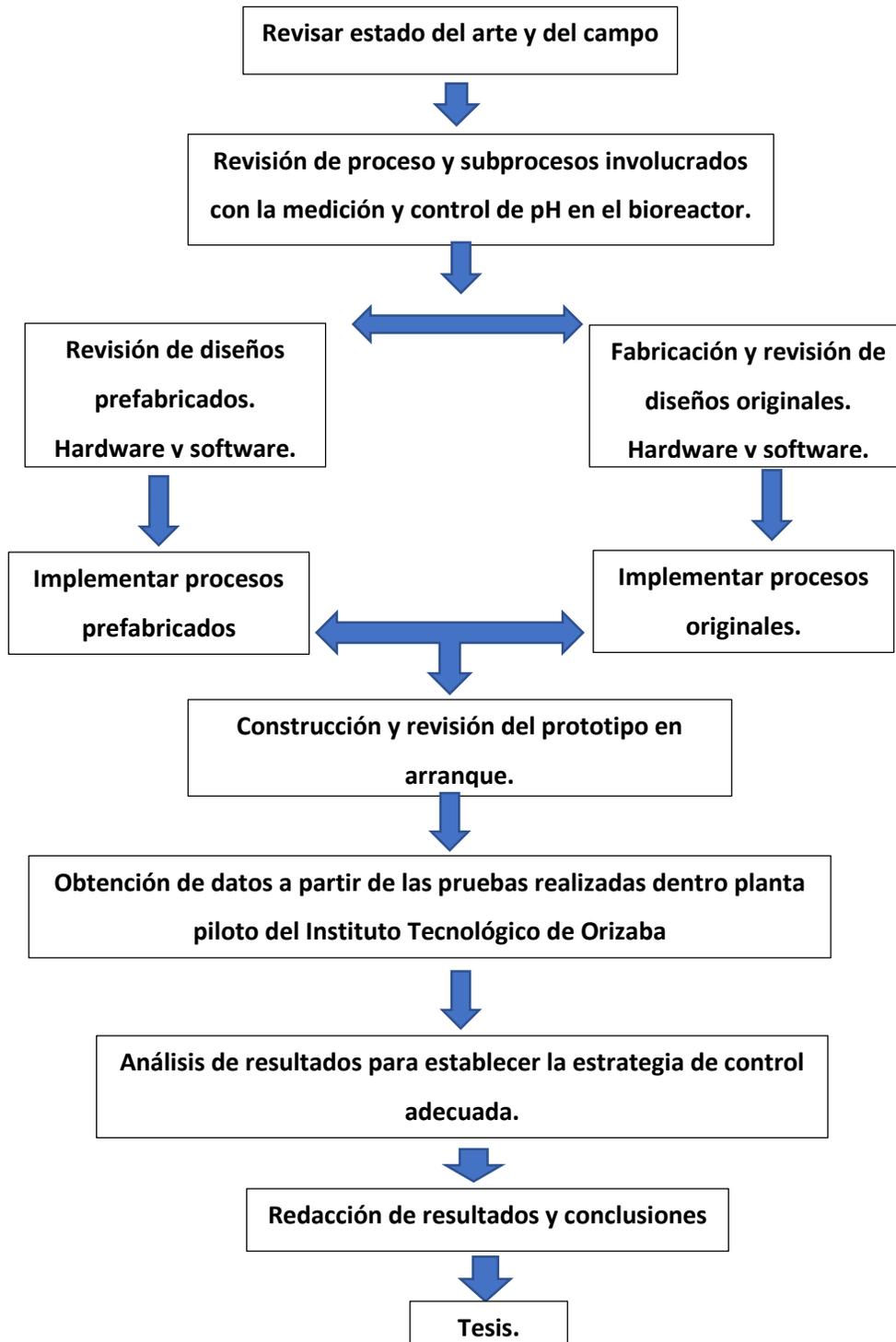


Figura 1.5 Metodología para la creación del proyecto.

### 1.7.1.1 Sensor para la medición de pH

Los tipos de sensores para la medición de pH en línea son los electrodos de membrana de vidrio, los cual son más inertes a las diferentes sustancias y por lo tanto los más exactos, además de las presentaciones con recubrimientos epóxico, con cuerpo de protección de plástico ABS para el uso en ambientes industriales. Sin olvidar que la membrana es de vidrio esta descubierta y puede romperse. Para el caso de ambientes extremos, el tipo de sensor tiene que resistir la presión, temperatura, la alta concentración de carga orgánica, la manipulación por parte del operador [2]. En los sensores de pH de uso industrial ya está integrada la porta sondas en el propio cuerpo del sensor, como se visualiza en la figura 1.6 el sensor tiene rosca en los extremos para ser montado en tubería o en un tanque de muestreo [8].



Figura 1.6 Sensor de pH PC2121-5M Phidgets [9].

Características para el sensor de pH.

- El rango de medición de pH, sea de 0 a 14.
- Que soporte una presión del líquido por lo menos 20 psi.
- Este cubierto de material resistente y que cubra en lo posible al sensor.
- El conector sea tipo BNC, para facilitar su conexión y evitar en lo posible el ruido.

### 1.7.1.2 Acondicionamiento de señal del sensor de pH

Los requerimientos básicos para la medición de pH son: la sonda de pH o sensor de pH, el porta sensor, el transmisor y la interfaz de visualización [9].

La parte siguiente al sensor de pH es el acondicionamiento de señal, este puede estar incluido en el transmisor, las cuales deben cumplir con: el acondicionamiento y la amplificación de la señal, debe tener una alta impedancia en la entrada, una conversión y transmisión de forma que no se pierda información y está pueda ser mostrada en la interfaz de visualización HMI con la mayor exactitud posible.

El acondicionamiento de la señal de pH es llevado a cabo por el módulo Adapter 1130, el cual es del mismo fabricante que el sensor de pH, las características de este módulo es la entrada con una alta impedancia de aproximadamente  $1\text{ M}\Omega$ , una alimentación de 5 VCD y una salida analógica de 0 a 5 Volt para ser acondicionada con el ADC convertidor analógico digital de cierto microcontrolador, en la figura 1.7 se puede visualizar en la parte central el acondicionador de señal [9].

El tercer elemento es el transmisor, este proporciona valores de mV y pH respectivamente, dependiendo del valor de pH de la solución que se analice y según sea el caso de la magnitud para ser visualizada. En la figura 1.7, el transmisor es el componente superior, este puede conectarse a la computadora con el software del mismo fabricante para visualizar el valor del pH.



Figura 1.7 Sensor de pH, Adapter 1130 y transmisor Phidgets [9].

### 1.7.1.3 Microcontrolador

El acondicionamiento de la señal del Adapter 1130 puede ser realizada por un microcontrolador, con la condición que supere las combinaciones de señal de resolución del sensor, la elección fue llevada a cabo debido a la revisión del estado del arte y del campo, encontrado el uso del microcontrolador ATmega2560 mostrado en la figura 1.8, el cual tiene una resolución de 10 bits, para una escalabilidad con el módulo Adapter 1130 [10].

El microcontrolador Arduino mega 2560 tiene la posibilidad de incorporar distintos módulos, como son la comunicación alámbrica e inalámbrica, almacenamiento de datos, reloj en tiempo real, interfaces hombre máquina HMI para la visualización de los datos, etc. Es por esta razón es utilizado en el presente proyecto.



Figura 1.8 Microcontrolador Arduino ATmega2560 [10].

La tabla 1.1 muestra las características de la placa Arduino mega 2560, entre las de mayor importancia para el proyecto, es la capacidad del convertidor analógico digital de 10 bits, la velocidad de reloj, la cantidad de entradas y salidas analógicas y digitales.

Tabla 1.1 Características de Arduino mega 2560 [10].

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de funcionamiento	5V
Voltaje de entrada (recomendado)	7-12V
Voltaje de entrada (límite)	6-20V
Pines digitales de E / S	54 (de los cuales 15 proveen salida PWM)
Pines análogos de entrada:	16
Corriente DC por cada Pin Entrada/Salida:	40 mA
Corriente DC entregada en el Pin 3.3V:	50 mA
Memoria Flash:	256 KB (8KB usados por el bootloader)
SRAM:	8KB
EEPROM:	4KB
Clock Speed:	16 MHz

#### 1.7.1.4 Compensación de temperatura

Los sensores de pH con membrana de vidrio son dependientes de la temperatura, por lo que se tiene que incorporar el valor de la temperatura mediante un sensor que efectúe dicha medición en la sustancia líquida o sólida. Este no debe ser invasivo al sensor de pH, para no alterar la medición o dañarlo.

La corrección por temperatura puede ser de manera manual, ingresando en el pHmetro el valor de la temperatura y la solución tampón de pH que se está midiendo [3].

Una de las ventajas de compensación por temperatura CAT, es mediante software de programación, en el programa ya está integrado junto con la medición de pH, la compensación por temperatura proporciona valores precisos e inclusive muy cercanos al valor exacto de pH [9].

Características para el sensor de temperatura para integrar al sistema automatizado de medición de pH.

- La respuesta debe ser más lenta que el sensor de pH.
- Al realizar la medición, este no sea invasivo para no afectar las mediciones de pH.
- Pueda ser introducirlo en el tanque de muestreo.

El sensor de temperatura utilizado en el presente proyecto es el sensor DB18B20, mostrado en la figura 1.9, cumple con las características antes descritas.



Figura 1.9 Sensor DS18B20 [11].

#### 1.7.1.5 Módulos de memoria micro SD y módulo de reloj.

El almacenamiento de datos es de suma importancia en prácticamente en todos los procesos industriales y comerciales, esto puede llevar a tomar decisiones con una mayor inferencia. Gran parte de los medidores de pH ya sea de pHmetro de mesa, portátiles o transmisores de medición en línea, tienen incorporado esta opción, almacenan datos de las variables de pH y temperatura etc. En el sistema automatizado de medición y control de pH, se incorpora el módulo de memoria Micro SD mostrado en la figura 1.10 [11].

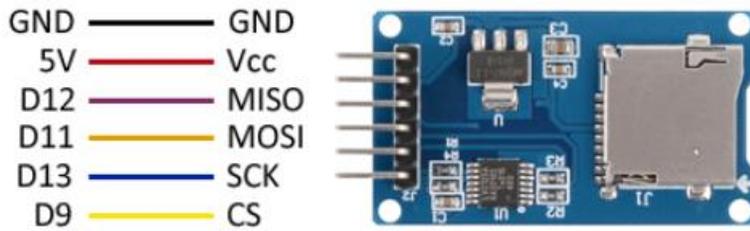


Figura 1.10 Lector de micro SD [12].

Para llevar el tiempo del proceso de medición de pH en el reactor, es necesario un dispositivo el cual no dependa de la alimentación eléctrica, de perderse la alimentación eléctrica el microcontrolador puede inicializarse y perderse el tiempo transcurrido de ciertos procesos programados. Por esta razón se utilizó el módulo de reloj DS3231 figura 1.11. Este dispositivo lleva la fecha y la hora actual sin depender de la corriente eléctrica, gracias a la batería de 1.3 Volt incorporada [11].



Figura 1.11 Módulo de reloj DS3231 [11].

#### 1.7.1.6 Interfaz hombre máquina para la medición y control de pH.

La interfaz de visualización HMI es de suma importancia para la medición de pH, los transmisores comerciales ponen el valor de pH con números mayores a los otros parámetros, este debe mostrarse con dos cifras decimales, además de tener una respuesta de visualización en tiempo real. La figura 1.12 muestra las etapas de acondicionamiento de una señal analógica de pH [13].

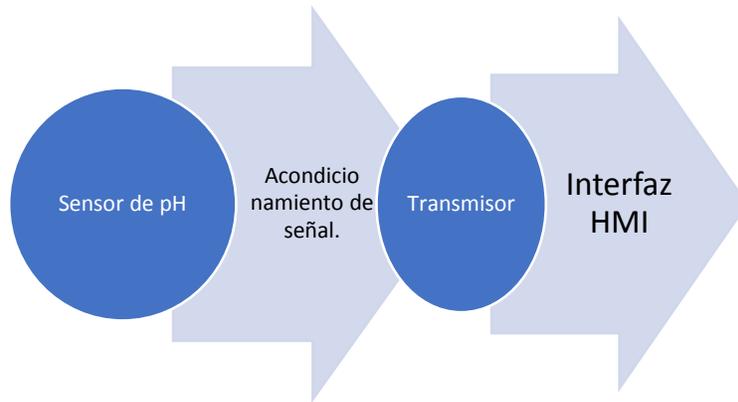


Figura 1.12 Acondicionamiento para la medición de pH [14].

Una de las primeras características en el diseño de las interfaces hombre maquina HMI, es el contenido de elementos visuales y táctiles, pero la mayor importancia en una HMI es el tiempo de respuesta de accionamiento de los elementos finales de control en el microcontrolador Arduino mega 2560 es de 9600 Baudios [10].

Una de las interfaces encontrada en el estado del arte con él microcontrolador Arduino, es con el programa de visual estudio C#, esta interfaz incorpora una infinidad de elementos visuales para la HMI, el inconveniente es la programación en el software visual estudio C# y en la IDE de Arduino, además de que no cuenta con una pantalla táctil dedicada para la creación de la HMI. Por lo que la programación se incrementa prácticamente al doble.

En el estado del campo se buscó una interfaz que cumpliera con una similitud al programa visual estudio C# para la creación de la HMI, la mejor opción es la pantalla táctil Nextion, mostrada en la figura 1.13, la cual cumple con los requerimientos de tener su propio software o editor de desarrollo y la pantalla táctil del mismo fabricante [15].

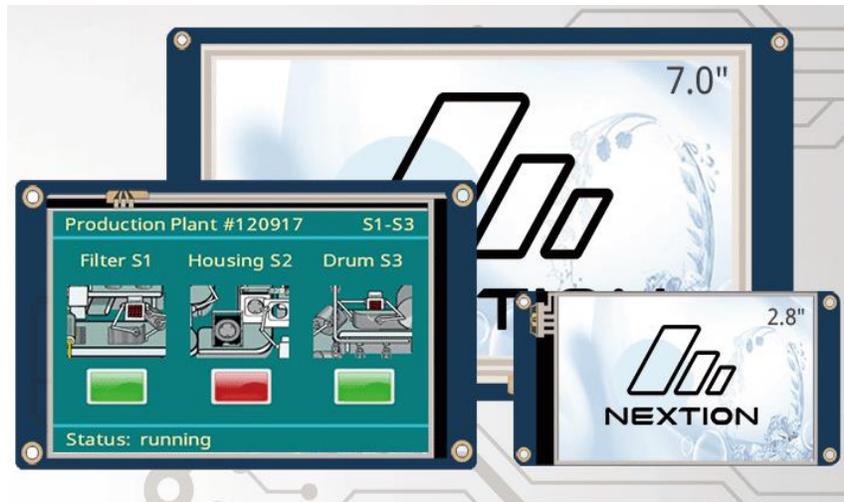


Figura 1.13 Pantalla Nextion HMI [15].

#### 1.7.1.7 Instrumentación para el sistema automatización de medición pH.

El proceso de medición y calibración de pH de cierta sustancia con el sensor de membrana de vidrio requiere de un correcto sistema de limpieza y calibración, junto a la compensación o corrección por temperatura CAT. Por lo que se requieren los siguientes componentes, para la realización de este proyecto.

#### 1.7.1.8 Bombas peristálticas

Para realizar una buena medición de pH, es necesaria una correcta limpieza del sensor de membrana de vidrio, esta se realiza con agua destilada y paños o servilleta de papel para el secado [7].

La calibración con soluciones tampón tiene que ser con una estricta limpieza para evitar la contaminación de estas y que no exista una variación en la calibración, ni en la medición.

Para llevar estas sustancias se necesita bombas que tengan el menor contacto con el líquido, sobre todo sin elementos metálicos en el impulsor al paso del líquido.

Las bombas peristálticas basan su funcionamiento para el bombeo del líquido en la succión mediante la manguera presionada por dos rodillos a gran velocidad, hace pasar el líquido a través de la manguera de succión y descarga, para ser llevada a otro depósito [13].

La limpieza del sensor es llevada a cabo por el agua destilada, dicho líquido es bombeado por las bombas peristálticas. Tanto el agua destilada como las soluciones tampón deben estar en un depósito de fácil limpieza, en lugar alto para aprovechar la gravedad y disminuir el consumo eléctrico.

La presión del agua y las soluciones tampón deberán ser constantes para llenar el tanque de muestreo en un determinado tiempo para ser programado en el microcontrolador.

#### 1.7.1.9 Soluciones tampón o buffers de calibración

Las soluciones tampón mostradas en la figura 1.14 son las encargadas de realizar la calibración del sensor de pH de membrana de vidrio, estas no deben ser contaminadas, ni tener contacto con ningún elemento como: metal, polvo o aceite u otra sustancia [3]. Debido a que estos pueden liberar electrones y alterar el valor de pH e inclusive dañar el sensor. Cómo se indicó para el bombeo de agua destilada y las soluciones tampón, la mejor opción son las bombas peristálticas las cuales no tienen contacto con el líquido y no alteran el valor de las soluciones.



Figura 1.14 Soluciones buffer o tampón [7].

#### 1.7.1.10 Secado del sensor

De manera manual el sensor de pH es secado con un paño o una servilleta de papel, el cual debe ser pasado con precaución y sin fuerza en la bombilla de vidrio para no dañarla. Para realizar esta acción se utilizaron ventiladores de inyección y extracción de aire, en estos se introducen aire y lo sacan para que el sensor pueda ser secado en un lapso de tiempo y esté listo para la siguiente medición, en la figura 1.15 muestra un ventilador utilizado en el presente proyecto.



Figura 1.15 Ventilador para computadora.

#### 1.7.1.11 Tanque para la toma de muestra

El muestreo debe realizarse en un tanque, el cual cumpla con las siguientes características: que sea de un material inerte a las sustancias depositadas en él, sobre todo a las soluciones tampón acidas o muy básicas, debe efectuarse una limpieza rápida y profunda, el vaciado de las sustancias líquidas con sólidos en suspensión debe desplazarse hacia el tubo de salida eficazmente para no generar alteraciones en la siguiente medición e inclusive no generar algún tipo de microorganismo, la figura 1.16 se muestra la base del tanque de muestreo con una pequeña pendiente para realizar las acciones antes descritas, además de el orificio rectangular alrededor para pegar las paredes de acrílico.



Figura 1.16 Base para el piso del tanque de muestreo.

#### 1.7.1.12 Las tuberías

Las tuberías para el sistema de medición y control de pH MIE1, deben ser de un diámetro de aproximadamente de 1/8 de pulgada, para que puedan ser conectadas a las bombas peristálticas. No deben de retener líquido y deben limpiarse con facilidad. Soportar una presión de

aproximadamente 0.0014 Bar y un caudal de 15 litros por minuto. Este tipo de tuberías estarán conectadas de las bombas peristálticas al tanque de muestreo.

La tubería para conectar la toma de muestra del reactor con el sistema de medición de pH, deben ser resistente con una presión de 0.0020 Bar y un caudal de 20 litros por minuto, el tubo que cumple con estas características es el tubo PVC, este retiene la menor cantidad de sólidos y puede limpiarse con facilidad.

#### 1.7.1.13 Válvula de entrada

Para la entrada de la muestra proveniente del reactor es necesaria una electroválvula, mostrada en la figura 1.17, con las siguientes características.

Una válvula de plástico para evitar corrosiones de las soluciones acidas o básicas, para que estas no lleguen al tanque de muestreo. El diámetro de ½ pulgada para la conexión entre la tubería de muestra del reactor y el módulo de medición de pH, que el cierre sea aproximadamente instantáneo para llenar el tanque de muestreo en un tiempo permanente y así establecerlo en la programación del microcontrolador.



Figura 1.17 Electroválvula solenoide 12v, 1/2" [8].

#### 1.7.1.14 Válvula de salida

La válvula de salida para el tanque de muestreo tiene que ser inerte a las sustancias, debido a que la conexión esta con el tanque de muestreo para el vaciado del líquido, al llenar el tanque de muestreo tiene contacto con el sensor de pH, el de temperatura y el agitador.

El cuerpo de cada una de las partes de este tipo de válvula, deben ser de plástico o PVC, no deben ser metálicos debido a que el sensor no está diseñado para metales, como se revisó en el estado del

arte para algunas sustancias alcalinas altas como pH 12, pueden atrapar electrones inclusive del medio ambiente, por lo que partes de metal en la válvula alteraran las mediciones de pH y pueden dañar el sensor [2].

La figura 1.18 muestra una válvula tipo globo motorizada, con la apertura sin presión para el vaciado del tanque de muestreo, el inconveniente es que está constituida de partes metálicas, estas al momento de tener contacto con la muestra y el sensor de pH en el tanque de muestreo, alteraran las mediciones del sensor de pH e inclusive pueden dañarlo, sobre todo con soluciones ácidas como pH 4 y básicas como pH 12 [16].



Figura 1.18 Válvula de bola motorizada 1/2" [9].

#### 1.7.1.15 Fuentes de alimentación eléctrica.

Los elementos eléctricos antes mencionados son activados por módulo de relevadores, controlados por la placa Arduino mega 2560.

La alimentación eléctrica hacia los relevadores y al microcontrolador Arduino, corresponde a las fuentes de alimentación de 5 Volt de 1 Ampere, una fuente de 12 Volt de 2 Amperes y una fuente simétrica de +/-15 Volt para la alimentación de los amplificadores operacionales. Las fuentes deben estar selladas para evitar la corrosión de los componentes metálicos debido a la atmosfera en plantas piloto del ITO, en la figura 1.19 se muestra un esquema de las fuentes necesarias para el presente proyecto.

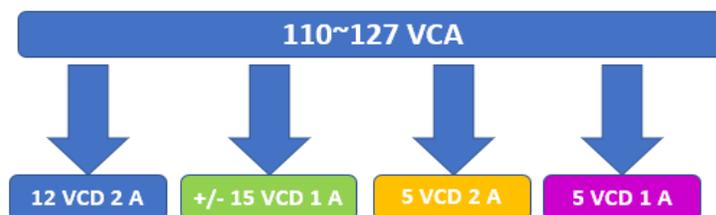


Figura 1.19 Fuentes de alimentación para el sistema.

#### 1.7.1.16 Ubicación de elementos del sistema en gabinete

La figura 1.20 muestra el diseño del gabinete que contendrá los elementos descritos a continuación. Para el diseño de los tanques de almacenamiento de agua destilada, soluciones tampón y muestreo, se dibujaron en el software Fusión 360. El cual es de fácil uso, debido a la interfaz de compatibilidad con AutoCAD y SOLIDWORKS e inclusive la facilidad para impresión en 3D.

El tamaño del tanque de muestreo partió de las muestras tomadas y probadas en el laboratorio con muestras de 50 ml. Con las condiciones del tamaño del sensor de pH, el sensor de temperatura y el agitador. Resultando con un contenido para la muestra de 100 ml.

El diseño del tanque de almacenamiento de agua destilada es creado a partir de la operación del reactor a lo largo del día, en promedio de 5 horas de operación por alumnos de ingeniería química. La cantidad de litros de agua destilada quedó en 1 L, repartido en 100 ml por cada media hora para la limpieza del sensor de pH, una vez realizada la medición.

El diseño de los tanques de soluciones tampón, se realizó en proporción al tanque de agua destilada y a la succión de las bombas peristálticas, además de la estética para el sistema automatizado de medición y control de pH, la cantidad en litros para los tampón quedó de ½ litro, estas sólo serán utilizadas un día a la semana para efectuar la calibración.

En la parte trasera se visualizan dos agujeros, los cuales son para montar dos ventiladores, tienen la función de inyector y extractor de aire, servirán para el secado del sensor de pH.

En la parte frontal se muestra un orificio rectangular el cual sirve para tener la visualización de los procesos de medición y calibración de pH, verificando que se lleve a cabo de manera correcta: el llenado del tanque, la limpieza y secado del sensor pH.

Otro rectángulo en la parte frontal superior es para colocar la pantalla táctil Nextion de la HMI de control manual y automático, además del espacio sobrante para las cajas que contendrán las fuentes de Voltaje y el microcontrolador Arduino mega 2560.

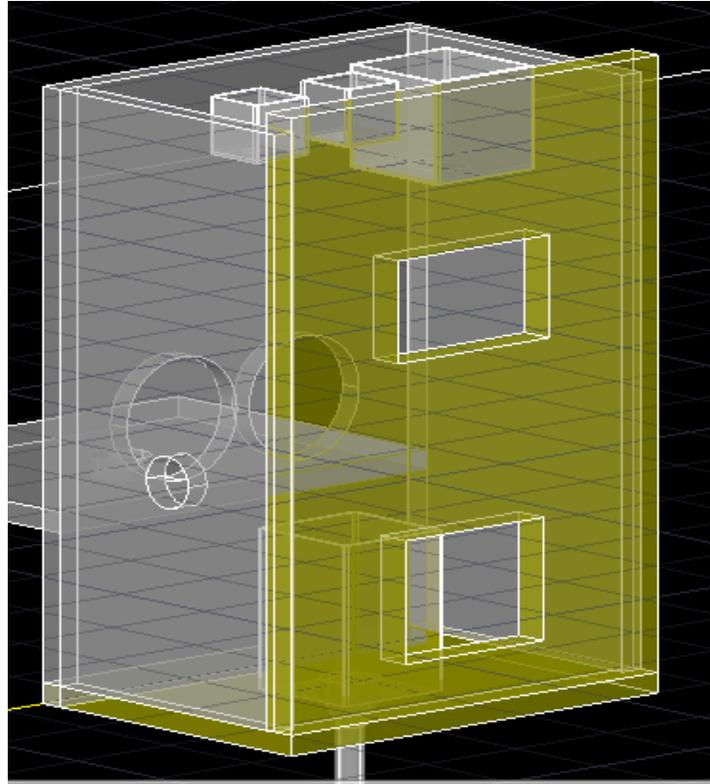


Figura 1.20 Vista frontal del sistema automatizado de medición de pH.

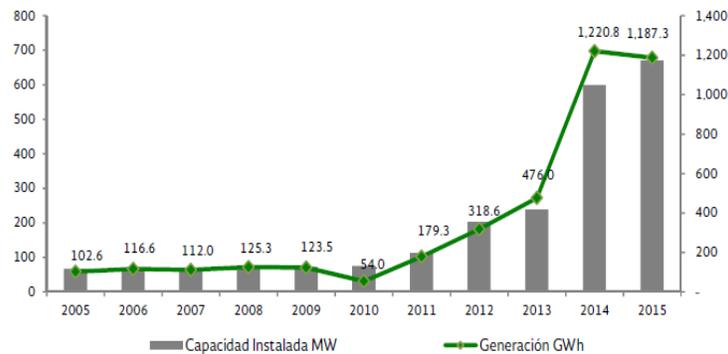
## 1.8 ESTADO DEL ARTE

### 1.8.1 La Biomasa Prospectiva de Energías Renovables 2016-2030

La prospectiva de energía renovable proporciona datos del incremento del uso de las energías renovables, en la forma de obtención a partir de la biomasa, tomando en consideración leyes y acuerdos internacionales por varios países.

La Biomasa para la generación de energía eléctrica en México, se obtiene principalmente del Bagazo de caña. La capacidad instalada derivada del uso de bagazo de caña se incrementó 906.5%, pasando de 66.6 MW a 599.1 MW al cierre del 2015.

Respecto a la generación de electricidad, se produjo 1,187.3 GWh, 1,084.6 GWh más que el 2005 (102.6 GWh), lo que representó un incremento de 1,056.8% a lo largo de la década 2005-2015 como se indica en la figura 1.21 [5].

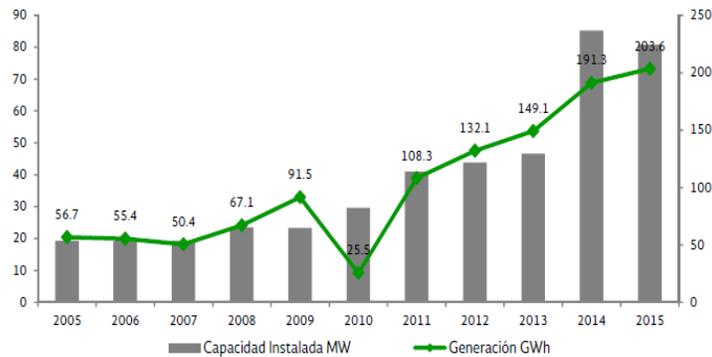


Fuente: SENER.

Figura 1.21 Capacidad instalada y generación bruta de electricidad con bagazo de caña, 2005-2015(MW, GWh) [5].

La SENER en cooperación con la SEMARNAT y la Agencia de Cooperación Alemana para el Desarrollo (GIZ) estiman que el país cuenta con un potencial de 3.1 millones de toneladas anuales de residuos sólidos urbanos para utilizarse en el coprocesamiento cementero en México, este potencial reemplazaría el 30% de la energía térmica generada con coque de petróleo y carbón de ese sector.

Entre 2005 y 2015 la capacidad instalada para generación de energía eléctrica por biogás paso de 19.3 MW a 80.8 MW, lo que representó un incremento de 319.1%. Respecto a la producción de electricidad, el incremento fue de 258.9% en el mismo período, registrando al cierre del 2015 203.5 GWh, véase figura 1.22 [5].



Fuente: SENER.

Figura 1.22 Capacidad efectiva instalada y generación bruta de energía eléctrica a partir de biogás, 2005 – 2015 (MW, GWh) [5].

En todo el país se cuenta con 70 centrales de generación que emplean bioenergía, ya sea biomasa o biogás. Las regiones con mayor producción de energía eléctrica a través de estos bioenergéticos son Oriental y Occidental, con 598.0 GWh y 389.0 GWh respectivamente. Esto es asociado a la gran cantidad de ingenios azucareros que existe en esa región, siendo el estado de Veracruz uno de los más importantes en la producción de bagazo de caña [5].

### 1.8.2 Generalidades de la instrumentación y automatización

En los inicios de la era industrial, la operatoria de los procesos se llevaba a cabo con un control manual de variables como temperatura, presión, flujo etc. Utilizando sólo instrumentos simples, manómetros, termómetros, válvulas manuales, etc., control que era suficiente por la relativa simplicidad de los procesos. Sin embargo, la gradual complejidad con qué éstos se han ido desarrollando ha exigido su automatización progresiva por medio de los instrumentos de medición y control. Estos instrumentos han ido liberando al personal de campo de su función de actuación física directa en la planta y, al mismo tiempo, le han permitido una labor única de supervisión y de vigilancia del proceso desde centros de control situados en el propio proceso o bien en salas aisladas separadas; asimismo, gracias a los instrumentos, ha sido posible fabricar productos complejos en condiciones estables de calidad y de características, condiciones que al operario le serían imposibles o muy difíciles de conseguir, realizando exclusivamente un control manual [13].

Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos categorías: procesos continuos y procesos discontinuos. En general, en ambos tipos deben mantenerse las variables

(presión, caudal, nivel, temperatura, etc.), bien en un valor deseado fijo, bien en un valor variable con el tiempo de acuerdo con una relación predeterminada, o bien guardando una relación determinada con otra variable [13].

### 1.8.2.1 Sistemas automatizados

Una forma clásica de abordar el estudio de los sistemas automatizados es la división en parte de mando y parte operativa.

- La parte operativa es la parte que actúa directamente sobre la máquina. Son los elementos que hacen que la máquina se mueva y realice la operación. Forma parte de ella los accionadores de las máquinas como son motores de corriente continua, motores de corriente alterna, cilindros neumáticos, accionadores hidráulicos, compresores, bomba, etc.
- La parte de mando suele ser un autómata programable. Es un sistema de fabricación automatizado está el autómata programable en el centro del sistema. El autómata programable PLC debe ser capaz de comunicarse con todos los constituyentes del sistema automatizado.

El autómata elabora las acciones a realizar sobre el sistema de fabricación en base al programa que ha sido introducido en su memoria, en base a las señales de los sensores, y en base a las órdenes que provengan del operador.

El autómata dialoga con el operario, similar a lo mostrado en la figura 1.23, recibiendo las consignas y suministrando informaciones. Puede coordinarse con otros procesos comunicándose con los demás autómatas de la línea de producción o con un nivel superior de supervisión.

No es posible automatizar todos los procesos. Las razones o causas pueden ser varias, aunque las más comunes son.

- Es muy caro desarrollar las máquinas o los robots necesarios para la automatización.
- No existen captadores o sensores fiables del proceso que se desea automatizar. Un ejemplo puede ser la automatización inteligente de lavadoras. ¿Existe un sensor de suciedad fiable? ¿A que llamamos suciedad?
- Es más barato que lo realice un ser humano [17].



Figura 1.23 Hardware de comunicación PLC, PC y HMI [13].

### 1.8.2.2 El término sistema

El aspecto importante en un sistema es la relación entre las entradas y las salidas. Un sistema puede ser una estación de generación de energía completa o quizá sólo un motor eléctrico. No importa que tan complejo sea un conjunto de componentes y sus interacciones dentro del sistema; se puede considerar que todos están dentro de una caja negra y sólo tener en cuenta las entradas y las salidas a dicha caja. La figura 1.24 muestra los ejemplos descritos [14].

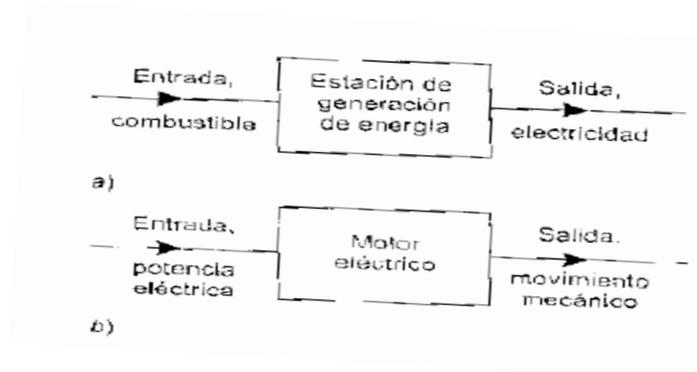


Figura 1.24 Sistemas a) una estación de generación de energía b) un motor eléctrico [14].

### 1.8.2.3 El sistema de control

Permite este mantenimiento de las variables puede definirse como aquel que compara el valor de la variable, o condición a controlar, con un valor deseado y toma una acción de corrección de acuerdo con la desviación existente sin que el operario intervenga en absoluto [13].

El sistema de control exige pues, para que esta comparación y subsiguiente corrección sean posibles, que se incluya una unidad de medida, una unidad de control, un elemento final de control y el propio proceso. Este conjunto de unidades forma un bucle o lazo que recibe el nombre de lazo de control. El lazo puede ser abierto o bien cerrado, en la figura 1.25 se muestra un sistema de control de lazo abierto de calefacción [13].



Figura 1.25 Sistema de calefacción central [14].

#### 1.8.2.4 Elementos en un sistema en lazo abierto

Se puede considerar que un sistema en lazo abierto consiste en algunos subsistemas básicos arreglados como se muestra en la figura 1.26.

Estos elementos pueden ser distintos, equipos separados, pero todas las funciones que cumple cada subsistema se deben preservar. La entrada global al sistema es una señal, que, basada en experiencias anteriores, es probable que conduzca a la salida requerida. Los subsistemas son:

- 1.- Elemento de control. Este elemento determina que acción se va a tomar dada una entrada al sistema de control.
- 2.- Elemento de corrección. Este elemento responde a la entrada que viene del elemento de control e inicia la acción para producir el cambio en la variable controlada al valor requerido.
- 3.- Proceso. El proceso o planta es el sistema en el que se va a controlar la variable [14].

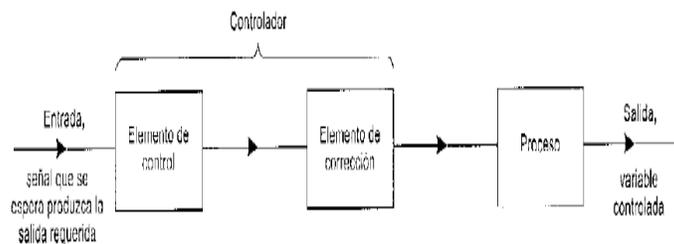


Figura 1.26 Subsistemas en un sistema de lazo abierto [14].

### 1.8.2.5 Elementos básicos de un sistema en lazo cerrado

Se puede considerar que un sistema en lazo cerrado consiste en algunos subsistemas básicos ordenados como se muestra en la figura 1.27.

Estos elementos pueden no ser partes distintas o equipos separados, pero todas las funciones de los subsistemas estarán presentes. La entrada global al sistema de control es el valor requerido de la variable. Y la salida es el valor real de la variable

1.- Elemento de comparación. Este elemento compara el valor requerido o de referencia de la variable por controlar con el valor medido de lo que se obtiene a la salida, y produce una señal de error la cual indica la diferencia del valor obtenido a la salida y el valor requerido.

$$\text{Señal de error} = \text{señal del valor de referencia} - \text{señal del valor medido.}$$

2.- Elemento de control. Este elemento decide que acción tomar cuando se recibe una una señal de error. A menudo se utiliza el término controlador para un elemento que incorpora el elemento de control y la unidad de corrección.

3.- Elemento de corrección. Este elemento se utiliza para producir un cambio en el proceso al eliminar el error, y con frecuencia se denomina actuador.

4.-Elemento proceso. El proceso, o planta, es el sistema donde se va a controlar la variable.

5.-Elemento de medición. Este elemento produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada, y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar si hay o no error.

Una característica necesaria de un sistema de control en lazo cerrado es el lazo de realimentación. Este es el medio a través del cual una señal relacionada con la variable real obtenida se realimenta para compararse con la señal de referencia. Se dice que se tiene realimentación negativa cuando la señal realimentada se sustrae del valor de referencia, esto es.

$$\text{Señal de error} = \text{valor de referencia} - \text{señal de realimentación.}$$

La realimentación negativa es necesaria para que logre el control. La realimentación positiva se expresa cuando la señal realimentada adiciona al valor de referencia, esto es:

Señal de error= valor de referencia +señal de realimentación.

En la figura 1.27 la señal de realimentación se combina con el valor de referencia en el elemento de comparación. El elemento de comparación se indica mediante un círculo con una cruz, éste es el símbolo genérico para indicar un elemento de suma. Cuando en el elemento de comparación hay realimentación, el valor de referencia se marca como una señal positiva y la señal de realimentación como negativa de modo que la salida del elemento de comparación es la referencia entre las señales. Si hubiera realimentación positiva entre elemento de suma entonces ambas señales deben marcarse como positivas. [14]

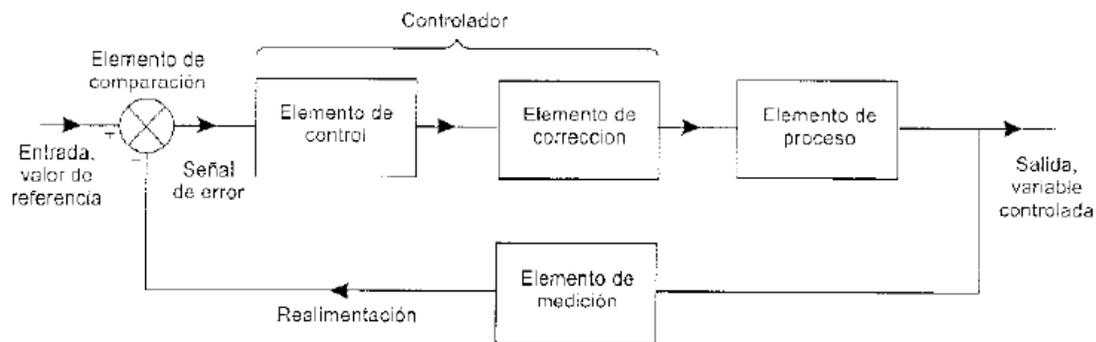


Figura 1.27 Subsistemas en un sistema de control en lazo cerrado [14].

### 1.8.2.6 Sensor

Un sensor es un dispositivo que, a partir de la energía del medio donde se mide, da una señal de salida transducible que es función de la variable medida.

Sensor y transductor se emplea a veces como sinónimos, pero sensor sugiere un significado más extenso: la ampliación de los sentidos para adquirir un conocimiento de cantidades físicas que, por su naturaleza o tamaño, no pueden ser percibidas directamente por los sentidos. Transductor, en cambio, sugiere que la señal de entrada y la de salida no deben ser homogéneas [18].

El efecto producido por el elemento primario puede ser un cambio de presión, fuerza, posición, medida eléctrica, etc.

Por ejemplo: en los elementos primarios de temperatura de bulbo y capilar, el efecto es la variación de presión del fluido que los llena y en los de termopar se presenta una variación de fuerza electromotriz, estos ejemplos son mostrados en la figura 1.28 [13].

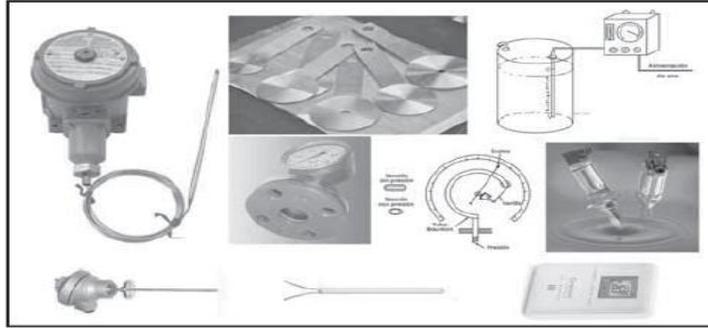


Figura 1.28 Sensores y elementos primarios [11].

### 1.8.2.7 Los transductores

Se denomina transductor, en general, a todo dispositivo que convierte una señal de forma física en una señal en una señal correspondiente, pero de otra forma física distinta. Es, por tanto, un dispositivo que convierte un tipo de energía en otro. Esto significa que la señal de entrada es siempre una energía o potencia, pero al medir, una de las componentes de la señal suele ser tan pequeña que puede despreciarse, y se interpreta que se mide sólo la otra componente [18].

Dado que hay seis tipos de señales: mecánicas, térmicas, magnéticas, eléctricas, ópticas y moleculares (químicas), cualquier dispositivo que convierte una señal de un tipo en una señal de otro tipo debería considerarse un transductor, y la señal de salida podría ser de cualquier forma física <<útil>>. En la práctica, no obstante, se consideran transductores por antonomasia aquellos que ofrecen una señal de salida eléctrica. Ello se debe al interés de este tipo de señales en la mayoría, en la imagen 1.29 se muestran algunos ejemplos de transductores o mejor conocidos como transmisores [18].



Figura 1.29 Transmisores [11].

### 1.8.2.8 El elemento final

Los elementos más comunes pueden ser electroválvulas, motores, resistencias calefactoras, en la figura 1.30, se muestra válvulas y electroválvulas, las cuales reciben la señal del controlador y modifica su posición por ejemplo variando el caudal de fluido [13].

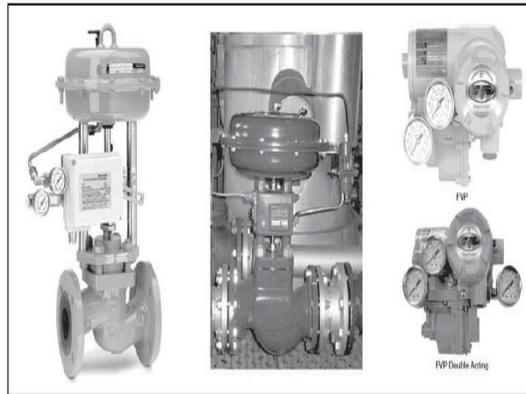


Figura 1.30 Elemento final de control [11].

### 1.8.2.9 Interfaz Hombre-Máquina (HMI)

Comprende los sinópticos de control y los sistemas de presentación gráfica. La función de un Panel Sinóptico es la de representar, de forma simplificada, el sistema bajo control (un sistema de aprovisionamiento de agua, una red de distribución eléctrica, una factoría). En la figura 1.31 se muestra un ejemplo de una HMI de fabricación de células flexibles.

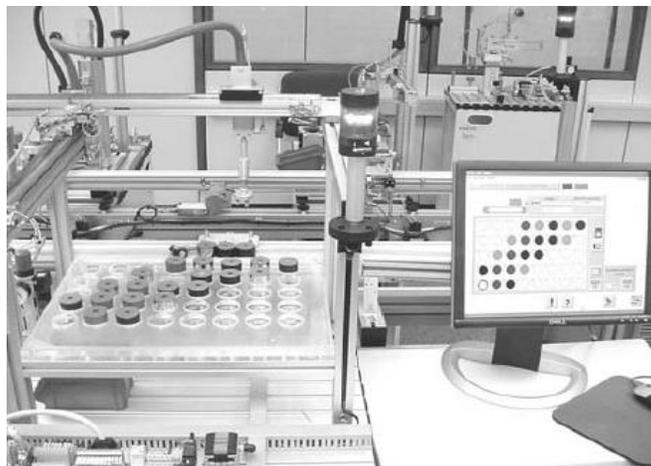


Figura 1.31 Scada de la Célula de Fabricación Flexible MPS2000 de Festo [16].

En un principio los paneles sinópticos eran de tipo estático, colocados en grandes paneles plagados de indicadores y luces. Con el tiempo han ido evolucionando, junto al software, en forma de representaciones gráficas en pantallas de visualización (PVD, Pantallas de Visualización de Datos). En los sistemas complejos suelen aparecer los terminales múltiples, que permiten la visualización, de forma simultánea, de varios sectores del sistema.

De todas formas, en ciertos casos, interesa mantener la forma antigua del Panel Sinóptico, pues la representación del sistema completo es más clara para el usuario al tenerla presente y no le afectan los eventuales fallos de alimentación de componentes o de controladores gráficos [19].

### 1.8.3 Generalidades de pH

Las variables químicas están relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición. Entre ellas, se encuentran la conductividad, el pH, redox y la composición de los gases en una mezcla [13].

#### 1.8.3.1 Ácidos y bases

Algunos ácidos muy conocidos son el vinagre (ácido acético), la vitamina C (ácido ascórbico) y el ácido del acumulador (ácido sulfúrico). Las bases muy comunes la lejía (hidróxido de sodio), el polvo para hornear (bicarbonato de sodio) y el amoníaco.

Los ácidos tienen sabor agrio, las bases tienen sabor amargo, y los compuestos que se forman cuando un ácido reacciona con una base (sales) tienen sabor salado.

Los datos experimentales indican que todos los ácidos tienen iones hidrógeno ( $H^+$ ) y las propiedades de las bases en agua se deben al ion hidróxido  $OH^-$ . El medio más común para identificar una sustancia como ácido o como base es la prueba del papel tornasol [20].

#### 1.8.3.2 pH

El pH es una variable química, el valor del pH está relacionado con la concentración de iones de hidrógeno ( $H^+$ ) que hay una solución acuosa y, por consiguiente, con la acidez de la solución. Su expresión viene dada por el logaritmo de la inversa de la concentración del ion *Hidrogeno*, expresada en moles por litro: [13]

$$pH = \log \frac{1}{[H^+]}$$

El pH puede (en teoría) tomar valores entre 0 – 14 en el agua, siendo 0 el valor extremo de ácido y 14 el valor extremo de base. La figura 1.32 muestra una escala a colores de los valores de pH [2].

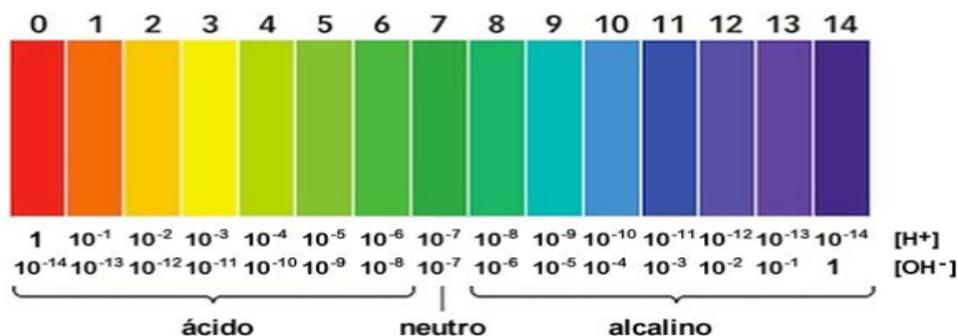


Figura 1.32 Escala de colores de pH y logarítmica [19].

En la medida del pH pueden utilizarse varios métodos, de entre los cuales los más exactos y versátiles de aplicación industrial son: el sistema de electrodo de vidrio y el de transistor (ISFET = *Ion Sensitive Field Effect Transistor*) [2].

### 1.8.3.3 La autoionización

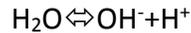
El agua es el disolvente por excelencia. Esto se debe en parte a que el agua puede actuar como un aceptor o como un donador de protones. Cuando el agua se enfrenta con una sustancia ácida actúa como base. Si se encuentra con una sustancia básica, actuará como un ácido. Esta capacidad dual es la que permite que en el agua se dé un proceso conocido como autoionización [21] [22].

La autoionización del agua es una reacción de las moléculas de agua con ellas mismas, como se indica:



Esta reacción se conoce como autoionización porque dos moléculas de agua se separan en iones cuando reaccionan entre sí. El ion hidronio (H<sub>3</sub>O<sup>+</sup>) representa a un H<sup>+</sup> asociado con una molécula de agua, que es lo que precisamente se encuentra en la disolución.

En la actualidad se sabe que el ion  $H^+$  en una disolución acuosa siempre se encuentra asociado con al menos una molécula de agua, formando iones  $H_3O^+$ , pero también puede asociarse con más moléculas de agua y formar iones  $H_5O_2^+$ . Sin embargo, es común escribir el equilibrio anterior simplemente como:



Esta reacción está en equilibrio y tiene asociada una constante. La constante de equilibrio para esta reacción puede escribirse como:

$$K_{eq} = \frac{[H^+][OH^-]}{[H_2O]}$$

Una forma de conocer la cantidad de iones que se producen por la autoionización del agua es a través de medir la conductividad eléctrica. Al realizar mediciones de conductividad eléctrica en muestras de agua químicamente pura, se conoce que la cantidad de iones presentes en ella es muy pequeña, es decir que esta reacción de autoionización es muy poco cuantitativa. Como la fracción de moléculas de agua que producen iones  $H^+$  y  $OH^-$  es muy pequeña, significa que casi toda el agua presente permanece como moléculas de agua. Eso permite suponer que la concentración de agua no cambia. En la ecuación del equilibrio químico se supone que  $[H_2O]$  es una constante. Si multiplicamos ambos lados de la ecuación por  $[H_2O]$ , obtenemos una nueva constante, al producto  $K_{eq}[H_2O]$  podemos llamarlo  $K_w$ . Su valor a 25 °C se determina experimentalmente, y es igual a  $1 \times 10^{-14} \text{ (mol/l)}^2$ .

$$K_{eq} [H_2O] = [H^+][OH^-] = K_w = 1 \times 10^{-14} \text{ (mol/l)}^2$$

Como por cada ion  $H^+$  que se produce se forma necesariamente un ion  $OH^-$ , la concentración de iones  $H^+$  en agua pura debe ser idéntica a la concentración de iones  $OH^-$ .

$$[H^+] = [OH^-]$$

Con la constante de equilibrio se sabe cuánto vale el producto de la concentración de  $H^+$  y  $OH^-$ ,

$$[H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14} \text{ (mol/L)}^2$$

Estas dos ecuaciones nos permiten calcular la concentración de cada ion en el agua,

$$[H^+] = 1 \times 10^{-7} \text{ (mol/L)} = [OH^-]$$

Esta concentración de iones es para el agua pura. Si la concentración de iones  $H^+$  es mayor que la concentración de iones  $OH^-$ , se dice que se tiene una disolución ácida. Si, por el contrario, la concentración de  $OH^-$  es mayor que la de  $H^+$ , se dice que se tiene una disolución básica o alcalina.

Como el valor de  $K_w$  es constante, es posible conocer la concentración de  $OH^-$  para una concentración dada de  $H^+$  y viceversa. Si, por ejemplo, la concentración de  $OH^-$  es igual a  $1 \times 10^{-5}$  mol/L,

$$[H^+][OH^-] = 1 \times 10^{-14} (\text{mol/L})^2$$
$$[H^+] [1 \times 10^{-5} \text{mol/L}] = 1 \times 10^{-14} (\text{mol/L})^2$$

$$[H^+] = \frac{1 \times 10^{-14} (\text{mol/L})^2}{1 \times 10^{-5} (\text{mol/L})} = 1 \times 10^{-9} (\text{mol/L})$$

Como los valores de las concentraciones de  $H^+$  suelen ser cantidades muy pequeñas y poco cómodas de manejar, se utiliza una medida más práctica, basada en la definición que dio el danés Soren P.L. Sorensen en 1909:

$$pH = -\log[H^+]$$

El pH de una disolución es el menos logaritmo de la concentración de iones  $H^+$ .

En el ejemplo anterior, en el que la concentración de  $H^+$  es igual a  $1 \times 10^{-9}$  mol/L, se puede calcular el pH. [3]

$$pH = -\log(1^{-9})$$
$$= -\log(0.000000001)$$
$$pH = -(-9)$$
$$pH = 9$$

## 1.8.4 Sensores para la medición de pH

### 1.8.4.1 Electrodo de vidrio

El método de medida se basa en una membrana de vidrio sensible al pH, cuya superficie reacciona con el contenido ácido de la solución generando una tensión que se mide con respecto a un electrodo de referencia de plata (Ag) o cloruro de plata (AgCl), la concentración de protones se muestra en la figura 1.33. Un sensor de pH proporciona mediciones lineales del pH de un material en un rango de concentraciones que abarca desde 0 hasta 14 de magnitud de pH. Los electrodos de vidrio se han convertido en estándares de medición del pH en todo el mundo. El vidrio es químicamente inerte y muy estable cuando se trabaja con ácidos y bases a alta temperatura. Por ello, los electrodos de vidrio para medición de pH pueden utilizarse universalmente en una multitud de aplicaciones [23].

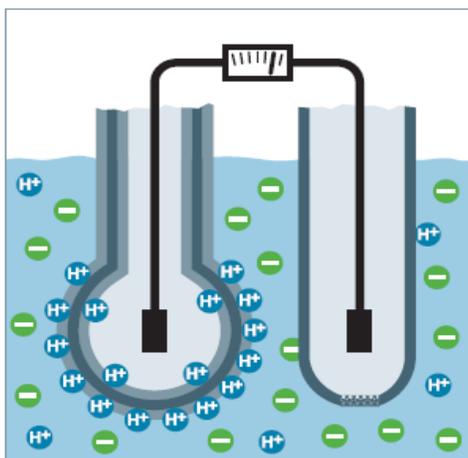


Figura 1.33 Funcionamiento del electrodo de vidrio [20].

#### 1.8.4.2 Electrodo ISFET

Se trata en efecto de un transistor sencillo con una fuente (genera tensión) y un drenador (absorbe la tensión) separados de la base mediante un semiconductor, como se muestra en la figura 1.34. Sobre éste se acumulan los iones de hidrógeno del medio a medir. La carga positiva resultante que se genera en el exterior origina una “imagen especular” negativa en el interior de la base. El canal semiconductor se transforma en conductor. Cuanto menor es el valor de pH del líquido, tanto mayor es la cantidad de iones de  $H^+$  que se acumulan en la base, y tanto mayor la corriente medible que se genera entre la fuente y el drenador.

La acumulación de protones es un efecto puramente electrostático. Por consiguiente, el material del sensor no sufre ningún cambio y no resulta por tanto necesario realizar tantas recalibraciones como con los electrodos de vidrio.

Utilizados ampliamente en la industria alimentaria y farmacéutica, donde la rotura de vidrio puede implicar serios problemas [23].

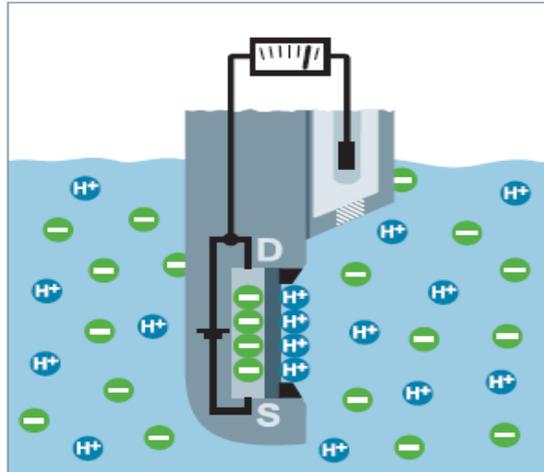


Figura 1.34 Funcionamiento Electrodo ISFET [20].

#### 1.8.4.3 Sensores de fibra óptica

Los sensores de fibra óptica consisten en un indicador inmovilizado, cuyas propiedades ópticas se modifican en función de la concentración de analito presente en la muestra.

La señal óptica así generada es conducida a continuación a través de una fibra óptica hasta un detector, para más tarde ser amplificada y procesada convenientemente.

Los sensores que funcionan por absorbancia se rigen por la ley de Lambert-Beer, que establece una relación de proporcionalidad directa entre la concentración de sustancia absorbente y la cantidad de luz absorbida por ésta, para una determinada longitud de onda:

Los sensores de fibra óptica no requieren señal de referencia, esto aumenta la estabilidad de la medida y reduce los costos de fabricación. En la figura 1.35 se muestra un sistema de medición de pH a través de la absorbancia [24].

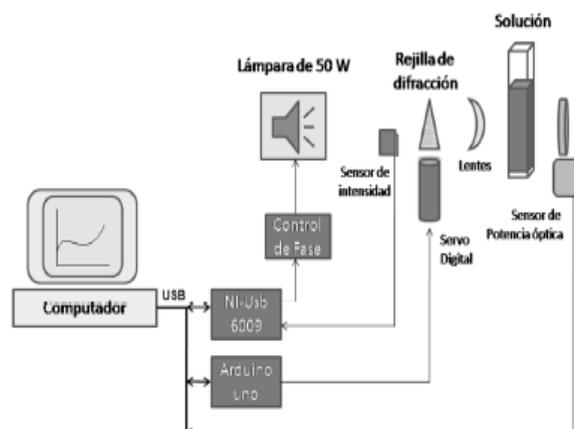


Figura 1.35 Diagrama de bloques del sistema para medir absorbancia óptica [21].

#### 1.8.4.4 Partes del sensor de pH electrodo de vidrio

**Potencial de asimetría:** Corresponde a los mV generados por un electrodo al ser sumergido en una disolución de pH 7. Habitualmente oscila alrededor de  $\pm 20$  mV. [3]

Este potencial cambia con la temperatura, por ejemplo, pasa de 54,2 mV a 0 °C a 74 mV a 100 °C por unidad de pH. Para medir el potencial desarrollado en el electrodo de vidrio es necesario disponer, en la solución, de un segundo elemento o electrodo de referencia. Éste, aparte de cerrar el circuito, suministra un potencial constante que sirve de referencia para medir el potencial variable del electrodo de vidrio. El electrodo de referencia contiene una célula interna formada por un hilo de plata recubierto con cloruro de plata en contacto con un electrolito de cloruro de potasio. Este electrolito pasa a la solución muestra a través de una unión líquida. De este modo, la célula interna del electrodo permanece en contacto con una solución que no varía de concentración y que, por lo tanto, proporciona una referencia estable de potencial [13].

La figura 1.36 muestra las partes de un sensor de pH electrodo de vidrio.

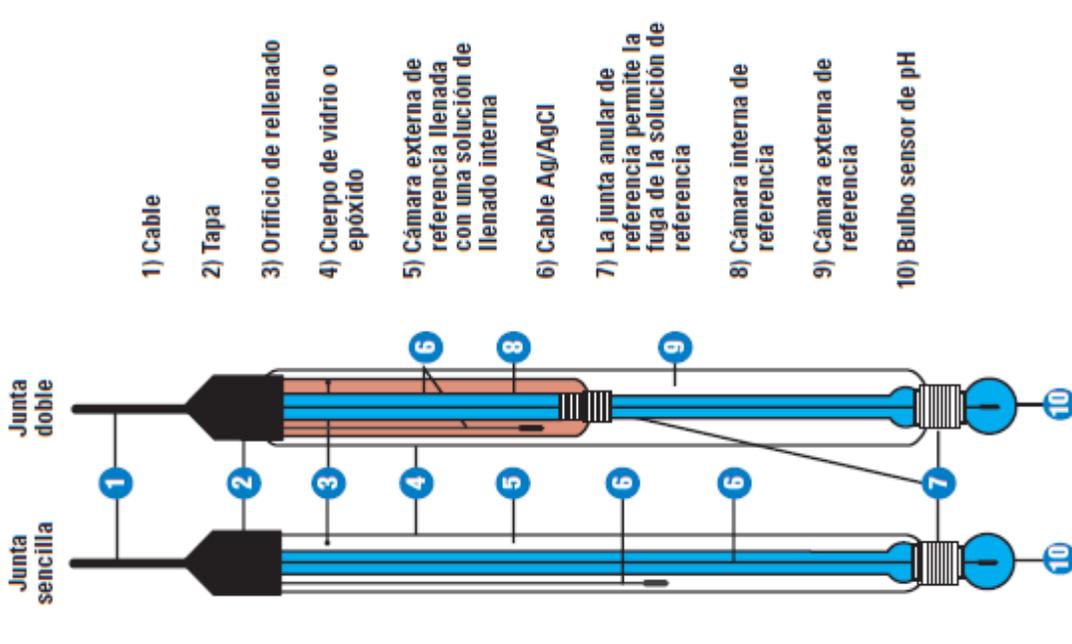


Figura 1.36 Electrodo y potenciales en la medida del pH [25].

#### 1.8.4.5 Efectos de la temperatura en la medida de pH

**Pendiente:** Es la respuesta del electrodo expresada en mV por unidad de pH. La pendiente teórica de un electrodo a la temperatura de 25 °C es de 59.16 mV/pH. En un electrodo nuevo se aproxima a este valor teórico. [3]

La pendiente del electrodo varía con la temperatura de forma conocida según la ley de Nerst. La figura 1.37 muestra las pendientes generadas por las temperaturas 100 °C con una pendiente de 74.04 mV, con una temperatura de 25 °C proporciona una pendiente teórica de 59.16 mV y con 0 °C proporciona una pendiente de 54.20 mV [13].

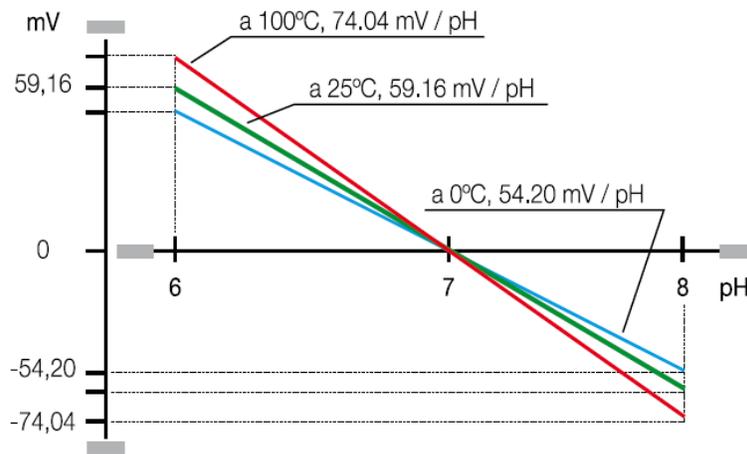


Figura 1.37 Pendiente en mV por unidad de pH según la temperatura [22].

La ecuación de Nernst da la f.e.m. desarrollada en el electrodo de referencia [13].

$$= \frac{RT}{F} \ln \frac{[H^+]_{\text{exterior al electrodo}}}{[H^+]_{\text{interior en el electrodo}}} = -\frac{RT}{F} \text{pH}$$

en la que:

$E$  = Potencial.

$R$  = Constante de los gases perfectos.

$F$  = Número de Faraday.

$T$  = Temperatura absoluta.

$[H^+]$  = concentración de iones hidrógeno.

Los pHmetros compensan automáticamente este efecto, con la llamada Compensación Automática de la temperatura (CAT).

Para ello el instrumento debe ser informado de la temperatura de la muestra. Existen varias posibilidades:

- Conectar al pHmetro un sensor de temperatura, además del electrodo.
- Utilizar un electrodo con sensor de temperatura incorporado cuya ventaja principal es que simplifica la instalación. Con un solo sensor, una sola sonda y un solo cable se transmiten las dos señales, pH y temperatura, al instrumento.
- Introducir la temperatura manualmente.

Hay aplicaciones donde no se requiere la medida de la temperatura, porque es constante o bien por que acepta una tolerancia amplia en el valor de pH, etc. En estos casos, la temperatura de la muestra se puede introducir manualmente mediante el teclado del instrumento.

### **Sobre las disoluciones tampón**

Cada disolución tiene un comportamiento específico frente a la temperatura. Los pHmetro tienen memorizada la tabla de valores de pH de las disoluciones tapón a distintas temperaturas, para poder realizar una correcta calibración a cualquier temperatura.

### **Sobre una determinada muestra**

Cada producto varía de un modo distinto su pH con la temperatura y por lo tanto el instrumento no puede compensar esta variación. De ahí la necesidad de expresar siempre juntos los valores de pH y temperatura a la cual ha sido realizada la medida.

### **Sobre aguas en general**

El pH de las aguas está comprendido habitualmente entre 5 y 9. Los errores cometidos sin tener en cuenta la temperatura son prácticamente despreciables, entre 10 y 35 °C, ver el gráfico de a continuación figura 1.38 [3].

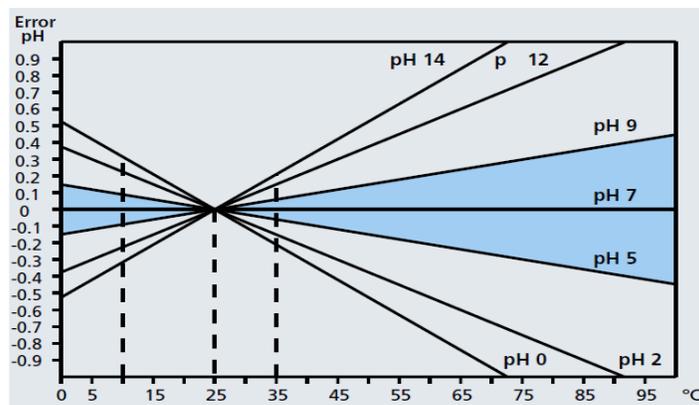


Figura 1.38 Error en la medida de pH sin compensación de temperatura entre 0 y 100 °C [23].

**Sensibilidad:** Es la expresión de la pendiente del electrodo en términos relativos. Se obtiene dividiendo el valor real de la pendiente por el valor teórico a la temperatura de calibración y se expresa en %.

Potencial de asimetría y sensibilidad varían con el tiempo y el uso del electrodo, de ahí la necesidad de calibrarlo periódicamente con disoluciones tampón.

### Calibración con tampones

Consiste en ajustar los valores leídos por un sistema de medida de pH (instrumento– electrodo) según los valores de unas disoluciones tampón (patrones). Así se compensan las desviaciones de potencial de asimetría y de la pendiente que el electrodo experimenta en el tiempo. Es recomendable verificar el calibrado intercalando tampones entre las muestras. Un valor desviado del tampón es una indicación de que es necesario calibrar [8].

### Frecuencia de la calibración

Depende de la precisión exigida por el usuario y del efecto que las muestras a medir tengan sobre el electrodo. Se recomienda una calibración diaria, pero deberá ser el usuario quien, con su particular experiencia, decida el tiempo adecuado [2].

### Calibración en un punto

Este modo de calibración es aceptable cuando se miden valores de pH cercanos al valor del tampón utilizado. Calibrando en un punto se corrige solo el potencial de asimetría del electrodo.

### Calibración en dos puntos

Es la calibración más habitual.

Se recomienda como primer tampón el de pH 7 y como segundo tampón puede

Utilizarse el de pH 4 o 9 según se vaya a trabajar en la zona acida o alcalina.

Calibrando con dos tampones se compensa, además del potencial de asimetría, la pendiente o la pérdida de sensibilidad del electrodo [3].

### Calibración en tres puntos

Este tipo de calibración se aconseja cuando habitualmente se mide en toda la escala de pH o cuando se requiere mucha precisión en una determinada zona.

Como primer punto se aconseja el pH 7.

Como segundo y tercer punto deben elegirse dos de los valores restantes (pH 2.00, 4.01, 9.21, 10.90 a 25 °C). Calibrando en tres puntos se compensa la asimetría del electrodo y su sensibilidad tanto en la zona acida como en la alcalina

### Agitación y pH

La agitación mejora la calidad de las medidas, aumentando la rapidez de respuesta y la reproducibilidad de las mismas, la figura 1.39 ejemplifica la velocidad de estabilidad mediante la agitación [3].

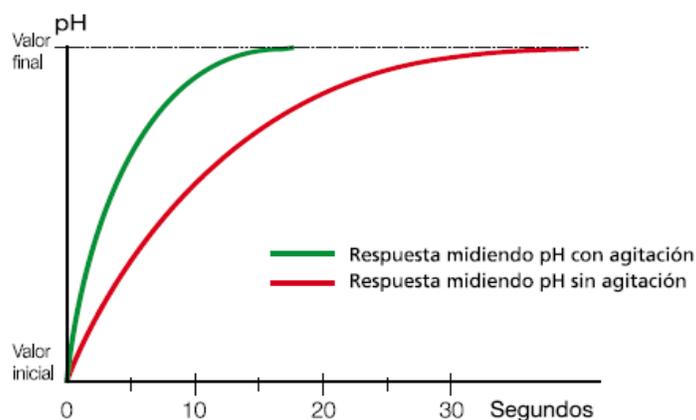


Figura 1.39 Respuesta la medición de pH con y sin agitación.

### 1.8.5 Digestión anaerobia

La digestión anaerobia es el proceso de degradación de materia orgánica en ausencia de oxígeno llevada a cabo por la acción de bacterias anaerobias cuyo producto principal es el biogás ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  etc.). La alta concentración de metano (60-70%) contenido en la mezcla total de biogás lo convierte en un atractivo combustible de origen natural para su uso como combustible mediante la combustión del mismo.

La digestión anaerobia ocurre de manera natural tanto los pantanos como en el tracto interior de los animales; no obstante, puede ser efectuada artificialmente por plantas industriales llamadas digestores anaerobios, otorgando la posibilidad para la aplicación del proceso en el tratamiento de aguas residuales y permitiendo simultáneamente que se genere biogás [26].

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea. Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas como se muestra en la figura 1.40 [27].

1. Hidrólisis.
2. Etapa fermentativa o acidogénica.
3. Etapa acetogénica.
4. Etapa metanogénica. [27]

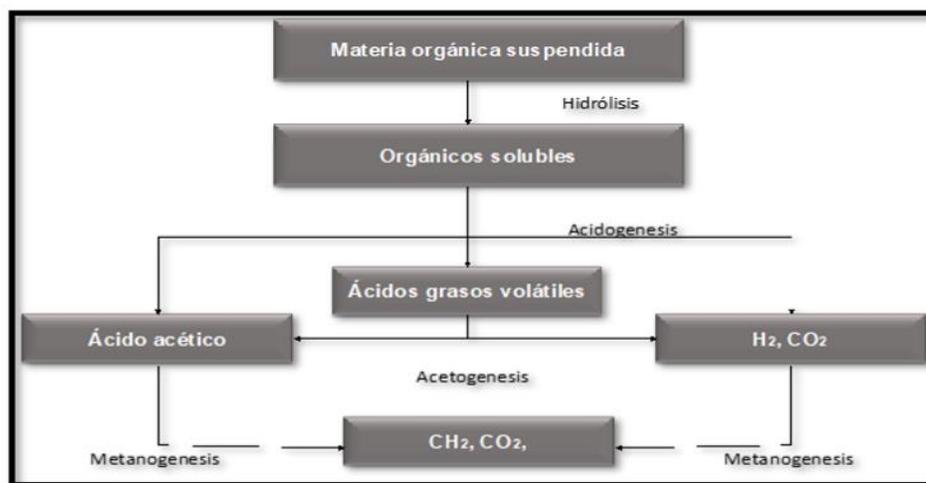


Figura 1.40 Etapas en el proceso de digestión anaerobia [26].

### 1.8.5.1 La Hidrolisis

La hidrólisis es la descomposición de compuestos orgánicos por la interacción con el agua (del griego, hydro = agua y lysis = romper), se interpreta como romper los enlaces entre 2 moléculas por adición de una molécula de agua.

Este proceso es el primer paso necesario para la degradación anaerobia de sustratos orgánicos complejos (proteínas, carbohidratos y lípidos) a compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga), ya que la materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos. Es un proceso que depende de la temperatura, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de  $\text{NH}_4^+$  y de la concentración de los productos de la hidrólisis. En algunos procesos este paso inicial es catalizado por el uso de un ácido o álcali. Los componentes formados durante la hidrólisis son divididos más adelante durante la acidogénesis. La figura 1.41 indica la molienda de materia orgánica para ser ingresada a la etapa de hidrolisis [27].



Figura 1.41 Molienda de materia prima para la etapa de Hidrólisis.

### 1.8.5.2 Acidogénesis

En esta segunda etapa de la digestión anaerobia, las materias moleculares pequeñas y los sustratos orgánicos granulares son degradados en ácidos grasos volátiles junto con la generación de

subproductos tales como amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) y ácido sulfhídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ). La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho de que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que, además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto en el sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos. Los principales productos finales pueden ser diferentes y generalmente prevalecen tres tipos de fermentación acidogénica: butírica-, propiónica- y fermentación tipo-etanol. Durante la fermentación butírica, los ácidos acéticos y butíricos son formados principalmente junto con  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . En la fermentación propiónica, los principales productos son el ácido propiónico, ácido acético y en menor medida ácido valérico, sin producción significativa de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . Y finalmente en la fermentación tipo-etanol, los principales subproductos son el etanol y el ácido acético en conjunto con bajas concentraciones de  $\text{CO}_2$  y  $\text{H}_2$ . [1]

### 1.8.5.3 Acetogénesis

Etapa microbiológica donde los ácidos grasos volátiles y alcoholes formados en la acidogénesis, son transformados en acetato, ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno principalmente, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos.

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos ( $\text{H}_2$  y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato ( $\text{CH}_3\text{COO}^-$ ) e hidrógeno ( $\text{H}_2$ ), a través de las bacterias acetogénicas

Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla  $\text{H}_2/\text{CO}_2$ ) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas [26].

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus

células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente [27].

#### 1.8.5.4 Metanogénesis

Etapa final del proceso de digestión anaerobia que implica la conversión de compuestos simples de carbono en metano por la acción de bacterias metanogénicas [27].

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización [1].

Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato,  $H_2/CO_2$ , metanol y algunas metilaminas. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan [1].

- Hidrogenotróficos, que consumen  $H_2/CO_2$  y fórmico.
- Acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas.

#### 1.8.5.5 Sistemas anaerobios

La descomposición de la materia orgánica por las bacterias se realiza en ausencia de aire, utilizándose reactores cerrados; en un proceso anaerobio, la mayoría de las sustancias orgánicas se convierten en dióxido de carbono y metano. Los productos finales de la digestión anaerobia son el biogás (mezcla gaseosa de metano, dióxido de carbono, hidrógeno, nitrógeno y sulfuro de hidrógeno), que se puede aprovechar para la producción energética, y los lodos de digestión (compuestos no biodegradables y biomasa). El proceso anaerobio se caracteriza por tener una baja tasa de síntesis bacteriana, es decir, una baja producción de lodos de desecho, en la tabla 1.2 se describen las ventajas y desventajas de los sistemas anaerobios [26].

Tabla 1.2 Ventajas y desventajas de los procesos anaerobios [27]

Ventajas	Desventajas
No es necesario emplear energía externa al proceso.	El sistema es muy inestable:  Cambios leves de temperatura, el pH y la composición del sustrato causan disfunciones. Además, es muy sensible a la presencia de sustancias tóxicas y antibióticos.
La energía contenida en el gas metano se puede aprovechar.	
La generación de lodos (biomasa) es baja	
Se puede aplicar aun a valores altos de DB05, 20 (Mayores que 10,000 mg/L).	

### 1.8.6 Parámetros de control en la digestión anaerobia

Es de suma importancia mantener y controlar los parámetros claves dentro los rangos apropiados para una operación eficiente de la digestión anaerobia. Estos parámetros son: materia prima, pretratamiento, sólidos totales y volátiles, temperatura, pH, ácidos grasos volátiles, tiempo de retención hidráulico y carga volumétrica aplicada, nutrientes e inhibición.

Las bacterias anaerobias utilizan entre el 5-10% de la energía contenida en el sustrato para funciones de reproducción, originando nuevas células, dirigiendo el 90-95% restante a la producción de gas metano, en cambio las bacterias aerobias emplean entre el 50 y 65% de la energía del sustrato en la síntesis de nuevas células, mientras que la otra parte es utilizada en la reutilización de otras funciones metabólicas [1].

Las reacciones bioquímicas que se llevan a cabo en este proceso son parecidas, a las que se realizan en forma natural en los sedimentos acuáticos (pantanos, manantiales, lagunas, etc.), en el intestino de animales y de seres humanos, la única diferencia es la velocidad de reacción [27].

#### 1.8.6.1 Materia prima

El proceso microbiológico no solo requiere de fuentes de carbono y nitrógeno, sino que también deben estar presentes en un cierto equilibrio sales minerales. En el caso de ciertos desechos industriales, es necesaria la adición de compuestos o realizar un post tratamiento aeróbico. En la digestión anaerobia, la materia prima es mejor conocida como sustrato, el cual es una materia

biológicamente biodegradable que tiene un gran potencial para generación de energía renovable como sustitución a los combustibles fósiles [27].

#### 1.8.6.2 Pretratamiento

El pretratamiento mecánico desintegra partículas sólidas de los sustratos, en consecuencia, libera compuestos de células e incrementa el área de superficie específica. Un incremento en la superficie del área proporciona mejor contacto entre el sustrato y la bacteria anaerobia, y por lo tanto, mejora el desempeño en el proceso de la digestión anaerobia. Esposito et al., (2011) sugirieron que una partícula de gran tamaño, resulta en una pobre degradación de DQO y una baja tasa de producción de metano [22].

#### 1.8.6.3 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más importantes e influyentes en la digestión anaerobia debido a que no solo afecta la actividad de las enzimas y las coenzimas, también influye en el rendimiento del metano y la calidad del digestato. Existen tres tipos de condiciones de temperatura en las cuales la bacteria anaeróbica puede crecer y desarrollarse adecuadamente: psicrófila (10-30 °C), mesofílica (30-40 °C) y termofílica (50-60 °C). El desempeño de la digestión anaerobia aumenta cuando se incrementa la temperatura, resaltando las ventajas de la condición termofílica con su tasa metabólica más alta, mayor crecimiento específico y mayor tasa de destrucción de patógenos junto con una mayor producción de biogás [27].

Para un rango de temperatura entre 52.2 y 54.4 °C, el proceso termofílico es 1.9 veces más sensitivo a cambios en temperatura y en el rango 54.4 a 56 °C la sensibilidad a los cambios de temperatura es 4.3 mayor que los observados bajo condiciones mesofílicas. Por lo tanto, un pequeño cambio en la temperatura modifica sustancialmente el desempeño del biodigestor. Un cambio repentino a temperaturas mayores, puede reducir la actividad metanogénica y simultáneamente disminuye la capacidad de degradación de los ácidos grasos de cadena corta. Es posible obtener buenos resultados en costo-eficiencia en el proceso de digestión anaerobia mesofílica mediante condiciones óptimas [1].

#### 1.8.6.4 Sólidos totales y sólidos volátiles

La materia orgánica contiene tanto agua como una fracción sólida el cual lleva por nombre Sólidos Totales (ST). Esta fracción es de suma importancia para que el proceso se efectúe satisfactoriamente ya que a medida que hay una mayor cantidad de sólidos dentro del reactor, la movilidad de las

bacterias metanogénicas dentro del sustrato es limitada y esto afecta directamente a la eficiencia y producción del biogás. Experimentalmente se ha demostrado que una carga en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8 % a 12 % de sólidos totales para asegurar el buen funcionamiento del proceso, a diferencia de los digestores discontinuos que tienen entre un 40 a 60 % de sólidos totales. Los sólidos volátiles contienen componentes orgánicos, los cuales serán convertidos a metano. Estos sólidos son porciones de los sólidos totales que se libera de una muestra volatilizándose cuando se calienta durante dos horas a 600 °C [1].

#### 1.8.6.5 El pH

La bacteria anaerobia necesita diferentes rangos de pH para su crecimiento, por ejemplo, para la bacteria fermentativa un rango comprensivo es de 4.0 a 8.5 mientras que para la bacteria metanogénica es necesario un rango limitante de 6.5 a 7.2 para su correcto crecimiento. En general, el valor óptimo de pH para la digestión anaerobia debe ser neutro, es decir, 7. En la digestión anaerobia de dos etapas, el pH en el reactor donde sucede la etapa hidrólisis es más bajo y ésta misma puede ser favorecida con un pH no controlado o un pH a 4.0 al combinarlo con inóculos tales como lodos activados aerobios o anaerobios. En la práctica se ha visto que, al alejarse del valor neutro, la eficiencia del proceso de digestión anaerobia disminuye, aunque se ha comprobado que para valores fuera del rango el proceso no se inhibe hasta cierto valor particular. Para regular el pH en un proceso anaerobio se pueden emplear diferentes métodos: adición de álcali (fundamentalmente cal o sosa), adición de ácido (orgánico o inorgánico) y disminución de la carga orgánica [1].

#### 1.8.6.6 Ácidos Grasos Volátiles

Los Ácidos Grasos Volátiles (AGV), los cuales principalmente incluyen ácido acético, ácido propiónico, ácido butírico y ácido valérico, son los principales productos intermedios durante la digestión anaeróbica de residuos orgánicos. Generalmente estos ácidos pueden transformarse en metano y dióxido de carbono por acetógenos sintróficos y la bacteria metanogénica. Los AGV determinan el pH el cual es también uno de los parámetros más importantes que influyen en el proceso anaerobio. También pueden ser usados para remoción de nutrientes, producción de biogás y biodiesel [27]. La abundancia y actividad de la bacteria acidogénica determina la acumulación de AGV (Wang et al., 2014) y la excesiva producción de éstos, inhibe a la bacteria metanogénica afectando el rendimiento en la producción de metano. Para evitar la inhibición metanogénica, es

necesario controlar la producción de los ácidos grasos volátiles durante la fermentación mediante la temperatura, pH, tiempo de retención hidráulica y la relación carbono/nitrógeno (C/N).

#### 1.8.6.7 Tiempo de Retención Hidráulico y Carga Volumétrica Aplicada

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) junto con la Carga Volumétrica Aplicada (CVA) determinada por el sustrato, son los principales parámetros de diseño, definiendo el volumen del reactor. La eficiencia de la producción del biogás se determina generalmente expresando el volumen de biogás producido por unidad de peso de materia seca o sólidos volátiles. Para alcanzar una significativa inmovilización de la biopelícula en el soporte, es necesario aplicar un TRH en el comienzo de la operación del reactor, esto con el fin de mejorar el tiempo de contacto entre las bacterias y el material del soporte [1].

#### 1.8.6.8 Nutrientes

Una de las principales ventajas que podemos encontrar en la digestión anaerobia frente a otros procesos biológicos es su bajo requerimiento de nutrientes debido a los bajos índices de producción de biomasa que presentan los microorganismos anaerobios. El proceso de digestión anaerobia requiere de macronutrientes (nitrógeno y fósforo) y micronutrientes (minerales traza). Sin embargo, en el caso de los balances de los nutrientes (balance carbono, nitrógeno, fosforo) es necesario encontrar la relación óptima contenida en el sustrato, esta relación se ve afectada dependiendo el tipo de materia orgánica a degradar o al realizar una codigestión para el aumento de nutrientes como el Nitrógeno [1].

#### 1.8.6.9 Inhibición

Para mejorar la eficiencia en los procesos anaerobios y así evitar en gran medida la inhibición de los microorganismos: Primeramente, se pueden lograr altas tasas de remoción de compuestos inhibidores si los microorganismos son aclimatados con aquellos compuestos usados como una fuente de carbono. Esta aclimatación debe durar al menos dos semanas. En principio, este largo acondicionamiento para los microorganismos anaerobios debería incrementar su tolerancia a los tóxicos y mejorar la biodegradabilidad de éstos. La segunda estrategia está relacionada con el uso de dos reactores separados para la etapa acidogénica y metanogénica, debido a que el incremento

de las concentraciones de ácidos grasos volátiles da lugar a una disminución del pH y, en consecuencia, la producción de metano es menor [1].

### 1.8.7 El Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo

El reactor bioquímico es el elemento principal en el cual ocurre el proceso de la degradación de la materia orgánica. Éstos pueden ser de forma cilíndrica, cúbica o rectangular, presentándose en su mayoría los cilíndricos.

El Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo (RLFIAP) figura 1.42, es un reactor de naturaleza híbrida al combinar diferentes ventajas que sustentan otros reactores anaerobios tales como el Reactor de Lecho Fluidizado Inverso (RLFI), Reactor de Lecho Fijo y el Reactor Anaerobio Multitubular (RAM). Este sistema se basa en los principios del RLFI al utilizar partículas como soporte de más baja densidad que la del líquido, este soporte es fluidizado de manera descendente (fluidización inversa).

Las ventajas de este reactor son amplias, por mencionar algunos ejemplos: bajos requerimientos energéticos, tiempos de residencias cortos y gran capacidad de carga orgánica. Tales ventajas se ven aumentadas de manera significativa en el RLFIAP al adoptar el principio de un RAM, pues el tanque principal de 2.5 m de altura y 1.18 m de diámetro, cuenta con cuatro columnas de 2 m de altura y 0.38 m de diámetro cada una en su interior ubicadas estratégicamente de forma paralela, lo cual reduce espacios vacíos. El tanque principal del reactor es de forma cilíndrica y el material con el cual está construido es resina de poliéster con fibra de vidrio. Con el fin de disminuir costos y los requerimientos energéticos, tiene adaptado un tanque de distribución en la parte superior, por lo tanto, se utilizan únicamente una bomba centrífuga de alimentación y otra de recirculación para el suministro del tanque de distribución y de esta forma se evita alimentar y recircular cada columna interior por separado.

El RLFIAP cuenta con un sistema electrónico para detección del nivel del soporte, con el objetivo de controlar la expansión deseada del lecho fluidizado. Con esta combinación de características, el RLFIAP optimiza el rendimiento de metano y la degradación del sustrato, ejecutando mayores cargas orgánicas en un TRH más corto. [1]

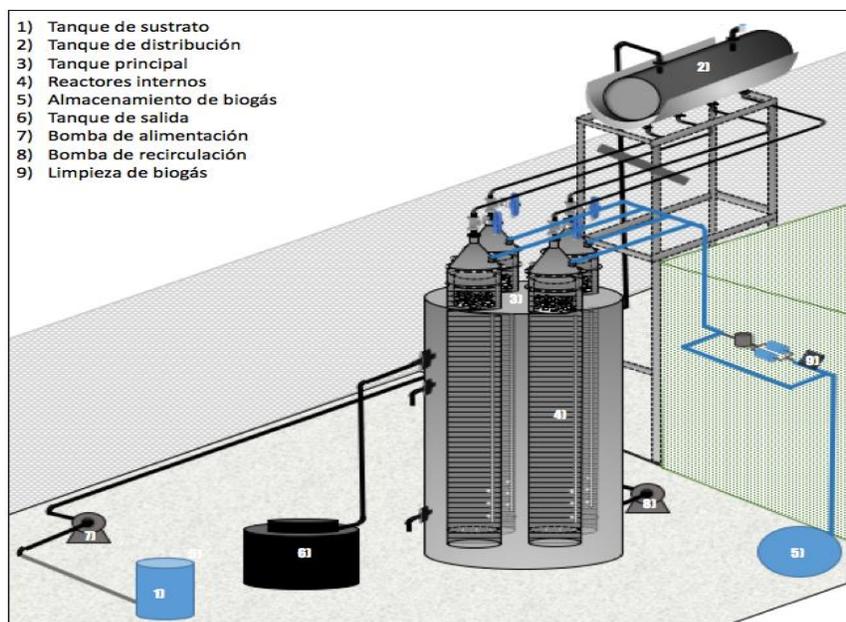


Figura 1.42 Reactor de Lecho Fluidizado Inverso con Arreglo en Paralelo [1].

### 1.8.8 Biogás

El biogás, compuesto de 55-77% (v/v)  $\text{CH}_4$  y 25-45% (v/v)  $\text{CO}_2$ , es una fuente alternativa de energía que puede ser utilizada en la producción de energía eléctrica y calor, como combustible automotriz y como sustituto del gas natural. Es el producto principal de la digestión anaerobia y puede ser producido a partir de una gran variedad de sustratos orgánicos, incluidos los residuos sólidos (p. ej., residuos agrícolas, estiércol, residuos orgánicos domésticos, etc.) y aguas residuales domésticas e industriales. Por ello el biogás representa una alternativa no solo a los combustibles fósiles, sino también a la creciente necesidad por revalorizar los residuos orgánicos. [28]

(Tabla 1.3). Cuando el biogás tiene un contenido de metano superior al 45 % se considera inflamable.

Tabla 1.3 Características generales del biogás [1].

Composición	55-70 % de metano ( $\text{CH}_4$ ). 30-45 % de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Trazas de otros gases.
Contenido energético	6.0-6.5 $\text{kWh}\cdot\text{m}^{-3}$
Equivalente de combustible	0.60-0.65 L petróleo/ $\text{m}^3$ biogás
Límite de explosión	6-12 % de biogás en el aire
Temperatura de ignición	600-750 $^{\circ}\text{C}$ (con el contenido de $\text{CH}_4$ mencionado)
Presión crítica	74-88 atm
Temperatura crítica	-82.5 $^{\circ}\text{C}$

Densidad normal	1.2 kg·m <sup>-3</sup>
Olor	Huevo podrido (el olor del biogás desulfurado es imperceptible)
Masa molar	16.043 kg·kmol <sup>-1</sup>

El biogás se puede utilizar para producir energía eléctrica mediante turbinas o plantas generadoras a gas. Aunque existe una tendencia incremental evidente en la generación eléctrica a partir del biogás, el desarrollo es aún limitado. El rendimiento del biogás obtenido de la digestión anaerobia por residuos orgánicos es sustancialmente afectado por la composición de la materia prima, incluso para las mismas especies de biomasa, su composición puede variar dependiendo de la localización geográfica y la temporada de cosechas. Por consiguiente, la caracterización de los componentes de los residuos orgánicos tales como celulosa, hemicelulosa, lignina y proteína son importantes para la correcta estimación del rendimiento de metano [1].

## 1.9 ESTADO DEL CAMPO

Los medidores de pH de membrana de vidrio encontrados en el estado del campo son: los pHmetro de mesa, los pHmetro portátiles y las sondas o sensores de pH individuales, cada uno con la medición por el método potenciométrico y con características similares para realizar la medición de pH, inclusive existen sensores de pH, para medir materia sólida como carnes, quesos, frutas, productos viscosos, etc.

### 1.9.1 Medidores de mesa de pH

Los medidores de pH utilizados en los laboratorios son los llamados pHmetros de mesa, para la medición de pH, ORP, conductividad, etc. Proporcionando valores en estas magnitudes o en miliVoltaje, en la mayoría de los sensores incorporan el sensor de temperatura, para realizar la compensación por temperatura CAT y así tener una medición de pH más precisa [23] [3].

La tabla 1.4 muestra algunos pHmetro utilizados en el presente proyecto, describe parte de las características principales, las cuales fueron tomadas en cuenta para incluirlas en el sistema de medición y control de pH, por ejemplo, registrar las mediciones de temperatura y pH.

Algunos de los pHmetro de mesa, cuentan con operación de diagnóstico para verificar el estado del sensor de pH, una fuente de Voltaje y una pantalla con dígitos vistosos ya sea en blanco y negro e

inclusive los nuevos modelos con pantalla a color, la sugerencia para la visualización de la medición de pH, es con la cantidad entera y las dos cifras decimales.

En el proyecto se visualizará en la HMI la medición de las magnitudes de pH, temperatura, la activación de los procesos de limpieza, calibración y medición, además que el usuario puede indicarle el momento para mostrar la medición de pH, temperatura u otro proceso.

Tabla 1.4 pHmetros de mesa.

pHmetro.	Características principales.	Imagen del pHmetro.
<p>Medidor de mesa de pH/mV con CAL Check HI2221-01. Marca HANNA® instruments [29] .</p>	<p>Intervalo de pH -2.0 a 16.0 pH, Resolución de pH 0.01 pH, Exactitud de pH <math>\pm 0.01</math> pH, Calibración de pH automática, hasta cinco puntos de calibración con siete valores disponibles (pH 1.68, 4.01, 6.86, 7.01, 9.18, 10.01, 12.45), Compensación de temperatura Manual o automática de -20.0 a 120.0°C (-4.0 a 248.0°F), Intervalo de temperatura -20.0 a 120.0°C (-4.0 a 248.0°F), Resolución de temperatura 0.1°C, Memoria de registro hasta 100 registros manuales, Conectividad USB con aislamiento óptico</p>	
<p>Medidor de pH 700 marca OAKTON [30].</p>	<p>Rango -2.00 a 16 pH, Resolución 0.01 pH, Exactitud <math>\pm 0.01</math> pH, Calibración hasta 5 puntos (USA: 4.01; 7.00; 10.01, 12.45 o NIST: 1.68, 4.01, 6.86; 9.18, 12.45); reconocimiento automático de sol. Buffer, Compensación de temperatura: seleccionable manual o automática de 0 a 100°C (32 a 212°F), Resolución de temperatura 0.1°C o 0.1°F, Memoria: hasta 100 grupos, pH y temperatura. Salida: ninguna.</p>	

<p>Medidor de pH/iones SevenCompact™ S220. Marca Mettler Toledo [31].</p>	<p>Intervalo de pH. -2.000 a 20.00, Resolución 0.001/0.01/0.1, Precisión. <math>\pm 0,002</math>, Máx. 5 puntos, 8 grupos de tampones predefinidos y 1 definido por el usuario, Temperatura – 30,0 a 130,0 °C, Resolución 0,1 °C, Almacenamiento de datos 1000 mediciones, Exportación de datos Unidad de memoria USB, software EasyDirect™ pH</p>	 <p>The image shows a white Mettler Toledo SevenCompact S220 pH meter. It features a large, color LCD screen displaying a pH reading of 9.21. The device has a control panel with several buttons. A glass electrode is mounted on a stand to the left of the meter, and a beaker containing a blue liquid is positioned below the electrode. The Mettler Toledo logo is visible on the top of the electrode stand.</p>
---	--	--

### 1.9.2 Medidores de pH portátiles

La medición de pH de las muestras provenientes de la etapa de hidrolisis, para ser ingresadas al RLFAP, se utiliza el pHmetro portátil de la Marca Oakton 35-Series Testrs™, con este se verifica el valor del pH del sustrato a ingresarla al RLFAP.

Realizando la medición de pH de forma manual, a la vez se va ajustando de esta misma forma el pH de la mezcla, agregando bicarbonato de sodio para lograr un valor de pH 7.00.

Para la medición de pH, se extrae la muestra en un depósito de aproximadamente 200 ml, se introduce el medidor portátil de pH, se espera alrededor de 10 segundos para que la medición se estabilice. Este procedimiento de medición, es realizado por alumnos de ingeniería y maestría en ingeniería química, dicho personal debe utilizar equipo de protección personal [32] [33].

La tabla 1.5 describe las principales características de los medidores de pH portátiles, dentro de estas están la calibración manual y automática, ambas se consideraron para el presente proyecto.

Tabla 1.5 Medidores de pH portátiles.

pHmetro portátil.	Características principales.	Imagen del pHmetro portátil.
<p>Medidor analógico de pH/mV/°C con electrodo HI1230B. HI83141. Marca HANNA® instruments [34].</p>	<p>Intervalo de pH 0.00 a 14.00 pH, Resolución de pH 0.01 pH, Exactitud de pH (a 25°C / 77°F) ±0.01 pH, Calibración de pH Manual, dos puntos, a través de potenciómetros de ajuste, Compensación por temperatura automático, de 0 a 70°C (32 a 158°F), Intervalo de temperatura 0.0 a 100.0°C, Exactitud de temperatura ±0.4°C, Resolución de temperatura 0.1 °C.</p> <p>Electrodo de pH Electrodo de pH HI1230B con cuerpo de PEI, conector BNC y cable de 1m (incluido).</p> <p>Sonda de temperatura Sonda de temperatura HI7669AW de acero inoxidable, conector BNC (incluida).</p>	
<p>Medidor económico pH 11. OAKTON [33].</p>	<p>Rango -2.00 a 16.00 pH, Resolución 0.01 pH, Exactitud ±0.01 pH, Calibración Hasta 5 valores de sol. Buffer: pH 1.68, 4.01, 6.86/7.00, 9.18/10.01, 12.45, Compensación de temperatura: automática o manual de 0 a 50°C, Resolución de temperatura 0.1°C, Exactitud de temperatura ±0.5°C, Almacena hasta 50 lecturas.</p>	

<p>FiveGo pH meter F2 METTLER TOLEDO [32].</p>	<p>Intervalo de medición de pH 0 – 14, Resolución de pH 0,01, Precisión de pH (<math>\pm</math>) 0,01, Intervalo de temperatura 0 °C – 100 °C, Resolución de Temperatura 0,1 °C, Precisión de temperatura (<math>\pm</math>) 0.5 °C, Tamaño de la memoria 200 mediciones.</p>	 <p>A white handheld pH meter with a digital display showing 7.00. It has several buttons and a probe at the top. The brand name 'METTLER TOLEDO' is visible at the bottom.</p>
<p>35-Series Testrs™ Multiparámetro OAKTON [35].</p>	<p>pH de 0.0 a 14 pH, resolución de pH 0.1 pH, Exactitud pH-/+ 0.1 pH, Calibración pH 3 puntos, Compensación de temperatura: automática (ATC), desde 0 a 50°C (32 a 122°F) o manual, Resolución temperatura 0.1 °C, Exactitud de temperatura -+ 0.5 °C (-+ 0.9 °F), Tecla de calibración</p> <p>– Calibre con más precisión que un ajuste de potenciómetro; no se requieren desarmadores.</p>	 <p>A yellow and white handheld multiparameter meter with a digital display showing 199.9 and 5.00. It has several buttons and a probe at the bottom. The model number '35425-00' is visible at the bottom.</p>

### 1.9.3 Sondas o Electroodos de pH

Las sondas de pH o sensores de pH pueden ser conectados a un pHmetro de mesa, portátiles y transmisores de pH. Hay aplicaciones donde el diseño de las sondas de pH es de suma importancia para el buen funcionamiento y precisión en la medición de pH. En el mercado existe una versión de sensor de pH industrial, sus características son el recubrimiento de plástico del cuerpo de vidrio, pueden soportar presiones altas a comparación con sensores de propósito general, e inclusive existen sensores de pH de membrana de vidrio que pueden medir sustancias con concentración de metales. Revisando las características anteriores y por las necesidades del proceso en el reactor. El sensor a utilizar en el presente proyecto es el modelo PC2121-5M BNC de la compañía Phidgets. La tabla 1.6 mostrada a continuación presenta algunos de estos sensores para ambientes considerados como extremo o industriales.

Tabla 1.6 Sondas o sensores de pH.

Sonda o sensor de pH	Características principales.	Imagen del sensor.
<p>Sensor de vidrio Orbipac CPF81/CPF81D*. Fabricante ENDRESS +HAUSER [36].</p>	<p>Rango de pH0 a 14, Presión Máxima hasta 10 bar, Presión Máxima hasta 10 bar, Material del ejevidrio, Diafragma PTFE, Sistema de referencia relleno de gel, doble cámara, Aplicaciones. Aguas residuales, minería.</p>	<p>Sensores de vidrio Orbipac CPF81/CPF81D*</p> 
<p>WD-35805-24. Fabricante OAKTON [25].</p>	<p>Rango de pH0 a 12 pH, Rango de temperatura máxima: 80°C, Material del eje plásticos ABS, Sistema de referencia. Rellenos de gel, Aplicaciones. La junta doble para analizar agua residual y soluciones con metales pesados y sustancias orgánicas.</p>	
<p>Sensor de pH InPro 4550VP. Mettler Toledo [37].</p>	<p>Rango de pH0...14, Resistencia a la presión (psi) 0...116 psi (266 °F), Sistema de referencia sistema Argenthal, Material de sensor polímero PPS (40 % de fibra de vidrio), diámetro: 28.5 mm o 1.12", electrodo de pH de mantenimiento mínimo con estructura de PPS.</p>	

<p>Electrodo compacto Memosens, Orbipac CPF81D, Fabricante ENDRESS +HAUSER [38].</p>	<p>Rango de medición pH 0-14, Temperatura del proceso 10°C. 110°C (14°F - 230°F). Presión de proceso máx. 10 bar (145 psi), sensor de temperatura Pt1000, Conexión Conector Memosens, Diseño Electrodo compacto en carcasa PPS con conexión a proceso NPT3/4". Aplicación Agua, agua residual, proceso, galvánica.</p>	
<p>S272CD Online Process pH Sensor. Fabricante Sensores [39].</p>	<p>Rango de medición: 0-14 pH, Rango de temperatura: 0-100° C, Rango de presión: 0 - 100 PSIG, Construcción del cuerpo: Sulfuro de polifenileno de Ryton (PPS), Tiempo de respuesta: 95% en 1 segundo, Conector: BNC o conductores estañados.</p>	
<p>Electrodo de pH CT-1001, Fabricante. Shenzhen Ke Dida Electronics Co [40].</p>	<p>Rango de pH 0 ~ 14, Potenciometro cero (PH) 7 ± 0.5, Temperatura (°C) 0 ~ 80 °C, Presión resistente (MPa) 0.6, Resistencia interna MΩ (25°C) 250, electrodo de aguas residuales, Bloques de terminales Cabeza BNC, pieza en Y, inserciones.</p>	

#### 1.9.4 TRANSMISORES DE pH

La integración para la medición y control de pH en los distintos tipos de industrias que realizan la medición de pH en línea, redox, ISFET, conductividad inductiva y conductiva, oxígeno disuelto, nitrato y turbidez, es realizada por instrumentos de medición multiparámetros, los cuales en el estado del campo pueden encontrarse como transmisores industriales de pH, por ejemplo, de los fabricantes: Hanna Instrument, Endress+Hauser, Foxboro, Mettler Toledo, etc.

Los sensores de pH son conectados a los transmisores de pH, estos tienen características similares a los pHmetros citados anteriormente, las variantes son la pantalla HMI, para realizar el control manual y automático de las mediciones, calibración y control de pH, estas pueden ser configuradas por el usuario. Además de tener salidas de 4 a 20 mA y salidas a relevador, para realizar el control.

El transmisor conectado con más instrumentos, son encargados de efectuar la limpieza, la medición, calibración y control del pH en línea, permitiendo que estas se realicen con las necesidades definidas por el usuario.

En la tabla 1.6 que se muestra a continuación se presentan diferentes tipos de transmisores de pH (multiparámetros) con su respectivo fabricante. Sólo se mencionan sus aplicaciones más básicas, debido a las múltiples tareas de medición y control que pueden realizar.

Tabla 1.7 Transmisores de pH (multiparametros)

Transmisor de pH(multiparámetro)	Breve Descripción.	Imagen del transmisor.
<p>Transmisor de 4 canales Liquiline CM444. ENDRESS AND HAUSER</p>	<p>Liquiline CM444 es un transmisor multiparamétrico digital para la monitorización y el control de procesos en cualquier aplicación. Multiparámetro: pH, redox, ISFET, conductividad inductiva y conductiva, oxígeno disuelto, nitrato y turbiedad.</p> <p>En cualquier momento se pueden añadir módulos para adaptarse a su proceso.</p> <p>Protocolos e interfaces de comunicación habituales, por ejemplo:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 0/4 ... 20 mA</li> <li>• HART</li> <li>• PROFIBUS DP</li> <li>• Modbus TCP / Modbus RS485</li> <li>• EtherNet/IP</li> <li>• Servidor web</li> </ul>	

<p>Analizador electroquímico inteligente para Medición de pH, ORP o electrodo selectivo de iones (ISE) Modelo 875PH. Marca FOXBORO.</p>	<p>analizador inteligente FOXBORO basado en microprocesador y alimentado por línea, cuando se usa con</p> <p>Los sensores de pH y ORP de las series DolpHin™ PH10 y ORP10, 871A, 871PH o EP460 proporcionan una alta medición de la precisión de pH, ORP o ISE. Las funciones incluyen pantalla de medición, salidas analógicas duales, y contactos de doble relé. Una interfaz humana guía al usuario a través de una configuración intuitiva basada en menús, procedimientos de calibración, estado y resolución de problemas.</p>	 <p>rack MOUNTED ANALYZER</p>
<p>Transmisor pH con salida aislada 4-20 mA. marca HANNA</p>	<p>Rango de pH0.00 a 14.00 pH; 4–20 mA, Resolución de pH (para modelos “L”) 0.01 pH; 0.01 mA, Precisión de pH (a 25°C / 77°F) ± 0,02 pH; ± 0.02 mA, calibración de pH offset: ± 2 pH; ± 2,2 mA; pendiente: 86 a 116%; ± 0.5 mA, Compensación de temperatura de pH fijo o automático de 0 a 100 ° C (32 a 212 ° F) con sonda HI76608, Salida de grabadora 4-20 mA (aislado), Monitor LCD solo para HI8614LN.</p>	

<p>Transmisor monocanal/bicanal M200 METTLER TOLEDO.</p>	<p>El transmisor multiparamétrico monocanal/bicanal M200 permite medir la conductividad, la resistividad, el pH, el ORP (Redox), el oxígeno disuelto y el ozono en cualquier combinación.</p> <p>Parámetros de medición. Conductividad/resistividad, pH/Redox, OD amperométrico y ozono.</p> <p>Unidades medidas pH, mV, S/cm, S/m, ohm-cm, % HCl, H2SO4 y NaOH, ppb y ppm para O2, ppb y ppm para ozono.</p> <p>Salida de corriente de 0/4 a 20 mA (alarma a 22 mA).</p> <p>Relés 2 SPDT de tipo mecánico con régimen de 250 V CA o 30 V CC (3 A).</p>	 <p>The image shows the front panel of a Mettler Toledo M200 multiparameter transmitter. The display is a monochrome LCD showing two main readings: '7.0 pH' and '25.0 °C'. Below these, there are smaller readings for '2.0 pH' and '77.0 °F'. The device has a blue faceplate with the 'METTLER TOLEDO' logo on the left and 'M200' on the right. At the bottom, there are five buttons labeled 'Menu', 'Cell', 'Info', and 'Enter'.</p>
--	---	---

Una de las desventajas de los transmisores es software del fabricante, a pesar de tener apertura para la programación de limpieza, calibración y control de pH, ya sea en forma manual o automática. No se pueden realizar modificaciones profundas debido a las restricciones del fabricante, además que las actualizaciones tienen costo económico y el trabajo tiene que realizarlo el personal autorizado de dicho fabricante.

Por estas razones que se desarrolló el módulo de medición y control de pH MIE1. El cual tiene software de programación libre, puede expandirse a nuevas necesidades del usuario e inclusive incorporar otras mediciones de las variables involucradas en el proceso del RLFAP, para ser visualizadas, controladas y operadas en la HMI Nextion.

### 1.9.5 Análisis comparativo de trabajos relacionados

Tabla 1.8 Artículos relacionados con la medición y control de pH.

ARTÍCULO	PROBLEMA	¿QUÉ FUE CONTROLADO?	TIPO DE CONTROL	ESTADO	OBJETIVO	TECNOLOGÍAS	Resultados.
[41]	Realizar la medición de soluciones acuosas.	Mecanismos para el haz de luz reflejante y absorbente, para la medición de pH	Control de intensidad lumínica PID.	El sistema mostró un desempeño adecuado de acuerdo a los PID utilizados y permite ser usado para la determinación de los pH en soluciones acuosas dentro de los límites de desempeño de los buffers empleados.	Realizar un sistema de medición de soluciones acuosas mediante la instrumentación virtual.	Computadora. Software National Instrument LABVIEW, Arduino, tarjeta NI USB 6009.	Se logró controlar la respuesta del sistema de control de intensidad lumínica y verificar el espectro de transmisión de potencia óptica para dos soluciones buffers.
[42]	Realizar el control de pH, OD y temperatura en un bioreactor columna de burbujas.	Las variables pH, OD y temperatura en el bioreactor, para la producción de <i>Candida utilis</i>	Control difuso por medio de Matlab.	El control difuso del OD, pH y temperatura presentó un mejor desempeño comparado con el control proporcional, siendo el pH el que muestra	Realizar el control mediante lógica difusa de las variables, pH, OD Y	Computadora, software MATLAB, Simulink, Eagle 4.01, microcontrolador programado con editor Microcode Studio Plus 3.0	La combinación de 6 ppm de OD, pH de 6 y 30°C, permite obtener la mayor producción de biomasa <i>Candida utilis</i> (7.65±0.02 g de masa seca/L) con mayores valores de $\alpha=1.51\pm0.2$ ,

				mayor efecto significativo en la producción de biomasa de <i>Candida utilis</i> .	temperatura.	(lenguaje Picbasic). El control se realizó desde la interfaz Visual Basic.  El enlace entre MatLab y Visual Basic se consiguió utilizando los archivos DLLActive-X	$\mu_{max}=0.7\pm 0.01 \text{ h}^{-1}$ y menor $\lambda=0.27\pm 0.01 \text{ h}$ .
[43]	controlar el pH en una planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR), la cual recibe soluciones ácidas provenientes de la producción de jugos (pH 2-5)	Una Bomba para ingresar una sustancia soda cáustica 0.04% con valores oscilatorios de pH 9-11. Para lograr un pH de 7 para verter el agua al efluente	Fue implementado un controlador PI clásico, en simulación.	Se realizaron las simulaciones necesarias para la compra de las bombas y otros mecanismos.  Además de realizar el control por medio de PLC.	Desarrollar un sistema un sistema mediante PLC para el control de pH en tanques de tratamientos de aguas residuales.	Computadora, software Matlab, simulink, PLC NAIS, trasmisores de pH (Hanna). No menciona los tipos de sensores.	Se tomaron varios tiempos de recirculación y, para un pH de 3, el sistema tarda 12 minutos en neutralizarse; pero cuando el pH de entrada es de 6.5, el sistema no presenta recirculación y es continua la dosificación de base.
[44]	La medición de pH en el bioreactor	Fue controlada la limpieza del sensor y la calibración.	Ajuste por mínimos cuadrados.	La automatización de un sensor para la medición de pH	Diseño e implementación de un	Computadora con software Matlab,	Este sistema ha sido exitosamente implementado en un

	era realizada de manera manual.			permite lograr mediciones con un menor error y una mayor repetibilidad. Este sistema ha sido exitosamente implementado en un biodigestor anaerobio de tipo UASB (como simulación).	sistema que permite automatizar tanto la medición del pH de una muestra, como el mantenimiento del mismo sensor.	National instrument.	biodigestor anaerobio de tipo UASB. La medición automática del pH permitirá próximamente efectuar un control más preciso del biodigestor.
[45]	Precisión en la medición de pH mediante sensor inteligente ISFET con LABVIEW.	El voltaje y la corriente para calibrar sensor ISFET	Por el usuario "manual" para la modificación de parámetros. mV y mA.	Las medidas experimentales de pH demuestran que el instrumento desarrollado puede considerarse válido ya que sus características en cuanto a resolución y error, son comparables a la de un instrumento comercial como el modelo GLP22 de Crison.	Controlar sensores de pH y temperatura, mediante instrumentos virtuales con LABVIEW.	Sensores ISFET, PT100, Circuitos acondicionadores .  PIC18F252, PC con software LABVIEW, módulos de red e Internet.	El máximo error absoluto cometido en las medidas diferenciales es de 0.02pH y un error relativo máximo de 0.51%. Transportable para adquirir y almacenar medidas.
[46]	Paqúa no cuenta con un sistema	El pH, el nivel de agua y la	Control ON OFF por activación	A partir del cuarto día, el sistema se mantuvo estable	Diseñar e implementar un control	Microcontrolador Arduino uno, bombas	Una vez corregida la conductividad, el sistema dosificó la

	<p>automatizado de medición de pH, conductividad y nivel de agua. Para cultivos hidropónicos .</p>	<p>conductividad mediante goteo.</p>	<p>PWM, para bombas peristálticas.</p>	<p>dentro de los parámetros establecidos, con el valor de conductividad sobrepasando en algunas ocasiones el límite superior, con lo cual se requiere intervención del usuario para añadir agua al sistema. Lo anterior se debe a efectos de rápida absorción de agua de la planta y por contar con un tanque de agua de pequeña capacidad para las pruebas de desempeño.</p>	<p>de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua de bajo costo para el cuidado de cultivos hidropónicos de uso doméstico.</p>	<p>peristáltica y bomba de acuario.  Software IDE de Arduino, falta interfaz HMI</p>	<p>solución pH Up, a fin de corregir el valor de pH que se encontraba por debajo del límite inferior. La corrección en pH tardó un día completo.</p>
--	--	--------------------------------------	--	---	--	--	--

## CAPÍTULO II. CARACTERIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS DEL SENSOR DE pH

En este capítulo se revisará el procedimiento para la medición de pH y temperatura con los pHmetro de mesa, los cuales tienen la característica de tener la sonda de temperatura incorporada para la compensación por temperatura (CAT) y así obtener un valor de pH lo más cercano a la exactitud.

En otra parte de este capítulo se revisará la conexión del sensor de pH industrial PC2121-5M con el acondicionador de señal: amplificador de instrumentación y el Adapter 1130, este último tiene una salida analógica de 0 a 5 Volt para conectarse al microcontrolador ATmega2560.

Se revisarán los procedimientos utilizados para la calibración y medición entre el sensor de pH, el acondicionamiento de la señal con el Adapter 1130 y la placa Arduino mega 2560.

### 2.1 Procedimiento para la medición de pH

El procedimiento para la calibración y medición de pH realizado por los alumnos de maestría e ingeniería química en el laboratorio, es con el pHmetro Oakton 700 y en el RLFIAP con el pHmetro portátil de la Marca Oakton 35-Series Testrs.

El primer paso es la limpieza del sensor de pH y temperatura es con agua destilada, como se indica en la figura 2.1, se introducen en un recipiente con agua destilada, está ya no puede reutilizarse nuevamente, después de procederá a encender el pHmetro, ambos sensores tienen que estar en el mismo recipiente para realizar la compensación por temperatura [30].



Figura 2.1 pHmetro de mesa OAKTON 700 [30].

Para realizar la calibración en el pHmetro Oakton 700, presionar la tecla CAL/MEAS, en la pantalla aparecerá CAL, estará listo para calibrar, el pHmetro trae por default calibrar a dos puntos, el primer punto es con la solución tampón pH 4, oprimir la tecla de CAL “calibración” la pantalla parpadeará con las siglas MES hasta que la lectura sea la correcta, en la pantalla se visualizará el valor de pH 4.01, y posteriormente aparecerá la leyenda READY, para una lectura estable se debe realizar una ligera agitación para mejores resultados. Si la lectura es estable, pulsar la tecla ENTER. En seguida pedirá la siguiente solución tampón. En la figura 2.2 se visualiza la medición de pH con la solución tampón pH 4, la cual tiene como color establecido el rosa.



Figura 2.2 Calibración con tampón pH 4.

Una vez calibrado el sensor con la primera solución tampón se debe lavar el sensor de pH y temperatura con agua destilada, secar con una servilleta sin presionar la membrana de vidrio para no dañarla, la figura 2.3 muestra la limpieza con agua destilada a presión por una pizeta.



Figura 2.3 Limpieza del sensor de pH con agua destilada.

Para una solución tampón superior, el pHmetro indica un pH de 10.01. El cual se visualiza en la figura 2.4, en la parte de la esquina izquierda de la pantalla. Con un registro de 10.51, se tiene que estabilizar la medición, el pHmetro está midiendo la solución tampón 10.01 a 25 °C, en la pantalla estará la leyenda MEAS, cuando aparece en la pantalla el mensaje de READY presionar la tecla ENTER, la calibración estará completa. A no ser que se haya seleccionado más puntos de calibración, repetir el paso anterior, realizando siempre la limpieza al cambiar de solución tampón. Si no se va a utilizar el sensor de pH, se debe poner un recipiente con una solución pH 4 o en una solución de KCL 4 M.



Figura 2.4 Electrodo en pH 4.00.

Para realizar la medición de pH, de una muestra del reactor u otro líquido, se debe limpiar con agua destilada el sensor de pH y el sensor de temperatura, posteriormente secar con un paño o una servilleta de papel sin presionar la membrana de vidrio.

Con la muestra disponible para medirla, se introduce el sensor de temperatura y el sensor de pH, presionando la tecla MEAS/CAL. En la pantalla debe mostrarse la leyenda MEAS, la lectura tardará algunos segundos en estabilizarse, si aparecerá la leyenda READY, la medición está hecha.

Para el caso de la muestra medida mostrada en la imagen 2.5, marcó una lectura de 8.83 de pH, por lo que la muestra del reactor tiene un pH alcalino.



Figura 2.5 Medición de pH de una muestra del reactor.

## 2.2 Caracterización del sensor de pH con el amplificador de instrumentación

La pequeña señal generada por el sensor de pH de membrana de vidrio, no puede ser amplificada con un simple amplificador inversor, por ejemplo, el circuito amplificador inversor con el integrado TL081, o un amplificador con ganancia alta, para conseguir un Voltaje medible y que pueda ser acondicionado en rangos de 0 a 5 Volt o de 0 a 12 Volts. Existen dos soluciones, la primera es con el amplificador de instrumentación AD620, la segunda forma es con el propio acondicionador de señal de miliVolt a Volt del mismo fabricante del sensor de pH o compatible.

Para verificar el funcionamiento del sensor de pH, se realizó la medición con el amplificador de instrumentación AD620, circuito integrado mostrado en la figura 2.6.

El primer paso es revisar la hoja de datos del integrado AD620 (Amplificador de instrumentación) la forma de conexión para la alimentación de Voltaje simétrico y las terminales para conectar el sensor, la configuración de pines se muestra en la figura 2.6.

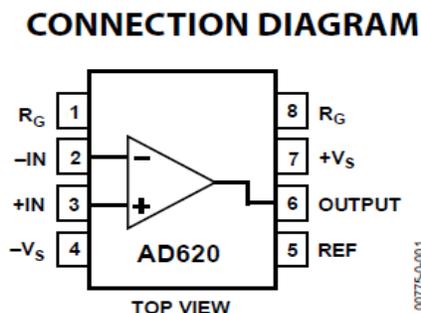


Figura 2.6 Diagrama del amplificador de instrumentación AD620.

Conectar la alimentación simétrica de -15 V, +15 V como se visualiza en la figura 2.7. Se conectó a la tarjeta ELVIS II las terminales -Vs y +Vs de forma correspondiente. Para activar de dichos Voltajes, estarán activos al encender la tarjeta, por lo que no se necesita la interfaz en la computadora.

Conectar el sensor a las terminales 2 y 3, respetando el positivo y negativo, como se indica en el siguiente diagrama de la figura 2.7. La terminal número 5 a GND, las terminales 1 y 8, son para ajustar la ganancia o Voltaje de salida mediante el potenciometro de presicion de 1 K $\Omega$  o 10 K $\Omega$ .

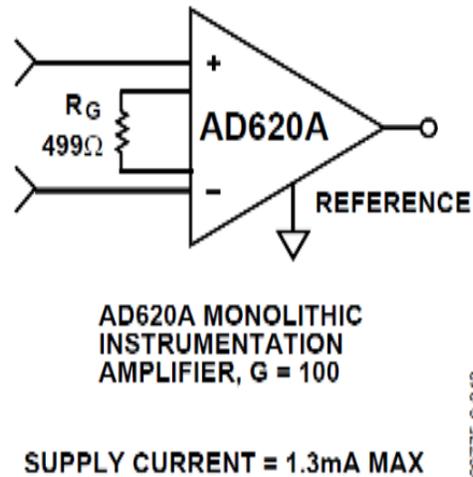


Figura 2.7 Conexiones del amplificador de instrumentación y sonda de pH.

El circuito se conectó similar a la simulación de la figura 2.8, para realizar la medición de Voltaje a la salida del amplificador de instrumentación, se ajusto a un Voltaje de 2.5 aproximadamente, para una solución tampón de pH 7.

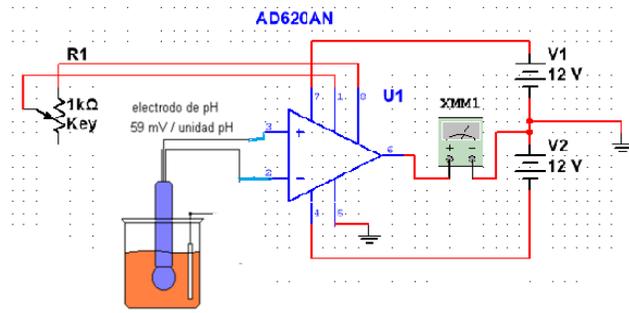


Figura 2.8 Conexión del sensor de pH al amplificador de instrumentación AD620.

Con el amplificador de instrumentación, el integrado AD620, se verificó que se pueden amplificar señales de Voltaje en el orden de los miliVolts, con una alta robustez al ruido, para generar a su salida Voltajes medibles, para ser acondicionados según la necesidad del usuario.

La figura 2.9 corresponde a la simulación del amplificador de instrumentación, con un ajuste a 2.5 Volt, para simular un valor de pH 7.

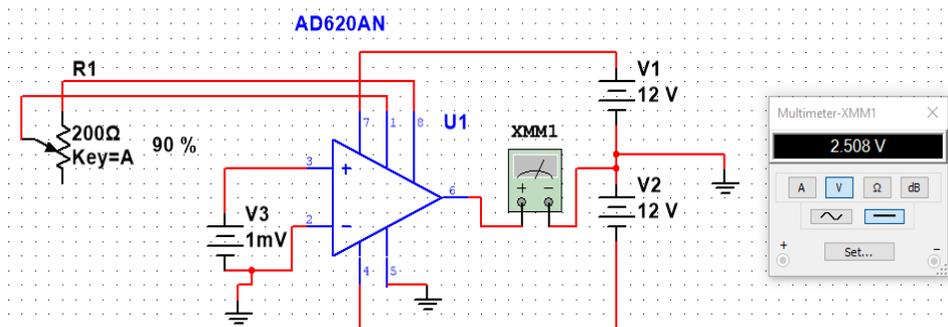


Figura 2.9 Simulación de Voltaje con AD620.

Se concluye que el amplificador de instrumentación, puede acondicionar la señal de miliVoltaje del sensor de pH pH PC2121-5M, para tener Voltajes acondicionados para ser conectados y procesados por el microcontrolador ATmega2560.

### 2.3 Diseño del sistema electrónico para el sistema de medición de pH

En este apartado se describen las etapas de control y potencia que constituyen el sistema automatizado de medición y control de pH. En la figura 2.11 están los bloques de los componentes eléctricos y electrónicos necesarios para la construcción de dicho sistema.

Iniciando por la parte izquierda de la figura 2.10 está la fuente de alimentación 5 VCD a 1 A para: el microcontrolador, los sensores de pH y temperatura, el acondicionador de señal de miliVolt a pH el Adapter 1130, estas señales entraran al microcontrolador ATmega2560 y de este salen las señales digitales que activaran a los relevadores los cuales proporcionaran la terminal de positiva 12 VCD para la alimentación eléctrica de las válvulas de entrada, salidas, además de las bombas peristálticas. Otro bloque de salida del microcontrolador son las salidas analógicas para el control de la tolva y así despechar bicarbonato de sodio, un último bloque son las salidas para la conexión de la pantalla táctil Nextion a través de las terminales RT y TX de la placa Arduino mega 2560.

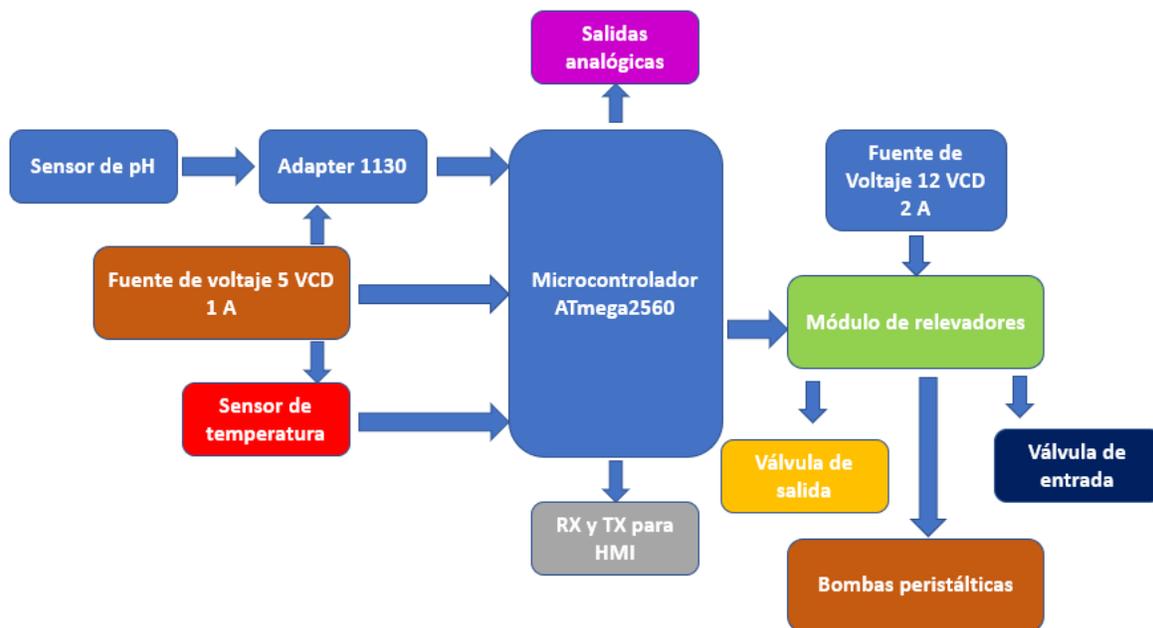


Figura 2.10 Diagrama bloques de los componentes eléctricos y electrónicos.

#### 2.3.1 Sensores para el sistema automatizado de medición de pH

En el sistema automatizado de medición y control de pH cuenta con dos sensores, el primero es el sensor de pH PC2121-5M BNC del fabricante Phidgets, es el encargado de leer el valor de pH en miliVolt de la muestra depositada en el tanque y de las soluciones tampón para la calibración.

El segundo es el sensor de temperatura el DS18B20, es el encargado de enviar la señal a la terminal 2 del microcontrolador para realizar la compensación por temperatura ATC, los valores detectados por el sensor de temperatura son incorporado a la fórmula programada en el microcontrolador, con una cantidad entera no incluyendo decimales, para obtener el valor de pH con una mayor exactitud, estas acciones están programada en el microcontrolador ATmega560 y fueron previamente verificadas con las soluciones tampón.

#### 2.3.1.1 El sensor de pH

El sensor que se muestra en la figura 2.11 corresponde al sensor PC2121-5M BNC pH Industrial Electrode de la compañía Phidgets, es el sensor utilizado en este proyecto por ser un electrodo de membrana de vidrio de uso industrial, con una buena resolución y velocidad de respuesta, ver la tabla 2.1, además cuenta con un cuerpo de plástico protector a golpes. El acondicionado mecánico con rosca en ambos extremos permite montarlo en una tubería o en una brida de conexión, otra de las ventajas que tiene es el conector tipo BNC tipo macho, el cual puede ser conectado a un BNC hembra para ser acondicionado con un Voltaje de 0 a 5 Volt según las necesidades del usuario, las características de este sensor son descritas en la tabla 2.1.



Figura 2.11 Sensor PC2121-5M pH BNC.

Tabla 2.1 Características técnicas del sensor de pH PC2121-5M

<b>Propiedades del electrodo</b>	
Tipo de Electrodo	Combinación de unión única (pH)
Rango de medición de pH	0 a 14
Tiempo de respuesta del electrodo Max	10 s
Temperatura de funcionamiento mínima	0 ° C
Temperatura de funcionamiento máx.	110 ° C
<b>Propiedades físicas</b>	
Material del tubo exterior	Plástico PPS
Presión máxima	87 psi
tipo de conector	BNC
Tipo de rosca posterior	Hilo de tubería de 3/4 "
Longitud	160 mm
Diámetro	29.3 mm
Longitud del cable	5 m

#### Acondicionamiento antes de usar el sensor de pH PC2121-5M

Antes de usar el sensor de pH o electrodo por primera vez, se deben seguir tres pasos para acondicionarlo.

1. Retire la tapa protectora o la funda de goma de la parte inferior del sensor y enjuague el electrodo con agua destilada o desionizada.
2. Coloque el electrodo en un vaso de precipitados que contenga uno de los líquidos enumerados a continuación, en orden de capacidad iónica para acondicionar el electrodo. Remojar durante 20 minutos.
  - Solución 3.8 M o 4.0 M KCL
  - Solución tampón de pH 4.0
  - Solución tapón 7.0 tampón de pH.

Nunca acondicione un electrodo de pH en agua destilada o desionizada. La exposición prolongada al agua pura dañará la membrana de vidrio especial.

3. Después de acondicionar el sensor durante 20 minutos, enjuague el electrodo con agua destilada o desionizada. El electrodo ahora está listo para medir el pH de cierta solución.

### 2.3.1.2 Acondicionamiento de señal del sensor de pH con el Adapter 1130

El Adapter 1130 del fabricante Phidgets mostrado la figura 2.12 es el encargado del acondicionamiento de señal del sensor de pH PC2121-5M BNC o para un sensor de Oxido reducción ORP, una de estas dos opciones puede seleccionarse con el microinterruptor integrado en dicho módulo [8] [9].

Con la entrada del conector BNC tipo hembra, permite una rápida y fácil conexión para otros sensores de pH, siempre que estos sean compatibles con el módulo ver la tabla 2.2, en esta se describen las especificaciones del acondicionador Adapter 1130.



Figura 2.12 Módulo Adapter 1130 [9] .

Tabla 2. 2 Especificaciones del Adapter 1130 [9].

Propiedades del sensor	
Controlado por	Entrada de voltaje (0-5 V)
Tipo de salida del sensor	No ratiométrico
Especificaciones de pH	
Rango de entrada de pH	$\pm 400$ mV DC
Resolución de pH	0.018
pH Error Max	$\pm 0.09$
Especificaciones de ORP	
Rango de entrada de ORP	$\pm 2$ V DC
Resolución de ORP	5 mV DC

ORP Error Max	± 8 mV DC
Tablero	
Consumo de corriente máximo	3 mA
Impedancia de entrada	1 TΩ
Voltaje de suministro mínimo	4.5 V DC
Voltaje de suministro máx.	5.3 V DC
Tamaño de rosca del conector	½-28UNEF-2A

### Alimentación eléctrica del Adapter 1130

Con el microcontrolador Arduino mega 2560 se puede alimentar al módulo Adapter 1130, la alimentación a 5 VCD se puede tomar de los 5 Volt de placa y el negativo del GND, con el cable tipo molex como el que se muestra en la figura 2.13. La señal analógica de 0 a 5 VCD proveniente del Adapter 1130, se puede conectar a cualquier entrada analógica del microcontrolador, para este proyecto está conectado a la entrada analógica A0. Precaución al seleccionar la entrada analógica en Arduino mega 2560, verificar si la terminal no está floja, no tiene una soldadura fría o si un cable conectado está flojo. Estas son algunas de las causas que ocasionan que la lectura de pH sea incorrecta.



Figura 2.13 Cable Molex para el Adapter 1130.

### 2.3.2 Programación del sensor de pH en el microcontrolador Arduino mega 2560

La conexión de la sonda de pH, el Adapter 1130 y el Arduino mega 2560, se siguió de la conexión mostrada por el manual del fabricante del módulo Adapter 1130, la figura 2.14 muestra los componentes conectados para la medición de pH. El sensor de pH del fabricante Oakton, el acondicionador de señal de milivolt a pH el Adapter 1130 y la tarjeta para interfaz USB, esta última para ser conectado a la computadora con el programa correspondiente de Phidgets antes instalado en la computadora, con este sistema se podrá visualizar el valor en unidades de pH.

Para el sistema automatizado de medición y control de pH MIE 1, la tarjeta para interfaz USB es remplazada por el microcontrolador AT mega 2560, mediante los módulos y la programación correcta se puede leer y mostrar el valor de pH en el monitor serial de la IDE de Arduino.

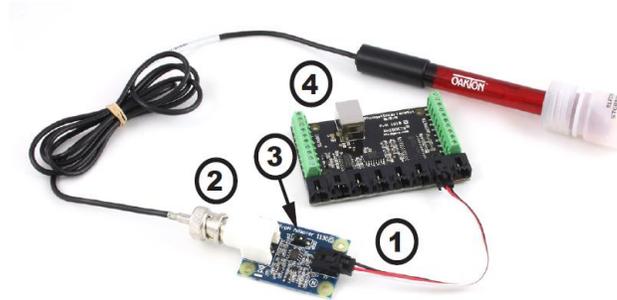


Figura 2.14 Conexión del sensor de pH, Adapter 1130 y tarjeta de interfaz USB [9].

#### 2.3.2.1 Programación de la fórmula de pH sin corrección por temperatura

La resolución que proporcionan, el sensor de pH PC2121-5M BNC y Adapter 1130, es de 0.018 de pH. Por lo que es necesario hacer el cálculo de los estados necesarios para el intervalo de 0 a 14 de pH.

$14 \text{ pH} / 0.018 \text{ pH} = 777.777$ . Este es el número de estados que se requieren, redondeando a 778.

Por lo tanto, se necesita una resolución de 10 bits igual a 1024 combinaciones, en el convertidor analógico digital ADC del microcontrolador. El ATmega 2560 cuenta con una resolución de 10 bits por lo tanto cumple con el número de bits para cambiar la señal de analógico a digital y ser procesada por el microcontrolador, para poder visualizar los valores de pH de forma exacta.

Con el cálculo de la resolución para el ADC del microcontrolador, se puede implementar la fórmula proporcionada por el fabricante del módulo Adapter 1130, ya sea a una temperatura de 25 °C o con la incorporación de la sonda de temperatura, para realizar la compensación por temperatura CAT.

La fórmula 2.1, asume que la solución está a 25 °C temperatura ambiente, sin la compensación de temperatura CAT. La variable declarada como SensorValue, es la encargada de leer la entrada

analógica hacia el ADC del microcontrolador, pero esta puede cambiar si la temperatura cambia, dando valores inexactos de pH.

$$\text{pH} = 0.0178 * \text{SensorValue} - 1.889 \dots\dots\dots 2.1$$

Para programar en la IDE de Arduino la fórmula como se indica en la figura 2.15, basta con declarar las variables: pH, ADC2 y SensorValue, esta última leerá el valor del ADC, el cual entrará el valor proveniente del módulo Adapter 1130, a la terminal A0 entrada analógica.

Para el bloque void setup, es necesario invocar al monitor serial a 9600, en el lazo void loop, se pasará el valor del SensorValue a ADC2, en otra línea se efectuará la fórmula para obtener el valor de pH con la fórmula 2.1 antes descrita, para finalizar el programa se realiza la impresión en el monitor serial de la IDE de Arduino, se visualizará el valor de pH y el valor del ADC2.

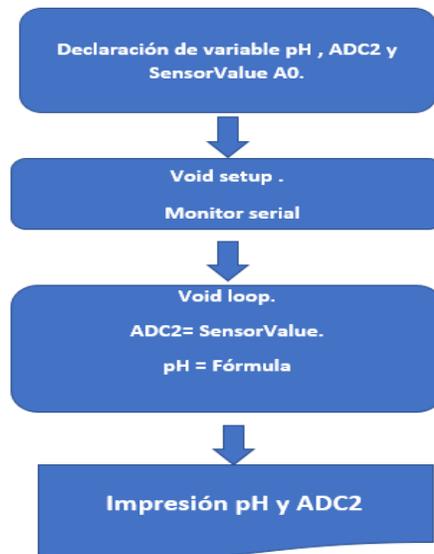


Figura 2.15 Diagrama de programación para el sensor de pH.

La conexión del sensor de pH con el módulo Adapter 1130 y el microcontrolador ATmega2560, se visualiza en la figura 2.16. Una vez cargado el programa en el microcontrolador ATmega2560, en el monitor serial se visualizará el valor de pH de la solución tampón medida.



Figura 2.16 Conexión del Adapter 1130 y Arduino mega 2560.

Para probar la fórmula sin compensación por temperatura, se procedió a probar una solución tampón de pH 6.86, para visualizar en el monitor serial de la IDE de Arduino, la figura 2.17 muestra la medición efectuada para esta solución tampón.



Figura 2.17 Medición de la solución tampón 6.86.

En la figura 2.18 se muestra el valor columna seleccionada con un ovalo, con un valor de 8.82 de pH y un valor en el convertidor analógico digital ADC2 de 489, hay un error de 0.04 centésimas en comparación con el valor de la solución tampón, para el tipo de sensor de pH con una resolución de 0.018 es un rango alto, se sugiere limpiar nuevamente el sensor e incorporar el sensor para medir la temperatura de la solución y esperar que la medición se estabilice.

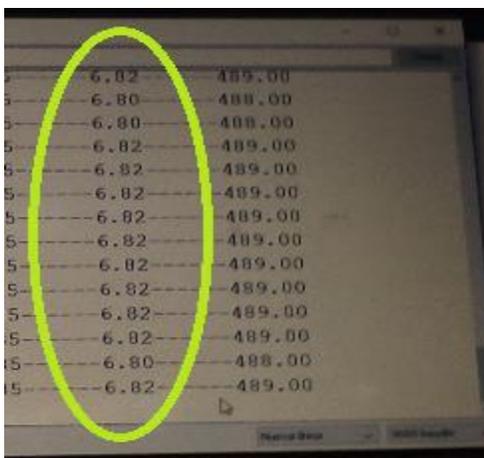


Figura 2.18 Medición de la solución tampón 6.86.

### 2.3.2.2 Programación de la fórmula de pH con corrección por temperatura CAT

La fórmula 2.2, que indica el fabricante del módulo Adapter 1130, es la correspondiente a la compensación por temperatura CAT.

$$Op2=7-(2.5-pH/200) / (0.257179+0.000941468*TEMPERATURE).....2.2$$

En la quinta columna del lado izquierdo de la figura 2.20, se muestra nuevamente el valor de convertidor analógico digital ADC de la entrada A0, en las restantes columnas se indica el valor de pH con dos cifras decimales.

La primera columna de la figura 2.19 muestra un valor de pH 7.00, es la correspondiente a la fórmula de CAT, el valor de pH no corresponde al valor indicado en la solución tapón 8.86, se revisaron diferentes modos de poner matemáticamente dicha fórmula en la IDE de Arduino, debido a la jerarquía de operaciones indicadas, aun estableciendo el valor de la variable TEMPERATURE de manera manual el valor no cambió del valor pH 7.00. Cuando ocurre este tipo de problemas el sensor de pH no ha sido calibrado adecuadamente o no se está utilizando el ADC con la resolución de 10 bits o superior e inclusive el conector BNC está mal conectado.

La sugerencia es poner la fórmula como se indica en el manual del fabricante de módulo Adapter 1130, el valor de pH se tiene que alcanzar igualando al valor de pH de las soluciones tampón.

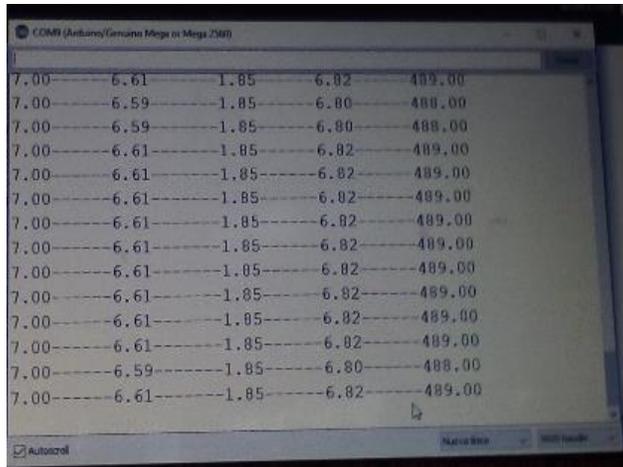


Figura 2.19 Valores con solución tampón pH 8.86.

Se verificó el valor de la solución tampón de pH 9.7, con la fórmula sin CAT, revisado previamente el valor de pH, en un pHmetro HANNA de mesa dando dicho resultado de pH 9.7.

Se introdujo el sensor de pH en la solución tampón, con el acondicionamiento en el microcontrolador Arduino, en el monitor serial se visualizó un valor de pH de 9.2, el valor de la medición está alejado del valor de la solución tampón 9.7, como se visualiza en la figura 2.20.

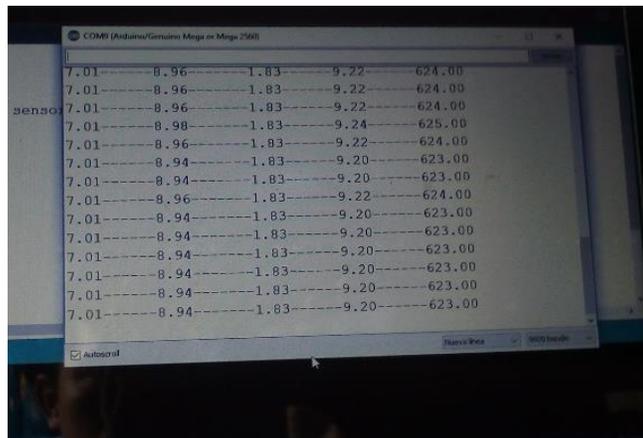


Figura 2.20 Mediciones efectuadas con solución tampón pH 9.7

Para solucionar este problema se aconseja limpiar el sensor con suficiente agua destilada y secarlo, sin dañar la membrana de vidrio. Una limpieza profunda es con una pizeta de manera que se introduzca el agua destilada a presión en las partes no accesibles de la membrana de vidrio. En la figura 2.21 se indica la limpieza con agua destilada a presión por la pizeta.



Figura 2.21 Limpieza del sensor de pH con agua destilada.

Si continúa proporcionando valores de pH alejados de la solución tampón, puede deberse a una mala calibración. Se recomienda remojar al sensor por una noche completa y realizar la limpieza con agua destilada para quedar calibrado. Es por estos problemas que los fabricantes recomiendan tener el sensor siempre en una solución pH 4 o  $4 \times 10^{-4}$  molar para evitar que pierda la calibración, recordando que nunca se debe almacenar en agua destilada, la figura 2.22 muestra el sensor pH sensor E-201-C, el cual tiene rosca en la punta para fijar el depósito de la solución de almacenamiento [47].



Figura 2.22 Sensor de pH con solución de almacenamiento [47].

### 2.3.2.3 Conexión del sensor de temperatura DS18B20

Para programación de la segunda fórmula con CAT proporcionada por el fabricante del módulo Adapter 1130, entre este y el microcontrolador ATmega256 es necesario leer la variable temperatura por microcontrolador e introducir el valor en dicha variable en la fórmula programada, por lo que se utilizó un sensor de temperatura, el cual tenga como característica principal que no sea invasivo para el sensor de pH, debido que este último puede generar variaciones significativas en el valor de pH e incluso dañar el sensor de pH, otras características necesarias es que sea preciso y económico.

Se realizaron pruebas con el sensor LM35, conectado en conjunto con el sensor de pH y el Adapter 1130 al microcontrolador, proporcionó valores de temperatura fluctuantes, visualizados en el monitor serial, además de no poder ser introducido en líquidos, por lo que se descartó el uso de este sensor. Las mediciones que se realizaron con el sensor LM35 se muestran en la figura 2.23. Por se visualiza proporcionó un valor de 18.57 y salta hasta 21.02, y posteriormente vuelve a bajar, por lo tanto, no cumple con lo requerido para este proyecto.

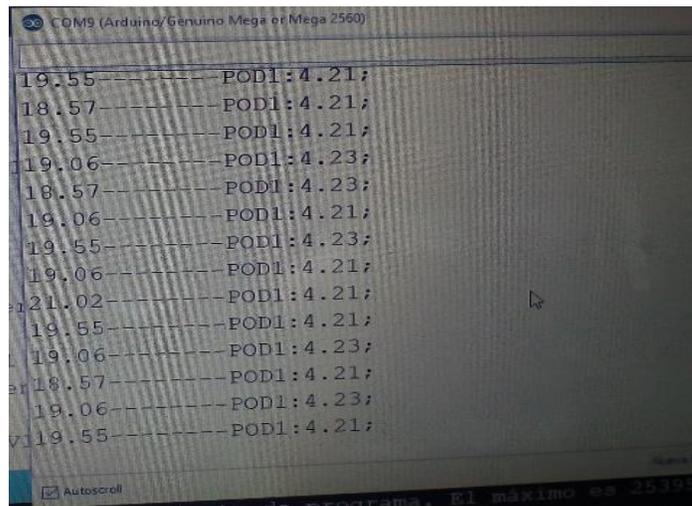


Figura 2.23 Mediciones de temperatura con el LM35 y pH.

El sensor de temperatura DS18B20 mostrado en la figura 2.24, cumple con las características necesarias para ser incorporado en el proyecto. En el mercado hay una versión de este sensor con cuerpo metálico, para poder introducirlo en líquidos además de esta característica el funcionamiento es a través de una señal digital, por lo que es altamente robusto a la presencia de ruido.



Figura 2.24 Sensor de temperatura DS18B20 [11].

Las conexiones para el sensor DS18B20, son las que se indican en la figura 2.25, lleva la alimentación en los extremos GND y 5 Volt, con los colores correspondientes de negro y rojo. Para los 5 Volt es necesario conectar en paralelo una resistencia de 4.7 KΩ con terminal de señal de color verde o amarillo, esta última es la que lleva la señal a la entrada digital al pin 4 del microcontrolador.

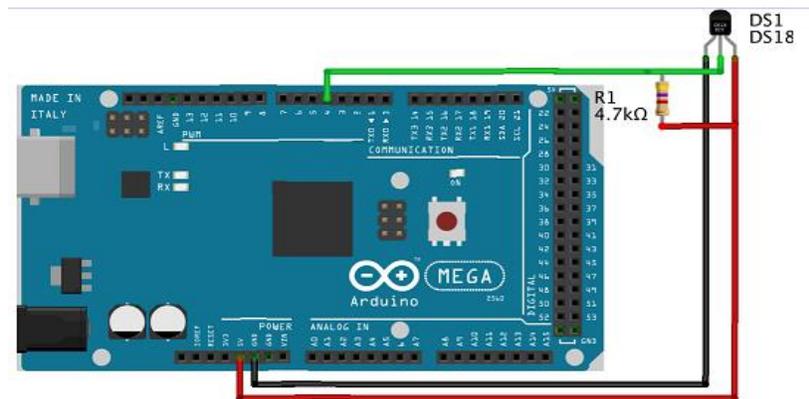


Figura 2.25 Conexiones del sensor DS18B20 y microcontrolador [11] [48].

La figura 2.26 es la correspondiente a las mediciones que se realizaron entre el sensor de temperatura DS18B20, el sensor de pH PC2121-5M BNC conectado al Adapter 1130, para incorporar la fórmula de compensación de temperatura CAT.

$$pH = 7 - (2.5 - \text{SensorValue} / 200) / (0.257179 + 0.000941468 * \text{Temperatura}) \dots\dots\dots 2.2$$

Donde:

SensorValue es el valor del sensor de pH.

Temperatura es el valor del sensor de la temperatura, dada con cifras enteras.

Así también en la figura 2.26 puede verificarse que la temperatura se da en cifras enteras sin variaciones, por lo que la medición de pH es prácticamente constante, el valor de pH en la columna del lado derecho, quedando resultado el problema de la introducción de ruido al conectar los dos sensores.

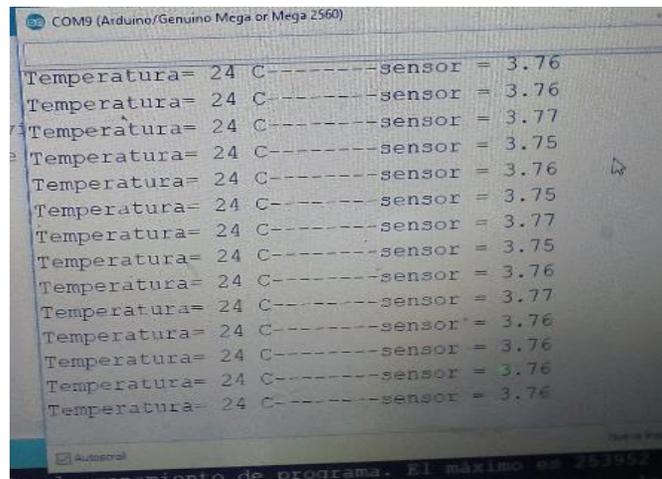


Figura 2.26 Mediciones de temperatura y pH.

Para disminuir el ruido en las entradas analógicas del microcontrolador, se hizo uso de una fuente de Voltaje Externa, debido a la baja corriente y a la disminución del Voltaje al conectar otros componentes al microcontrolador. La figura 2.27 es la correspondiente a la alimentación externa para el Adapter 1130, con la fuente de Voltaje de la tarjeta Elvis II, todas las terminales GND se deben de conectar a un solo punto en común, los 5 Volt alimentaran la terminal positiva del Adapter, las conexiones incorrectas proporcionaran un valor de pH alto o un valor negativo, este puede visualizarse en el monitor serial de la IDE de Arduino.

Revisando lo propuesto anteriormente, la mejor forma de evitar la introducción de ruido al microcontrolador, es utilizar una fuente independiente a este, para este proyecto se utiliza una fuente externa de 5 VCD a 1 A.

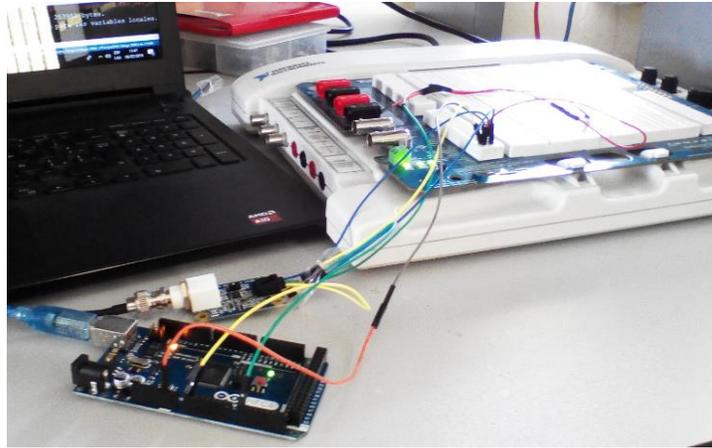


Figura 2.27 Conexión del 1130 con fuente externa.

### 2.3.3 Integración de los módulos electrónicos al microcontrolador ATmega2560

#### 2.3.3.1 Visualización de las variable pH y temperatura

Las pruebas que se realizaron con el sensor de temperatura LM35, ocasionaron la introducción de ruido al microcontrolador dando variaciones en la lectura de la temperatura y en el sensor de pH. Con esta experiencia, se fue revisando cada uno de los componentes conectados al microcontrolador Arduino mega 2560, de forma que no ocasionaran alteraciones en la lectura del valor de temperatura y por lo tanto de pH.

Se procedió a conectar una pantalla de visualización LCD 4x16, para verificar si las lecturas de pH y temperatura no se veían afectadas. En la figura 2.28, se puede observar el valor del ADC de 364 correspondiente a 3.94 de pH, estos valores son aceptables, la solución tampón correspondía a un pH 4, por lo que se procedió a conectar otros módulos al microcontrolador y seguir verificando que no existieran alteraciones en las mediciones de pH.



Figura 2.28 Conexión de la pantalla LCD 4X16.



- Establecer la hora actual, para que en el RTC quede grabada la hora, esto se realiza mediante el ajuste del programa que contiene la función. `setDS3231time ()`. Ajustar `setDS3231time`.
- Retener el tiempo, de modo que el RTC siempre dé la hora correcta, incluso cuando se queda sin alimentación eléctrica. Si no desea restablecer la hora cada vez que se apaga el RTC, debe hacer lo siguiente: después de configurar la hora, con el punto anterior, se debe de comentar la función que establece el tiempo y subir el código nuevamente `//setDS3231time`. Este es un paso muy importante para configurar el tiempo en el RTC. Si no se realiza esto, cada vez la hora se restablece en el RTC y por lo tanto se mostrará la hora que se ha configurado anteriormente en lugar de la hora actual.

Con este módulo se consiguió, no hacer uso de las opciones de retardo en la programación del microcontrolador, además de poder guardar la fecha y hora de las mediciones de pH en el módulo de memoria micro SD.

**Precaución:** la fecha y hora actual pueden penderse aun grabando el segundo código, esto es debido a la mala calidad de la batería del DS3231, por lo que se sugiere verificar la fecha al realizar el encender el sistema automatizado de medición y control de pH.

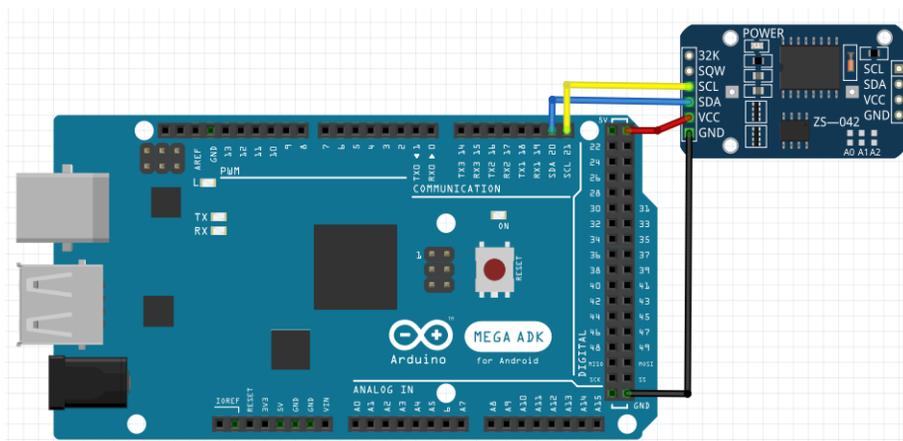


Figura 2.30 Conexiones del módulo de reloj DS3231 y Arduino mega 2560 [48].

### 2.3.3.3 Módulo de Memoria SD

Para guardar los datos de las mediciones realizadas a cada una de las muestras provenientes del RLFIAP, por el sensor de pH y el de temperatura, es necesario un módulo para guardar dichos datos, así también que se conecte al microcontrolador ATmega2560 sin contratiempos. La mejor opción es el módulo de la tarjeta micro SD, la cual permite guardar y leer estos datos e inclusive pasarlos al programa Excel para el análisis estadístico.

Conexiones del módulo de memoria micro SD.

La alimentación eléctrica es de 5 VCD con su respectivo negativo GND, el módulo es conectado a la fuente externa de 5 VCD a 1 A. Verificar la conexión de las terminales CS, MOSI, CLK, MISO, para conectar al microcontrolador, debido que cada para cada placa Arduino se conecta diferente. Para la placa Arduino mega 2560, las terminales a conectar son las mostradas en la siguiente tabla 2.3.

Tabla 2. 3 Conexiones de las terminales del módulo de memoria micro SD a Arduino mega [48].

Módulo de tarjeta SD	Conexiones a Arduino uno	Conexiones a Arduino mega
VCC	3.3 V o 5 V (Revisar la hoja de datos del módulo)	3.3 V o 5 V (Revisar la hoja de datos del módulo)
CS	4	53
MOSI	11	51
CLK	13	52
MISO	12	50
GND	GND	GND

La figura 2.31 muestra las conexiones de la tarjeta micro SD y el Voltaje de alimentación de 5 VCD con su respectivo negativo GND. La placa Arduino mega 2560 puede alimentar el módulo de memoria, solo para hacer las pruebas iniciales.

**Precaución:** si una de las terminales no está conectada correctamente no se guardarán datos en la memoria por lo que es necesario que se verifiquen las conexiones, en el monitor serial indicará si la memoria no ha sido iniciada correctamente.

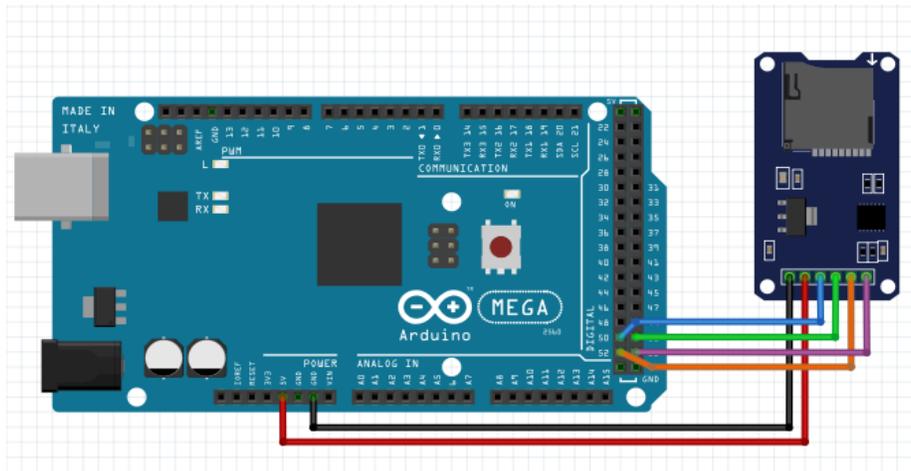


Figura 2.31 Conexiones del módulo de memoria micro SD con Arduino mega 2560 [48].

Para la programación y uso del módulo de memoria micro SD, es necesario formatear la tarjeta de memoria con un formato FAT32, utilizar las librerías SPI y SD, estas son parte de las librerías básicas de la IDE de Arduino. La librería SPI es utilizada para comunicar la tarjeta Arduino con el dispositivo periférico, por otra parte, es necesario revisar los programas de ejemplo de la librería SD, para que se puedan escribir y mostrar los datos de forma correcta.

### 2.3.4 Etapa de control y potencia del sistema automatizado de la medición de pH

#### 2.3.4.1 Conexión de las salidas digitales

Las conexiones para la activación y desactivación de los elementos finales de control del sistema automatizado de medición y control de pH, son provenientes de las salidas digitales del microcontrolador Arduino mega 2560, como se muestra en la figura 2.32, se indica las terminales o pines tomados del microcontrolador, las cuales son las terminales de la 3 a la 9, estas son conectadas a las entradas digitales del módulo de relevadores.

Para la activación de uno o más relevadores a través de su correspondiente entrada digital, es realizada mediante un Voltaje negativo GND, proveniente de la terminal del microcontrolador o una salida en LOW declarada en la programación. Para desactivar o apagar un relevador a través de su terminal digital, es efectuado mediante un Voltaje de 5 Volt o con un HIGH declarado en la programación.

La alimentación eléctrica de la etapa de control del módulo de relevadores, es tomada de la fuente externa a 5 Volt y 1 A, los cables son los de color rojo y negro, la conexión es indicada con un conector molex tipo macho.

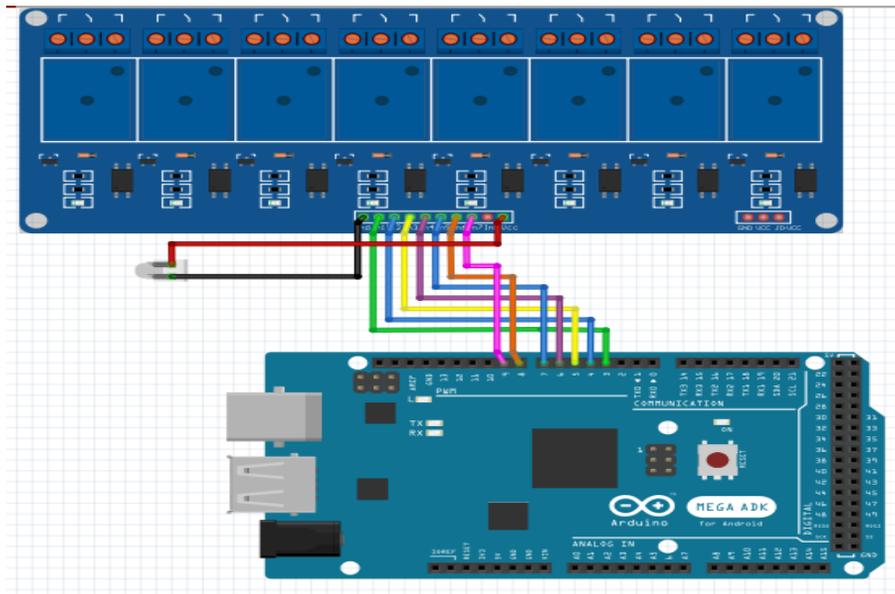


Figura 2.32 Conexiones digitales para la activación de los elementos finales [48].

#### 2.3.4.2 Conexiones de los elementos finales de control

Para accionar los elementos finales de control, es necesario un dispositivo que maneje una mayor cantidad de corriente y Voltaje, pero que a su vez este aislado del microcontrolador, de preferencia ópticamente, para no devolver Voltaje inverso o ruido. Uno de los dispositivos electrónicos que cumple con estas necesidades es el módulo de relevadores, con voltaje de la señal de control a 5 Volt y el manejo de corriente de 10 Amperios a 220 VAC, en el mercado local existen desde 1 hasta 8 relevadores, en el proyecto se utilizó un módulo de 8 relevadores como se muestra en la figura 2.33



Figura 2.33 Juego de 8 relevadores con entrada 5 VCD [12].

Los elementos finales de control son activados una vez conectadas las entradas digitales del módulo de relevadores y las salidas digitales del microcontrolador previamente programado. Esto es para controlar los tiempos de activación y desactivación de estos. Para activar dichos elementos, es mediante las conexiones del común de cada uno de los relevadores y el normalmente abierto, en este interruptor o puente se conectada sólo la terminal negativa de la fuente o GND y es completado conectado el positivo ya sea 12 VCD o 5 Volt directamente al elemento final de control.

Para activar la válvula de entrada V1, las bombas peristálticas B.P1, B.P2, B.P3, es con una fuente de 12 VCD a 2 A, para activar la válvula de salida V2, el agitador y ventiladores, es mediante una fuente de 5 Volt a 1 A, dichas conexiones se muestran en la figura 2.34.

**Precaución:** Todas las terminales negativas o GND tienen que estar conectadas a un mismo punto en común, pero para la activación de cada uno de los relevadores con la pantalla Nextion es conveniente tener conectado en un punto común el negativo de la etapa de control de módulo de los relevadores, el negativo del microcontrolador y el negativo de la pantalla Nextion de lo contrario los relevadores no se activarán.

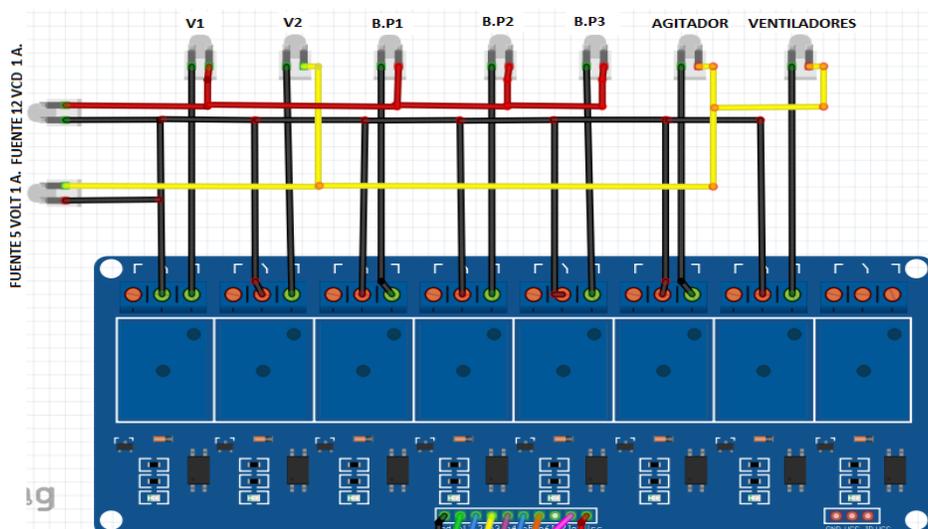


Figura 2.34 Conexión de las fuentes de voltaje para los elementos finales de control [48].

### 2.2.3 Shield para módulos electrónicos y Arduino mega 2560

Para conectar los sensores, los módulos para la medición de pH en una sola placa y así contribuir a disminuir del ruido generado por estas conexiones al microcontrolador ATmega2560, Se diseñó una placa para conectar estos componentes al microcontrolador sin falsos contactos.

Conocidas en el mercado como shield, se conectó el módulo de reloj DS3132, el módulo lector de tarjeta micro SD, el sensor de pH PC2121-5M, en dicha placa se realizó el circuito seguidor de Voltaje con el amplificador operacional para disminuir el ruido del Adapter 1130 o un corto, el sensor de temperatura DS18B20, la fuente externa de Voltaje de 5 Volts, la fuente simétrica de  $\pm 15$  Volt y los conectores tipo molex para las salidas digitales y analógicas.

En figura 2.35 que se muestran las conexiones para shield al microcontrolador ATmega2560, con los conectores tipo molex.

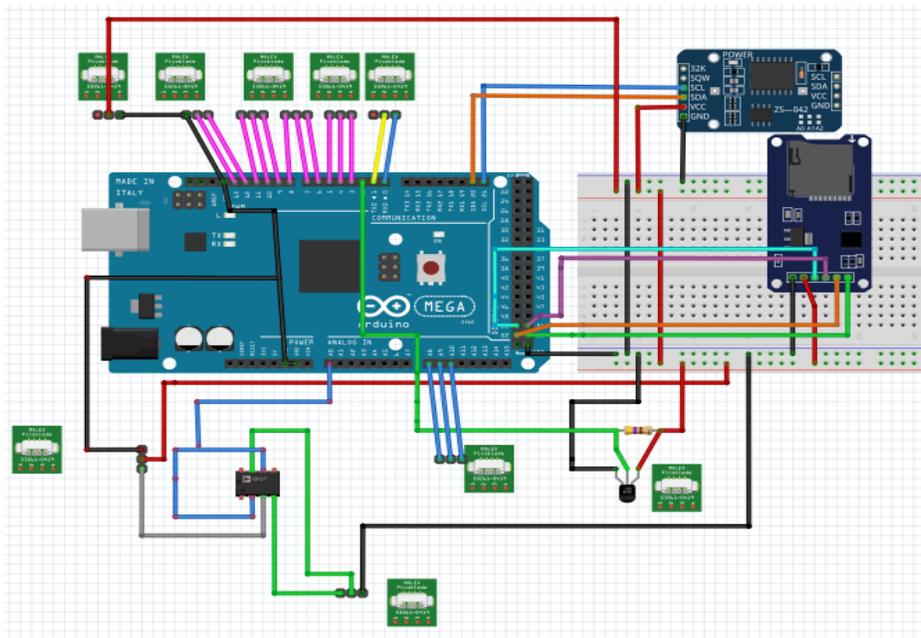


Figura 2.35 Conexionado de sensores y módulos en Arduino mega 2560 [48].

#### Circuito en NI Multisim

La figura 2.36 muestra las conexiones del circuito en Multisim de la plantilla de Arduino mega 2560, para creación de la placa que conjuntará los elementos y módulos para medir y controlar pH con dicho microcontrolador.

**Precaución:** si se realiza la acción copiar los conectores globales se creará otro conector diferente al de la variable global, el cual es diferente, lo correcto es seleccionar de la lista de conectores globales.

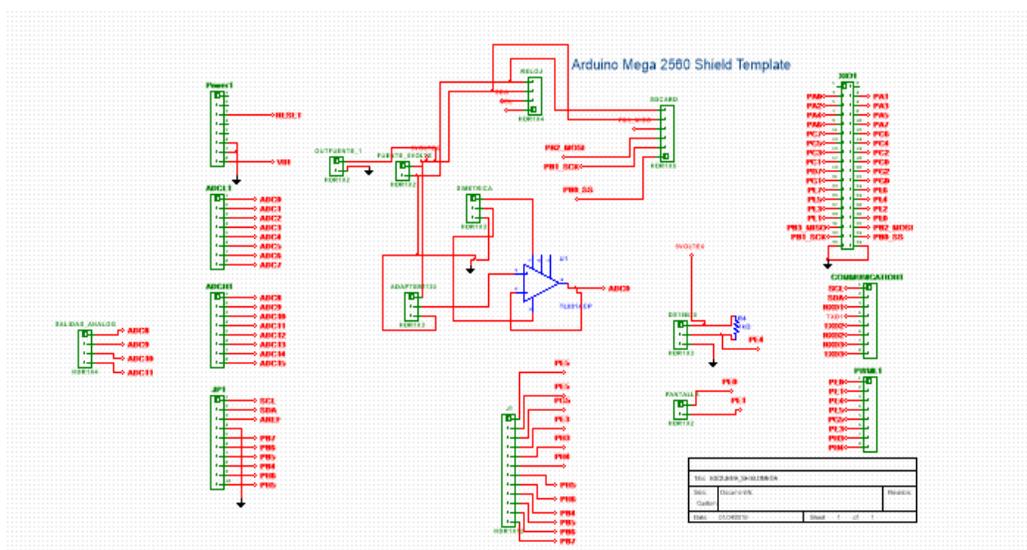


Figura 2.36 Conexiones en Multisim para la shield Arduino mega 2560 [49].

En la figura 2.37 se puede visualizar la impresión de la placa o shield para la conexión de los dispositivos de control del presente proyecto, realizada en el software Ultiboard con las dimensiones de la placa Arduino mega 2560, se procedió a la fabricación.

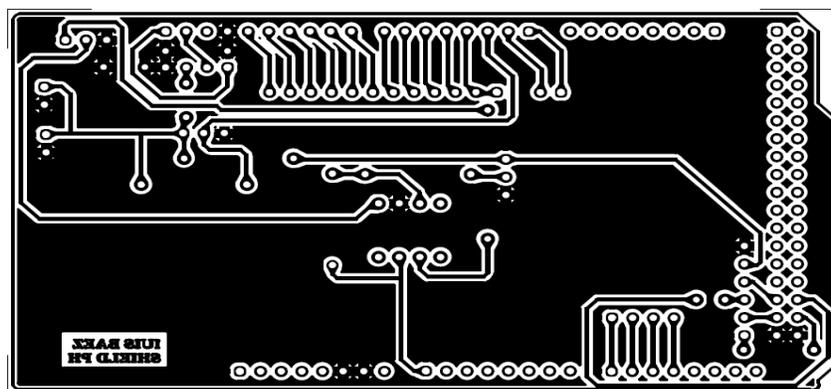


Figura 2.37 PCB para la shield de Arduino mega 2560 [50].

Una vez fabricada la placa se probó el funcionamiento, conectando el módulo de reloj DS3231, el módulo de memoria micro SD, el sensor de temperatura, el Adapter 1130 con el sensor de pH, la fuente de alimentación de 5 V y la fuente simétrica de  $\pm 15$  V.

Las pruebas realizadas con el shield Arduino resultaron satisfactorias, dando lecturas próximas a las indicadas por los buffers pH 4 y pH 10, guardando los datos en la tarjeta micro SD. La figura 2.38 muestra las conexiones de los elementos antes citados.

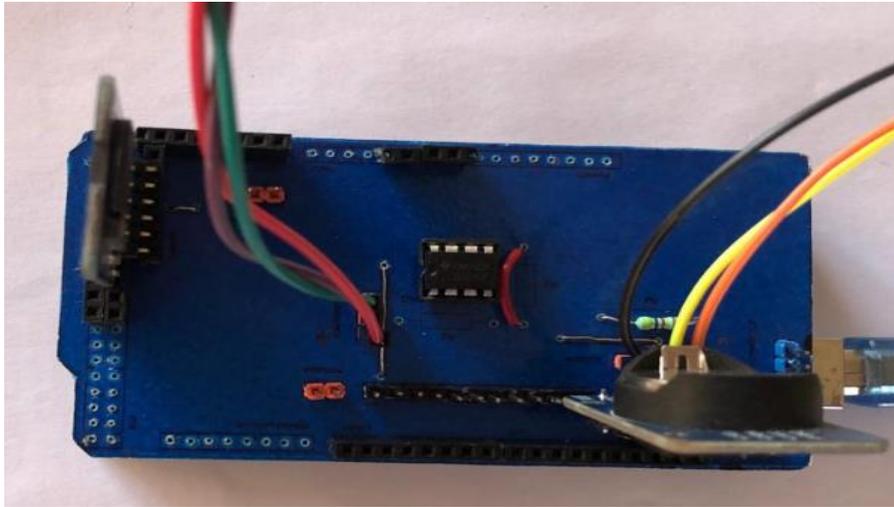


Figura 2.38 Placa para los componentes electrónicos del sistema.

## CAPÍTULO III. Construcción del sistema automatizado de medición de pH

En el presente capítulo se describirán las etapas de construcción del sistema automatizado de medición de pH, el cual contendrá los siguientes elementos:

Válvula 1: es la encargada del paso de líquido para la muestra proveniente del reactor, la ubicación de la válvula se muestra del lado izquierdo, con la línea y flecha indica la entrada de la muestra proveniente del RLFIAP.

Los rectángulos que se encuentran en la parte superior izquierda corresponden a los depósitos para el agua destilada el rectángulo del lado izquierdo, el rectángulo del centro es para el depósito de la solución tampón de pH 4, el rectángulo del lado derecho es el perteneciente al tanque de la solución tampón de pH 10.

Las bombas peristálticas visualizadas como los símbolos de motores, se encuentran en la parte superior de los tanques, estas son las encargadas de llevar el agua destilada y cada una de las soluciones tapón al tanque de muestreo, las líneas con flecha indican el flujo de estos líquidos.

M1: es el motor que se encarga de agitar la muestra depositada en el tanque para estabilizar más rápido la medición de pH.

EE: es la representación y ubicación del sensor de pH dentro del taque de muestreo.

TE: sensor de temperatura, ubicado dentro del tanque de muestreo.

Bloque de control: es la parte donde se instalará el microcontrolador Arduino mega 2560 y los módulos para medir y controlar el pH.

Bloque de potencia: parte donde se encuentran las fuentes de Voltaje y los relevadores para la activación de las bombas, electroválvulas, motor de agitación, ventiladores de inyección y extracción de aire.

Válvula de salida de la muestra, en el esquema es la válvula que se encuentra en la parte de abajo. Esta debe ser de accionamiento rápidamente y sin presión por parte del líquido contenido en el tanque de muestreo.

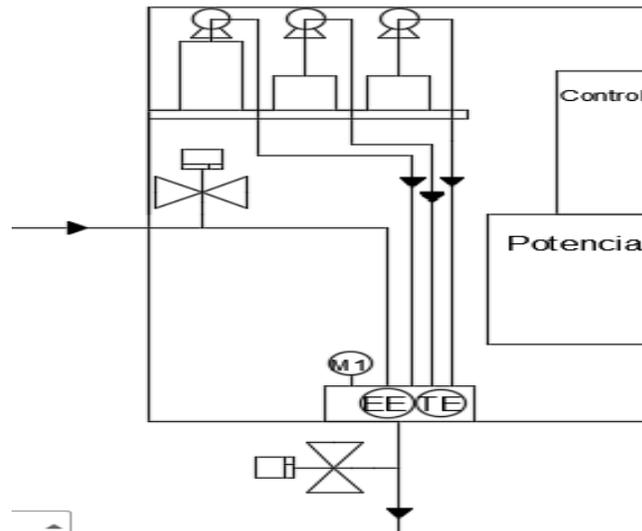


Figura 3. 1 Esquema del sistema automatizado de medición de pH.

### 3.2 Diseño y construcción del gabinete que contendrá la instrumentación

#### 3.2.1 Diseño en software CAD del sistema hidráulico.

Para la fabricación del sistema automatizado de medición de pH, se realizaron dibujos en 3D con el objetivo de visualizar la ubicación de los componentes, la figura 3.2 corresponde al gabinete metálico, en el cual están contenidos los instrumentos como son el sensor de pH, temperatura, bombas peristálticas, electroválvulas, módulo de control y potencia.

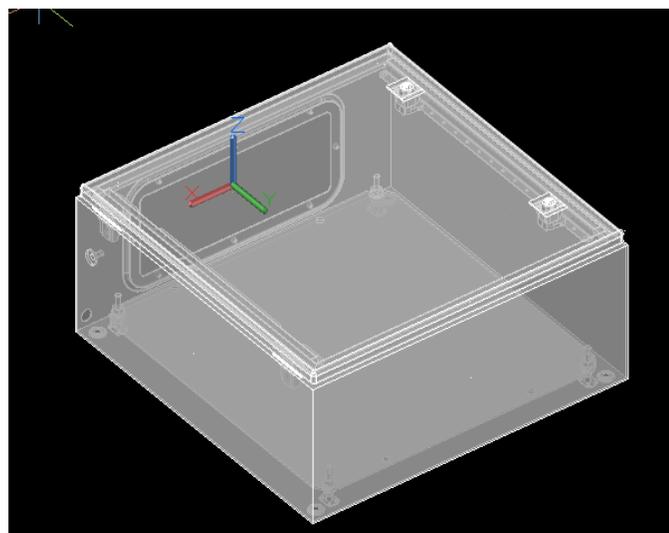


Figura 3.2 Dibujo en 3D del gabinete metálico [51].

Mediante el dibujo de la figura 3.3 se visualizó la ubicación de los tanques en la parte superior del gabinete, los cuales contendrán las soluciones tampón pH 4, pH 10 y el tanque para el agua destilada. En la parte inferior se visualiza el tanque de muestreo con el piso de este último tendrá una pequeña inclinación para que los líquidos contenidos en este fluyan a la salida con mayor fuerza para evitar dejar la menor cantidad de sedimentos.

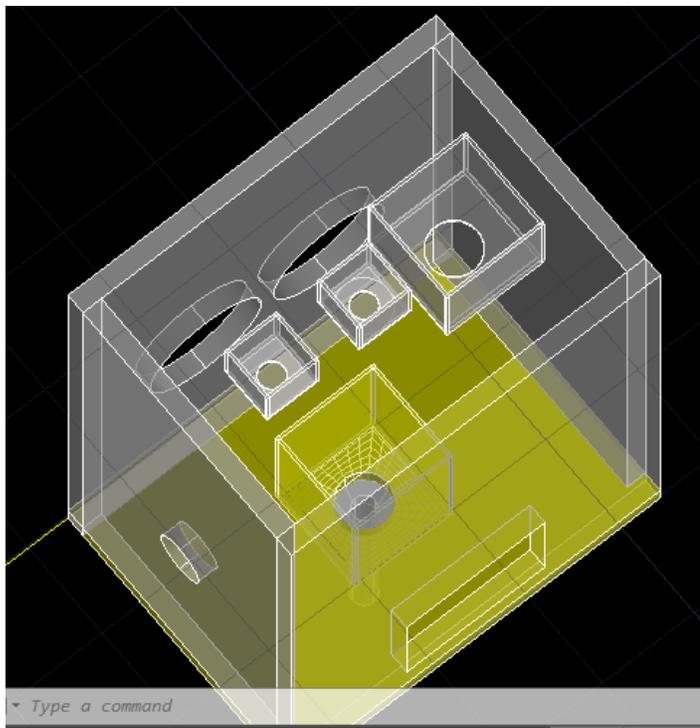


Figura 3.3 Vista de los tanques ubicados en el gabinete [51].

El orificio rectangular inferior en la parte frontal del gabinete como se puede observar en la figura 3.4, es para visualizar las acciones en el tanque de muestreo, en este el operador puede visualizar el sensor de pH y verificar si se están cumpliendo las acciones de llenado del tanque y la limpieza del sensor de pH y temperatura, esto servirá para visualizar las acciones tanto de manera manual y automática.

El orificio rectangular en la parte superior del gabinete de la figura 3.4, es para la instalación de la pantalla Nextion HMI, en esta el operador puede revisar de manera visual las acciones realizadas en el módulo de medición de pH MIE1 y a su vez realizar acciones de forma manual o automática.

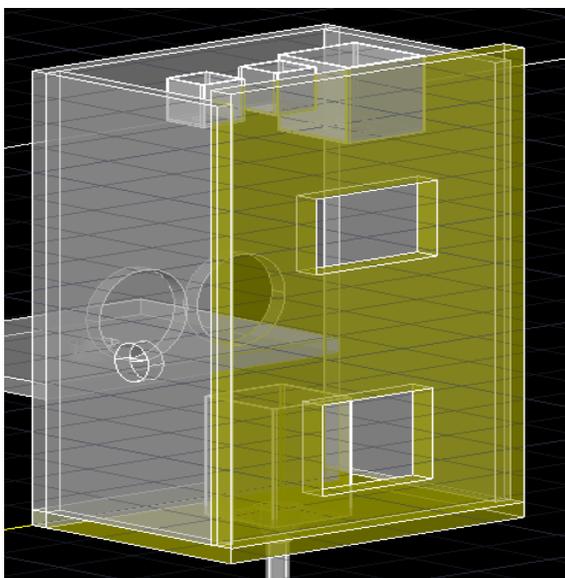


Figura 3. 4 Orificios rectangulares en la parte frontal del gabinete [51].

Como se revisó en el procedimiento de limpieza del sensor de pH, se debe lavar con agua destilada y secar con un paño o servilleta de papel, los ventiladores de inyección y extracción de aire son los encargados de realizar esta acción. Los orificios que se muestran en la figura 3.5, son para el montaje de los ventiladores en el gabinete en la parte trasera del gabinete, su función es para extraer y sacar el aire propiciando el secado del sensor de pH y temperatura.

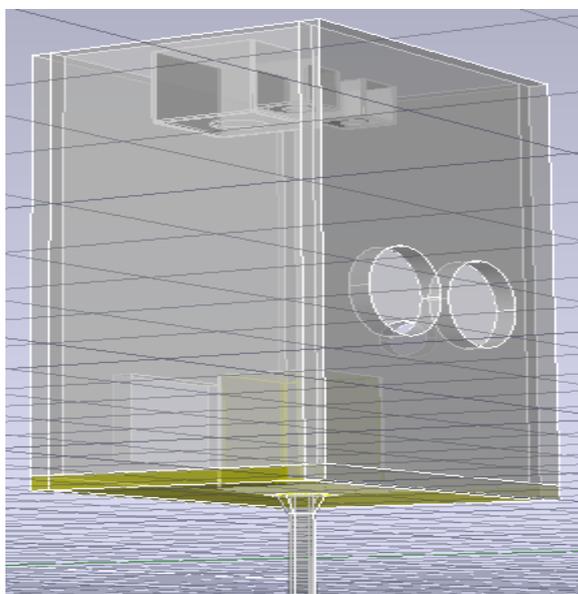


Figura 3.5 Orificios en la parte trasera del gabinete metálico [51].

### 3.2.3 Diseño y construcción del tanque de muestreo

Para efectuar una buena medición de pH, es llevada a cabo después de una limpieza y calibración exitosa del sensor de pH, es por ello que se diseñó un tanque de muestreo que permita realizar una limpieza rápida y eficaz.

El piso del tanque de muestreo tiene que ser ligeramente inclinado alrededor de 20 grados, para facilitar el vaciado, una vez activada la válvula de salida de la muestra de manera que no queden sólidos u otro tipo de suciedad en el tanque. Con una parte pronunciada de tubo en la base del tanque, para acoplar la tubería de desagüe.

En la figura 3.6, se puede visualizar una especie de borde con hueco en la parte superior, este es para pegar secciones de acrílico o vidrio y hacer las paredes del tanque sea visibles para los elementos instalados dentro del tanque.

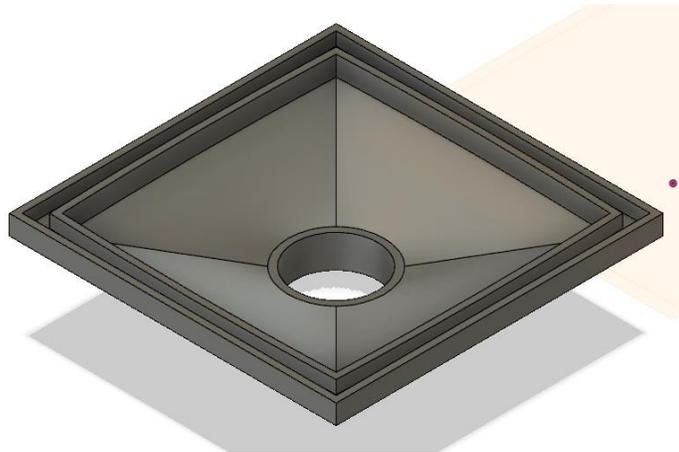


Figura 3. 6 Piso para el tanque de muestreo [52].

### 3.2.3 Válvula para la entrada de la muestra

Una de las características principales para la válvula de llenado del tanque de muestreo del sustrato proveniente del RLFAP, es la apertura y cierre prácticamente instantáneo. Encontradas en el estado del arte de las electroválvulas solenoides las cuales cierran en fallo o cierre sin alimentación eléctrica.

Se encontró en el mercado una electroválvula de plástico, la cual tiene las siguientes características.

El diámetro de 1/2 pulgada, para la conexión entre la tubería del RLFIAP y tanque de muestreo del sistema automatizado de medición de pH. El Voltaje de alimentación es de 12 Volts y se abrirá con una presión de mínima de 0.02 Mpa y el cierre es prácticamente instantáneo.

La figura 3.7 es la electroválvula líquida/gas, para microcontrolador encontrada de esta forma en mercado, es utilizada para la entrada de muestra del RLFIAP y el tanque de muestreo.



Figura 3. 7 Electroválvula Válvula Agua ½ Solenoide 12 V [53].

#### **Características de la electroválvula:**

- 1/2" Nominal NPS
- Presión de trabajo: 0.02 Mpa – 0.8 Mpa
- Temperatura de trabajo: 1 – 100°C
- Tiempo de respuesta (abrir): = 0.15 s.
- Tiempo de respuesta (cerrar): = 0.3 s.
- Voltaje de actuación: 12VDC
- Vida útil: = 50 millones de ciclos
- Peso: 90 g
- Normalmente Cerrada.

#### 3.2.4 Bombas peristálticas

Las bombas peristálticas son el mejor equipo para el bombeo de líquidos sin que estos sufran algún tipo de contaminación, el funcionamiento para la succión y descarga del líquido lo realiza presionando la manguera por rodillos, esta característica es una de las necesarias para el sistema automatizado de medición de pH, debido a que su funcionamiento no permite contaminar las soluciones tampón para la calibración o el agua destilada para la limpieza del sensor de pH. A demás

de tener un cierre total del líquido, no dejando pasar al tanque de muestreo a la hora de efectuar el paro, la bomba peristáltica utilizada en este proyecto se muestra en la figura 3.8.



Figura 3. 8 Bomba peristáltica 12 V.

#### **Características de la bomba peristáltica**

- Voltaje: DC 12V
- Corriente: 80 mA
- Temperatura de trabajo: 0-40 °C
- Humedad relativa < 80%
- Rango de flujo: 20-60 ml/min
- Velocidad de rotación: 0.1-100 RPM
- Motor RPM: 5000.
- Tamaño motor: Dia. 27.6 x Altura 37.9 (mm)
- Tamaño cabeza de bomba (Fx H): Dia. 31.7 x Altura 20.1 (mm)
- Tamaño de tubo: 2\*4mm
- Peso: 200g

#### 3.2.5 Tuberías y Accesorios para el sistema automatizado de medición de pH

Las tuberías son las encargadas de llevar cada uno de los líquidos al tanque de muestreo. La tubería que conecta al RLFIAP con el tanque de muestreo es de tipo PVC, mostrada en la figura 3.9, es utilizada en el proyecto debido al bajo costo y a los conectores de acoplamiento existentes en el

mercado local, una de la principal característica para el sistema de medición automatizado de pH es la mínima cantidad de sedimentos retenidas en esta.



Figura 3.9 Tubería de PVC.

Para los quiebres de la tubería y así poder llegar al tanque de muestreo del reactor, se necesitó de los acoplamientos de codos a 90°, 45° y niples. En la figura 3.10, se muestra un codo de 90 grados de PVC, para conectar la tubería hacia el tanque de muestreo.



Figura 3. 10 Codo a 90 grados.

Las tuberías para las bombas peristálticas tienen el inconveniente de ser de un diámetro pequeño. La manguera que cumpla con un diámetro de aproximadamente de 2\*4mm, con la característica principal de mantener una limpieza y evitar que la suciedad se genere en estas al paso de los líquidos.

La manguera de conexión para aire FESTO, cumple con estas características; conducir el aire y también es funcional para líquido, esto evita que se queden sólidos y que no se genere algún tipo de suciedad o microorganismo, por sus materiales de poliuretano es ideal para el proyecto, la figura 3.11 es la correspondiente a la manguera FESTO de 4X2.5 mm.



Figura 3.11 Manguera FESTO poliuretano azul 4x2.5 mm.

### 3.1 Fabricación del sistema automatizado de medición de pH

Se trazaron cada una de las medidas de los diferentes elementos que componen el sistema de medición de pH, dentro del gabinete metálico se muestra en la figura 3.12 corresponde a la ubicación de los ventiladores de inyección y extracción de aire, el sensor de pH y del tanque de muestreo.



Figura 3.12 Montaje de tanque de muestreo y ventiladores.

En la figura 3.13 se muestra el montaje de las bombas peristálticas en la parte superior del gabinete, conectando con las mangueras Festo para la succión del tanque o depósito de las soluciones tampón, agua destilada y la descarga hacia el tanque de muestreo, así como los cables de alimentación de 12 VCD.

En la parte de la esquina inferior derecha de la figura 3.13 se muestra la conexión de la etapa de control por la tarjeta Arduino mega 2560 y la placa shield construida anteriormente para el

conexionando de los demás elementos del sistema. En esa parte se encuentra empotrada la etapa de potencia la cual contiene las fuentes de alimentación de 12 y 5 Volt así como los módulos de relevadores para la activación de los elementos finales de control.

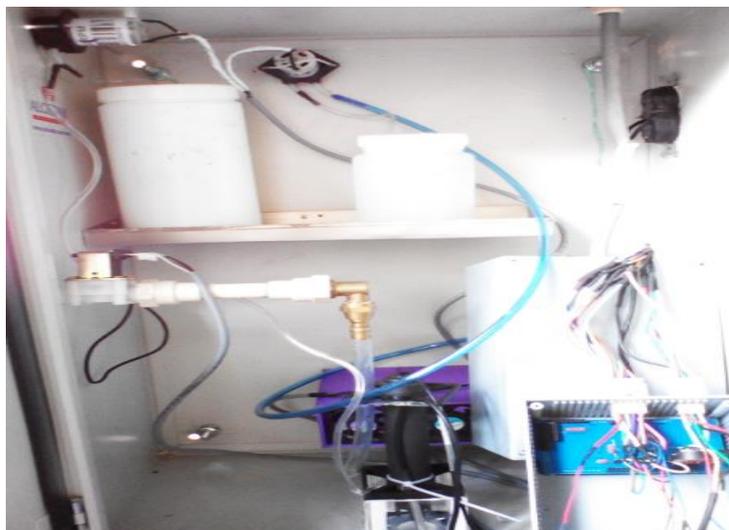


Figura 3.13 Montaje de bombas peristálticas en el gabinete.

La electroválvula solenoide para la entrada de la muestra proveniente del RLFAP, se ubica en la parte izquierda del gabinete, como se muestra en la figura 3.14, con la conexión del tubo PVC y manguera hacia el tanque de muestreo, para la visualización del paso del líquido, esta válvula es activada cada 2 o 3 segundos para llenar el tanque de muestreo.



Figura 3. 14 Instalación de la electroválvula solenoide.

Una vez con los elementos descritos anteriormente, además de las tuberías y el cableado de la etapa de potencia para la activación de las electroválvulas y de las bombas mediante relevadores, se culminó la fabricación del sistema automatizado de medición de pH, como se muestra en la figura 3.15.

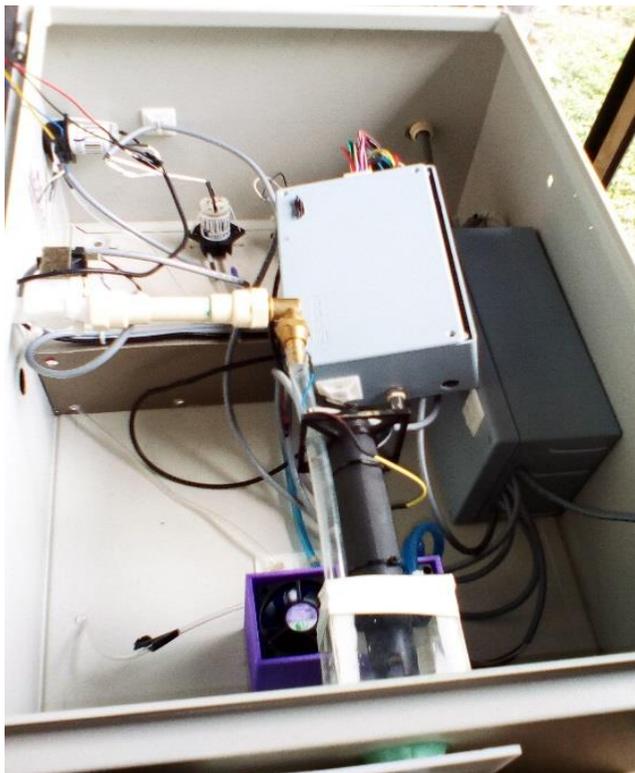


Figura 3.15 Sistema automatizado de medición de pH.

## CAPÍTULO IV. Desarrollo de la HMI para el sistema automatizado de medición de pH

En el presente capítulo se describe la programación de la HMI con la pantalla táctil Nextion, la cual comprende: desde los conocimientos básicos como lo son: la conexión eléctrica entre la pantalla y el microcontrolador o fuente de voltaje externa a 5 Volt, la explicación del entorno de desarrollo de la HMI para la creación de botones, cuadros de texto o etiquetas, cambios de pantallas HMI que permitan activar ciertos elementos en el sistema automatizado de medición de pH, la carga del programa HMI en la pantalla táctil de las pantallas HMI creadas en el entorno de programación Nextion, mediante tarjeta micro SD.

Así también se explicaran cada una de las pantallas HMI para la operación manual o automática del sistema automatizado de medición de pH, los cuales comprenden: la limpieza del tanque de muestreo y sus elementos contenidos en él con agua destilada, la calibración con una de las dos soluciones tampón de forma manual o automática, el manejo de las válvulas de entrada y de salida en las muestras depositadas en el tanque de muestreo, la lectura de pH y temperatura ya sea de forma manual o automática, y el almacenamiento del valor de pH y temperatura.

### 4.1 Generalidades de la pantalla HMI Nextion

Con las mínimas variaciones del valor del pH y temperatura, al agregar módulos conectados anteriormente descritos, se procedió a realizar la interfaz HMI, con la pantalla táctil Nextion.

Nextion es una solución de interfaz hombre máquina (HMI) que proporciona una interfaz de control y visualización entre una persona y un proceso, una máquina, una aplicación o un dispositivo, Nextion se aplica principalmente al campo de la electrónica de consumo.

Nextion incluye una parte de hardware (una serie de tableros TFT, transistor de película delgada) y una parte de software (el editor de Nextion). La tarjeta TFT de Nextion utiliza solo un puerto serie para comunicarse, evitando la molestia de mucho cableado, en comparación a otras pantallas. Solo es necesario conectar los 5 VCD, GND y las terminales RX Y TX al microcontrolador.

El editor de Nextion tiene componentes masivos como botones, texto, barra de progreso, control deslizante, panel de instrumentos, etc. para enriquecer el diseño de la interfaz. Y la función de arrastrar y soltar asegura que pase menos tiempo en la programación, lo que reducirá el 99% de sus cargas de trabajo de desarrollo. [15]

Para iniciar a programar en la pantalla táctil Nextion, es necesario descargar e instalar el software de desarrollo Nextion, la página oficial [15] , en esta se puede encontrar el software de desarrollo libre y las hojas de datos de cada uno de los modelos de pantallas táctil, además de los tutoriales e instrucciones para programar.

Cuando no se cuenta con la pantalla en físico, ni con el microcontrolador conectado a esta, es posible realizar la simulación, con el icono DEBUG, para probar el funcionamiento del programa desarrollado como HMI.

#### 4.1.1 Área de trabajo del software Nextion

La figura 4.1 indica las partes del área de trabajo del software para la programación de las HMI de la pantalla táctil Nextion.

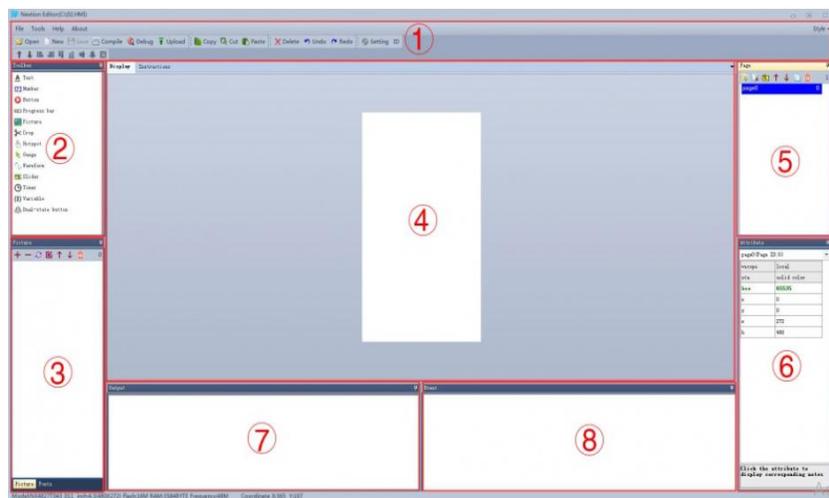


Figura 4.1 Software o editor de Nextion [15].

- 1.- Menú principal
- 2.- Área de componentes, botones sencillos y dobles, cuadros de texto, barras deslizantes, temporizadores, etc.
- 3.- Librería de imágenes y fuentes, cargadas para el proyecto.
- 4.- Área de trabajo, en esta área se agregan los componentes para la HMI.
- 5.- Área de páginas. Editor de páginas o pantallas en la HMI

6.- Área de atributos o características del componente. En esta área se editan las características de los componentes y páginas, tal como el valor, el color del texto, tamaño, etc.

Los atributos utilizados para la programación en el microcontrolador son, el número de página, el nombre y el número id del componente.

7.- Ventana del compilador o panel de salida. De presentarse errores, estos serán mostrados en esta área.

8.- Área de eventos, se puede escribir el código en esta parte. Cuando se tiene seleccionada la pantalla principal, o si se elige un componente. Por ejemplo, un botón se pondrá las acciones de activación al presionar o al dejar de presionar.

Al seleccionar un tipo de evento para el microcontrolador, se debe establecer que se enviará el código o dirección id al microcontrolador de lo contrario la instrucción no se realizará. [15]

#### 4.1.2 Creación de un programa en el editor de Nextion

Al generar un archivo en el software Nextion pedirá que se le asigne un nombre en cierta carpeta definida por el usuario, posteriormente debe seleccionarse el modelo de pantalla, la orientación del área de trabajo para la HMI. La figura 4.2 muestra la selección del modelo de una pantalla básica.

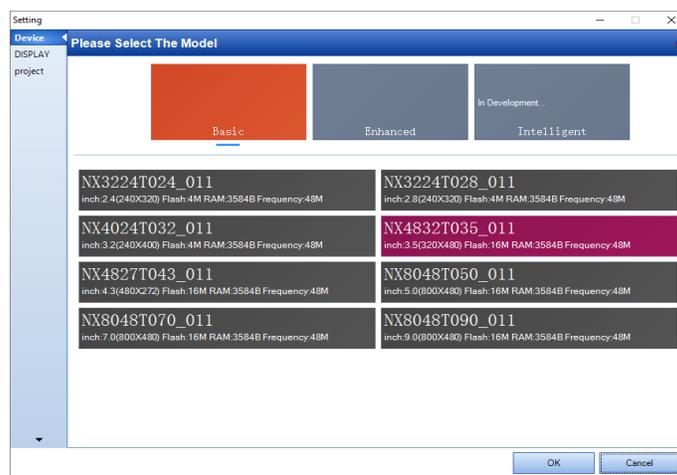


Figura 4.2 Selección del modelo de pantalla Nextion [15].

#### 4.1.3 Creación de fuente

Es necesario para todos los programas, crear una fuente (tipo de letra), aunque en el programa HMI no contenga ningún componente de texto, esto evitara errores al compilar.

Las fuentes que se generan, se guardaran en la carpeta de elección del usuario, la figura 4.3 muestra la ventana para generador de fuente.

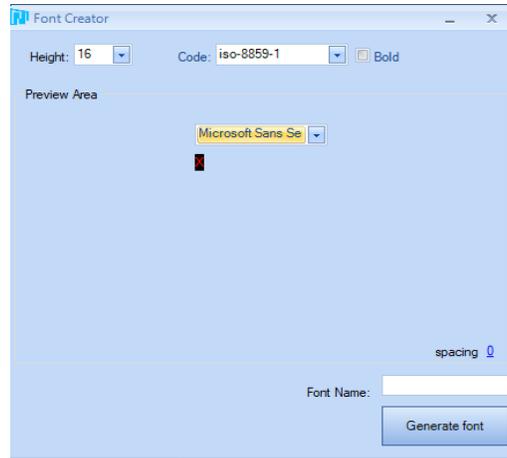


Figura 4.3 Ventana del generador de fuente [15].

#### 4.1.3 Agregar una imagen

Para agregar imágenes en el área de trabajo interfaz HMI, es necesario seleccionar la pestaña picture, cercana a la pestaña Fonts, como se muestra en la figura 4.4, las imágenes deberán estar prediseñadas, estas deben ajustarse en tamaño de pixeles menores a los de la pantalla, para el proyecto es utilizada una pantalla de 7 pulgadas, con los pixeles de 400x800.



Figura 4.4 Ventana picture [15].

#### 4.1.4 Agregar componentes al área de trabajo

Para agregar componentes al área de trabajo, basta con dar clic sobre el componente, este se posicionará en el área de trabajo para la creación de la HMI, por ejemplo, al agregar un botón en el área de trabajo saldrán las características de dicho componente, las cuales se pueden modificar en la ventana atributos del componente. La figura 4.5 corresponde a los componentes: botón y cuadro de texto ubicados en el área de trabajo.

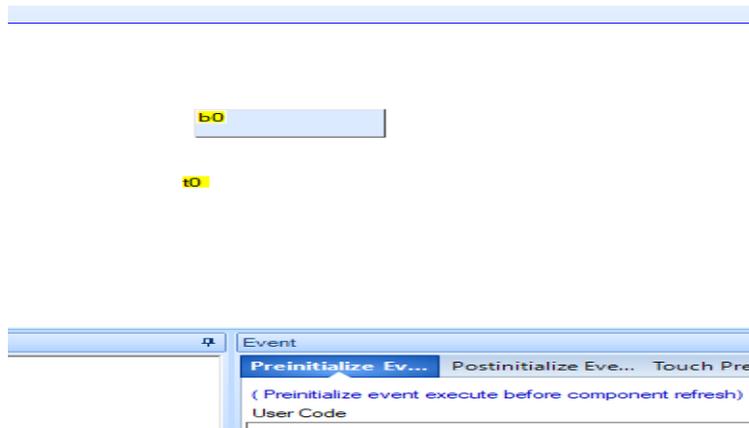


Figura 4.5 Componentes botón y texto en el área de trabajo [15].

Dentro de los atributos de los componentes. Los parámetros para la programación del microcontrolador son: el número de página, el nombre del componente y la dirección id, la figura 4.6 muestra las estas características, dentro de la ventana atributos o características del componente.

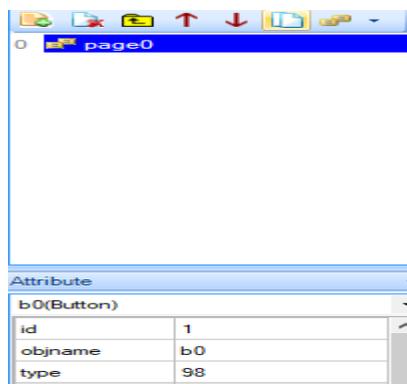


Figura 4. 6 Atributos para la programación del componente [15].

Para indicarle al microcontrolador que está recibiendo una acción desde la interfaz HMI, por ejemplo, la activación de un botón, es necesario establecer correctamente las características anteriores, en la programación y complementar con la selección de enviar componente ID, es necesario verificar si el botón se activará al presionar el botón o al soltarlo, la figura 4.7 indica la selección para enviar ID del componente.

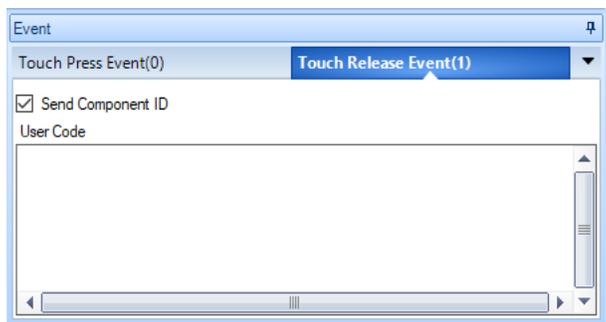


Figura 4. 7 Selección de enviar componente [15].

### Compilar

Al utilizar compilar el en proyecto HMI, es necesario por cualquier advertencia o mensaje de error. Si no existen errores en el programa HMI, se creará un archivo \*. TFT en la carpeta bianyi, este archivo puede copiarse en la memoria micro SD, para posteriormente cargarlo en la pantalla Nextion. La memoria micro SD sólo debe tener un único archivo TFT, para cargarlo en la pantalla Nextion. La carpeta bianyi se muestra a continuación en la figura 4.8, esta muestra los archivos TFT los cuales pueden ser cargados preferentemente mediante la tarjeta micro SD para evitar retardos. **Precaución:** la tarjeta de memoria micro SD debe estar previamente formateada con la opción FAT32.

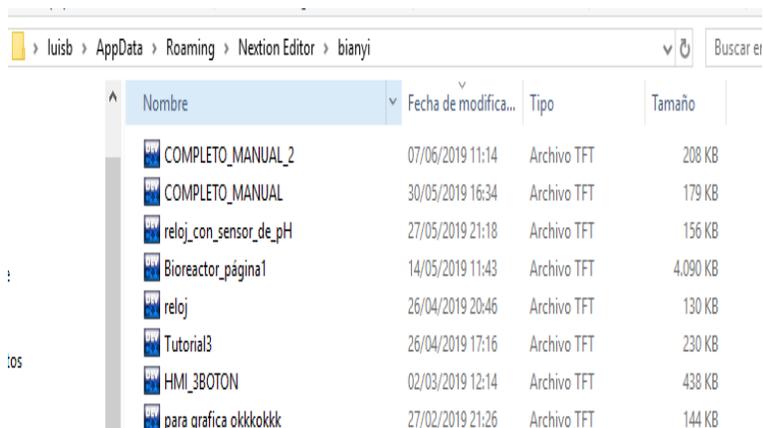


Figura 4.8 Carpeta bianyi [15].

#### 4.1.4 Cargar un archivo TFT a la pantalla Nextion mediante memoria micro SD

La parte trasera de la pantalla Nextion mostrada en la figura 4.9, el ovalo indica donde se introduce la memoria micro SD y se cargan los archivos TFT, este único archivo puede contener varias páginas o pantallas HMI.

Lo primero es verificar que la pantalla Nextion no tenga alimentación eléctrica de 5VCD y corriente de 2 A, posteriormente se introduce la memoria en la ranura micro SD, ya insertada la memoria micro SD se conecta la alimenta eléctrica. En la pantalla se muestra un mensaje con letras de color rojo, este indica el porcentaje de carga del archivo TFT, esperar unos segundos hasta que aparezca el mensaje de carga exitosa successfull. Posteriormente quitar la alimentación eléctrica, para poder retirar la memoria micro SD. Ya sin la micro SD se puede encender la pantalla y visualizar que el programa que se cargó correctamente, es el mismo creado en el editor de Nextion. Otras partes importantes en la pantalla son: el conector de la UART interface, es la conexión para el Voltaje y las terminales RX y TX.



Figura 4.9 Parte trasera de la pantalla Nextion [15].

Voltaje para la alimentación de la pantalla Nextion. Se puede resumir en la figura 4.10, en esta se conecta mediante una fuente de alimentación externa. El Voltaje de alimentación para las pantallas Nextion básicas es de 5 Volt, la corriente es diferente para cada modelo de pantalla.

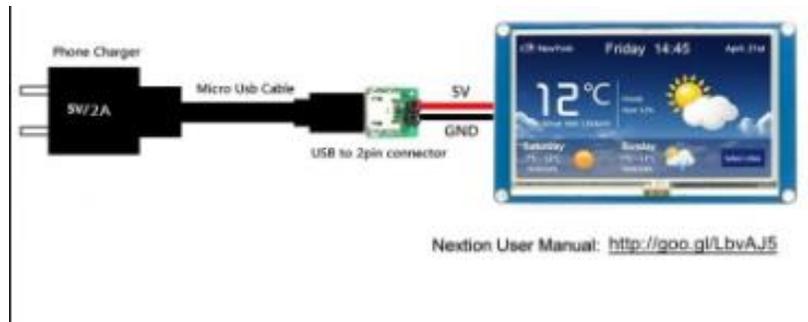


Figura 4 10 Alimentación eléctrica pantalla Nextion [15].

#### 4.1.5 Conexión de la pantalla HMI con el microcontrolador AT mega 2560

En el presente proyecto la pantalla Nextion es conectada con una fuente eléctrica independiente de 5 VCD a 2 A para el modelo NX8048T070\_011 de 7 pulgadas. Las conexiones para RX y TX van conectadas de forma cruzada al microcontrolador ATmega2560 a las terminales TX0 y RX0, como se puede visualizar en la figura 4.11.

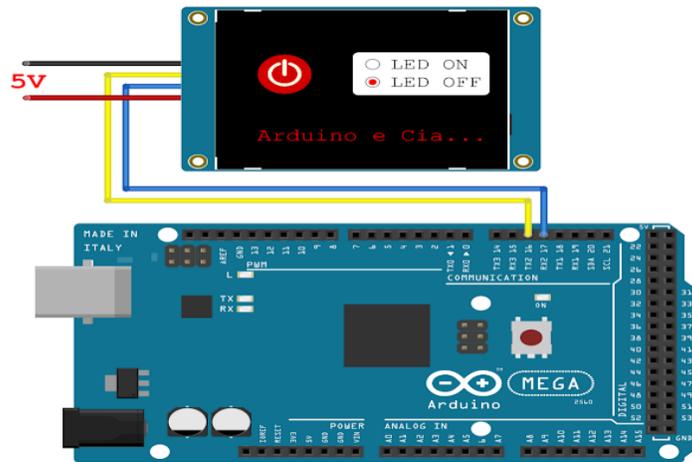


Figura 4.11 Conexión de microcontrolador y pantalla Nextion [15] [48].

#### 4.2 Programación de las entradas y salidas digitales

Para la programación de las entradas y salidas digitales, entre la pantalla Nextion y el microcontrolador Arduino mega 2560, una vez ya instalado el editor de Nextion y la IDE de Arduino, es necesaria la librería y las siguientes acciones.

Descargar la librería de la página Nextion\_Itead. ITEADLIB\_Arduino \_Nextion-master. RESOURCES>>DOWNLOAD>>NEXTION LIBRARES.

**Precaución.** La librería ITEADLIB\_Arduino \_Nextion-master viene configurada por defecto para Arduino mega, se sugiere renombrar la librería a ITEADLIB\_Arduino \_Nextion. Si existen problemas con la comunicación RX y TX, es necesario modificar el archivo NexConfig, comentar las líneas 27, 32, 37 y finalizar poniendo en la línea 38, declarando sólo un puerto serial como se indica en la figura 4.12.

```
--
27 // #define DEBUG_SERIAL_ENABLE
28
29 /**
30  * Define dbSerial for the output of debug messages.
31  */
32 // #define dbSerial Serial
33
34 /**
35  * Define nexSerial for communicate with Nextion touch panel.
36  */
37 // #define nexSerial Serial2
38 #define nexSerial Serial
```

Figura 4.12 Modificación del archivo NexConfig [15].

Una vez modificado el archivo NexConfig, copiar la librería ITEADLIB\_Arduino \_Nextion, a la carpeta librería de los archivos de programa de la IDE de Arduino. Cumplidos estos requisitos, se puede empezar a crear una interfaz HMI en el editor de Nextion para programar las acciones en la IDE de Arduino y subir al microcontrolador ATmega2560.

Para la creación de una HMI, con las acciones de activación y desactivación de botones, es a través de las señales digitales enviadas o recibidas por el microcontrolador Arduino mega 2560.

La figura 4.13 corresponden al encendido y apagado de cinco LEDs entre la pantalla Nextión y el microcontrolador Arduino mega 2560.

Como inicio tenemos que crear un proyecto nuevo en el editor de Nextion, seleccionando una pantalla básica con una orientación a cero grados, para el proyecto es una de 7 pulgadas, posteriormente aparecerá el área de trabajo del editor de Nextion, podemos empezar a poner botones dobles y cuadros de texto, las imágenes se almacenan en la pestaña picture, estas imágenes para el caso de los botones dobles se pueden cargar en pic1 y pic2 de la ventana de atributos, es necesario ajustarse el tamaño de la imagen respecto al tamaño del botón.

Para el texto, es necesario tener una fuente cargada en la pestaña fonts, el texto del componente del mismo nombre, puede ser modificado en la casilla txt de la ventana atributos, ya sea para poner un mensaje o solo dejar las líneas punteadas.

La programación en Arduino no tiene grandes cambios en lo absoluto inicia con la librería de Nextion, la declaración de las variables y los pines de salida.

Posteriormente se declaran los objetos o componentes como son botones, texto, etc. En esta parte lo importante el nombre, la página y el Id o número del objeto del editor de Nextion, de no ser correctos el programa correrá, pero no activará o desactivará los botones o mensajes de texto.

La siguiente sección es la declaración de los eventos táctiles, para este ejemplo es el botón doble. En la siguiente parte de la programación es la llamada de la función del botón de doble efecto. En la parte del void setup están las condicionales, ciclos comunes a la programación en Arduino.

Para subir un programa al microcontrolador y si ya está conectado con la pantalla Nextion, es necesario tener desconectado los pines RX y TX del microcontrolador. Se puede conectar ya cargado el programa para verificar el funcionamiento.

Verificar si se ha seleccionado uno de los dos eventos táctiles, así también marcar la pantalla enviar ID del componente, esto es necesario para que el botón active la salida digital del microcontrolador.

La figura 4.13 representa la HMI para la activación y desactivación de las entradas digitales entre los utilizados están: los botones ON y OFF, los cuales son del tipo doble, se tiene que asignar imágenes en cada uno de los dos estados, sin olvidar activar la casilla de enviar componentes, las líneas punteadas corresponden a las etiquetas de texto las cuales una vez activo el LED enviara en texto de ON u OFF por el microcontrolador se envía texto similar a las pantallas LCD.



Figura 4.13 Botones entradas y salidas digitales.

## 4.2 Programación de la interfaz del sistema automatizado de medición de pH

La figura 4.14 corresponde a la HMI principal del sistema automatizado de medición de pH, con las opciones de modo manual o automático, mediante la activación del botón en la esquina inferior derecha, en esta pantalla se puede acceder a activar y desactivar cada uno de los instrumentos del sistema automatizado de medición y control de pH. Al seleccionar un botón, pasará a otra pantalla HMI, en la cual se puede activar y desactivar cierto elemento final de control, por ejemplo, las válvulas de entrada y salida de la muestra, estas tienen incorporado su propio tiempo permanente o variable, esta última operación puede ser modificada para dar más tiempo de apertura o cierre, según las necesidades del usuario, el valor permanente no puede ser modificado ya que se encuentra grabado en el microcontrolador.

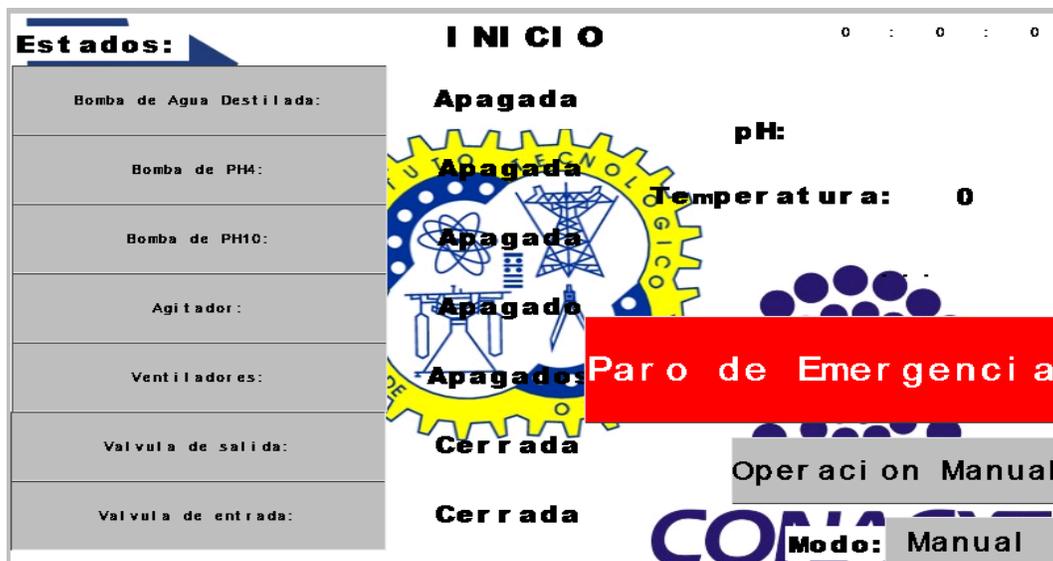


Figura 4 14 Pantalla HMI principal para uso manual o automático.

#### 4.2.1 Programación de la activación de las válvulas de entrada y salida

Una vez que se presiona el botón válvula de salida, se ingresa a la pantalla configuración de la válvula de salida como se indica en la figura 4.15, en esta pantalla HMI se muestra el botón inicio, con el cual se regresará a la pantalla principal. En el microcontrolador ATmega2560 se tiene programado el tiempo para la apertura de dicha válvula es de 5 segundos, el cual funciona con la opción automática este no puede ser modificado desde la opción manual, para modificar el tiempo ya establecido es necesario grabar el nuevo tiempo al programar al microcontrolador.

Para modificar el tiempo en forma manual basta con presionar el botón + incrementar o – decrementar, dichos valores serán modificados en intervalos de 10 milisegundos una vez establecido el tiempo se puede presionar el botón encender para abrir o apagar para cerrar inmediatamente la válvula de salida.



Figura 4.15 HMI configuración del tiempo para válvula de salida.

Para la válvula de entrada el funcionamiento del programa de la HMI de la figura 4.16, es similar al de la válvula de salida, el tiempo permanente es de 2 segundos, para la operación automática grabado en el microcontrolador y el cierre es prácticamente inmediato debido a que es una electroválvula solenoide.

En la operación manual se encuentran los botones + y –, estos sirven para incrementar y decrementar el tiempo de apertura de la válvula, solo se activará en este tiempo y por obvio al estar en la pantalla HMI correspondiente.

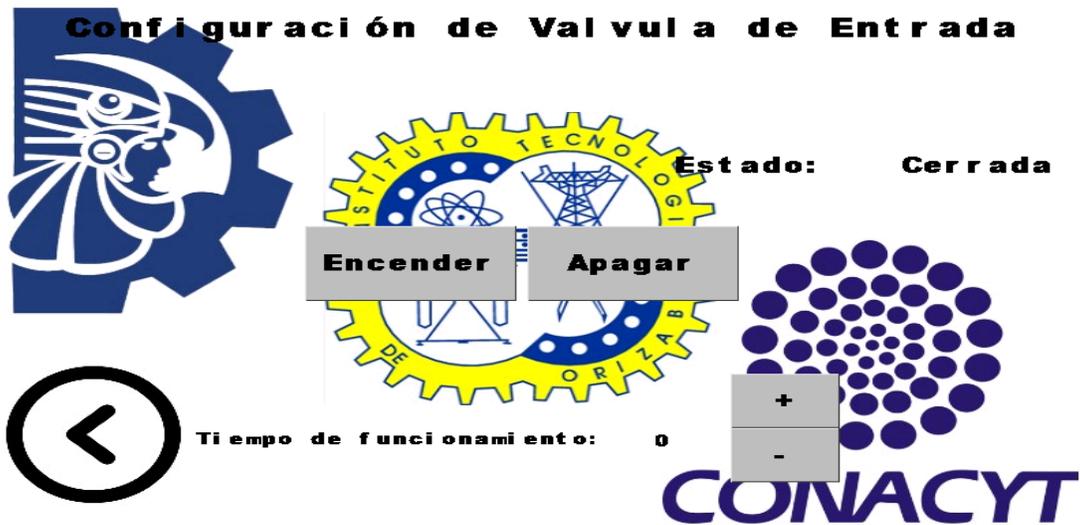


Figura 4.16 HMI configuración del tiempo para válvula de entrada.

#### 4.2.2 Activación de la bomba peristáltica para la limpieza del tanque de muestreo

En la pantalla de la HMI fue incorporada la acción de limpieza manual con agua destilada para sensor de pH, tanque de muestreo, sensor de temperatura y agitador, debido a que estos elementos pueden estar sucios aun con la limpieza programada automáticamente, por lo que el operador puede activar la opción de limpieza cuantas veces sea necesaria.

Una vez que se verifica de manera visual la limpieza y el valor del pH, este último cercano al valor del agua destilada pH7, además de la inspección visual en la mirilla del gabinete metálico de los elementos contenidos en el tanque de muestreo, la figura 4.17 que se muestra a continuación corresponde a la HMI para la activación de la bomba de agua destilada.



Figura 4 17 HMI configuración del tiempo para válvula de entrada.

#### 4.2.3 Programación de los ventiladores y agitador

Al presionar el botón ventiladores, se invocará una nueva pantalla HMI, en esta solo está la activación y desactivación de dichos elementos. Como se visualiza en la figura 4.18, en la esquina superior derecha, está ubicado el botón inicio para volver a la pantalla HMI principal.

En la parte central se tienen los botones encender y apagar, además de la leyenda en mensaje de texto que indica si están encendidos o apagados, si en la pantalla no se tiene conectado el microcontrolador o si solo se simula no aparece el mensaje de activados, es debido a que la acción necesita completarse con él envió del texto por parte del microcontrolador, en la simulación solo se mostrará el código con la terminación FF FF FF.



Figura 4.18 HMI activación y apagado de ventiladores.

### 4.3 Pantalla para la calibración pH 4 y pH 10

El sensor de pH requiere la calibración sobre todo cuando este no está húmedo por varios días, es necesario efectuar la calibración en dos puntos, debido a que el RLFIAP tiene comportamientos alrededor de pH 6.5 y pH 8.5. Para este proceso se tiene programada la forma de operación automática una vez por semana y la calibración manual cuando el usuario verifique que sea necesaria, esta se efectuarán con las soluciones tampón pH4 y pH 10. En la calibración manual el operador puede seleccionar una de estas dos soluciones.

Al ingresar con el botón operación manual se mostrará la pantalla HMI, como se indica en la figura 4.18 la cual tiene la calibración de pH4 y pH10, de manera semiautomática las opciones de: limpieza, mostrar el valor de pH, mostrar el valor de temperatura y guardar datos.

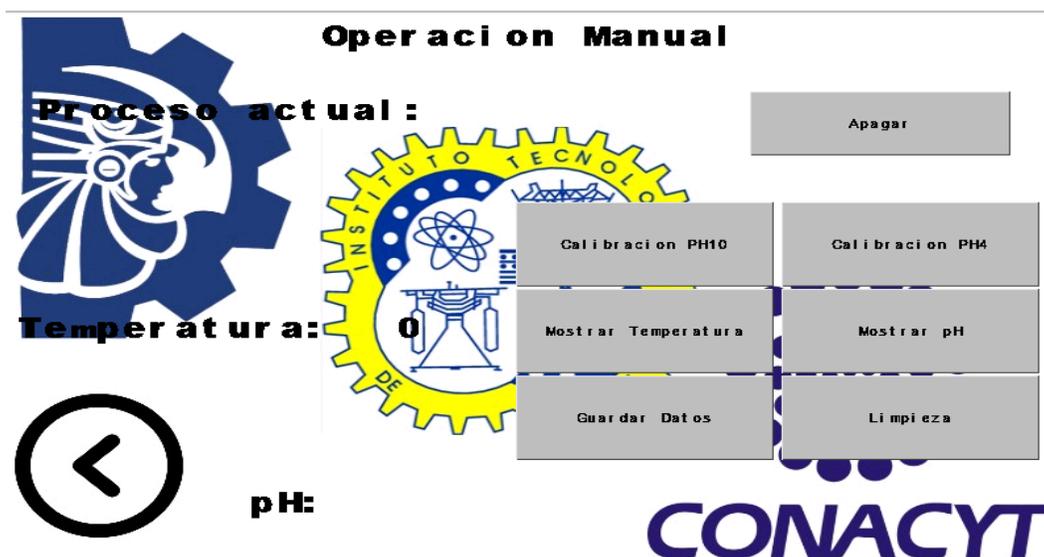


Figura 4.19 HMI opciones para operación manual.

Si el operador selecciona una de estas dos soluciones para la calibración en la pantalla de la HMI, esta parte del proceso se realizará de forma semiautomática. Para otra solución tampón el proceso es similar.

En la calibración se realizará la limpieza del sensor de pH con agua destilada depositándola en el tanque de muestreo, posteriormente se vaciará el agua destilada la cual no debe ser reutilizada y se depositarán una de las soluciones tampón, se agitará y cuando el operador considere que el sensor de pH está leyendo el valor de esta variable, por lo regular después de 10 segundos de ingresar la muestra y que se realice la compensación por temperatura, podrá presionar el botón leer pH y leer

temperatura. Una vez calibrado el sensor de pH se mostrará un mensaje de calibración realizada en la HMI.

Con los botones mostrar temperatura y mostrar pH, se puede realizar la acción de mostrar el valor del pH y de la temperatura, cuando el usuario lo requiere, de preferencia completado el proceso de calibración o lectura de la muestra, el usuario puede indicarle al sistema que muestre uno o los dos valores, además el usuario puede indicarle al sistema que guarde los datos en la memoria microSD.

Para detener cualquiera de estas opciones se tiene el botón de apagar, con este botón se pueden detener la limpieza, la calibración y las lecturas o el guardado de datos, por lo que basta pulsarlo para detener estas opciones y salir de la ventana operación manual.

### 4.3 Resultados

Con la pantalla táctil Nextion controlada por el microcontrolador Arduino mega 2560, fue creada la HMI como se indica en la figura 4.20, con las operaciones en forma manual y automática. Para la primera opción se debe presionar la pantalla en el botón manual, una vez presionada esta opción se podrá ingresarse a cada uno de los elementos finales de control por ejemplo activar la válvula de entrada, esta tiene un tiempo definido de 2 segundos permanente en el modo automático y grabado en el microcontrolador, para la opción manual el tiempo de apertura puede ser modificado, así también para la válvula de salida, esto facilitará por si las presiones en el reactor cambian o el usuario quisiera controlar en llenado del tanque de muestreo.

Para la bomba de agua destilada si se accede a la pantalla HMI correspondiente, en esta se pueden activar las veces que sean necesaria por el operador, para poder realizar la limpieza del tanque de muestreo y de los instrumentos contenidos en él.

La opción de la HMI de las bombas de pH 10 y pH 4 tiene los tiempos constantes de 1.5 minutos, estos no se pueden modificar ya que la presión depende siempre de la bomba y no del contenido en el tanque, para estos dos botones hay una segunda opción la cual indica la calibración con una de estas dos soluciones, al activar la calibración pH 4 o pH 10, estas se realizan de forma automática.

Para los ventiladores encargados de inyectar y extraer aire para el secado del sensor, tiene un tiempo permanente en ambos modos de operación, debido a que este no perjudica si se están activos por algunos segundos, lo mismo aplica para la HMI del agitador.

El botón de color rojo, es el paro de emergencia, principalmente para la válvula de entrada, si el tiempo permanece activo puede derramar la muestra de sustrato dentro del gabinete del sistema, por esta razón existen tiempos permanentes para las válvulas de entrada y salida. El operador en cada una de las ventanas de la HMI puede presionar el botón de paro de emergencia.



Figura 4.20 HMI del sistema automatizado de medición de pH.

Se realizó la lectura del valor de pH en el RFLIAP con el sistema automatizado de medición de PH, el cual complementó las lecturas de otras variables como la DQOt y remoción de DQOt involucradas en el proceso del RLFIAP, como se visualiza en la figura 4.21, se midieron los valores de pH en la entrada y la salida del reactor. En la entrada van desde 6.64 hasta 7.44, con la ayuda del sistema permite actuar al personal rápidamente para realizar las regulaciones de pH en el sustrato de entrada. Además se registraron las fechas en la toma de muestra de los meses de febrero a mayo, verificando el valor de pH en cada uno de las horas y días, esto permitió el incremento en la producción de biogás de 59 hasta 102 l/h, por lo que el funcionamiento del RLFIAP incremento su eficiencia.

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA		DQOt y DQOs														
MIE		LUIS ALBERTO BÁEZ RODRÍGUEZ														
DISEÑO DE UN SISTEMA AUTOMATIZADO DE pH PARA EFICIENTAR LA PRODUCCIÓN DE BIOGÁS EN BIOREACTORES.																
Volumen de alimentación (L)	100	Vol. Util (L)	540													
			135 4 540													
Fecha	Tipo de muestra	No. de muestra	Entrada				Salida				Remoción DQOt (%)	Remoción DQOs (%)	Biogás Promedio (l/h)	Cva (gDQO/L*d)		
			DQOt	DQOs	DQOt (g/L)	DQOs (g/L)	pH	DQOt	DQOs	DQOt (g/L)	DQOs (g/L)	pH				
21-feb	RLFI	1	221,23	198,87	11,0615	9,9435	6,64	163,34	154,22	8,167	7,711	7,83	26,17	22,45	59	2,05
22-feb	RLFI	1	230,15	188,31	11,51	9,42	7,65	159,12	134,41	7,96	6,72	7,82	30,86	28,62	51	2,13
24-feb	RLFI	1	240,34	201,23	12,02	10,06	7,73	175,23	141,22	8,76	7,06	7,98	27,09	29,82	54	2,23
25-feb	RLFI	1	256,44	178,72	12,82	8,94	7,68	166,65	125,34	8,33	6,27	7,74	35,01	29,87	66	2,37
26-feb	RLFI	1	243,21	237,88	12,16	11,89	7,61	191,31	180,81	9,57	9,04	7,66	21,34	23,99	80	2,25
27-feb	RLFI	1	232,77	179,88	11,64	8,99	7,77	169,91	168,47	8,50	8,42	7,98	27,01	6,34	96	2,16
02-mar	RLFI	1	245,32	231,22	12,27	11,56	7,92	148,68	156,76	7,43	7,84	7,95	39,39	32,20	91	2,27
03-mar	RLFI	1	184,45	143,96	9,22	7,20	7,87	140,12	124,22	7,01	6,21	7,94	24,03	13,71	110	1,71
05-mar	RLFI	1	274,41	152,75	13,72	7,64	7,82	183,18	127,35	9,16	6,37	7,75	33,25	16,63	121	2,54
06-mar	RLFI	1	168,84	143,72	8,44	7,19	7,61	134,51	123,38	6,73	6,17	7,85	20,33	14,15	106	1,56
07-mar	RLFI	1	171,65	127,31	8,58	6,37	7,79	115,21	105,23	5,76	5,26	8,25	32,88	17,34	105	1,59
09-mar	RLFI	1	239,93	148,17	12,00	7,41	7,82	138,06	137,61	6,90	6,88	7,96	42,46	7,13	98	2,22
12-mar	RLFI	1	262,82	241,06	13,14	12,05	7,94	231,05	228,71	11,55	11,44	8,03	12,09	5,12	95	2,43
13-mar	RLFI	1	315,85	300,01	15,79	15,00	7,44	227,96	221,33	11,40	11,07	7,93	27,83	26,23	102	2,92

Figura 4.21 Lectura de las mediciones de pH en el RLFIAP.

En la gráfica representada por la figura 4.22, se pueden visualizar las medidas de pH efectuadas por el sistema automatizado de medición de pH, como se muestra son las medidas tomadas en la entrada y la salida del RLFIAP en los meses de febrero a mayo, presentando incrementos de hasta valores de pH 8, por lo que se tuvieron que implementar otras medidas como introducir valores de pH bajos en la entrada, esto se logró mediante la regulación con bicarbonato de sodio en una relación de 3 litros de sustrato por 21 gramos de bicarbonato de sodio, aun con cálculos previos esto puede variar debido a la concentración de carga volumétrica aplicada CVA y al flujo de descenso del sustrato contenido en el tanque elevado.

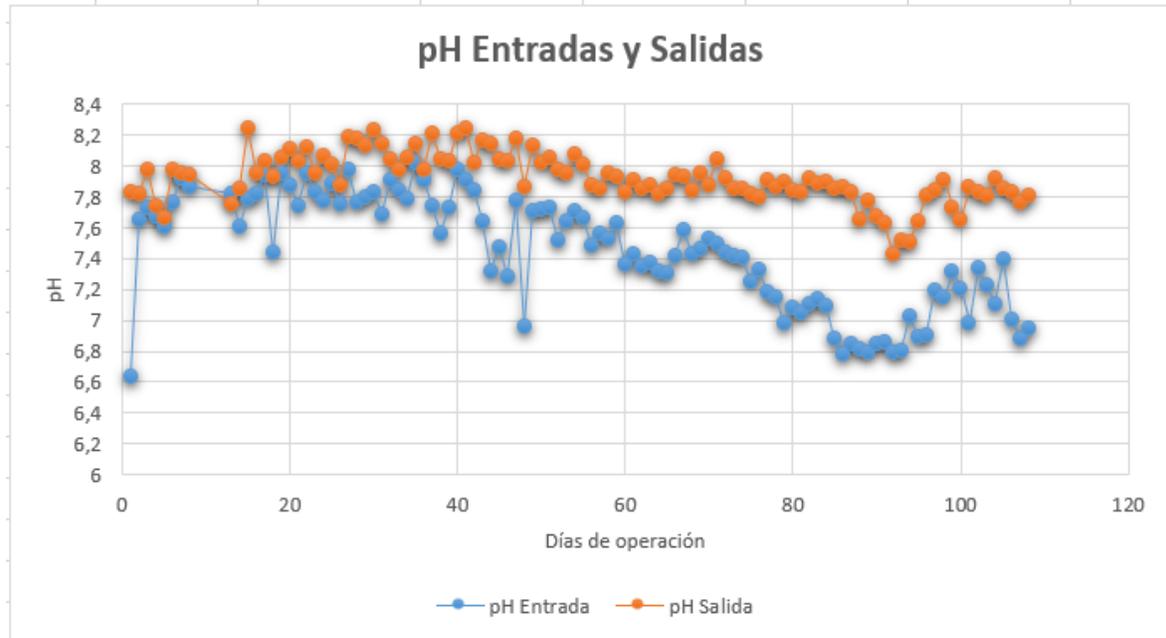


Figura 4.22 Gráfica de los pH en el RLFAP de febrero a mayo 2019.

Para bajar el pH a la entrada del RLFAP se realizó la regulación del sustrato mediante la aplicación de bicarbonato de sodio, como se muestra en la figura 4.22 se realiza la medición de la cantidad de litros del sustrato y la lectura del valor de pH, además se mide la concentración de carga volumétrica aplicada CVA, esto es a la salida de la etapa de hidrólisis.



Figura 4 23 Medición de sustrato.

En el siguiente gráfica representada por la figura 4.23 se muestra la producción de biogás en los meses de febrero a mayo, teniendo un incremento en los últimos 10 días debido a las rápidas mediciones de pH y por lo tanto a las oportunas regulaciones efectuadas al sustrato de entrada del RLFIAF, por lo que el sistema automatizado de medición de pH contribuyo al incremento en la producción de biogás, ya que el personal queda libre de realizar dicha actividad.

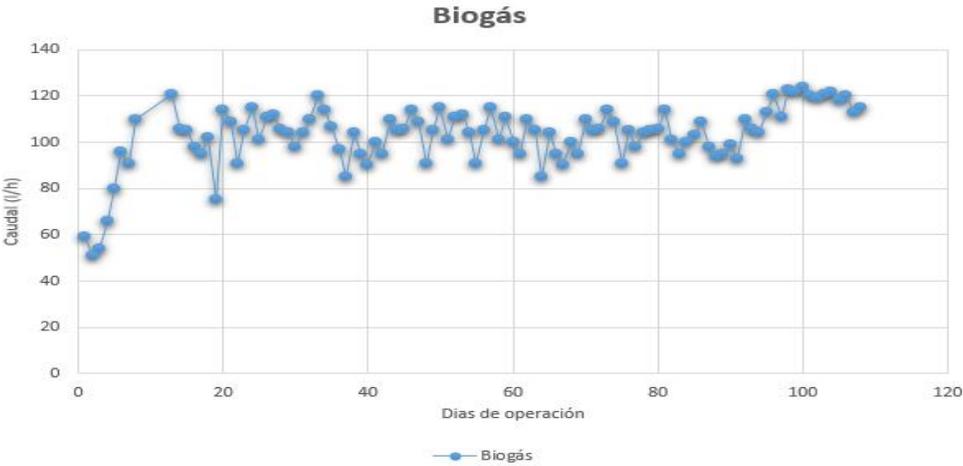


Figura 4.24 Producción de biogás de febrero a mayo 2019.

## CONCLUSIONES

Se realizó el sistema automatizado de medición de pH de forma satisfactoria logrando la correcta programación de la limpieza, calibración y la exacta medición de pH de las soluciones tampón y muestras del RLFIAP, consiguiendo igualar los sistemas industriales conocidos como transmisores de pH, por lo que se logró el objetivo de realizar la medición automatizada de pH en línea.

Fue posible conocer la correlación entre temperatura y el pH, gracias al sensor de pH pH PC2121-5M Phidgets y el sensor de temperatura DB18B20, para realizar la corrección por temperatura en la medición de pH de cada una de las muestras e ingresar al RLFIAP sustratos con pH lo más cercanos al valor neutro, para contribuir a la medición correcta del pH en el RLFIAP efectuada por el operador ya sea de forma manual o automática, sin poner en riesgo su seguridad gracias a la creación de la HMI con la pantalla táctil Nextion. Con la opción de guardar los datos de pH y temperatura en la fecha y hora exacta, el operador quedó libre de esta actividad, esto le permite posteriormente realizar un análisis estadístico de dichas variables de los días de operación y realizar acciones de control sobre esta variable.

## TRABAJO FUTURO

Realizar la incorporación al sistema y a la HMI de las variables de flujo y nivel de líquido del sustrato, la cantidad a ingresar en el RLFAP, debido a que estas variables son parte fundamental del funcionamiento del reactor.

Implementar el sistema de automatización de control de pH para el RLFAP una vez se cuente con el material y equipo para su realización e incorporar la HMI de este sistema en la programación a la tarjeta Raspberry Pi 3.

## REFERENCIAS

- [1] I. O. M. Peña, «GENERACIÓN DE BIOENERGÉTICOS A PARTIR DE RESIDUOS SÓLIDOS ORGÁNICOS EN UN REACTOR DE LECHO FLUIDIZADO INVERSO CON ARREGLO EN PARALELO,» Instituto Tecnológico de Orizaba, ORIZABA VERACRUZ. , 2016.
- [2] E. +HAUSER, *Medición del pH en procesos industriales*, vol. FA 007C/23/es/02.10, BARCELONA: ENDRESS +HAUSER, 2018.
- [3] CRISON, «PH 25, mV, °C, METER,» 24 02 2009. [En línea]. Available: [www.crisoninstruments.com](http://www.crisoninstruments.com). [Último acceso: 16 03 2018].
- [4] D. O. M. C. Dr. Carlos Alberto García Bustamante, «ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO,» Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt, MÉXICO, 2016.
- [5] S. d. Energía, «Prospectiva de energías renovables 2016-2030,» Subsecretaría de Planeación y Transición Energética, México, 2016.
- [6] M. E. C. B. y. R. Carlos Alberto Severiche Sierra, «Manual de Métodos Analíticos para la Determinación de Parámetros,» Biblioteca virtual eumed.net, Colombia, 2013.
- [7] OAKTON, «Instruction Manual,» EUTECH INSTRUMENT, Vernon Hills, IL 60061 USA, 2010.
- [8] P. INC., «PC2121-5M pH Industrial Electrode,» 13 Marzo 2016. [En línea]. Available: <https://www.phidgets.com/?tier=3&catid=11&pcid=9&prodid=413>.
- [9] P. Inc., «Phidgets 1130 - Product Manual,» Phidgets, Mountain Time (US & Canada), 2010.
- [10] Arduino., «ARDUINO MEGA 2560 REV3,» Arduino , 18 03 2019. [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/usa/mega-2560-r3>. [Último acceso: 18 03 2019].
- [11] R. SANTOS, «ARDUINO PROJECTS,» RAMDOM NERD TUTORIALS.COM, ESTADOS UNIDOS, 2018.
- [12] L. LLAMAS, «LEER Y ESCRIBIR EN UNA TARJETA SD O MICRO SD CON ARDUINO,» LUIS LLAMAS Ingeniería, informática y diseño, 16 10 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/tarjeta-micro-sd-arduino/>. [Último acceso: 14 06 2019].
- [13] A. Creus, *Intrumentación industrial*, Mexico,DF: MARCOMBO S.A., 2010.
- [14] B. William, *Ingeniería de control*, México: Alfaomega, 2001.
- [15] I. STUDIO, «NEXTION HOME,» ITEAD STUDIO, 26 05 2011. [En línea]. Available: <https://nextion.tech/>. [Último acceso: 19 01 2018].

- [16] D. d. M. S. d. R. d. C.V, «Válvula De Bola Motorizada 1 2 Válvula De Bola De Acero Ino,» mercado libre, 26 01 2019. [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-648506816-valvula-de-bola-motorizada-1-2-valvula-de-bola-de-acero-ino-\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-648506816-valvula-de-bola-motorizada-1-2-valvula-de-bola-de-acero-ino-_JM?quantity=1). [Último acceso: 17 03 2019].
- [17] R. P. Moreno., Ingeniería de la automatización industrial., México. : Alfaomega. , 2009.
- [18] R. P. ARENY, Sensores y acondicionadores de señal., MARCOMBO, 2010.
- [19] A. R. Penin, Sistemas SCADA, México. : Alfaomega, 2013.
- [20] M.-T. GmbH, «A Guide to pH Measurement,» 03 2016. [En línea]. Available: <https://www.mt.com/mx/es/home/library/guides/process-analytics/ph-measurement-guide.html>. [Último acceso: 22 08 2018].
- [21] K. A. R. JUDITH F. RUBINSON, QUÍMICA ANALÍTICA CONTEMPORANEA, MÉXICO: PEARSON EDUCACIÓN, 2000.
- [22] A. L. JONH B. RUSSELL, QUÍMICA GENERAL, MÉXICO: MC GRAW HILL, 1993.
- [23] Endress+Hauser, «Sensores, transmisores, equipos compactos y portasondas,» Endress+Hauser FA00007C/23/es/17.16 , México, 2018.
- [24] C. V. H. Luis Vidal Salgado, «Medición de la absorbancia óptica de soluciones acuosas mediante la instrumentación virtual y el control,» Universidad Tecnológica de Pereira., Manizales Colombia, 2014.
- [25] A. INSTRUMENTS, «WD-35805-24 OAKTON,» AOKTON INSTRUMENTS, 27 6 2018. [En línea]. Available: <http://www.4oakton.com/proddetail.asp?action=add>. [Último acceso: 27 6 2018].
- [26] A. M.-S. R. P.-G. C. M. A.-Z. J. R.-J. E.M. Sánchez Coronado, «Diseño e implementación de un sistema automatizado de medición de pH para aplicaciones en biodigestores anaerobios,» de *Congreso Internacional en Innovación y Desarrollo Tecnológico*, Morelos., México, 2010.
- [27] M. A. A. Lassmann, «“Diagnóstico de fallas en un sistema anaerobio especializado en la producción de biohidrógeno para obtención de energía sustentable mediante celdas de combustible”,» INSTITUTO TECNOLÓGICO DE ORIZABA, Orizaba Veracruz. , 2015.
- [28] D. O. M. C. Dr. Carlos Alberto García Bustamante, «ESTADO DEL ARTE DE LA BIOENERGÍA EN MÉXICO.,» Publicación de la Red Temática de Bioenergía (RTB) del Conacyt., MÉXICO. , 2016.
- [29] H. INSTRUMENTS, «HI2221-01 Medidor de mesa de pH/mV con CAL Check™,» Hannapro, S.A. de C.V. o afiliados, 14 02 2019. [En línea]. Available: <https://hannainst.com.mx/productos/linea/laboratorio/medidor-de-mesa-de-phmv-con-cal-check/>. [Último acceso: 8 4 2018].

- [30] M. d. s. p. 700, «OAKTON INSTRUMENT,» OAKTON INSTRUMENT, 17 11 2018. [En línea]. Available: <http://www.4oakton.com/proddetail.asp?parent=25&prod=361&seq=2&TotRec=7>. [Último acceso: 17 11 2018].
- [31] M. TOLEDO, «SevenCompact pH meter S220,» METTLER TOLEDO, 7 02 2019. [En línea]. Available: SevenCompact pH meter S220. [Último acceso: 5 03 2018].
- [32] M. TOLEDO., «pHmetro portátil monocanal estándar FiveGo,» METTLER TOLEDO., 26 04 2019. [En línea]. Available: [https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory\\_Analytics\\_Browse/pH-meter/portable-pH-meter/fivego.html](https://www.mt.com/mx/es/home/products/Laboratory_Analytics_Browse/pH-meter/portable-pH-meter/fivego.html). [Último acceso: 23 8 2018].
- [33] O. Instruments, «Medidor económico de pH 11,» OAKTON Instruments, 23 01 2019. [En línea]. Available: <http://www.4oakton.com/proddetail.asp?parent=12&prod=313&seq=5&TotRec=16>. [Último acceso: 15 5 2018].
- [34] H. INSTRUMENTS, «HI83141 Medidor analógico de pH/mV/°C con electrodo HI1230B,» Hannapro, S.A. de C.V., 17 05 2019. [En línea]. Available: <https://hannainst.com.mx/productos/medidores-transportables/medidor-analogico-de-phmvc-con-electrodo-hi1230b/>. [Último acceso: 18 07 2018].
- [35] OAKTON, «35-Series Testrs™ multiparámetro,» 9 06 2018. [En línea]. Available: [http://www.4oakton.com/PDF/WD\\_3227SP\\_09.indd.pdf](http://www.4oakton.com/PDF/WD_3227SP_09.indd.pdf). [Último acceso: 9 06 2018].
- [36] E. M. AG, «Sensor digital de pH Orbipac CPF81D,» Endress+Hauser Management AG, 16 9 2018. [En línea]. Available: <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-digital-pH>. [Último acceso: 16 9 2018].
- [37] M. TOLEDO, «Sensor de pH InPro 4550VP,» METTLER TOLEDO, 28 10 2018. [En línea]. Available: <https://www.mt.com/mx/es/home/products/Process-Analytics/pH-probe/durable-probe/electrode-InPro-4550.html>. [Último acceso: 28 10 2018].
- [38] E. M. AG, «Sensor digital de pH Orbipac CPF81D,» Endress+Hauser Management AG, 14 8 2018. [En línea]. Available: <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-digital-pH>. [Último acceso: 14 8 2018].
- [39] Sensorex, «S272CD Online Process pH Sensor,» SENSOREX, 23 7 2019. [En línea]. Available: <https://sensorex.com/product/s272cd-online-process-ph-sensor/>. [Último acceso: 18 11 2018].
- [40] S. K. D. E. Co., «electrodo de pH CT-1001,» Shenzhen Ke Dida Electronics Co., 17 09 2016. [En línea]. Available: <http://www.yyuew.com/html/en/category/electrodeseries/112.html>. [Último acceso: 15 6 2018].
- [41] C. V. H. Luis Vidal Salgado, «Medición de la absorvancia óptica de soluciones acuosas mediante instrumentación virtual y el control,» *Scientia et Technica*, vol. 19, nº 1, p. 5, 2014.

- [42] H. A. Miñano y V. V. Villalobos, «Control difuso del oxígeno disuelto, pH y temperatura de un biorreactor columna de burbujas en la producción de biomasa de *Candida utilis*,» *Scientia Agropecuaria*, vol. 1, nº 1, pp. 139 -147, 2012.
- [43] Ó. A. C. Ó. F. A. WILSON FABIÁN AMAYA, «CONTROL DE pH PARA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 1, nº 14, pp. 86-95, 2004.
- [44] «Diseño e implementación de un sistema automatizado de medición de pH para aplicaciones en biodigestores anaerobios.,» A. Martínez-Sibaja, R. Posada-Gómez, C. M. Astorga-Zaragoza, J.P. Rodríguez-Jarquín, E.M. Sánchez Coronado, vol. 1, nº 1, pp. 1-6, 2010.
- [45] A. E. N. R. G.-G. D. R. B. M. S. Casan, «Red de sensores inteligentes aplicado a la medida de pH y temperatura,» *Dpto. de Ingeniería Electrónica, Universidad de Valencia*, vol. 1, nº 1, pp. 870-873, 2012.
- [46] L. C. A. Amaya, «Diseño e implementación de un control de pH, conductividad y monitoreo del nivel de agua para el cuidado cultivos hidropónicos de uso doméstico,» *Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Colombia*, vol. 1, nº 1, pp. 1-5, 2013.
- [47] e.-G. m. central, «PH SENSOR E-21-C,» e-Gizmo mechatronix central, CHINA , 2017.
- [48] fritzing, «fritzing,» fritzing, estados unidos , 2018.
- [49] N. INSTRUMENT, «MULTISIM 12.0,» NATIONAL INSTRUMENT, ESTADOS UNIDOS , 2015.
- [50] N. INSTRUMENT, «ULTIBOARD 12,» NATIONAL INSTRUMENT, ESTADOS UNIDOS , 2015.
- [51] AUTODESK, «Autocad 2016,» AUTODESK, ESTADOS UNIDOS., 2016.
- [52] AUTODESK, «FUSION 360,» AUTODESK, ESTADOS UNIDOS, 2016.
- [53] D. d. M. S. d. R. d. C.V, «Electroválvula Válvula Agua ½ Solenoide 12v, Arduino, Pic,» mercado libre, 11 02 2019. [En línea]. Available: [https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-606539040-electrovalvula-valvula-agua-solenoide-12v-arduino-pic\\_JM?quantity=1](https://articulo.mercadolibre.com.mx/MLM-606539040-electrovalvula-valvula-agua-solenoide-12v-arduino-pic_JM?quantity=1). [Último acceso: 26 02 2019].
- [54] M. TOLEDO, «Sensor de pH InPro 4550VP,» METTLER TOLEDO, [En línea]. Available: <https://www.mt.com/mx/es/home/products/Process-Analytics/pH-probe/durable-probe/electrode-InPro-4550.html>. [Último acceso: 11 06 2019].
- [55] E. M. AG, «Sensor digital de pH,» Endress+Hauser Management AG, [En línea]. Available: <https://www.mx.endress.com/es/instrumentacion-campo/analisis-agua-liquidos-industria/sensor-digital-pH>. [Último acceso: 11 06 2019].
- [56] h. K. D. E. Co., «pH electrode CT-1001-Electrode Series-PH meter, electronic ...,» henzhen Ke Dida Electronics Co., 2016. [En línea]. Available: <http://www.kedida.com.cn/en/category/electrodeseries/112.html>. [Último acceso: 11 06 2019].

- [57] E. y. c. d. s. fundamentales, «Concepto de pH, expresión matemática, escala de Sorensen, definiciones de ácido-base.,» Energía y consumo, 2019. [En línea]. Available: <http://energiayconsumo16in.blogspot.com/2016/03/concepto-de-ph-expresion-matematica.html>. [Último acceso: 23 01 2019].
- [58] V. Rosso, «Biología VS Química.,» Veronica Rosso, [En línea]. Available: <http://www.sceu.frba.utn.edu.ar/dav/archivo/homovidens/rosso/trabajo%20final%20rosso/ph.html>. [Último acceso: 26 11 2017].
- [59] P. facil.com., «DS18B20 sensor de temperatura para líquidos con Arduino,» Programar facil.com. , 16 12 2018. [En línea]. Available: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/ds18b20-sensor-temperatura-arduino/>. [Último acceso: 16 12 2018].
- [60] S. HACH LANGE SPAIN, «Disolución tampón pH 4.01,» Crison Líderes en electroquímica. , 23 05 2011. [En línea]. Available: <http://www.crisoninstruments.com/es/laboratorio/disoluciones-/tampones-ph/disolucion-tampon-ph-4-01>. [Último acceso: 19 07 2018].
- [61] Ó. A. C. Ó. F. A. WILSON FABIÁN AMAYA, «CONTROL DE pH PARA PLANTA DE,» *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 1, nº 14, p. 6, 2004.
- [62] P. Hitek, «El módulo DS3231, un reloj para Arduino,» 25 09 2013. [En línea]. Available: <http://panamahitek.com/el-modulo-ds3231-un-reloj-para-arduino/>. [Último acceso: 24 08 2018].
- [63] SIEMENS, «Testing and simulation of HMI projects in conjunction with a SIMATIC PLC and PLCSIM,» 01 10 2018. [En línea]. Available: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109748099/testing-and-simulation-of-hmi-projects-in-conjunction-with-a-simatic-plc-and-plcsim-?dti=0&lc=en-WW>. [Último acceso: 20 01 2019].
- [64] CRISON, «"AGUAS-INDUSTRIA",» 5 08 2005. [En línea]. Available: [www.crisoninstruments.com](http://www.crisoninstruments.com). [Último acceso: 23 05 2018].