



*“Formando líderes para la construcción
de un nuevo país en paz”*

AUTOMATIZACIÓN DE UN PROCESO QUÍMICO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA CON UN REACTOR UBICADO EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Autor

Deyder Esteban Siabato Ruiz

Director

MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

**PROGRAMA INGENIERÍA ELECTRÓNICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
PAMPLONA
2022**



Autor: Deyder Esteban Siabato Ruiz
Director: MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

Dedicatoria:

Este proyecto es dedicado a mi bella y amada madre ELVIRA por todo el apoyo brindado, por hacer de mí una persona capaz de sacar adelante este título profesional. Por ser esa mujer luchadora que a pesar de las dificultades busca la manera de que me encuentre bien. Sin su ayuda, este sueño no habría sido posible. Todo el reconocimiento y esfuerzo es para ti, madre mía de mi corazón.



Autor: Deyder Esteban Siabato Ruiz
Director: MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

Agradecimientos:

En primera instancia agradecer a Dios por la sabiduría y la capacidad de lograr este sueño, por ser el primer ingeniero de la familia Siabato Ruiz. A mis padres Elvira Ruiz e Hildebrando Siabato, por ser los responsables de formarme con buenos valores y con la capacidad de lograr grandes metas, por otro lado, agradecerle a Arvey Guio por el gran apoyo que me ha brindado. Agradezco a la Universidad de Pamplona y a los docentes del programa de ingeniería electrónica por el acompañamiento en este sueño de ser ingeniero. Finalmente, a mis amigos que de algún u otra forma me apoyaron en este camino.



AUTOMATIZACIÓN DE UN PROCESO QUÍMICO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA CON UN REACTOR UBICADO EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

Resumen

La fermentación anaeróbica es un proceso que se realiza por medio de bacterias microbianas que trabajan en ausencia de oxígeno, con este proceso se pueden reutilizar diferentes residuos orgánicos como el Almidón, Azúcares, aceites, biomasa agrícola, biomasa forestal, pulpas, entre otros. [1]

Estos sustratos se ingresan a un contenedor sellado herméticamente para que los microorganismos anaeróbicos puedan convertir ese residuo en un producto aprovechable. Dependiendo del sustrato se obtiene un producto aprovechable como el alcohol, metano, enzimas, biogás, biomasa, entre otros. [1] Los microorganismos trabajan con condiciones específicas por lo que se requiere el uso de la instrumentación electrónica para determinar variables como la temperatura, el pH y la agitación. [1] [2].

En el presente proyecto se realizó la automatización de un proceso de fermentación anaerobia, el cual, por medio del ingreso de azúcares a un reactor y gracias a los microorganismos anaeróbicos, se genera alcohol con un porcentaje mayor en bioetanol. Para este proceso se usó un reactor de flujo discontinuo en el cual se monitorearon variables como la temperatura, pH, alcohol y agitación.

El proceso es automatizado por el sistema embebido Raspberry pi pico, el cual, es programado por medio del software de licencia Tonny (interprete del lenguaje de programación MycroPython) que es exclusivo para programación de microcontroladores. En cuanto a la interfaz gráfica, se realizó por medio de Visual Basic.NET por medio del entorno de desarrollo integrado IDE Visual Studio.

Raspberry pi pico es un dispositivo que permite el uso de diferentes comunicaciones como (UART, SPI, I2C), para este proyecto fue necesario utilizar varias comunicaciones para el acoplamiento de los sensores. Finalmente, se usó un controlador PID para la revisión de la temperatura.



AUTOMATION OF A CHEMICAL ANAEROBIC FERMENTATION PROCESS WITH A REACTOR LOCATED IN THE CHEMICAL ENGINEERING LABORATORIES OF THE UNIVERSITY OF PAMPLONA

Abstrac

Anaerobic fermentation is a process that is carried out by microbial bacteria working in the absence of oxygen, with this process different organic wastes can be reused such as starch, sugars, oils, agricultural biomass, forest biomass, pulp, among others. [1]

These substrates are placed in a hermetically sealed container so that anaerobic microorganisms can convert the waste into a usable product. Depending on the substrate, a usable product is obtained, such as alcohol, methane, enzymes, biogas, biomass, among others. [1] Microorganisms work with specific conditions, which requires the use of electronic instrumentation to determine variables such as temperature, pH and agitation. [1] [2].

In the present project, the automation of an anaerobic fermentation process was carried out, which, by means of the entry of sugars into a reactor and thanks to the anaerobic microorganisms, alcohol is generated with a higher percentage of bioethanol. A batch flow reactor was used for this process in which variables such as temperature, pH, alcohol and agitation were monitored.

The process is automated by the Raspberry pi Pico embedded system which is programmed by means of the Tonny license software (interpreter of the MycroPython programming language) which is exclusive for microcontroller programming. As for the graphical interface, it was done using Visual Basic.NET through the integrated development environment IDE Visual Studio.

Raspberry pi Pico is a device that allows the use of different communications such as (UART, SPI, I2C), for this project it was necessary to use several communications for the coupling of the sensors. Finally, a PID controller was used for temperature control.



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	16
PROBLEMA	17
JUSTIFICACIÓN	18
DELIMITACIONES	19
REFERENTE TEORICO	20
1.1 Antecedentes	20
1.2 Digestión anaerobia	21
1.2.1 Hidrólisis	22
1.2.2 Acidogénesis o fermentación	22
1.2.3 Acetogénesis	23
1.2.4 Metanogénesis	24
1.3 Variables que influyen en la digestión anaerobia	24
1.3.1 Temperatura	24
1.3.2 pH	25
1.3.3 Agitación	25
1.4 Biorreactores	25
1.5 Sistema SCADA	26
1.6 Sistema embebido	27
1.7 Protocolos de comunicación	29
1.7.1 Comunicación SPI	29
1.7.2 Comunicación I2C	29
1.7.3 Comunicación UART	30
1.8 Instrumentación electrónica	31
1.9 Transductores	31
1.10 Sensores	31
1.10.1 Sensores de temperatura	32
1.10.2 Sensores de pH	33
1.10.3 Sensor de alcohol (Etanol)	34
1.11 Acondicionamiento	36



1.12	Actuadores.....	36
1.12.1	Electroválvulas	36
1.12.2	Resistencia calefactora	37
1.12.3	Agitador (Motor DC)	37
1.12.4	Bomba de agua magnética.....	38
METODOLOGÍA.....		39
2.1	Reactor.....	41
2.2	Sistema embebido Raspberry Pi Pico	42
2.3	Sensores	45
2.3.1	Sensor de temperatura Termopar tipo K	46
2.3.2	Sensor de alcohol (Etanol).....	49
2.3.3	Sensor de pH E-201-C	52
2.4	Actuadores	55
2.4.1	Resistencia calefactora.....	55
2.4.2	Electroválvulas.....	56
2.4.3	Agitador	57
2.4.4	Bomba de agua magnética.....	58
2.5	Descripción de Softwares.....	58
2.5.1	Visual Studio.....	59
2.5.2	Tonny.....	60
2.5.3	Matlab.....	61
2.6	Protocolos de comunicación.....	61
2.7	Diseño del controlador	62
2.7.1	Sintonización del controlador.....	65
RESULTADOS		67
3.1	Interfaz grafica.....	67
3.2	Descripción de conexiones y circuitos.....	71
3.2.1	Etapa de control.....	71
3.2.2	Etapa de potencia.....	80
3.2.3	Sistema de respaldo	86



3.3	Puesta en funcionamiento	87
3.3.1	Datos de sensores	87
PRESUPUESTO ECONOMICO		90
CONCLUSIONES.....		92
OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES		93
BIBLIOGRAFÍA		94



LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Etapas digestión anaerobia. Fuente: K. Ostrem, Greening waste	22
Figura 2. Tipos de biorreactores. Fuente: E. V. Moreno Rivera y D. F. Vanegas Gutiérrez.....	26
Figura 3. Sistemas embebidos. Fuente: Internet	27
Figura 4. Protocolo SPI. Fuente: G. Galeano	29
Figura 5. Protocolo I2C. Fuente: G. Galeano	30
Figura 6. Protocolo UART. Fuente: G. Galeano	31
Figura 7. Válvula solenoide. Fuente: internet	37
Figura 8. Resistencias calefactoras. Fuente: Internet.....	37
Figura 9. Agitador. Fuente: Internet.....	38
Figura 10. Bomba de agua. Fuente: Internet.....	38
Figura 11. Diseño de Reactor. Fuente: Autor	40
Figura 12. Diagrama general del proceso. Fuente: Autor	41
Figura 13. Reactor discontinuo. Fuente: Autor	42
Figura 14. Pines de Raspberry Pi Pico. Fuente: RP2040 Datasheet.....	43
Figura 15. Termopar tipo K 100 mm. Fuente: Internet.....	47
Figura 16. Termopar tipo K 3 mm. Fuente: Internet.....	47
Figura 17. Modulo MAX6675. Fuente: Internet.....	49
Figura 18. a) Curvas del MQ-3 b) Esquema básico del sensor. Fuente: S. Priyanka, D. Sakshi, M. Shruti y S. Smriti	50
Figura 19. Código para calibración de sensor. Fuente: S. Priyanka, D. Sakshi, M. Shruti y S. Smriti.....	51
Figura 20. (a) Modulo acondicionador de la señal (b) Electrodo de pH. Fuente: e.-. G. M. Central	52
Figura 21. Sobres para la calibración del sensor de pH. Fuente: Autor.....	54
Figura 22. Recta para la calibración del sensor de pH. Fuente: Autor.....	55
Figura 23. Resistencia calefactora implementada. Fuente: Autor	56
Figura 24. Electroválvulas implementadas. Fuente: Autor.....	56
Figura 25. Agitador implementado. Fuente: Autor	57
Figura 26. Bomba de agua magnética implementada. Fuente: Autor.....	58
Figura 27. Salida del proceso. Fuente: Autor	63
Figura 28. Tiempo en que la temperatura alcanza el 63.2% Fuente: Autor.....	64
Figura 29. Resultados función de transferencia con Matlab. Fuente: Autor	64
Figura 30. Constantes del controlador PID estimadas por Matlab. Fuente: Autor.....	65
Figura 31. Respuesta de pidTuner de Matlab. Fuente: Autor	66
Figura 32. Estimación final del controlador. Fuente: Autor.	67
Figura 33. Sección 1 interfaz gráfica. Fuente: Autor	68
Figura 34. Sección 2 Interfaz gráfica. Fuente: Autor.....	68



Figura 35. Fuente de alimentación. Fuente: Autor.....	72
Figura 36. Disipación de energía promedio máxima. Fuente: Datasheet LM7812 Texas Instruments.....	73
Figura 37. Conexiones Raspberry Pi Pico. Fuente: Autor	75
Figura 38. Conexiones ATMEGA328P. Fuente: Autor	75
Figura 39. Conexión indicadores Leds. Fuente: Autor.....	76
Figura 40. Conexión actuadores en DC. Fuente: Autor.....	76
Figura 41. Esquemático circuito interruptor. Fuente. Autor.....	77
Figura 42. Verificación de los cálculos. Fuente: Autor.....	78
Figura 43. Conexión de sensores. Fuente: Autor	79
Figura 44. Conexión conversor USB a UART. Fuente: Autor.....	80
Figura 45. Conexión modulo I2C LCD. Fuente: Autor	80
Figura 46. Conexión de la etapa de potencia. Fuente: Autor.....	81
Figura 47. Circuito básico de control MOC3021. Fuente. Datasheet.....	85
Figura 48. Conexión fuente de 24V. Fuente: Autor.	86
Figura 49. Resultado final sistema de automatización. Fuente: Autor	87
Figura 50. Inoculo para la fermentación anaerobia. Fuente: Autor.....	88
Figura 51. Datos de los sensores. Fuente: Autor.	88



LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Tipos de fermentación. Fuente: G. I. Puerta Quintero.....	23
Tabla 2. Comparación de los sistemas embebidos. Fuente: Autor	28
Tabla 3. Tipos, construcción y rangos de temperatura. Fuente: J. Gómez Sarduy	32
Tabla 4. Valores de pH de diferentes sustancias. Fuente: A. Ramón Pallás	34
Tabla 5. Modelos sensores MQ. Fuente: L. Llamas.....	35
Tabla 6. Características MAX6675. Fuente: Datasheet Maxx6675.....	48
Tabla 7. Datos técnicos agitador (Motor). Fuente Datasheet Fabricante motor. ...	57
Tabla 8. Información para hallar la función de transferencia. Fuente: Autor	63
Tabla 9. Consumo de corriente de dispositivos de 5V. Fuente: Autor.	73
Tabla 10. Consumo de corriente de dispositivos de 24V. Fuente: Autor.	74
Tabla 11. Presupuesto económico. Fuente: Autor.	90



INTRODUCCIÓN

La fermentación anaerobia es un proceso en el cual, se desintegran residuos orgánicos o sustratos para convertir esta materia prima en nuevos productos aprovechables. Por ejemplo, la desintegración de cascara de la naranja, residuo que se puede aprovechar para la generación de biocombustibles, reduciendo la extracción de petróleo para estos fines, o la desintegración del material orgánico de origen animal, este funciona para convertir estos residuos en biogás, producto que se puede aprovechar en hogares o en la generación de energía eléctrica, reduciendo así, la contaminación por gases contaminantes como el metano o el dióxido de carbono. Este proceso de fermentación se realiza por medio de bacterias que realizan esta conversión en ambientes sin oxígeno.

Al tener ambientes sin presencia de oxígeno, es difícil medir manualmente las variables que comprenden este proceso, como la temperatura o el pH, acá es donde se hace importante la implementación de la instrumentación electrónica, gracias a sus avances en sensores, podemos medir de forma fácil y sin complicación cualquier tipo de variables. Pero para usar esto sensores se debe tener un sistema que permita visualizar estos datos, la automatización es una solución que implica tanto la toma de datos como el control de las variables en cuestión.

Existen muchos dispositivos y software para realizar la automatización de procesos, el perfil profesional de un ingeniero está en seleccionar los mejores equipos que se adapten mejor al sistema, de este modo presentar procesos óptimos y económicos.

En la universidad de Pamplona se realizó el acondicionamiento de un autoclave para trabajar el proceso de fermentación, pero se usaron dispositivos costosos y que implican la compra de software para el monitoreo y control del sistema, lo que lo hace ineficiente para las prácticas de los estudiantes. Por esta razón, por ser un proceso para practicas académicas, la solución a esto es de implementar un sistema embebido de bajo costo y que permita programarse con software libres, de este modo garantizar un funcionamiento amplio del sistema.



PROBLEMA

En el proceso de fermentación anaerobia es importante la automatización del mismo debido a que es un reactor sellado herméticamente por lo que no se pueden medir variables directamente en el sustrato. Para esto se usa la instrumentación electrónica, debido a que con ella ponemos medir en tiempo real la situación del proceso.

En la universidad de Pamplona se realizaron proyectos en cuanto a la automatización del proceso de fermentación anaerobia con la implementación de un Datalogger CR1000 de la empresa Campbell Scientific lo que implicó la compra de licencias para el uso del software, que finalmente al término de su vencimiento, el dispositivo quedó obsoleto, por consiguiente, no se pudieron realizar más prácticas sobre este tipo de procesos.

Para mejorar esta situación se busca implementar un sistema embebido para automatizar el proceso debido a que estos sistemas pueden trabajar con software de acceso libre, por consiguiente, se garantiza el funcionamiento a largo plazo del dispositivo.



JUSTIFICACIÓN

La fermentación anaerobia es un proceso en el cual, se puede obtener productos aprovechables como el biogás, la biomasa, el biocombustible, entre otros. Actualmente, la energía generada por recursos fósiles ha estado en constante cuestionamiento, por ser causante del efecto invernadero, china hoy en día es el que produce más emisiones, debido a la quema del carbón para satisfacer la energía eléctrica demandada por los acondicionadores de aire. [3]

Por esta razón, la energías renovables han tomado gran importancia, actualmente han aumentado 9.7%, más lento que el promedio de 10 años (13.4% anual), la capacidad solar tuvo una expansión de 127GW y la energía eólica creció 11 GW, casi el doble de su mayor aumento anual anterior. [4]

Otra solución para aprovechar las energías renovables a parte de la energía eólica y energía solar, es el uso de reactores, los cuales, por medio de bacterias anaeróbicas convierte residuos orgánicos en gas o en biocombustibles para el posterior aprovechamiento y reducir un poco los gases de efecto invernadero.

Con el uso de estos reactores y a la fermentación anaerobia se pretende automatizar el proceso para la generación de bioetanol, un producto que se usa generalmente como combustible, reduciendo así el uso de recursos fósiles.

Para la automatización del proceso se realizará por medio de un software libre, hoy en día el software libre es bastante utilizado debido a su versatilidad con varios dispositivos embebidos. [5], los software libres se generó como un movimiento social nacido en la década de los 70 debido al avance privatizador que se le daba al conocimiento. [6] es por eso la importancia de una automatización con código abierto.



DELIMITACIONES

Objetivo general

Automatizar un proceso de fermentación anaerobia por medio de un reactor ubicado en los laboratorios de ingeniería química de la Universidad de Pamplona.

Objetivos específicos

1. Implementar un sistema embebido que permita el control y registro de datos para la medición de temperatura, pH y agitación del reactor anaerobio para el proceso de fermentación anaerobia.
2. Desarrollar el acondicionamiento eléctrico y electrónico para sensores y actuadores.
3. Diseñar una interfaz gráfica para la supervisión y monitoreo de las variables.
4. Evaluar el sistema para verificar la funcionabilidad del dispositivo.

Acotaciones

Este proyecto se realizó en los laboratorios de la Universidad debido a que es un sistema que pertenece a la misma, se trabajó con sensores que ya habían sido implementados como el sensor de temperatura y actuadores como las válvulas, la electrobomba y el motor. Se adaptaron diferentes etapas para el control de los actuadores y se trabajó con un solo sustrato, azúcar.

La interfaz gráfica se puede descargar e instalar en cualquier dispositivo y su implementación se realizó con software libres. Este proyecto tiene una etapa de respaldo para situaciones en que no haya flujo de energía. Pero solo se colocó una LCD, una batería y un inversor quedando pendiente la etapa de conmutación para que el inversor pueda entrar en funcionamiento y se active como sistema de respaldo para que el proceso no se detenga.



CAPÍTULO 1

REFERENTE TEORICO

1.1 Antecedentes

La automatización en procesos químicos es de gran importancia hoy en día debido a que hace los procesos más óptimos generando mayor producción en lo que se está trabajando. Existen diferente tipos de automatización, desde el monitoreo de variables básicas hasta el automatismo de grandes dispositivos.

Edwin Ramon Valencia expone una automatización de un biorreactor por medio del software RTMC (Control y monitoreo en tiempo real) donde enlaza un Datalogger CR1000 de la empresa Campbell Scientific, el cual permite la monitorización en tiempo real de parámetros como la temperatura, el pH oxígeno disuelto, este enlace se hace por medio de una comunicación RS-232 [7].

Por otro lado, realizaron un sistema de supervisión con un Datalogger CR1000, pero implementando también el software LabVIEW para monitorear variables como la temperatura, pH, Oxígeno disuelto y conductividad eléctrica. La comunicación se realiza mediante el protocolo de Modbus Serial. [8].

La automatización de biorreactores por medio de LabVIEW es eficiente que se desarrolló un sistema de supervisión y control por medio de LabVIEW también para monitorear parámetros en el proceso de fermentación ubicado en los laboratorios del instituto de agroindustrias de la universidad tecnológica de Mixteca, allí también se controlaron los parámetros básicos como la temperatura y pH, así como el encendido y apagado de actuadores como resistencia calefactora y bombas peristálticas. Todo el sistema fue desarrollado bajo la supervisión de la tarjeta de adquisición de datos USB1208FS. [8] Tanto el Datalogger CR1000 y la tarjeta de adquisición de datos USB1208FS permiten almacenar los datos históricos de la lectura de los sensores, esto para analizar y pronosticar los mejores sustratos que se integran en los biorreactores. [7] [9]

La automatización es tan amplia y tan versátil que Carlos López, Fanny Martínez y Oscar Paredes crearon un sistema automatizado para hacer el seguimiento de los parámetros fundamentales del proceso de biodigestión, como la temperatura, pH y presión, lo anterior para la obtención de un gas aprovechable para el uso industrial y doméstico, este sistema fue elaborado en los entornos de programación como



FlowCode, Proteus y Visual Basic, con el fin de hacer una comunicación con el hardware, de igual forma también se transmite información en tiempo real. [10] Por lo anterior, se puede determinar que para la automatización de un biorreactor es necesario tener sustratos o residuos orgánicos siempre y cuando se trabaje en las condiciones óptimas.

Por ejemplo, el trabajo de Ibeth Viviana Ordoñez y compañía fue una investigación orientada a la automatización de la etapa de reproducción de una levadura denominada *Saccharomyces Cerevisiae* para la producción de etanol, se identificaron las diferentes variables y la instrumentación que se requiere. Se detallo una descripción del proceso para la generación de etanol, para así determinar que parámetros se necesitan medir, por consiguiente, determinar el tipo de instrumentación electrónica, seguidamente se realizó un análisis de control de biomasa donde se determinaron químicamente el balance del etanol y la concentración de oxígeno que requiere el sustrato. Finalmente, se detalló la propuesta de la automatización como fin a lo que se requería. [11] ese proceso descrito anteriormente, es el que se desea desarrollar, pero con otro tipo de sustratos.

El sistema SCADA es muy importante para cualquier proceso químico u otro proceso donde implique la adquisición de datos y el acondicionamiento de sensores, en Taiwán un grupo de investigación analiza el consumo de energía en plantas de aguas residuales y hace la simulación por medio de un sistema SCADA, esto permitió a los autores determinar el porcentaje de compuestos contaminantes y la manera en que se pueden tratar. [12]

1.2 Digestión anaerobia

Son reacciones químicas, las cuales, el material orgánico mediante rutas metabólicas de los organismos en ausencia de oxígeno se descompone. La digestión anaerobia se puede procesar en cualquier material que contenga carbono, como papel, alimentos, aguas residuales, desechos sólidos, entre otros. [13]

En [14] la digestión anaerobia la definen como el trabajo de bacterias anaeróbicas en un proceso fermentativo, es decir, es una serie de procesos que interactúan entre si mediante reacciones metabólicas en ausencia total de oxígeno. Estos procesos metabólicos se dividen en cuatro etapas, hidrólisis, acidogénesis o fermentación, acetogénesis y metanogénesis. [13] [14]

En la figura 1. Se muestra como esta entrelazadas las cuatro etapas de la digestión anaerobia. [13]



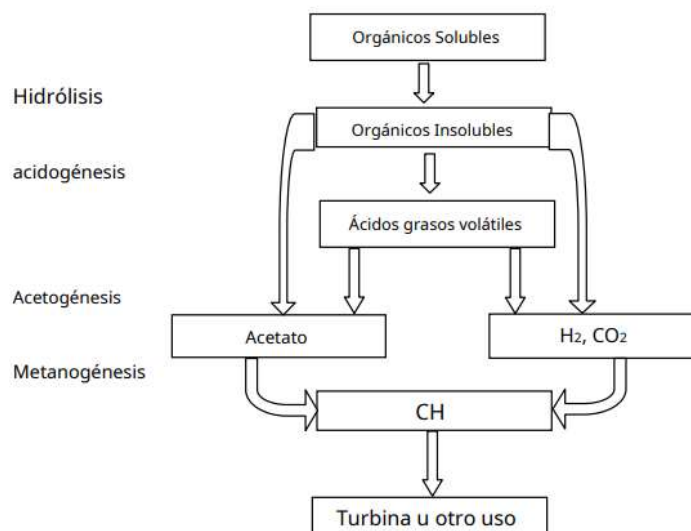


Figura 1. Etapas digestión anaerobia. Fuente: K. Ostrem, Greening waste

1.2.1 Hidrólisis

Es la primera etapa de la digestión anaerobia. Los monómeros solubles es el resultado donde la proteína se convierte en aminoácidos como el ácido graso, glicerol y triglicéridos; carbohidratos como los polisacáridos, lignina, celulosa y almidón y finalmente la fibra se convierte en azúcares simples como la glucosa. [13]

También involucra procesos en sólidos insolubles, es decir, partículas como la celulosa o hemicelulosa que son partículas orgánicas o como coloides orgánicos, referentes de la proteínas. [14]

1.2.2 Acidogénesis o fermentación

Es el paso siguiente después de la hidrólisis, en ese proceso las bacterias acidogénicas convierten el producto resultante de la hidrólisis en compuestos simples que en su mayoría son ácidos volátiles (ácido propiónico, láctico, fórmico y succínico) o en cetonas (etanol, glicerol, acetona, metano) y en alcohol. La cantidad de producto varían dependiendo de las bacterias y las condiciones de cultivo, generalmente la temperatura y el pH. [13]

La acidogénesis o fermentación es un proceso para producir compuestos orgánicos y energía a partir de la oxidación de sustancias orgánicas. Esta transformación se realiza por medio de levaduras y bacterias en ausencia de oxígeno. Existen varios tipos de fermentación, en la tabla 1 se especifican algunos tipos de fermentación. [15]



Tabla 1. Tipos de fermentación. Fuente: G. I. Puerta Quintero

Tipos de fermentación	Microorganismos fermentadores	Sustratos	Productos
Alcohólica o etanólica	Saccharomy cerevisiae, S. elipsoideus, S. anamensis	Malta de cebada, cereales, arroz, maíz, trigo, azúcar.	Etanol, vinos, cerveza, licores, bebidas destiladas
Láctica homofermentativa	Streptococcus thermophilus, S. lactis, S. faecalis, Lactobacillu.	Leche, suero, vegetales, sacarosa	Yogur, suero de elche, quesos, mantequilla, kumis
Láctica heterofermentativa	Leuconostoc mesenteroides, Lactobacillus brevis y L. fermenti.		
Butírica o butanoica	Clostridium utyricum y clostridium spp	Polisacáridos (almidón, glucógeno, pectina), proteínas, aminoácidos	Acido butírico, láctico, butanol, cetonas
Maloláctica	Leuconostoc oenos.	Acido málico	Vinos blancos y rojos, cidra.

1.2.3 Acetogénesis

Es la fase en la que se aceleran la transformación metabólica bacteriana de enzimas, hidrólisis, proteínas, ácidos nucleicos en otros compuestos que funcionan como fuente de energía. [14] La acetogénesis ocurre por medio de la fermentación de carbohidratos, el cual, el acetato es el principal producto y otros procesos metabólicos. El resultado de esta etapa es la mezcla de CO₂ y H₂.

El hidrogeno es el intermediario en las reacciones de la digestión anaerobia. [13] en la fermentación algunos productos son metabolizados directamente por organismos metanogénicos y otros deben ser producidos por medio de la mezcla de productos más sencillos (acetato y H₂) a través de bacterias acetogénicas, estas sustancias



generalmente son el etanol, butirato, algunos compuestos aromáticos, entre otros. [16]

1.2.4 Metanogénesis

Es la etapa final de la digestión anaerobia en el cual se forma el metano a partir de dos rutas principales, en la primera se da la acetoclástica, es un microorganismo que crece principalmente en su sustrato y la segunda es la hidrogenotrófica donde los microorganismos crecen en los sustratos como el dióxido de carbono y el hidrogeno. [14]

También es conocida también como fermentación de metano. En esta fase se convierte aproximadamente dos tercios de la conversión de acetato de la materia solubles o la fermentación de alcohol el alcohol metílico y como resultado da un tercio en la conversión de carbono. [13]

Se ha comprobado que un 70% del metano que se produce en los reactores anaerobios es formado a partir del acetato, esto a pesar de que los organismos metanogénicos utilizan el H_2 para la aceptación de electrones. [16]

1.3 Variables que influyen en la digestión anaerobia

1.3.1 Temperatura

Para un proceso optimo y rápido, dependerá de la velocidad de crecimiento de los microorganismos y estos a su vez dependen de la temperatura, a medida que aumenta la temperatura, el crecimiento de los microorganismos va a aumentar, por consiguiente, se acelera el proceso de digestión por lo que la producción final va a hacer mayor. [16]

Los microorganismos anaerobios pueden trabajar en tres rangos de temperatura: psicrófilo que es por debajo de los $25^{\circ}C$, mesófilas un rango entre $25^{\circ}C$ a $40^{\circ}C$ y el termófilo con un rango entre los $50^{\circ}C$ y los $65^{\circ}C$. la recomendación es trabajar en la etapa mesofílica donde se debe mantener el reactor con una temperatura de aproximadamente $30^{\circ}C$. [13]

La temperatura se puede mantener mediante diferentes tratamientos como el aislamiento, balos de agua mediante la calefacción solar pasiva, o mediante el flujo de agua dentro de una recamara que cubre la materia prima. Para el calentamiento se pueden usar intercambiadores de calor, serpentines de calentamiento o inyección de vapor directamente en el reactor. [13]



1.3.2 pH

El pH es una de las variables más importantes para el diagnóstico de procesos anaerobios, es una de las variable demasiado lenta por lo que resulta difícil el control, ya que hay muchos factores que influyen sobre la misma. Un ejemplo de ello se presenta en la etapa de fermentación o acidificación donde se presentan desequilibrios en la producción y consumo de ácido grasos volátiles, esta acumulación provoca una disminución del pH. [16]

El nivel de pH es un indicador principal para la eficacia del reactor. Un pH estable indica que el sistema está equilibrado y una disminución del pH puede indicar hacia la acumulación de ácido y, por consiguiente, la inestabilidad del reactor. La mayoría de los procesos metanogénicos funcionan en un rango de pH entre 6.7 y 7.4 y de manera óptima entre 7 y 7.2 [13]

1.3.3 Agitación

A posteriori ha demostrado que la mezcla del producto es esencial para una mejor producción, el objetivo de esto es poner en contacto el sustrato con los microorganismos, proporcionar una densidad uniforme de los microorganismos alrededor del sustrato, prevenir la formación de espumas y la sedimentación en el reactor y eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor. [7]

1.4 Biorreactores

También denominados reactores, biorreactores o fermentadores, es un recipiente sellado herméticamente donde se lleva el proceso de digestión anaeróbica, el diseño debe proporcionar condiciones para que los microorganismos crezcan y puedan realizar la conversión de la mezcla en nuevos productos, existen diferentes tipos de reactores de los cuales dependerá la conveniencia de acuerdo al producto que se quiera obtener.

- Discontinuo (batch): El ingreso de la materia prima se realiza mediante tandas, sin alimentación, se coloca dentro del reactor la carga total para la fermentación y se procede a poner el funcionamiento el proceso con el tiempo adecuado dependiendo de la materia prima, el cual se denomina, tiempo de retención. [17]
- Semi-Continuo (fed-batch): Se realiza por medio de lotes alimentado, con alimentación de entrada. El funcionamiento consiste en remover al final del proceso el 80% o 90% del producto final y es restituida con una cantidad equivalente a lo que se retiró. [17]



- Continuos: generalmente utilizados para fines industriales, tienen un flujo uniforme de entrada y salida, la cantidad extraída debe ser igual a la que se ingresa nuevamente, generando así mayor producción en menor tiempo. [17]

En la figura 2 se muestra el diseño de los tipos de reactores que generalmente se usan.

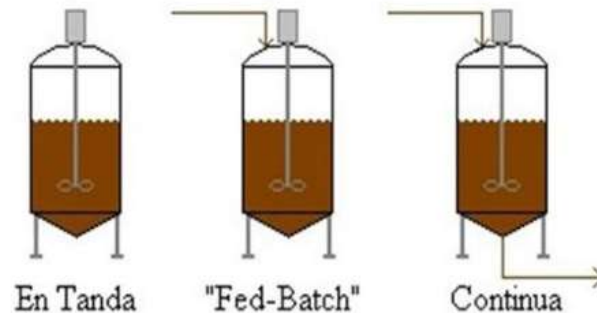


Figura 2. Tipos de biorreactores. Fuente: E. V. Moreno Rivera y D. F. Vanegas Gutiérrez

1.5 Sistema SCADA

Denominado como Control Supervisión y Adquisición de datos, SCADA permite la gestión y control de sistema locales o remotos gracias a una interfaz gráfica que comunica el sistema con el usuario.

Según [18] menciona que un SCADA es la recopilación de información y transferencia de datos a servidores centrales, llevando así el análisis y el control necesario de los sistemas, seguidamente mostrar información en una pantalla que permita la interacción y las acciones puestas allí se reflejen a un nuevo proceso.

Según [19] las características principales de un sistema SCADA son:

- Adquisición y almacenamiento de datos para recoger, procesar y guardar información de forma continua y segura.
- Representación gráfica y animada de las variables presentes en el proceso y generación de alarmas.
- Ejecutar acciones de control para modificar el proceso si es el caso.
- Capacidad de adaptación y ampliación de los sistemas.
- Fácil comunicación con aplicaciones y base de datos distribuidas en la redes de comunicación.
- Supervisión para observar desde un pantalla la evolución del proceso.



1.6 Sistema embebido

Se denomina como un circuito electrónico capaz de realizar una labor específica en un producto, a diferencia de los sistemas computacionales como los PC, estos sistemas solucionan inconvenientes específicos y generalmente están en productos cotidianos. En general, un consumidor promedio interactúa con cerca de 400 microcontroladores por día, número que va en incremento debido a que los procesadores son más pequeños y consumen menos energía, por consiguiente, es más económico. [20]

Existen muchas plataformas de desarrollo las cuales pueden implementar el software para un hardware específico, generalmente estas plataformas cuentan con aplicaciones como el procesamiento de señales, automatización, entre otras. [21]

Existen algunos sistemas embebidos bastante utilizados para proyectos académicos que a su vez ofrecen un rendimiento amplio para sistemas de alta calidad, son compatibles con diferentes software de acceso libre y diferentes protocolos de comunicación. En la figura 3 se muestran algunos de los sistemas embebidos más económicos y con amplias condiciones para la puesta en marcha de este proceso de fermentación.

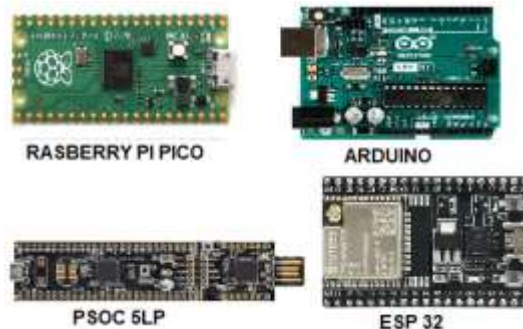


Figura 3. Sistemas embebidos. Fuente: Internet

- Raspberry pi pico: Es una gama de pequeñas placas, son rápidas y versátiles construidas con RP2040, es un chip insignia de microcontroladores diseñado por Raspberry Pi en Reino Unido. Puede controlar desde pantallas de luz, dispositivos IoT hasta procesos de señalización y fabricación. La serie Raspberry Pi Pico es capaz de brindar el poder de controlar operaciones domésticas e industriales.

Programable en C y en MicroPython, y en cuanto a los protocolos de comunicación incluye SPI, I2C, UART y ocho E/S programables (PIO) para la personalización de periféricos. Actualmente está disponible con conectividad inalámbrica para mayor flexibilidad en proyectos. [22]

- Arduino: Es una plataforma de desarrollo que incorpora un microcontrolador reprogramable, además de conexiones externas para establecer conexiones entre el microcontrolador y diferentes actuadores y sensores. Su programación es muy sencilla está basado en C++ con un IDE propio de Arduino. La placa de Arduino UNO es la más común y la más económica, sin embargo, los otros modelos también son económicos de acuerdo a sus características. [23]
- PSOC 5LP: Es un sistema integrado programable que integra periféricos analógicos y digitales configurables. Cuenta con un núcleo Arm Cortex-M3 de 32 bits. Un solo dispositivo PSoC puede integrar hasta 100 dispositivos digitales lo que reduce el tiempo de diseño. La programación es por medio de bloques y códigos basado en C, con software de acceso libre dispuesto por la empresa Cypress Embedde in Tomorrow. [24]
- ESP 32: Es un microcontrolador con funciones de conectividad Wi-Fi y Bluetooth a través de protocolos como SPI o I2C, es capaz de trabajar en entornos industriales, diseñado especialmente para dispositivos móviles, su programación es mediante el IDE de Arduino lo que permite versatilidad en los proyectos, la igual puede funcionar con el software Mycropython. [25]

En la tabla 2 se tomaron las características de los diferentes sistemas embebidos para hacer una comparación y determinar cuál es el mejor y cual conviene más para la implementación del proyecto.

Tabla 2. Comparación de los sistemas embebidos. Fuente: Autor

Especificaciones	Arduino	ESP32	Raspberry Pi Pico	PSoC 5LP
Numero de núcleo	1	2	2	1
Arquitectura	8 bits	32 bits	32 bits	32 bits
Frecuencia CPU	16 MHz	160 MHz	133 MHz	80 MHz
FLASH	32 KB	16 MB	2 MB	256 KB
Tamaño RAM	2 Kbyte	512 Kbyte	264 Kbyte SRAM	64 Kbyte
GPIO	14	36	26	62
ADC (Canales)	6	18	3	2
Busses	I2C, SPI, UART	I2C, SPI, UART, I2S, CAN	I2C, SPI, UART, USB	I2C, SPI, UART, USB
PWM (Canales)	6	16	16	
Costo	\$ 42.000	\$ 39.000	\$ 35.000	\$ 90.000



1.7 Protocolos de comunicación

Es un conjunto de normas con estándares y políticas formales, el cual se conforma por procedimientos, formatos y restricciones que realizan el intercambio de paquetes de información para lograr la comunicación entre dos dispositivos o más servidores a través de una misma red. [5]

1.7.1 Comunicación SPI

En el mercado muchos microcontroladores con periféricos SPI integrados para el manejo de envío y recepción de datos esto mediante velocidades muy altas. Este protocolo es bastante dinámico para que cualquier persona puede escribir rutinas propias para el manejo de E/S. [20]

Para configurar este protocolo es necesario consultar la hoja de datos del dispositivos, de acuerdo a la configuración esta comunicación posee las siguientes características:

- La interfaz puede enviar datos ya sea primero el bit menos significativo (LSB) o primero el más significativo (MSB)
- Cuando la información es enviada el esclavo leerá los datos en el flanco ascendente o descendente del pulso de reloj.
- La comunicación SPI puede funcionar a velocidades muy altas, esta se puede ajustar dependiendo del dispositivo.
- Si se usa librerías SPI se debe usar pines SCK, MOSI, MISO, ya que el hardware está conectado a esos pines.

En la figura 4 se muestra cómo se transmiten los datos con el protocolo SPI.

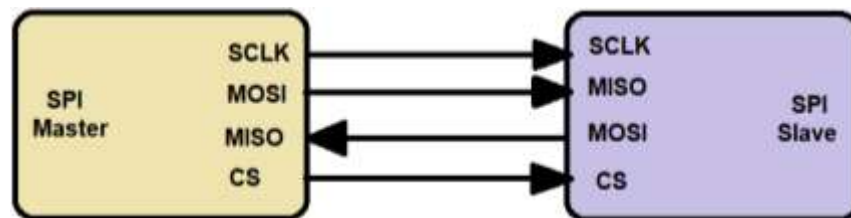


Figura 4. Protocolo SPI. Fuente: G. Galeano

1.7.2 Comunicación I2C

Es un protocolo que permite que varios circuitos digitales (esclavos) se comuniquen con dispositivos configurados como maestros, está diseñada para la transferencia de datos a corta distancia, al igual que la comunicación RS-232 y UART solo



requieren de dos cables para realzar la comunicación [20]. Permite una comunicación segura entre dispositivos digitales, una de las desventajas es que el esquema general es un maestro y varios esclavos, genera una latencia en el envío y recepción de la trama hacia los esclavos.

El protocolo I2C es uno de los más usados para diferente aplicaciones, en el mercado existen muchos sensores con protocolos I2C para una implementación más fácil y rápida compatible con lenguajes de programación libre como Arduino, Python, Mbed, entre otros. [20]

En la figura 5, se muestra cómo se envían la información a través de la comunicación I2C

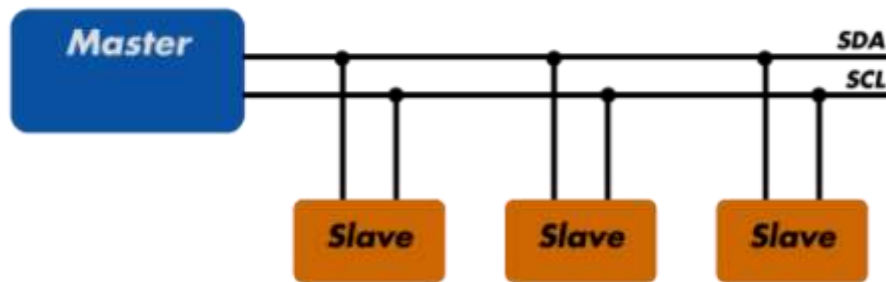


Figura 5. Protocolo I2C. Fuente: G. Galeano

1.7.3 Comunicación UART

UART (Transmisor-receptor asíncrono universal) es un protocolo para el intercambio de paquetes o tramas entre dos dispositivos. Solo necesita de dos cables y un punto común de tierra, puede transmitir en ambas direcciones al tiempo (dúplex completo), en ambas direcciones, pero un dispositivo a la vez (semidúplex) o la información se envía en una sola dirección (Simplex). [20]

Una de las ventajas más importantes de este protocolo es que es asíncrono, la señal de reloj del transmisor como del receptor, son diferentes lo que simplifica enormemente este protocolo, solo se debe configurar la misma velocidad entre los dos dispositivos para que haya un intercambio de información exitosa. [20]

En la figura 6 se muestra cómo se envían las tramas entre los dispositivos con comunicación UART.



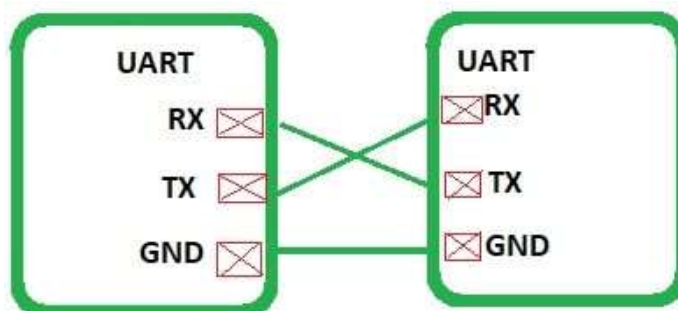


Figura 6. Protocolo UART. Fuente: G. Galeano

1.8 Instrumentación electrónica

La tecnología y la ciencia se caracteriza por la generación y medición de variables físicas, por consiguiente, instrumentos es el nombre que se le proporciona a los equipos tecnológicos que tienen como finalidad de terminar la magnitud de señal física o magnitud, que es capaz de visualizarla, o convertirla en otra señal diferente. [26]

Por otra parte, en los últimos 20 años se forma la revolución en la medición, instrumentación y en la automatización de procesos, lo que conlleva después al nacimiento de la instrumentación virtual para la medición de temperatura pH, presión, entre otras variables físicas. [9]

1.9 Transductores

Un transductor es un dispositivo con la finalidad de convertir una señal física a otra señal de magnitud distinta, es decir, convierte un tipo de energía en otro [27]. Se produce una pérdida de energía cuando se hace la transformación de la señal por medio de un transductor. [28]

1.10 Sensores

Un sensor es aquel dispositivo que adquiere señales del ambiente a partir de la energía de medio donde se mide, estos sensores entregan una señal de salida medible en función de una variable medible. [27] [28]



1.10.1 Sensores de temperatura

Los sensores más utilizados para medir la temperatura son: detectores resistivos de temperatura (RTD, Resistance Temperature Detector), termopares, termistores, sensores de circuitos integrados y sensores infrarrojos [28]

- Sensores Resistivos: Están constituidos por las RTD (Resistance Temperature Detector) o mejor conocidas como PT100, su funcionalidad es basada en la dependencia de la resistividad de un conductor con la temperatura, es decir, a lo que aumenta la temperatura aumentará la resistencia, en esta clasificación también se incluyen los termistores, estos tienen un coeficiente de temperatura positivo PTC o coeficiente de temperatura negativo NTC. [28]
- Termopares: Es uno de los sensores que ha actualizado la forma de medir la temperatura, por lo que actualmente es uno de los dispositivos más usados en la industria. [29]

La funcionalidad del termopar es mediante la tensión generada entre dos metales diferentes, que es la unión fría y la unión caliente al ser sometidos a cambios térmicos. La parte caliente es la que es expuesta al contacto cuando se pretende medir la temperatura, mientras la parte fría no sufre cambios, cuando existe un cambio de temperatura este produce una señal de voltaje en milivoltios (mV) produciendo un voltaje proporcional al cambio de temperatura.

El rango de temperatura es diferente dependiendo del material en el que fue construido el termopar, para ello en la tabla 3 tomada de [19] se muestra los tipos y el materia de construcción con el que fueron creados.

Tabla 3. Tipos, construcción y rangos de temperatura. Fuente: J. Gómez Sarduy

Tipo	Ensamble	Rango (°C)
T	Cu/Cu Ni	-200 a 400
J	Fe/Cu Ni	-200 a 1200
K	Ni Cr/Ni Al	-200 a 1372
E	Ni Cr/Cu Ni	-200 a 900

- Sensores de circuitos integrados: Son dispositivos producidos en masa lo que hace que se consto sea bastante bajo, según [27] estos sensores se pueden clasificar en diferentes categorías:
 - o Salida de voltaje: Son sensores que entregan en su salida un valor de voltaje proporcional a la temperatura que se mide, un ejemplo de ello



y el más común es el LM35 el cual entrega una salida de 10mV por cada grado centígrado presente, funciona con voltaje de 3V a 5V y una corriente muy baja de operación.

- Salida de Corriente: A diferencia del anterior, en lugar de voltaje, en su salida entrega un valor de corriente proporcional a la temperatura medida.
- Salida digital: En este caso además del sensor, incorpora módulos digitales, lo que reduce el número de componentes y se pueden usar en sistemas embebidos compatibles con comunicación SPI o I2C.

-

1.10.2 Sensores de pH

En el libro [26] se menciona que el pH es una medida de acidez o alcalinidad del agua con compuestos químicos disueltos dentro de la sustancia. Tiene la siguiente expresión, el algoritmo por la inversa de la concentración del ion del Hidrogeno (H), sus unidades el mol por litro.

$$\text{pH} = \log\left(\frac{1}{\text{H}^+}\right) \quad (1)$$

Una sustancia se considera neutra cuando su pH es 7 como por ejemplo el agua pura, se considera acida cuando su pH es menor que 7, esto se mide con respecto al agua pura, ya que si es acida es porque tiene una mayor concentración de ion de hidrogeno que el agua pura y si tiene una menor concentración de ion de hidrogeno que el agua pura, el pH sube más de 7.

En la tabla 4 se muestra valores de pH de diferentes soluciones, obtenida de [27]

Existen dos tipos de sensores, los electroquímicos que son los que usan el ion de hidrogeno en una señal eléctrica, está compuesto por un electrodo el cual es el encargado de detectar y un electrodo de referencia; por otro lado, están los sensores ópticos, son una tira de pH de plástico o papel con un indicador óptico que cambia dependiendo del valor de pH medido. [27]



Tabla 4. Valores de pH de diferentes sustancias. Fuente: A. Ramón Pallás

Tipo	pH	Concentración H+ Mols/litro	Concentración OH- Mols/Litro	pH de productos alimenticios comunes
	0	1	0.000000000000001	
	1	0.1	0.00000000000001	
	2	0.01	0.0000000000001	
Ácido	3	0.001	0.000000000001	Jugo de limón
	4	0.0001	0.0000000001	Jugo de naranja
	5	0.00001	0.000000001	Cerveza
	6	0.000001	0.00000001	Leche
Neutro	7	0.0000001	0.0000001	Agua Pura
	8	0.00000001	0.000001	Huevos blancos
	9	0.000000001	0.00001	
	10	0.0000000001	0.0001	Bórax
Básico	11	0.00000000001	0.001	Magnesia
	12	0.000000000001	0.01	
	13	0.0000000000001	0.1	
	14	0.000000000000001	1	

1.10.3 Sensor de alcohol (Etanol)

- Detector de etanol PROSENSE P-4233: es un sensor que detecta de manera confiable gases de alcohol etílico en áreas o ambientes clasificadas, su funcionamiento principal se base en sensores infrarrojos donde toma datos de forma lineal de 0 – 100%.

Proporciona una señal de 4-20 mA para conexión a PLC por medio de comunicación Modbus. Tiene integrado relés de alarmas para configurarse dependiendo el nivel de alcohol. Sus aplicaciones principales están en la industria de procesos, tratamiento de aguas, industria química, instalaciones alimentarias, instalaciones farmacéuticas, laboratorios. Finalmente, este sensor gracias a sus prestaciones, tiene un costo de \$850.000 COP. [30]

- Detector de gas GSI 400: Este sensor es adecuado para medir la concentración de gases en el ambiente, tiene capacidad para medir gases como el metano, dióxido de carbono, alcoholes, metano, entre mucha otra variedad. Puede monitorear el aire en busca de concentraciones de gases, tiene baja sensibilidad



en cuanto a otros gases, maneja una alta precisión, larga vida útil. Maneja voltajes de 24 VDC, tiene cableado brindado trenzado, su salida es de 4-20 mA. Es un sensor industrial que debe ser instalado por personal calificado. [30]

- Sensor de gases de la serie MQ: Es una serie de dispositivos diseñados para detectar la presencia de componentes químicos en el aire. Existe una gran variedad de dispositivos sensoricos MQ, el modelo varía según el tipo de gas o sustancia que se pretenda medir. Los sensores proporcionan un módulo con el comparador LMC662, el cual permite obtener una lectura analógica y un valor digital el cual se puede cambiar el umbral de activación por medio de un potenciómetro.

Cualquier sensor que se utilice debe ser calibrado para obtener una medida precisa. Este tipo de familia de sensores son muy económicos, lo que lo hacen accesible para realizar proyectos de electrónica, el precio varía entre \$7.000 y \$10.000. para usar este modelo de sensores, se recomienda revisar el datasheet antes de adquirir el producto.

La detección del gas se hace por medio de un calentador el cual cambia su estado dependiendo de la concentración del gas que se está midiendo. En la tabla 5 se visualiza los modelos y el tipo de gas que mide que dispositivo, en caso de seleccionar este tipo de sensor, el más conveniente es el modelo MQ-3, el cual, tiene la capacidad de medir alcohol, etanol y humo. [31]

Tabla 5. Modelos sensores MQ. Fuente: L. Llamas

Modelo	Sustancias detectadas	Calentador
MQ-2	Metano, butano, GLP, humo	5V
MQ-3	Alcohol, Etanol, humo	5V
MQ-4	Metano, gas natural comprimido (GNP)	5V
MQ-5	Gas natural, GLP	5V
MQ-6	Butano, GLP	5V
MQ-7	Monóxido de carbono	Alternado 5V y 1.4V
MQ-8	Hidrógeno	5V
MQ-9	Monóxido de carbono, gases inflamables	Alternado 5V y 1.5V
MQ-135	Benceno, alcohol, humo, calidad del aire	5V
MQ-136	Ácido sulfhídrico	5V
MQ-214	Metano, gas natural	5V
MQ-216	Gas natural, gas carbón	6V
MG-811	Dióxido de carbono	6V



1.11 Acondicionamiento

En un sentido amplio son los elementos que se ofrecen al sistema de medición, a partir de señal generado por un sensor electrónico, posteriormente podrá ser presentada y procesada por un equipo o instrumento estándar, generalmente son circuitos que ofrece funciones como filtrado, adaptación de impedancias, amplificación, multiplexación, entre otras. [27]

1.12 Actuadores

Un transductor de salida es conocido como actuador debido a que estos dispositivos son los que se encargan de realizar la acción física en respuesta de una señal de entrada. Actualmente los fabricantes proveen una serie de actuadores como motores, válvulas, relevadores e interruptores. [27] Estos actuadores se pueden clasificar en dos grandes grupos, el primero es el tipo de energía que utiliza, como un actuador neumático, eléctrico o hidráulico; el segundo es según el movimiento que genera, puede ser un actuador rotativo o lineal. [29]

1.12.1 Electroválvulas

Dispositivo el cual puede controlar fluidos, ya sean líquidos, vapores o gases, se le considera un actuador de automatización y/o seguridad. [32]

La funcionalidad de una electroválvula consta de dos unidades, la primera es el paquete electromagnético, compuesto por un solenoide y su núcleo móvil, el su segunda parte el cuerpo de válvula conteniendo los orificios de entradas, pasajes y salidas. Básicamente es un dispositivo que abre y cierra electromecánicamente para permitir o bloquear el paso de algún tipo de material, es diseñado para un control unidireccional. [32]





Figura 7. Válvula solenoide. Fuente: internet

1.12.2 Resistencia calefactora

El funcionamiento de este actuador es basado en el principio descubierto por James Prescott Joule en 1841, cuando pasa corriente eléctrica por un conductor, parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor debido a que el material pone una resistividad en el conductor, elevando así la temperatura.

Dentro de las resistencias calefactoras se encuentran la de inmersión, las cuales son de un tipo resistivo y están compuestas generalmente por aleaciones de nique (80%) y cromo (20%) llegando a soportar temperaturas de hasta 1000°C. Las aplicaciones más comunes para estos actuadores son en baños maría, calefacción por circulación de líquido, termos, entre otros. [27]



Figura 8. Resistencias calefactoras. Fuente: Internet

1.12.3 Agitador (Motor DC)

Es un motor DC donde lleva acoplado un eje para realizar la mezcla del contenido, en la parte inferior del eje lleva unas aspas las cuales permiten mover el contenido dentro del recipiente, generalmente se usan en aplicaciones donde la materia prima debe estar en constante movimiento como fermentadores, procesos agroindustriales, entre otros.



Figura 9. Agitador. Fuente: Internet

1.12.4 Bomba de agua magnética

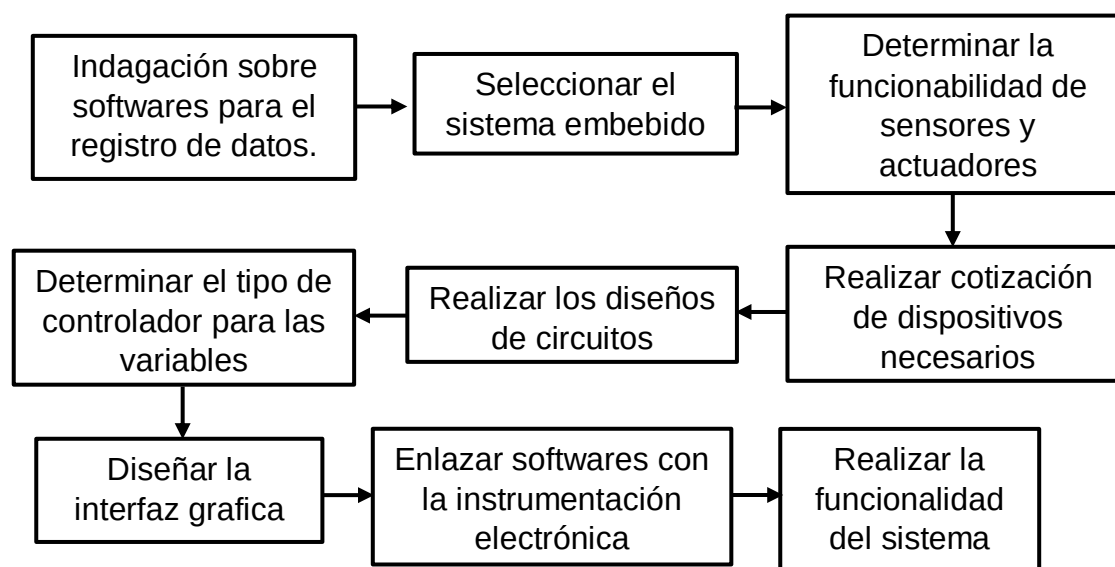
Es un actuador que transforma la energía aplicándola para hacer fluir el agua, generalmente ese flujo es ascendente. Todas estas bombas tienen un orificio de entrada (aspiración) y otro de salida (impulsión). [33]



Figura 10. Bomba de agua. Fuente: Internet

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA



La metodología inicia con la búsqueda de información en cuanto al sistema embebido y a los software que permitan la automatización del proceso de fermentación de sustratos para la obtención de etanol.

De acuerdo a la búsqueda y la selección del sistema embebido y los software de acceso libre se determinó un diseño que muestra los componentes con los que va a contar el reactor para realizar la automatización (figura 11). El sistema cuenta con actuadores (electrobomba, electroválvulas de entrada y salida, resistencia calefactora, motor DC e indicadores), sensores (pH, temperatura, alcohol y nivel), sistema embebido (Rasberry Pi Pico), Sistema de respaldo (LCD, batería e inversor).



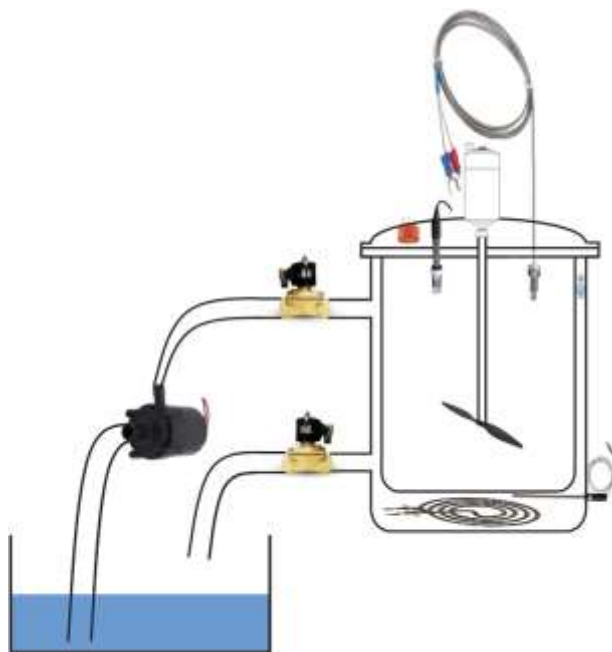


Figura 11. Diseño de Reactor. Fuente: Autor

En la figura 12 se muestra un diagrama con el proceso completo comprendido entre el reactor, el sistema embebido y la interfaz gráfica, para comprender mejor el funcionamiento total del sistema.

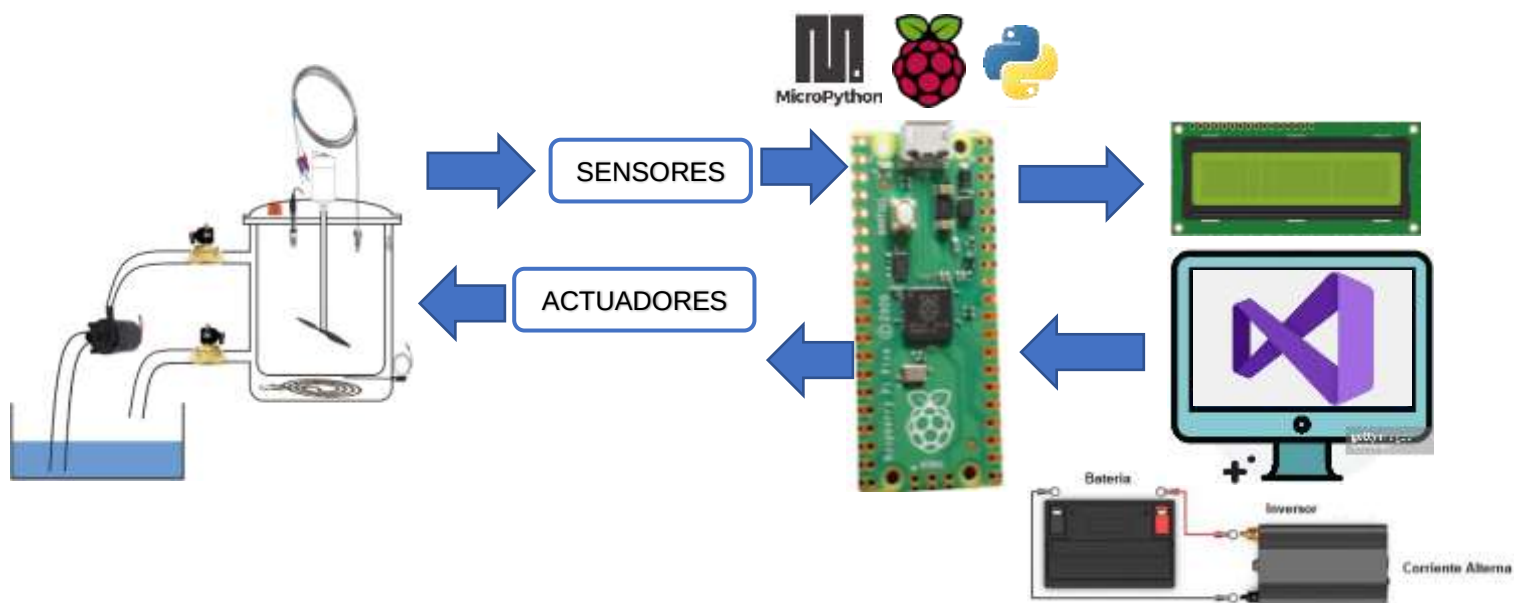


Figura 12. Diagrama general del proceso. Fuente: Autor

A continuación, se realizará la caracterización de cada uno de los componentes del sistema.

2.1 Reactor

Es la adaptación de un autoclave, que funciona como reactor discontinuo, esto para verificar la producción de etanol con cierta cantidad de sustrato, debido a que este proyecto se realiza con fines académicos para los estudiantes de ingeniería química de la Universidad de Pamplona. El reactor tiene una capacidad total de 5 litros para el procesamiento de sustratos.

En la parte lateral se acondicionaron 2 electroválvulas para la refrigeración del reactor donde se hace circular el agua para mantener la temperatura constante, a la electroválvula de ingreso va acoplada una electrobomba para realizar un flujo circular del agua para evitar desperdicios del líquido, por consiguiente, se emplea un impacto ambiental en el mismo.

El autoclave en su interior cuenta con una resistencia calefactora para el calentamiento del sistema, con ayuda de las electroválvulas y un controlador PID se hace un control de la temperatura para que el reactor este a la temperatura deseada. Por otro lado, tiene acoplado varios sensores para la toma de datos y monitorización del mismo, finalmente, se implementó un agitador para mantener una mezcla homogénea, esto ayuda a la aceleración del proceso.

En caso de tener un proceso continuo que dure varios días, se implementó un sistema de respaldo, donde se acopla una batería y un inversor de corriente para que el proceso no se pierda, los datos de los sensores se visualizan en una LCD mientras se reestablece el flujo eléctrico.

El reactor implementado con sus sensores y actuadores se muestra en la figura 13.



Figura 13. Reactor discontinuo. Fuente: Autor

2.2 Sistema embebido Raspberry Pi Pico

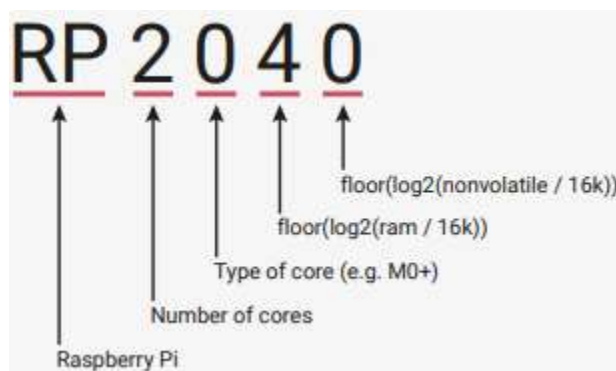
Este sistema embebido es controlado por un microcontrolador desarrollado por la empresa Raspberry Pi denominado RP2040, tiene como características principal el alto rendimiento y el bajo costo; tiene en su interior un complejo procesador de doble núcleo simétrico, una estructura de bus determinista y un amplio conjunto de periféricos, lo que aumenta un exclusivo sistema de E/S programables. Proporciona a los usuarios una potencia y flexibilidad con documentación detallada.

Por otro lado, cuenta con la barrera de entrada más baja posible. RP2040 es un dispositivo sin estado, con soporte para la ejecución en cache en lugar de almacenamiento en memoria QSPI externa. Este microcontrolador se fabrica con un proceso moderno de 40 nm, por consiguiente, ofrece un alto rendimiento y baja potencia dinámica, bajo consumo y baja fuga, además tiene una variedad de modos de bajo consumo de energía para soportar operaciones extendidas de las baterías. A continuación, se presentan las características claves tanto del microcontrolador RP2040 como del sistema embebido general. [34]

- Microcontrolador RP2040 con Flash de 2 MB
- PCB de 40 pines, dimensiones 21x51 mm tipo 'DIP'
- 26 pines E/S de uso general (GPIO) multifunción de 3.3 V
- 23 GPIO son solo digitales y 3 compatibles con DC
- Doble ARM Cortex-M0 de 133MHz.
- Arquitectura de suministro de energía simple pero altamente flexible.
- Varias opciones para alimentar fácilmente la unidad desde micro-USB, suministros externos o baterías
- Convertidor analógico a digital (ADC) de 12 bits y 500 ksp/s
- SRAM en chip de 264kB en seis bancos independientes.
- Compatibilidad con hasta 16 MB de memoria Flash fuera del chip a través del bus QSPI dedicado.
- Periféricos de interpolador y divisor de enteros.
- LDO programable en chip para generar voltaje en el núcleo.
- Periféricos
 - o 2 UART
 - o 2 controladores SPI
 - o 2 controladores I2C
 - o 16 canales PWM
 - o Controlador USB 1.1 y PHY, con soporte para host.
 - o 8 máquinas de estado PIO



El número posfijo en RP2040 proviene de lo siguiente:



En la figura 14 se muestran los pines y las características con los que cuenta la Raspberry Pi Pico.

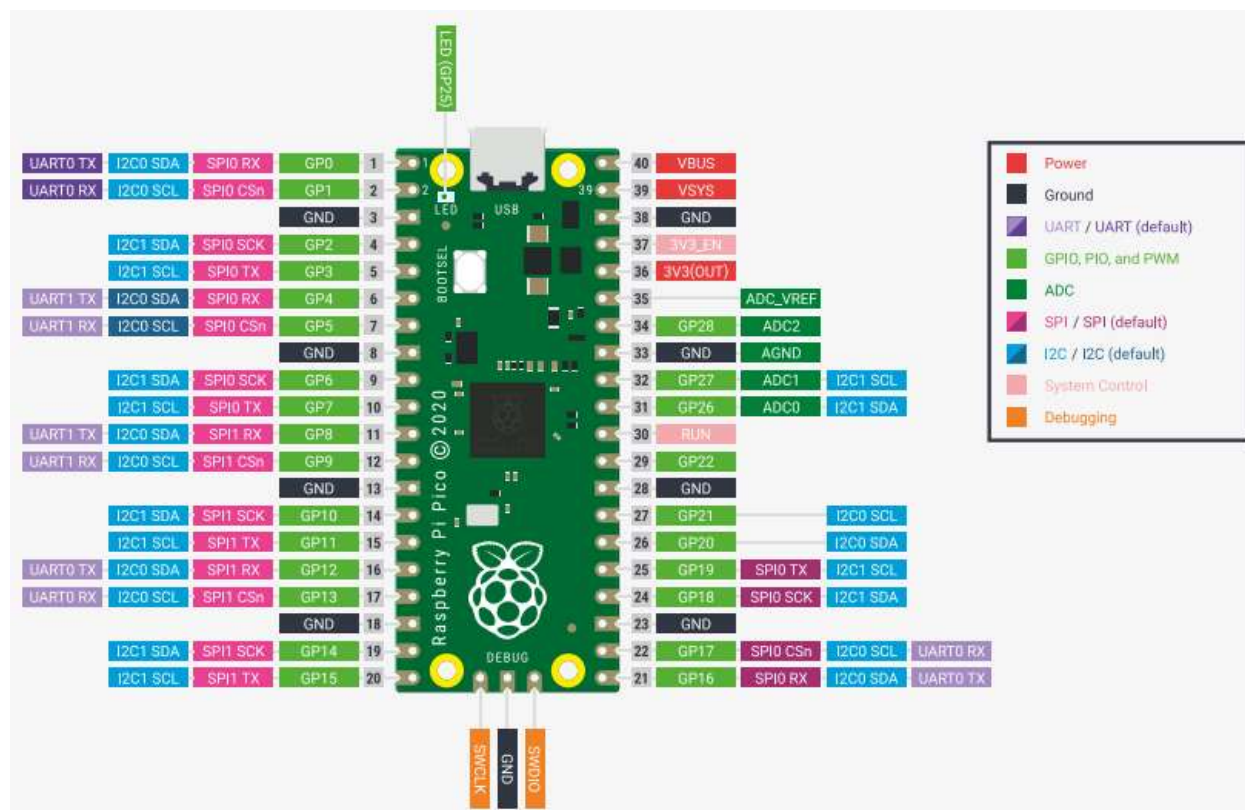


Figura 14. Pines de Raspberry Pi Pico. Fuente: RP2040 Datasheet

Pico utiliza un SMPS Buck-boost integrado que puede generar 3.3 V necesarios para alimentar el microcontrolador RP2040 y dispositivos externos. Tiene una amplia gama de voltajes de entrada (~1.8 a 5.5 V), esto permite una flexibilidad en

cuanto a la alimentación por parte de fuentes externas como por ejemplo una batería de litio. [34]

- **Asignación de pines**

Algunos pines GPIO RP2040 se utilizan para funciones internas de la placa, estos son:

- GPIO29 IP Utilizado en modo ADC (ADC3) para medir VSYS/3
- GPIO25 OP Conectado al usuario LED
- GPIO24 IP VBUS sense: alto si VBUS está presente, de lo contrario, bajo
- GPIO23 OP Controla el pin SMPS Power Save integrado

Además de los pines GPIO y de tierra, hay otros 7 pines en la interfaz principal de 40 pines:

- PIN40 VBUS
- PIN39 VSYS
- PIN37 3V3_ES
- PIN36 3V3
- PIN35 ADC_VREF
- PIN33 AGND
- PIN30 EJECUTAR

VBUS, es el voltaje de entrada de micro-USB, conectado al pin 1 del puerto micro-USB, el voltaje en este pin es nominalmente 5 V o 0 V si el USB no está conectado o no tiene alimentación.

VSYS es el voltaje de entrada del sistema, el cual se puede alimentar entre 1.8 a 5.5 V, y lo utiliza el SMPS incorporado para generar los 3.3 V para el microcontrolador RP2040 y su GPIO.

3V3_EN se conecta al pin de habilitación SMPS incorporado y se para incorporarlo (a VSYS) a través de una resistencia generalmente de 100 kΩ. Para deshabilitar los 3.3V, haga un corto en este pin.

3V3 es el suministro principal de 3,3 V al RP2040 y su E/S, generado por el SMPS incorporado. Este pin se puede usar para alimentar circuitos externos (la corriente de salida máxima dependerá de la carga del RP2040 y el voltaje VSYS, se recomienda mantener la carga en este pin por debajo de los 300 mA).

ADC_VREF es el voltaje de la fuente de alimentación ADC (y de referencia), y se genera en Pico al filtrar el suministro de 3,3 V. Este pin se puede usar con una referencia externa si se requiere un mejor rendimiento de ADC.



AGND es la referencia de tierra para GPIO26-29, hay un plano de tierra analógico separado que se ejecuta bajo estas señales y termina en este pin. Si no se usa el ADC o el rendimiento del ADC no es crítico, este pin se puede conectar a tierra digital.

RUN es el pin de habilitación del RP2040 y tiene una resistencia pull-up interna (en el chip) de 3,3 V de unos ~50 kΩ. Para restablecer RP2040, corto este pin bajo.

Finalmente, también hay 6 puntos de prueba (TP1-TP6) a los que se puede acceder si es necesario, por ejemplo, si se usa como un módulo de montaje en superficie. Estos son:

- TP1 Tierra (tierra acoplada para señales USB diferenciales)
- TP2 USB DM
- TP3 USB DP
- TP4 GPIO23/SMPS Pin PS (no usar)
- TP5 GPIO25/LED (no se recomienda su uso)
- TP6 BOOTSEL

Se pueden usar TP1, TP2 y TP3 para acceder a las señales USB en lugar de usar el puerto micro-USB. TP6 se puede utilizar para llevar el sistema al modo de programación USB de almacenamiento masivo (haciéndolo corto durante el encendido). Tenga en cuenta que TP4 no está diseñado para usarse externamente, y TP5 no se recomienda realmente para su uso, ya que solo oscilará de 0 V al voltaje directo del LED (y, por lo tanto, solo se puede usar realmente como una salida con especial cuidado).

- **Condiciones de funcionamiento recomendadas.**

El funcionamiento de Raspberry Pi Pico depende en gran medida de las condiciones especificadas por su componentes

- Temperatura de funcionamiento máx. 85 °C (incluido el autocalentamiento)
- Temperatura de funcionamiento mín. -20 °C
- VBUS 5V ± 10%.
- VSYS Mínimo 1.8V
- VSYS máx. 5,5 V

2.3 Sensores

Para el monitoreo y control de proceso de fermentación se implementaron sensores de temperatura, pH y alcohol, los cuales fueron implementados en la tapa de



reactor, exceptuando una termocupla que va en la parte inferior del reactor para medir la temperatura del agua que recircula por el mismo. A continuación, se hará una descripción de los sensores que se usaron para el proyecto.

2.3.1 Sensor de temperatura Termopar tipo K

Se usaron dos sensores de este tipo, el primero para la medición de la temperatura del agua que recircula por el reactor y el segundo para medir la temperatura ambiente dentro del reactor. Estos sensores son linealizados por medio de un módulo MAX6675, estos módulos mandan la señal por medio del protocolo SPI, el cual, es compatible con el sistema embebido.

- Termopar tipo K: Son sensores que se fabrican mediante dos alambres de distinto material unidos por soldadura en un extremo, al testear temperatura en la unión de los metales, estos generan un voltaje en milivoltios, el cual es un efecto denominado Seebeck, el cual es proporcional al aumento de la temperatura; las termocuplas están encapsuladas dentro de un tubo de acero inoxidable. A continuación, se presenta las características de la termocupla que censa la temperatura del agua que recircula por el reactor, ver figura 15: [29]
 - Longitud de sonda: 100 mm
 - Diámetro de sonda: 5 mm
 - Tipo de termocupla: K
 - Rosca fijación de la sonda: M8
 - Rango de medición: 0 a 400°C
 - Longitud de cable 1 metro
 - Material de fabricación: Cable +: aleación Nickel/Cromo; Cable -: Aleación Nickel/Aluminio
 - Aislamiento interno: Fibra de vidrio
 - Aislamiento externo: Blindaje metálico.



Figura 15. Termopar tipo K 100 mm. Fuente: Internet

Por otro lado, tenemos el termopar tipo K que censa la temperatura ambiente dentro del reactor, ver figura 16. [29]

- Longitud de sonda: Termocupla de tornillo (sonda 3 mm)
- Diámetro de sonda: 4.5 mm
- Tipo de termocupla: K
- Rosca fijación de la sonda: M6
- Rango de medición: 0 a 400°C
- Longitud de cable 1 metro
- Material de fabricación: Cable +: aleación Nickel/Cromo; Cable -: Aleación Nickel/Aluminio
- Aislamiento interno: Fibra de vidrio
- Aislamiento externo: Blindaje metálico.



Figura 16. Termopar tipo K 3 mm. Fuente: Internet

- Modulo MAX6675: Realiza una compensación de unión fría y digitaliza la señal proveniente del termopar tipo K, estos datos se emiten con una resolución de 12 bits, y el formato es compatible con SPI, este convertidor resuelve temperaturas a 0.25°C y su rango máximo es de +1024°C, la precisión del termopar es de 8 LSB para temperaturas que van desde los 0°C hasta +700°C.

La conversión de temperatura la realiza mediante un hardware de acondicionamiento de la señal, el cual, convierte la señal del termopar en un voltaje compatible con canales ADC. Antes de realizar la conversión de voltaje termoelectrónicos en valores de temperatura proporcionales, es necesario equilibrar la diferencia entre el lado de unión fría del termopar y una

referencia virtual de 0°C, en el caso del termopar tipo K, el voltaje cambia en 41 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$, lo que aproxima a la característica del termopar con la siguiente ecuación lineal:

$$V_{out} = (41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}) \times (T_R - T_{AMB}) \quad (2)$$

Donde:

V_{out} es el voltaje de salida del termopar (μV)

T_R es la temperatura de la unión del termopar remoto ($^\circ\text{C}$)

T_{AMB} es la temperatura ambiente

La función de la digitalización se realiza cuando el ADC agrega la medición del diodo de unión fría con el voltaje del termopar amplificado y lee el resultado de 12 bits en el pin SO. Una secuencia de ceros significa que la lectura del termopar es 0°C. Una secuencia de todos unos significa que la lectura del termopar es +1023.75°C.

En la tabla 6 se muestra algunas características claves de este módulo.

Tabla 6. Características MAX6675. Fuente: Datasheet Maxx6675

Características	Descripción
Tensión de alimentación (VCC a GND)	-0.3V a +6V
SO, SCK, CS, T-, T+ a GND	-0.3V a VCC +0.3V SO
Corriente	50 mA Protección
Protección ESD	$\pm 2000\text{V}$ Disipación
Disipación de energía continua ($T_A = +70^\circ\text{C}$)	471 mW
Rango de temperatura de funcionamiento	-20°C a +85°C
Rango de temperatura de almacenamiento	-65°C a +150°C
Temperatura de unión	+150°C

En la figura 17 se muestra el módulo MAX6675 el cual se implementa para leer los valores de temperatura del proyecto.





Figura 17. Modulo MAX6675. Fuente: Internet

2.3.2 Sensor de alcohol (Etanol)

Es un sensor de la serie MQ, su función principal es la de medir los niveles de concentración de alcohol en el aire. Su conexión es sencilla ya que, solo depende de alimentación y un pin analógico del microcontrolador. También cuenta con una salida digital el cual se calibra mediante un potenciómetro.

El sensor es sensible al material SnO_2 (dióxido de estaño) el cual tiene una conductividad más baja en el aire limpio. Cuando existe presencia de gas de alcohol, la conductividad del sensor se hace más alta junto con la concentración de gas, es un sensor de bajo costo que utiliza un electro circuito simple, que convierte el cambio de conductividad en la señal de salida con la concentración de gas. [35]

En la figura 18 (a) se muestra las características de sensibilidad del sensor MQ-3 para varios gases, el cual realiza una medida de forma logarítmica; las gráficas son tomadas con condiciones especiales como: temperatura: 20°C , humedad: 65%, concentración de oxígeno O_2 : 21% y una resistencia de carga; $R_L = 200\text{K}\Omega$, resistencia del sensor: 0.4 mg/L de alcohol en el aire limpio. [35]

La calibración del sensor se debe hacer debido a que la resistencia del MQ-3 es diferente a varios tipos y concentraciones de gases. Se recomienda calibrar el sensor a 0.4 mg/L (aproximadamente 200 ppm) de concentración de alcohol en el aire. Antes de realizar la calibración se debe poner el funcionamiento durante aproximadamente 24 horas continuas como pretratamiento. [35]

En la figura 18 (b) se muestra el circuito básico del sensor MQ-3, este sensor debe tener 2 voltajes, uno para el calentador (VH) y otro es el voltaje de prueba (VC). VH es para suministrar temperatura de trabajo, mientras VC detecta el voltaje VRL en la resistencia de carga R_L que se encuentra en serie con el sensor. [35]

- Especificaciones:

- Requisitos de alimentación: 5 VCC @ ~165 mA (calentador encendido) / ~60 mA (calentador apagado)
- Consumo de corriente: 150mA
- Salida DO: TTL digital 0 y 1 (0.1 y 5V)
- Salida AO: 0.1- 0.3 V (en relación con la contaminación), la concentración máxima de un voltaje de aproximadamente 4V
- Detección de concentración: 0.05-10mg / L de alcohol
- Interfaz: 1 entrada compatible con TTL (HSW), 1 salida compatible con TTL (ALR)
- Consumo del calentador: menos de 750mW
- Temperatura de funcionamiento: 14 a 122 °F (-10 a 65 °C)
- Resistencia de carga: 200kΩ
- Sensibilidad S: R_s (en el aire) / R_s (0.4mg / L de alcohol) ≥ 5
- Resistencia de detección R_s : 2KΩ-20KΩ (en alcohol de 0.4mg / l)
- Dimensiones: 32 x 22 x 16 mm

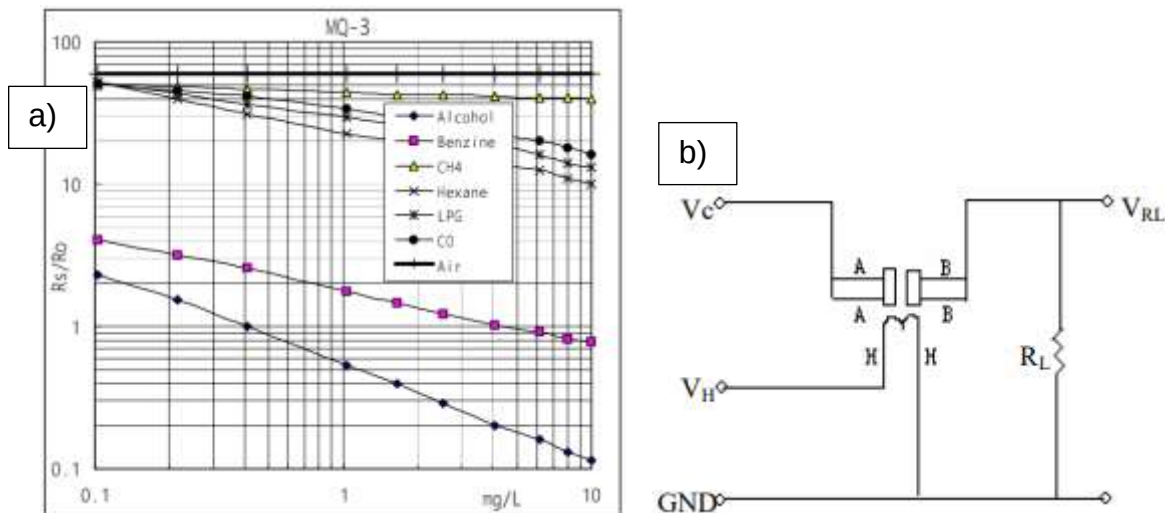


Figura 18. a) Curvas del MQ-3 b) Esquema básico del sensor. Fuente: S. Priyanka, D. Sakshi, M. Shruti y S. Smriti

La calibración del sensor se realizó mediante la puesta en funcionamiento del sensor durante 24 horas como lo menciona el datasheet del dispositivo. El siguiente paso fue calibrar el sensor en el aire, sin acercarle ningún objeto con concentración de alcohol. De acuerdo a la figura 18 (a), se toma el valor de R_s/R_o para la línea logarítmica del aire, de acuerdo a este valor, se realiza un programa en Python para calcular el valor de R_o . Este valor se ingresa en el código principal para tener una lectura adecuado del sensor. En la figura 19 se muestra el código que se implementó para la calibración del equipo.



```
Calibracion_MQ_Parte_1.py  Calibracion_MQ_Parte_2.py
1  from machine import Pin, PWM
2  import utime as time
3
4  SENSOR = ADC(26)
5
6  while True:
7      for x in range(100):
8          sensorValue = sensorValue + SENSOR
9
10         sensorValue = sensorValue/100.0;
11
12         sensor_volt = sensorValue/1024 * 5.0;
13         RS_air = (5.0 - sensor_volt)/sensor_volt;
14         R0 = RS_air/60.0;
15
16         print("sensor_volt = ");
17         print(sensor_volt);
18         print("V");
19         print("R0 = ");
20         print(R0);
21         time.sleep(1)
```

Figura 19. Código para calibración de sensor. Fuente: S. Priyanka, D. Sakshi, M. Shruti y S. Smriti

El código de la figura 19 inicialmente se importan las librerías para trabajar con los pines de la Raspberry Pi Pico seguidamente de la librería para asignar tiempos de retardos en el código. En la línea 4 del código se asigna un pin analógico del microcontrolador en el cual se va a conectar el sensor para que de esta forma se puedan obtener los datos.

En el while: True es un ciclo que se está repitiendo constantemente, se implementa un ciclo for el cual toma 100 muestras de los valores analógicos que se obtienen del sensor, estos se almacenan en la variable “sensorValue” el cual se va sumando con el valor analógico del pin 26, ese valor resultante se divide en 100 que finalmente es el promedio de las 100 muestras obtenidas con el ciclo for.

En la variable “sensor_volt” se almacena la conversión del dato dependiendo la resolución y el voltaje del microcontrolador, para pasar el dato analógico a un valor de voltaje.

Mediante la siguiente fórmula se halla el valor de la resistencia del aire RS, esta ecuación está descrita en la línea 13 del código.

$$\frac{RS}{RL} = \frac{V - VS}{VS}$$

Finalmente, para saber el valor de la resistencia del sensor para hacer la respectiva medición, se divide el valor de RS obtenido anteriormente, sobre la proporción de aire limpio que nos entrega la gráfica de la figura 18 (a).



2.3.3 Sensor de pH E-201-C

Es un módulo que consiste en la implementación de un sensor de pH, también llamada sonda de pH, cuenta con una placa de acondicionamiento de la señal, el cual, manda una señal proporcional al valor de pH, tiene la facilidad de usarse con cualquier microcontrolador. Los componentes que integran este sensor es un módulo (figura 20 (a)) y un electrodo de pH combinado (Figura 20 (b)), el electrodo está constituido por vidrio que resulta bastante frágil, el preamplificador (modulo) es un dispositivo que registra la señal del electrodo con alta impedancia y la convierte en una señal de baja impedancia que puede analizar el transmisor, el preamplificador también puede estabilizar la señal, haciéndola más susceptible al ruido eléctrico. [36]



Figura 20. (a) Modulo acondicionador de la señal (b) Electrodo de pH. Fuente: e.-. G. M. Central

- Asignación de pines
 - TO - Salida de temperatura
 - DO - Salida de 3,3 V (del potenciómetro de límite de pH)
 - PO - Salida analógica
 - Gnd - Gnd para la sonda PH
 - Gnd - Gnd para la placa
 - VCC - 5V DC
 - POT 1: desplazamiento de lectura analógica (más cercano al conector BNC)
 - POT 2 – Configuración del límite de PH
- Configuración para la lectura del pH

Esta placa tiene la capacidad de suministrar un voltaje a la placa analógica el cual representa un valor de pH. La medición de pH la realiza ente 0 y 14,



inicialmente la placa viene configurada para que en 0V sea un pH de 7, lo que conlleva a trabajar con valores negativos para pH menores que 7, lo que no se puede realizar con pines analógicos de los microcontroladores. Para solucionar esto se usa el potenciómetro de compensación POT1 de modo que cuando el pH sea 7 la lectura de voltaje sea de 2.5 V, ya que este valor está a medio camino entre 0 V y 5 V como un pH 7 está a medio camino entre pH 0 y pH 14. [36]

Para el caso de la Raspberry Pi Pico que sus entradas analógicas trabajan de 0 – 3.3V se realiza un acondicionamiento en el software para ajustar los valores de voltaje.

- Configuración de límite de pH

El potenciómetro POT2 actúa como interruptor de límite, el pin D0 de la placa suministra 3.3 V al pin cuando alcance el valor preestablecido, cuando llegue a este límite encenderá un led rojo. Se puede establecer por software límites para informar al usuario el cuando llegue al nivel de pH establecido, esto dependiendo de la aplicación. [36]

- Conexión y calibración de la sonda de pH

- Conecte el electrodo de pH al conector BNC en la placa del medidor de pH, y luego use líneas de conexión, la placa del medidor de pH está conectada a un puerto analógico. Cuando el controlador recibe energía, verá que el LED azul a bordo está encendido.
- Por medio de software se realiza el registro de los datos.
- Coloque el electrodo de pH en la solución estándar cuyo valor de pH es 7.00, o cortocircuite directamente la entrada del conector BNC. Abra el monitor en serie del controlador, puede ver el valor de pH impreso en él y el error aparece. no exceda de 0,3. Registre el valor de pH impreso, luego compárelo con 7.00, y la diferencia debe cambiarse en una variable establecida, por ejemplo "Compensación". Por ejemplo, el valor de pH impreso es 6,88, por lo que la diferencia es 0,12. Debe cambiar el valor de la variable "Compensación" a 0.12.
- Coloque el electrodo de pH en la solución estándar de pH cuyo valor es 4,00. Luego espere alrededor de un minuto, ajuste el dispositivo de



potencial de ganancia, deje que el valor se estabilice en alrededor de 4,00. En este momento, la calibración ácida se ha completado y puede medir el valor de pH de una solución ácida. Nota: Si desea medir el valor de pH de otra solución, primero debe lavar el electrodo de pH. En la figura 21 se muestra la solución utilizada para calibrar el sensor de pH, el cual es un sobre que se disuelve en agua destilada y tiene un pH de 9.18, luego se introdujo el electrodo en agua potable donde el pH de este líquido está alrededor de 7.

- De acuerdo con las características lineales del electrodo de pH, después de la calibración anterior, puede medir directamente el valor de pH de la solución alcalina, pero si desea obtener una mayor precisión, puede recalibrarlo. [36]
- En la figura 22 está la recta de calibración donde se puede observar el voltaje que representa los diferentes niveles de pH, de esta manera podemos ayudarnos para realizar la calibración del sensor y saber dependiendo del voltaje de salida del sensor, cual es el nivel del pH que se está midiendo.



Figura 21. Sobres para la calibración del sensor de pH. Fuente: Autor

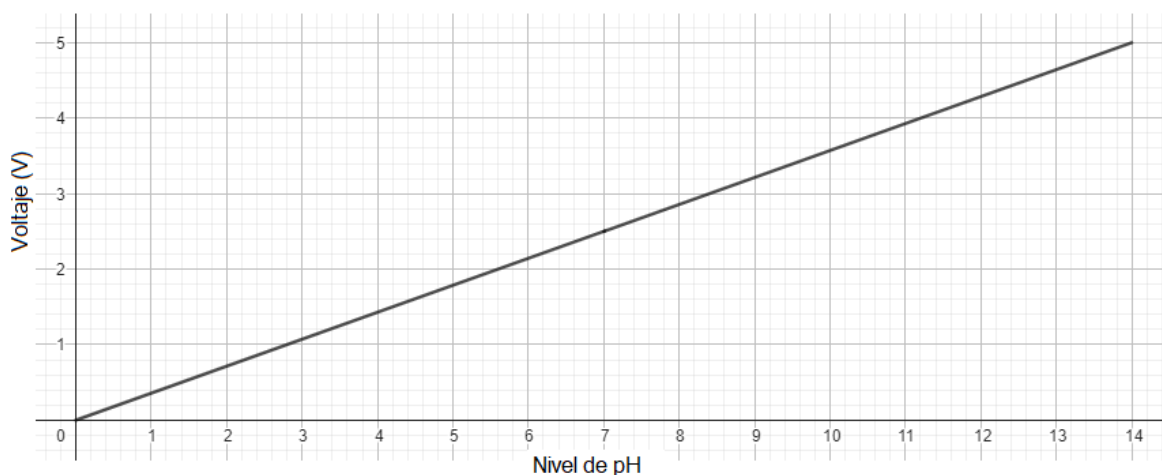


Figura 22. Recta para la calibración del sensor de pH. Fuente: Autor.

- Precauciones
 - Después de quitar la cubierta protectora del electrodo, tener cuidado de que las burbujas de vidrio son muy delicadas.
 - Después de completar las mediciones, debe colocarse nuevamente la manga de protección. Se debe colocar una pequeña cantidad de cloruro de potasio de 3.3 mol/L.
 - El extremo del cable del electrodo debe mantenerse limpio y seco, evitando así cortocircuitos.
 - El electrodo debe sumergirse en agua destilada y solución de fluoruro ácido durante mucho tiempo para evitar el contacto con la grasa.
 - Si se usó por bastante tiempo, sumergir el electrodo en ácido fluorhídrico al 4%, posteriormente lavarlo con agua destilada. [36]

2.4 Actuadores

Son los encargados de realizar las acciones en el proyecto, como calentar el agua, hacer recircular el agua en el reactor o homogenizar la mezcla, estos actuadores son controlados por pines digitales con los que cuenta el sistema embebido. A continuación, se describirán los actuadores que se implementaron en el proyecto.

2.4.1 Resistencia calefactora

Para mantener en condiciones óptimas el reactor se hace uso de una resistencia calefactora de 1000W, esta resistencia ya venía implementada antes de acondicionar el autoclave. La temperatura proporcionada por este actuador es controlada por la recirculación del agua a través de dos válvulas, al igual que por un controlador PID.





Figura 23. Resistencia calefactora implementada. Fuente: Autor

2.4.2 Electroválvulas

Estos actuadores son los encargados de permitir el flujo del agua para permitir el control de temperatura del reactor. El funcionamiento de la electroválvula de salida es de 110 VAC, con una potencia de 0.2W; y la electroválvula de entrada el voltaje de funcionamiento es de 24 VDC con una potencia de 25W, estas dos electroválvulas son controlados por pines digitales de la Raspberry Pi pico.



Figura 24. Electroválvulas implementadas. Fuente: Autor

2.4.3 Agitador

Generalmente se acondiciona para mezclar y homogenizar el producto, este agitador está compuesto por un motor de 12V con una caja reductora, en el eje del motor esta acoplado un aspa el cual se encarga de la mezcla del sustrato, este eje gira a 30 rpm dentro del reactor, el tiempo de agitación es asignado por el usuario en la interfaz gráfica.

El motor es de la empresa Kinmore de la serie KM, la referencia de este es KM-37N545. En la tabla 7 se muestra los datos técnicos del motor proporcionados por la empresa mencionada anteriormente.

- Datos técnicos

Tabla 7. Datos técnicos agitador (Motor). Fuente Datasheet Fabricante motor.

Ratio	Modelo	Voltaje		Sin carga		Con carga		
		Rango operación	Voltaje nominal	Corriente	Velocidad	Corriente	torque	velocidad
		V	V	A	r/min	A	Kg.cm	r/min
1/150	KM-37B545-90-1230	6-12	12	0.34	30	0.60	10	28



Figura 25. Agitador implementado. Fuente: Autor

2.4.4 Bomba de agua magnética

Este actuador se encarga de hacer fluir el agua hacia el reactor, para que cuando la temperatura aumente, esta se pueda controlar ingresando agua por medio de la electroválvula superior del reactor, de esta forma se garantiza la reutilización del líquido y evitando desperdicios del mismo.

El modelo de la bomba es la PD-10-3. El funcionamiento de la bomba de agua se garantiza con un voltaje nominal de 24 VDC, con un consumo de 5 W y una corriente nominal de 0.45 A.



Figura 26. Bomba de agua magnética implementada. Fuente: Autor

2.5 Descripción de Softwares

En cuanto a la interfaz gráfica, está tiene como objetivo monitorear las variables presentes en el reactor, como la temperatura del agua y la temperatura ambiente del reactor, el nivel de pH y la concentración de alcohol que se genera. También tiene como propósito realizar el control de variables y actuadores para que el usuario pueda desde la PC pueda realizar el monitoreo y control del proceso de fermentación anaerobia.

Tiene implementada una comunicación tipo UART para enlazar el sistema embebido con la interfaz, de esta forma realizar la recepción y envío de datos por medio del IDE de Tonny y MycroPython como lenguaje de programación.

Se implementa dentro de la interfaz un sistema para adquirir y guardar el historial de datos del proceso. Finalmente, se realiza la adjudicación de alarmas para cualquier eventualidad anormal que se presente durante el proceso.

El diseño y ejecución para la automatización del proceso de fermentación se desarrolló por medio de los siguientes programas:

2.5.1 Visual Studio

Es un IDE (entorno de desarrollo integrado) el cual es rico en funciones para el desarrollo de software. Visual Studio es una plataforma creativa que se puede usar para crear, editar, compilar y depurar código para luego publicar una publicación. A comparación de otros IDE, Visual Studio incluye compiladores y herramientas para la terminación de códigos, además de incluir diseñadores gráficos y funciones explícitas para mejor aplicaciones de desarrollo de software. [37]

En Visual Studio, tiene la facilidad de crear aplicaciones que se conectan a datos de cualquier producto o base de datos con la que se esté trabajando, en cualquier formato y en cualquier lugar, por ejemplo, en una máquina virtual, o una red de área local o privada. para aplicaciones .NET el IDE de Visual Studio proporciona herramientas que pueden crear modelos para almacenar o manipular datos en la memoria y de esa forma vincular datos en la interfaz de usuario. [37]

Visual Studio tiene interesantes beneficios como acceso a recursos y herramientas gratuitas, al igual, puede ser usado por cualquier desarrollador individual para crear aplicaciones de pago o de forma gratuita. También pueden ser usada por organizaciones con un número ilimitado de usuarios para usarse en escenarios como aprendizaje en clase, para investigaciones académicas o para la contribución en proyectos de códigos abiertos. Finalmente, para uso comercial tiene un límite que es el uso de hasta 5 usuarios de la organización. [37]

En conclusión, se utilizó el IDE de Visual Studio para realizar la interfaz gráfica por medio del lenguaje de programación de visual Basic.

- Visual Basic: es un lenguaje de programación que está dirigido por eventos, es desarrollado por Alan Cooper para la compañía de Microsoft, este lenguaje es un dialecto de Basic. Este lenguaje es orientado a objetos, proporcionan API para el análisis de códigos sofisticado y está abierto en GitHub. [37]

Existen varias versiones de Visual Basic, dentro de las cuales están: [37]

- Visual Basic 1.0, 2.0 y 3.0: estas versiones son las antecedentes de visual Basic que actualmente se conoce
- Visual Basic 4.0 y 5.0: fueron las versiones que hicieron más popular a Visual Basic, los cuales integraron sistemas operativos de última generación de Microsoft.



- Visual Basic 6.0: Fue la versión que expandió a gran escala este lenguaje de programación, Visual Basic fue uno de los lenguajes que se usó para el desarrollo de grandes y numerosas aplicaciones tanto profesionales como empresariales.
- Desde el 2002 Visual Basic se incluyó dentro de plataformas de programación que tenía cualidades más amplias, las cuales, admitían diferentes lenguajes de programación denominada Visual Studio.NET, después de esto cambio se utiliza el termino Visual Basic.NET. Ya dentro de la plataforma de Visual Studio se emplearon las siguientes versiones:
 - Visual Basic 2005: Se introdujeron cambios en relación a la filosofía de la programación con el que se basaba Visual Basic, pero generalmente resulta siendo el mismo.
 - Visual Basic 2008, 2010, 2012, 2020, 2022: sigue siendo un lenguaje integrado en el IDE de Visual Studio, que sigue mejorando con cada versión, e implementa mejoras de programación modernas.

2.5.2 Tonny

Actualmente el lenguaje de programación que más usan los desarrolladores y que cuenta con amplias características para diseño, compilación, depuración, entre otras, es Python. Python es uno de los lenguajes más sencillos, gracias a su sintaxis que está tipado dinámicamente, esto lo hace más accesibles que otros lenguajes como C# y C++. [38]

Para la ejecución y programación de Python, existen diferentes IDE, de los cuales se puede sacar el mejor provecho. Para esta ocasión se utilizó el IDE de Tonny para la programación del proyecto. Tonny cuenta con características en cuanto al IDE y a Python. Por un lado, se puede destacar que tiene un depurador que ayuda a la detección de errores y por otro lado ofrece una consola propia de Python, también cuenta con la visualización de variables, AST, e inspector de objetos y otras características más. [38]

El desarrollador principal de Tonny es la Universidad de Tartu, por consiguiente, puede ser descargado gratuitamente desde el sitio oficial del proyecto.

Lo anterior es hablando de las ventajas de Python en cuanto a programación y creación de software o aplicaciones, pero como se implementará un sistema embebido, Tonny también ofrece trabajar con un lenguaje de programación denominado MycroPython, el cual es una reimplementación de Python el cual va



dirigida a microcontroladores y sistemas integrados. La programación en este lenguaje es muy similar al habitual Python. [38]

2.5.3 Matlab

Matlab es la abreviación de MATriz LABoratory, es un software con bastantes aplicaciones y características que lo hace esencial en cualquier proyecto de ingeniería, debido a que puede realizar cálculos vectoriales, de matrices, simulaciones en 2D, 3D, y lo que se usó, la estimación del controlador PID.

Matlab es un software pago el cual se trabajó con una versión de prueba gratuita para obtener la función de transferencia de la planta, este es un software solamente para realizar la parte de control, no tiene ninguna implicación para garantizar el funcionamiento a largo plazo del sistema.

Con Matlab se realizó la estimación de la función de transferencia correspondiente a la planta. Para esto se tomaron los datos y se modeló por medio de la función “pidtuner” para la sintonización y que la planta tuviera una mejor respuesta.

2.6 Protocolos de comunicación

Para este proyecto se utilizaron varios protocolos debido a que implementaron módulos que tienen un protocolo en específico.

Se uso el protocolo de comunicación UART para la comunicación entre el sistema embebido (Raspberry Pi Pico) y la interfaz gráfica desarrollada en visual Studio. De este modo se envían y se reciben datos para la visualización de los sensores y para el control de los actuadores dependiendo de las indicaciones hechas por el usuario en la interfaz.

El protocolo SPI para la comunicación de los sensores de temperatura, estos sensores adaptan el módulo MAX6675 el cual envía los datos al sistema embebido por medio de la comunicación SPI.

Finalmente, se usó el protocolo de comunicación I2C para la conexión de una LCD el cual visualiza los valores de los sensores en caso de que haya una ausencia de energía eléctrica. Aunque la LCD puede trabajar sin este módulo I2C, se decidió implementar para no usar tantos pines del sistema embebido.



2.7 Diseño del controlador

En la teoría de control, generalmente se usan funciones de transferencias que relacionan entrada-salida de sistemas las cuales se describen mediante ecuaciones diferenciales lineales que son invariantes en el tiempo.

La función de transferencia se define según como el cociente entre la transformada de Laplace de salida y la transformada de Laplace de entrada, teniendo en cuenta que las condiciones iniciales son cero.

$$G(s) = \frac{L[y(t)]}{L[x(t)]} = \frac{Y(s)}{X(s)} \quad (3)$$

Donde $G(s)$ es la función de transferencia, $Y(s)$ es la salida y $X(s)$ es la entrada que interfieren en el sistema.

Un sistema dinámico se define como una serie de ecuaciones que representa el comportamiento del proceso de forma precisa y se asemeja al sistema real. Cada proceso es diferente por lo que se deben adoptar diferentes métodos para el análisis y determinar el modelo matemático.

Para la obtención del modelo matemático se implementó un sistema con respuesta en lazo abierto con una entrada escalón del 100% como se muestra en la figura 27.

Estos datos se obtienen mediante la implementación del sensor de temperatura a una tarjeta de desarrollo Arduino, programando la tarjeta de tal modo que los datos sean almacenado en un archivo de Excel, de esta manera poderlos exportar a Matlab para realizar la obtención de la función de transferencia y diseñar el controlador.

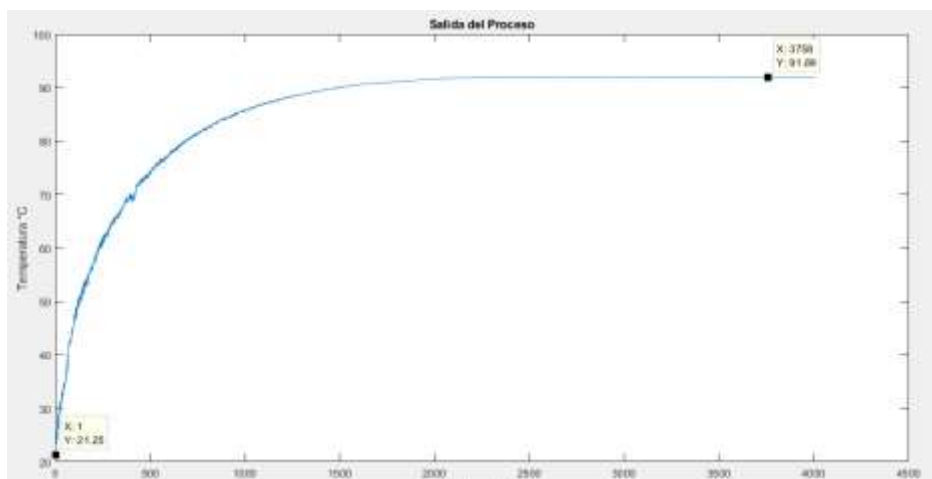


Figura 27. Salida del proceso. Fuente: Autor

A continuación, se realiza el análisis analítico para determinar la función de transferencia del sistema de acuerdo a la gráfica obtenida, estos datos son visualizados en la tabla 8.

Tabla 8. Información para hallar la función de transferencia. Fuente: Autor

Variables	Valores
Temperatura máxima	91.8
Temperatura mínima	21.25
Escalón máximo	100
Escalón mínimo	0

- Cálculo de la ganancia

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta U} = \frac{91.8 - 21.25}{100 - 0} = \frac{70.55}{100} = 0.7055$$

- Hallar el tiempo en que la temperatura alcanza el 63.2% que equivale al primer tao.

$$(0.632)(\Delta Temp) = (0.632)(91.8 - 21.25) = 44.58^{\circ}C$$

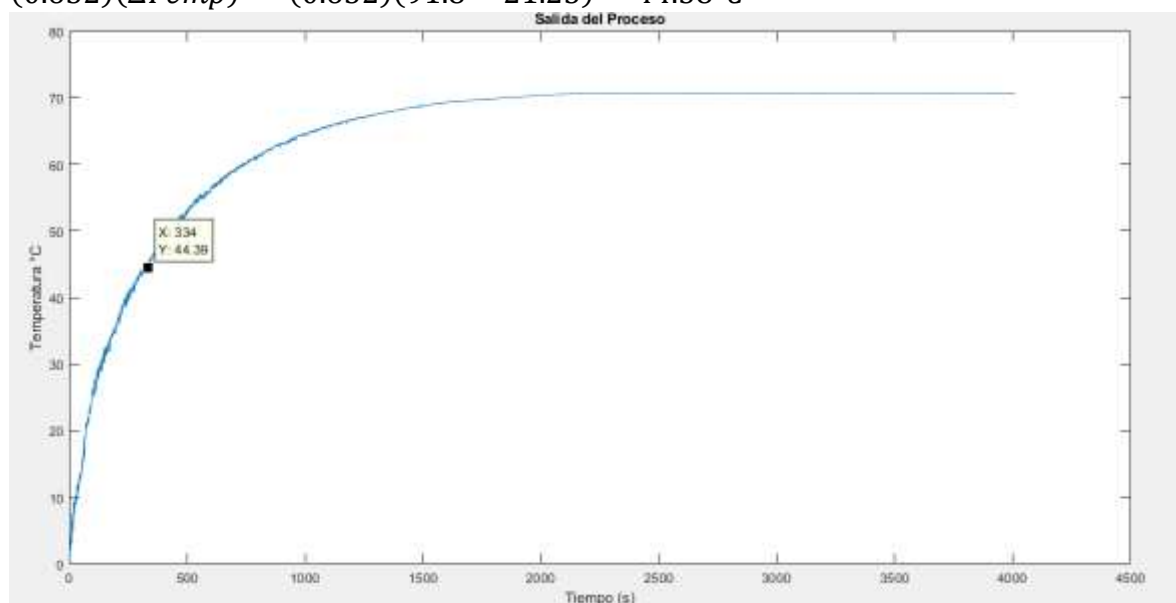


Figura 28. Tiempo en que la temperatura alcanza el 63.2% Fuente: Autor

Por consiguiente, el tiempo en que la temperatura alcanza el 63.2% es aproximadamente de 334, por lo que la función de transferencia queda de la siguiente forma:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-t_0 s}$$
$$G(s) = \frac{0.7055}{334s + 1} e^{-t_0 s}$$

Finalmente, para corroborar esta función de transferencia, se apoyó con Matlab ingresando los datos obtenidos del sistema y con la ayuda de la herramienta "systemIdentification" se obtuvo una respuesta aproximada a la que se halló analíticamente. La estimación que realizó Matlab es del 89.88% lo que lo hace un sistema confiable. En la figura 29 se muestra el resultado de la función de transferencia obtenida de Matlab.

```
Command Window

>> PID

PID =
Process model with transfer function:
      Kp
G(s) = ----- * exp(-Td*s)
      1+Tpl*s

      Kp = 0.70165
      Tpl = 349.52
      Td = 0

Name: PID
Parameterization:
  'PID'
  Number of free coefficients: 3
  Use "getpvec", "getcov" for parameters and their uncertainties.

Status:
Estimated using PROCEST on time domain data "mydata".
Fit to estimation data: 89.88%
FPE: 1.514, MSE: 1.511
```

Figura 29. Resultados función de transferencia con Matlab. Fuente: Autor



2.7.1 Sintonización del controlador

Para la sintonización del controlador se usa Matlab que cuenta con una herramienta denominada “pidtune” que inicialmente ajusta el controlador de la planta en la cual se ingresa la función de transferencia que se halló y el software estima las constantes del controlador PID. en la figura 30 se muestra el resultado que determino Matlab para ajustar el controlador, para esta planta determinó una constante proporcional (Kp) e integral (Ki).

```
G =  
  
    0.7016  
-----  
349.5 s + 1  
  
Continuous-time transfer function.  
  
>> Gc = pidtune(G,'pid')  
  
Gc =  
  
          1  
Kp + Ki * ----  
          s  
  
with Kp = 2.04, Ki = 0.0106  
  
Continuous-time PI controller in parallel form.
```

Figura 30. Constantes del controlador PID estimadas por Matlab. Fuente: Autor.

Luego de este paso se sintoniza el controlador con la aplicación “pidTuner” de Matlab para mejorar el tiempo de respuesta del controlador determinado anteriormente. En la figura 31 se muestra la estimación hecha por la aplicación de Matlab para mejorar el tiempo de respuesta.



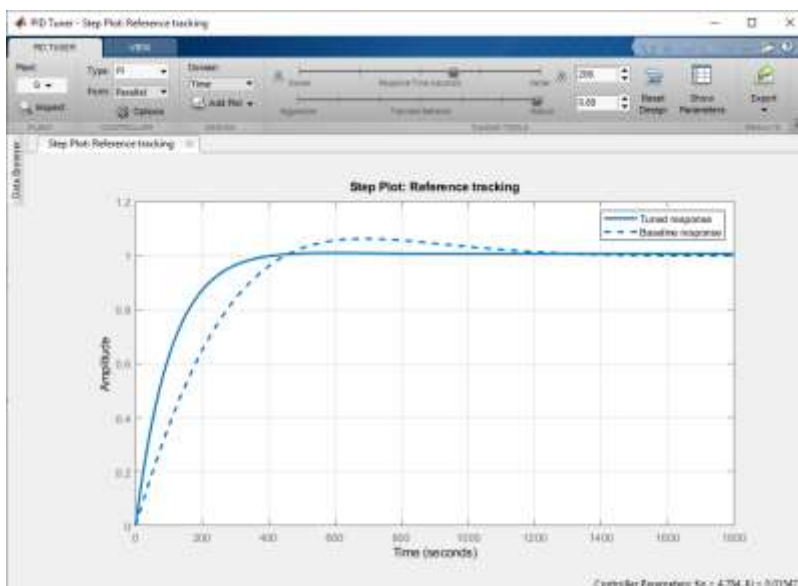


Figura 31. Respuesta de pidTuner de Matlab. Fuente: Autor

La grafica de línea punteada de la figura 31 es el tiempo de respuesta del controlador que se halló inicialmente, y se ajusta con el comando ubicado en la parte superior sintonizando mejor el tiempo de respuesta, la línea continua muestra la mejor respuesta para el controlador.

Finalmente, en la figura 32 se muestra los parámetros que se hallaron inicialmente comparándolos con los que se estimó con la aplicación “pidTuner”.

Controller Parameters		
	Tuned	Baseline
Kp	4.784	2.0403
Ki	0.015469	0.010581
Kd	n/a	n/a
Tf	n/a	n/a
Performance and Robustness		
	Tuned	Baseline
Rise time	211 seconds	319 seconds
Settling time	337 seconds	1.11e+03 seconds
Overshoot	0.827 %	6.08 %
Peak	1.01	1.06
Gain margin	Inf dB @ NaN rad/s	Inf dB @ NaN rad/s
Phase margin	88 deg @ 0.00971 rad/s	73.8 deg @ 0.0051 rad/s
Closed-loop stability	Stable	Stable

Figura 32. Estimación final del controlador. Fuente: Autor.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS

Se determina los resultados obtenidos luego de la implementación de sensores y actuadores y puesta en marcha del reactor. Las pruebas consistieron en ingresar el producto al reactor y verificar el funcionamiento del mismo.

En primer lugar, se describe la interfaz gráfica, donde se especificará el uso correcto de la misma y cuál es el contenido de la misma. Y como segunda medida se describe la parte de control, circuitos y sistema embebido implementado.

3.1 Interfaz grafica

El diseño de la interfaz gráfica muestra en tiempo real el comportamiento de las variables involucradas en el proceso, además de contar con secciones de control para que el usuario indique a que temperatura debe estar el reactor y así mismo el tiempo de agitación que se le quiere dar a la mezcla.

La interfaz gráfica cuenta con dos secciones o ventanas el cual muestra información del proyecto y la parte de control del sistema.

Sección 1: En la figura 33 se muestra la primera sección la cual contiene el nombre del proyecto, autor, información de la universidad y en la parte inferior un botón de color verde el cual le indica al usuario que puede iniciar el proceso. Al darle clic en botón, aparece la segunda sección.

Sección 2: En la figura 34 se evidencia la ventana 2 el cual contiene las gráficas de las variables que se van a monitorear. En la parte inferior cuanta, con el apartado de comunicación, agitación, control de temperatura, indicadores de los actuadores, un botón el cual se puede oprimir en caso de tener alguna emergencia con el



AUTOMATIZACIÓN DE UN PROCESO QUÍMICO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA CON UN REACTOR UBICADO EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

reactor, un botón el cual guarda los datos de los sensores para su posterior análisis y finalmente, un botón el cual se oprime cuando se haya terminado el proceso.



Figura 33. Sección 1 interfaz gráfica. Fuente: Autor

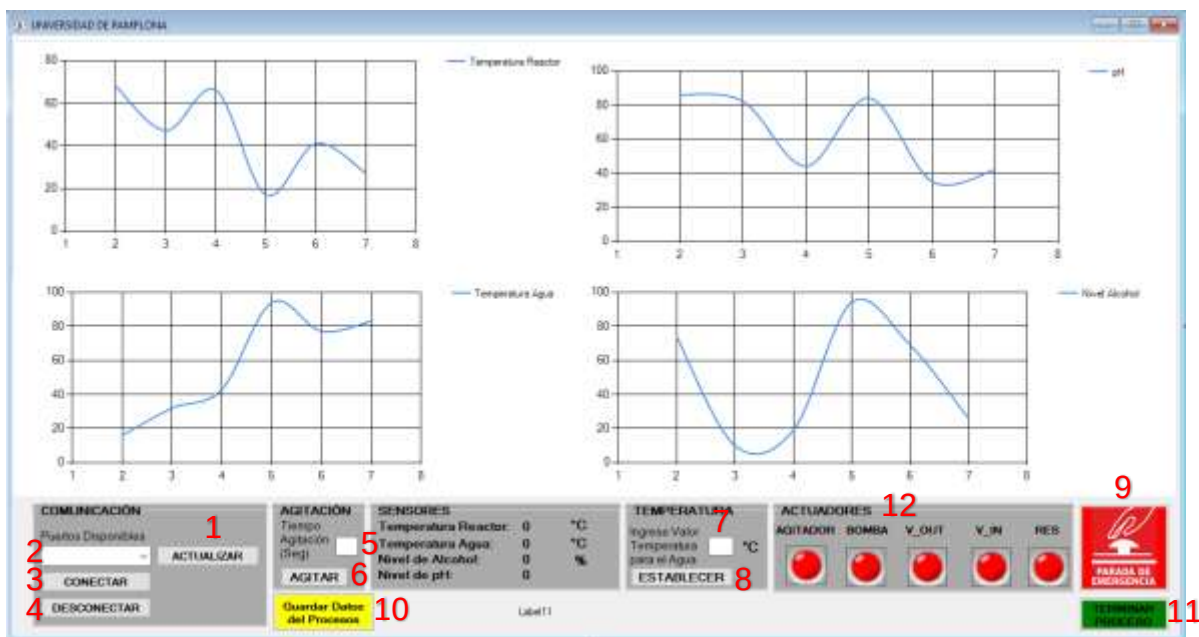


Figura 34. Sección 2 Interfaz gráfica. Fuente: Autor



Autor: Deyder Esteban Siabato Ruiz
Director: MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

En la figura 34 se muestran los pasos para la puesta en funcionamiento del reactor por medio de la interfaz gráfica, a continuación, se describirán cada uno.

1. Actualizar los puertos disponibles que tenga el PC.
2. Buscar y seleccionar el puerto indicado para la transferencia de datos.
3. Conectar el sistema embebido y la interfaz gráfica. Al conectar el sistema se encenderá la electrobomba y el indicador de encendido.
4. En caso de pausar el proceso o no querer seguir con el proceso, se oprime el botón “desconectar” o el botón “terminar proceso” (Paso 11), de esta forma cualquier actuador que este activo se apagará.,
5. ingresar el tiempo de agitación conveniente para homogenizar la mezcla
6. Oprimir el botón agitar, de esta manera se encenderá el agitador y mezclará la cantidad de tiempo que el usuario ha ingresado.
7. Ingresar el valor de temperatura o setpoint el cual desea para que se mantenga el reactor en funcionamiento. Un valor entre 23 y 50 grados centígrados, esto dependiendo el tipo de sustrato que se vaya a ingresar al reactor.
8. Oprimir el botón “Establecer” de este modo se activará el controlador para mantener la temperatura en el valor ingresado en el paso anterior. Al momento de activarse el controlador, este activará la resistencia calefactora en caso de que la temperatura este por debajo del valor ingresado, y si por el contrario la temperatura supera el valor ingresado, se apagará la resistencia calefactora y se encenderá la electroválvula de entrada el cual deja fluir el agua y de esta manera se refrigera el reactor.
9. En caso de alguna emergencia, como rebose del agua, fallo de algún sensor o actuador, se oprime este botón y detiene todo el sistema.
10. Para guardar los datos del proceso se asignó este botón, el cual guarda como imagen las gráficas con el comportamiento de las variables durante el proceso, estos datos se pueden guardar durante o al finalizar el proceso.
11. Finalmente, cuando se termine el proceso se oprime el botón “Terminar proceso”, el cual cierra las ventanas y apaga todo el sistema.

- Instalación de la interfaz grafica

La interfaz que se desarrolló se hizo con el objetivo de solucionar la problemática de utilizar software pagos, por esta razón se crea un ejecutable para poder instalar esta aplicación en cualquier computador para que cualquier persona pueda



conectar el reactor y visualizar los datos en cualquier computador que esté disponible.

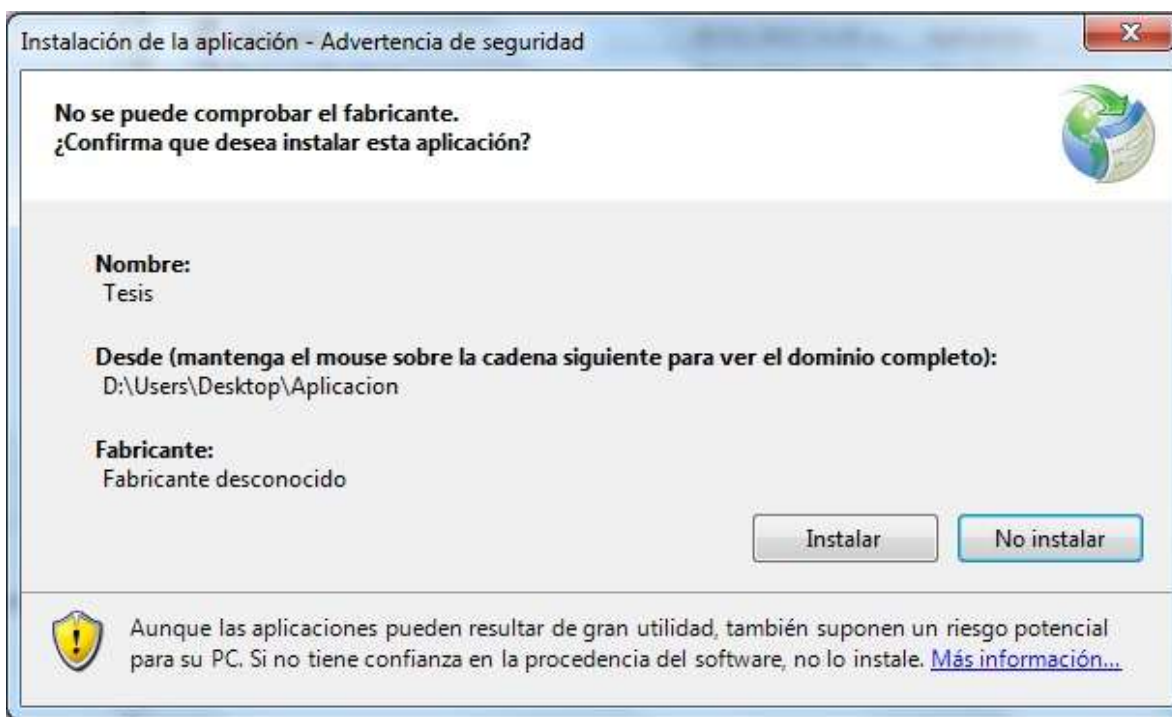
A continuación, se describen los pasos para la instalación de la aplicación.

En los archivos entregados se encuentra una carpeta denominada “Aplicación”, la cual contiene el ejecutable de la interfaz gráfica.

1. Abrir la carpeta mencionada anteriormente y seleccionar el archivo que esta resaltado.

Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño
Application Files	21/11/2022 09:34 a...	Carpeta de archivos	
setup.exe	20/11/2022 11:05 a...	Aplicación	563 KB
Tesis.application	20/11/2022 11:05 a...	Manifiesto de imp...	6 KB

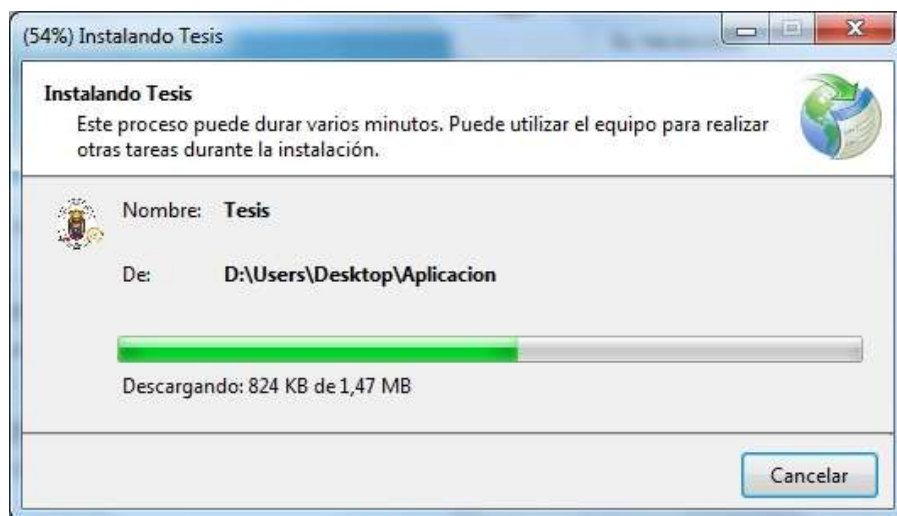
2. Aparecerá la siguiente ventana y seleccionamos la opción instalar.



3. Finalmente aparecerá la siguiente ventana el cual nos indica el porcentaje de descarga de la aplicación, es importante tener en cuenta que para descargar este aplicación se necesita de internet. Cuando termine la descarga la



interfaz gráfica quedará instalada en la computadora, después de que quede instalada ya no se requiere de acceso a internet.



3.2 Descripción de conexiones y circuitos

3.2.1 Etapa de control

En esta etapa se realiza el diseño de la PCB para implementar todo lo relacionado con el control del sistema. A continuación, se describe cada etapa que se tuvieron en cuenta.

- **Fuente de alimentación:** En la figura 35 se muestra las conexiones para alimentar todo el circuito. Se usaron 3 niveles de voltajes, 24V es el voltaje que alimenta los actuadores, se implementó una fuente de 5V para poder energizar el sistema embebido y demás componentes que tienen 5V como voltaje nominal.

Por otro lado, se implementó un LM7812 para convertir el voltaje de la fuente principal de 24V y convertirlos a 12V y así alimentar el motor (agitador) que tiene como voltaje nominal 12V.



Figura 35. Fuente de alimentación. Fuente: Autor

- Cálculos para regulador de voltaje.

El regulador de voltaje utilizado fue el LM7812 con encapsulado TO-220, según el datasheet del componente determina que su corriente máxima de operación es de 1A y de acuerdo a la tabla 7 la corriente que demanda el motor es de 0.6A, por lo que está dentro de los parámetros de uso del regulador. Ahora, ¿El regulador necesita disipador?

Según la figura 36 la potencia de disipación sin disipador para el encapsulado T-220 es de aproximadamente 2W para una temperatura ambiente de 25°C; y para un disipador de 10°C/W es de 6W, por consiguiente:

Cálculos del regulador sin disipador.

$$\begin{aligned}P_{max} &\leq 2W \\(I_{max})(V_{in} - 12V) &\leq 2W \\I_{max} &\leq \frac{2W}{(V_{in} - 12V)} \\I_{max} &\leq \frac{2W}{(23.5V - 12V)} \\I_{max} &\leq 0.174A\end{aligned}$$

Como la carga (motor), demanda una corriente de 0.6A, se concluye, que el regulador requiere de disipador de calor.

Cálculos del regulador con disipador.

$$\begin{aligned}P_{max} &\leq 7.5W \\(I_{max})(V_{in} - 12V) &\leq 7.5W \\I_{max} &\leq \frac{7.5W}{(V_{in} - 12V)} \\I_{max} &\leq \frac{7.5W}{(23.5V - 12V)} \\I_{max} &\leq 0.66A\end{aligned}$$

Finalmente, la corriente del regular está dentro de los parámetros usando un disipador de 10°C/W, pero como se recomienda usar el 60% o 70% de la corriente limite, se opta por usar un disipador con una resistencia mayor para que disipe más energía, de esta manera evitar el calentamiento del dispositivo.



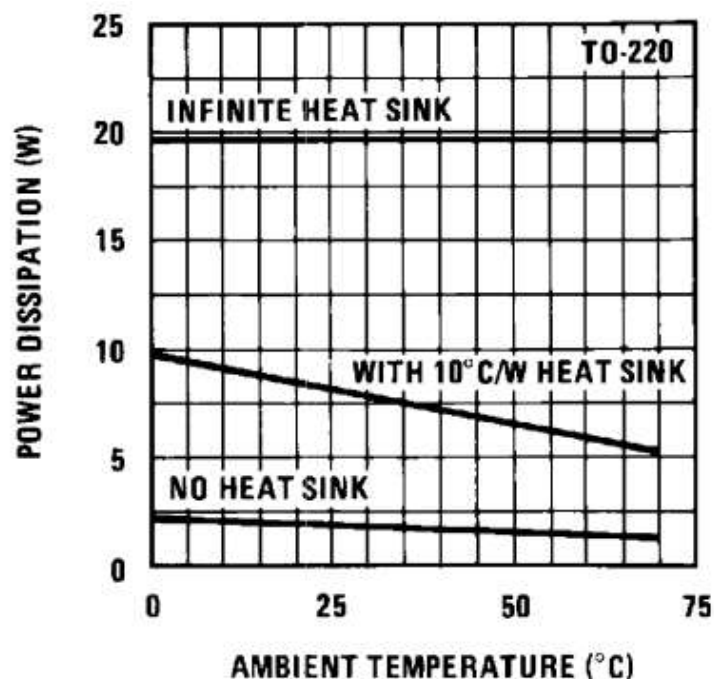


Figura 36. Disipación de energía promedio máxima. Fuente: Datasheet LM7812 Texas Instruments

Dimensionamiento de las fuentes de voltaje.

Para la fuente de 5V se determina el consumo de cada componente utilizado, de esta manera podemos determinar la corriente que necesita la fuente.

Tabla 9. Consumo de corriente de dispositivos de 5V. Fuente: Autor.

Cantidad	Dispositivo	Consumo de corriente (mA)
1	Raspberry Pi Pico	93
1	Atmega 328P	2.7
2	Max6675	3
1	MQ3	150
1	pH E-201-C	10
4	Relés 5V	600
4	1N4007	0.02
6	Leds	60
4	2N2222	17.2
1	LCD	25
1	FT232RL	50
Consumo total		1010.92



En la tabla 9 se evidencia el consumo total de los dispositivos que trabajan con un voltaje nominal de 5V, por lo que el consumo total es de 1.01092 A, de acuerdo a esto la fuente debe ser de 5V a más de 1 A, en este caso se implementó una fuente de 5V a 2 A, por lo que soporta el consumo de estos dispositivos.

Tabla 10. Consumo de corriente de dispositivos de 24V. Fuente: Autor.

Cantidad	Dispositivo	Consumo de corriente (A)
1	Electroválvula	0.3
1	Electroválvula	0.8
1	Agitador	0.6
1	Bomba	0.45
Consumo total		2.15

En la tabla 10 está el consumo de los actuadores que trabajan a 24V, el cual consumen una corriente de 2.15 A, la fuente implementada es de 24V a 2.5 A, cabe resaltar que los actuadores no van a estar todos encendidos al tiempo, por lo que el consumo para la fuente va hacer menor, sin embargo, se opta por colocar una fuente de que supere el consumo de corriente de todos los actuadores en simultaneo.

- **Raspberry Pi Pico:** Es el sistema embebido implementado para el control de todo el proyecto. En la figura 37 se muestra cómo se distribuyeron los pines para el control de actuadores, la lectura de los sensores y el enlace con la interfaz gráfica. En la Raspberry Pi Pico está conectado el sensor de pH, el sensor de nivel, el sensor de alcohol el sensor de temperatura del reactor, pines para controlar todos los actuadores, los indicadores leds, y la LCD; por otro lado, se usó un canal UART para comunicar la Raspberry Pi Pico con el microcontrolador ATMEGA328P para que este realice solo el controlador de temperatura. Es de destacar que la Raspberry Pi Pico es de doble núcleo y para que el sistema tuviera un mejor rendimiento se implementaron los dos.
- **ATMEGA328P:** Debido a la cantidad de pines conectados y la funcionalidad que tiene implementada la Raspberry Pi Pico se hace necesario usar otro microcontrolador para que este se encargue exclusivamente del controlador debido a que es una parte fundamental para realizar un buen proceso de fermentación anaerobia. A este microcontrolador se conectó un sensor de temperatura para que este identifique el valor actual que tiene el agua del



reactor. En la figura 38 se muestra las conexiones que se realizaron en este microcontrolador.

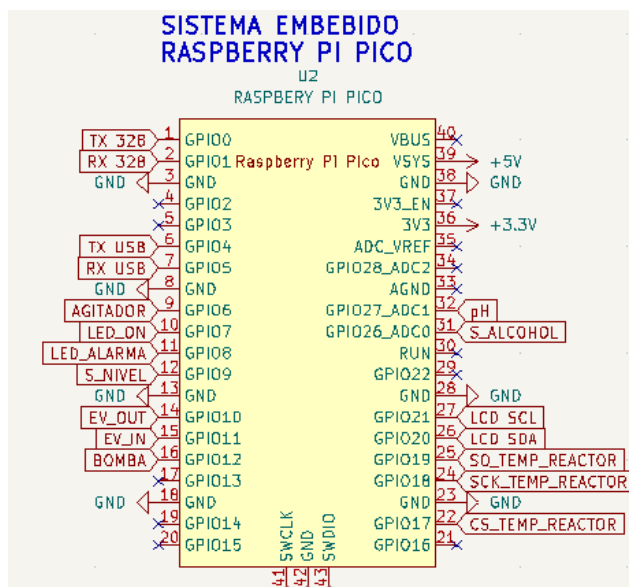


Figura 37. Conexiones Raspberry Pi Pico. Fuente: Autor

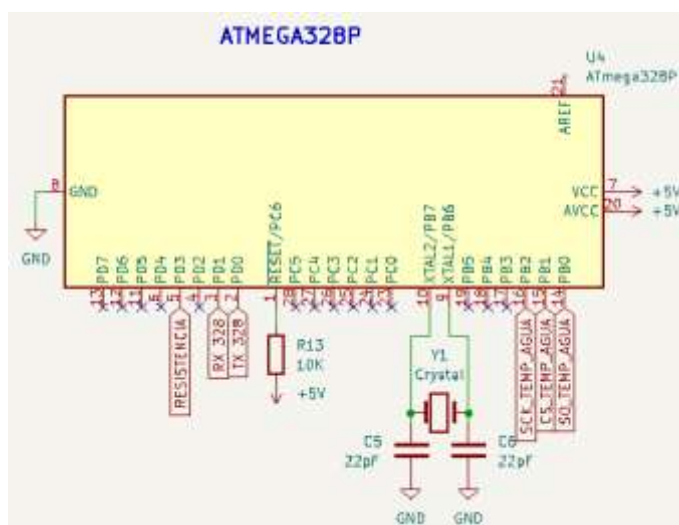


Figura 38. Conexiones ATMEGA328P. Fuente: Autor

- **Indicadores Leds:** En la figura 39 se evidencia las conexiones de los indicadores leds implementados para que el usuario identifique como esta el proceso y que actuadores estan encendidos.



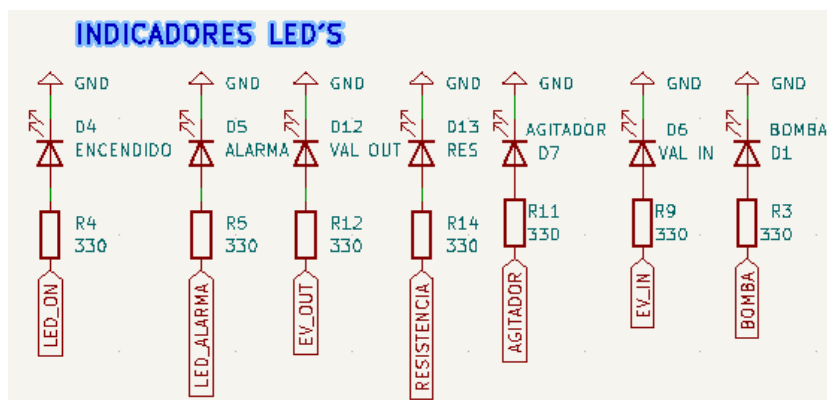


Figura 39. Conexión indicadores Leds. Fuente: Autor

- **Control de actuadores en DC:** La valvula de entrada, la electrobomba, y el motor son actuadores que trabajan con corriente directa, de esta forma se hace el control por medio de transistores y reles para hacer la activacion en el caso pertinente. En la figura 40 se evidencia las conexiones para el control de los actuadores en DC.



Figura 40. Conexión actuadores en DC. Fuente: Autor

El circuito es un interruptor accionado por un transistor con configuración de emisor común. Este transistor funcionará en corte y en saturación. Estos estados se definirán de acuerdo a la salida del pin digital de la Raspberry Pi Pico, de acuerdo a la programación desarrollada.

Para el correcto funcionamiento del interruptor compuesto por un transistor y relé, según el datasheet de la Raspberry Pi Pico la corriente máxima de salida de un pin digital es de 5 mA. En primer lugar, considerando que la Raspberry suministra 5V a los pines digitales y además la resistencia de la unión base emisor del transistor cero voltios por ley de ohm se deducen lo siguiente:

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5V}{5 \text{ mA}} = 1 \text{ k}\Omega$$

De acuerdo a esto, se implementa una resistencia de $1 \text{ k}\Omega$ y 0.25 W debido a que:

$$P = (I)^2(R) = (0.005)(1000) = 0.005 \text{ W}$$

Para el transistor se usa un 2N2222A que es de propósito general, y de acuerdo al datasheet del componente soporta una corriente máxima de 600 mA, lo cual, es ideal ya que el relé consume 71.4 mA. En la figura 41 se dibujan las corrientes para hallar los valores correspondientes.

Datos del relé

$$V = 5V$$

$$R = 70\Omega$$

$$I = 71.4 \text{ mA}$$

Datos transistor 2N2222A

$$hFE = 100$$

$$I_{Cmax} = 600 \text{ mA}$$

$$V_{BE} = 0.6V$$

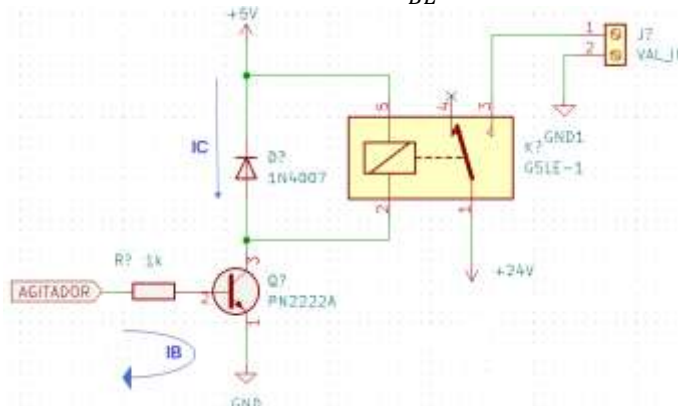


Figura 41. Esquemático circuito interruptor. Fuente. Autor.

Realizando leyes de Kirchhoff para hallar la corriente de base obtenemos lo siguiente:

$$-V_{in} + V_{RB} + V_{BE} = 0$$

$$-5V + (1K\Omega)I_B + 0.6V = 0$$

$$I_B = \frac{5V - 0.6V}{1K\Omega} = 4.3 \text{ mA}$$

Ahora se halla la corriente de colector también por leyes de Kirchhoff:



$$-V_{CC} + V_{RC} + V_{CE} = 0$$

$$-5V + (70\Omega)(71.4mA) + V_{CE} = 0$$

$$V_{CE} = 5 - (70\Omega)(71.4mA)$$

$$V_{CE} = 2mV$$

La figura 42 muestra la verificación de los cálculos obtenidos anteriormente mediante el programa de simulación Proteus.

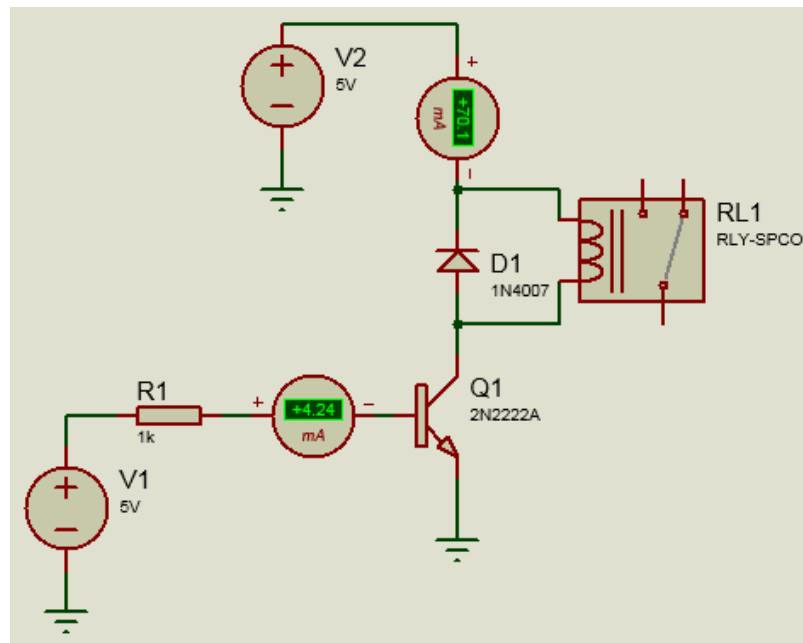


Figura 42. Verificación de los cálculos. Fuente: Autor.

De acuerdo al procedimiento anterior los 71.4 mA es la intensidad que pasa por la bobina del relé. Cuando el transistor está en corte la corriente por la bobina es nula, por consiguiente, el relé permanece normalmente cerrado. Cuando hay un 1 lógico en el pin de la Raspberry, el transistor entra en saturación por lo que en la bobina fluye una corriente generando un campo magnético el cual hace cambiar de estado de normalmente cerrado a normalmente abierto. Activándose la carga que se encuentra conectada al relé.

Algo importante a tener en cuenta es el uso de un diodo paralelo a la bobina del relé. Esto debido a que, en la bobina del relé, la corriente no puede tener un cambio bruscamente, de tal modo que, si el transistor entrara en corte, la corriente circularía instantáneamente de su valor máximo a cero, lo que provoca un pico de tensión que dañaría el circuito de control.



Para evitar este fenómeno se coloca un diodo de libre circulación, el cual, cuando el transistor pasa de saturación a corte este amortigua la intensidad de la bobina del relé, lo que provoca un paso gradual hasta cero de la corriente, se usó un diodo 1N4007.

Finalmente, como medida de seguridad a posibles desconexiones inesperadas del sistema, se coloca una resistencia de $10\text{ k}\Omega$ entre la base del transistor y tierra, esta conexión es lo que comúnmente se denomina resistencia Pull- Down, de esta manera se evita dejar un potencial desconocido en la base del transistor en caso de una desconexión. Si esta resistencia se omitiera, habría la posibilidad de que algún potencial desconocido en la base, tomara algún valor y este activara de forma inesperada el transistor, entrando en saturación y encendiendo alguno de los actuadores.

El esquemático final es el que se muestra en la figura 40, el cual tiene implementado la resistencia Pull-Down.

- **Sensores:** En la figura 43 se muestra las conexiones de los sensores para el control y monitoreo de las variables propias para realizar la fermentación anaerobia.

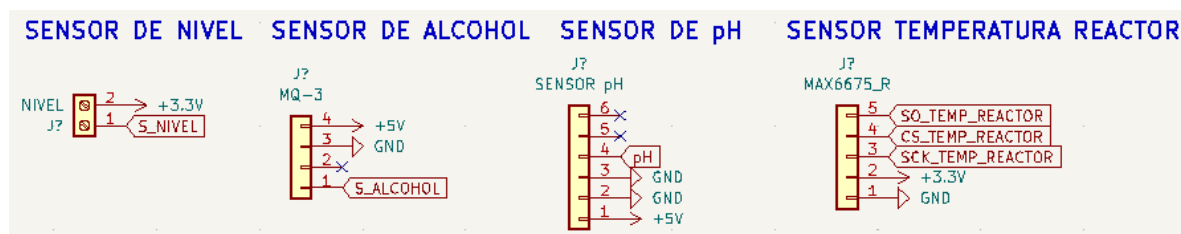


Figura 43. Conexión de sensores. Fuente: Autor

- **Convertidor USB a UART:** Debido a que la interfaz gráfica es para visualizarse en computadores, lo ideal es tener este conversor para que se pueda conectar a cualquier computador que tiene entradas USB. Este es conectado a un canal UART de los dos que cuenta la Raspberry Pi Pico. En la figura 44 se evidencia las conexiones para este convertidor al sistema embebido.



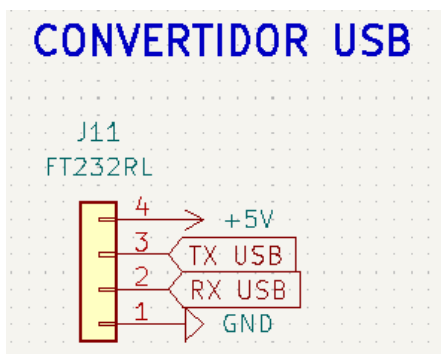


Figura 44. Conexión conversor USB a UART. Fuente: Autor

- **LCD:** Se implementa una LCD para visualizar los datos de los sensores en cualquier momento, generalmente el objetivo es tener siempre presente el estado del reactor en caso del fallar el flujo eléctrico y así no perder el proceso que se está llevando. Adicionalmente a eso se implementó un sistema de respaldo para evitar problemas de ausencia del flujo de energía eléctrica.

Debido a que el sistema embebido principal tiene la mayoría de pines ocupados, se opta por utilizar uno de los canales de comunicación I2C para conectar la LCD. En la figura 45 se muestra la conexión del módulo I2C para la LCD.

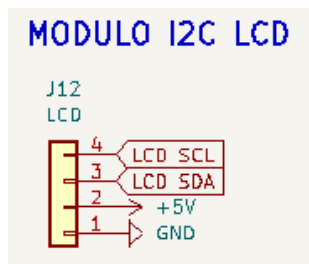


Figura 45. Conexión módulo I2C LCD. Fuente: Autor

3.2.2 Etapa de potencia

Se implementó una segunda placa la cual contiene las conexiones de actuadores que usan corriente alterna, como es la válvula de salida y la resistencia calefactora. El diseño de esta placa es para que quede acomodada encima de la placa de la figura 37 y así tenga una mejor disposición. En la figura 46 se muestra las conexiones para esta placa y así mismo el resultado final de la etapa de potencia.

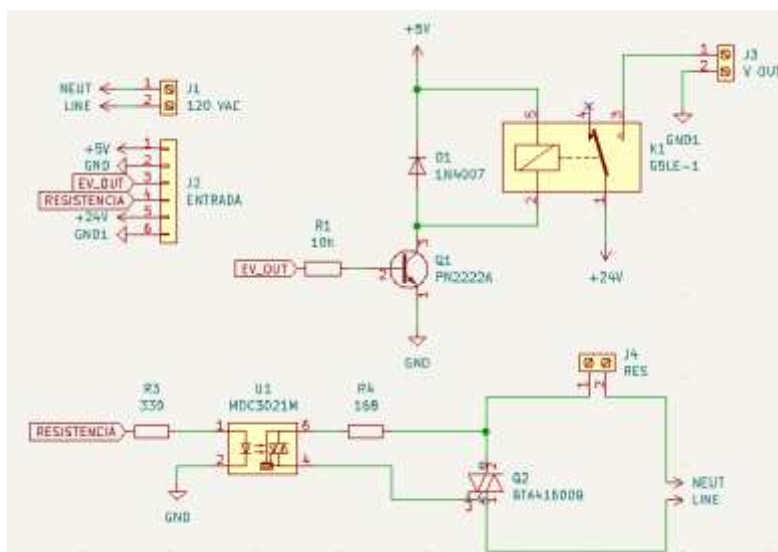


Figura 46. Conexión de la etapa de potencia. Fuente: Autor

Para que el Triac trabaje adecuadamente debemos saber si el dispositivos que implementamos funciona para que realice el trabajo que se necesite.

$$V_{RRM} = 600 \text{ V}$$

$$V_{sp} = 120V$$

$$VRRM > 2 * Vsp$$

$$\therefore 600V > 2 * (125V)?$$

¿ $600V > 250V$? $\rightarrow$ ¡SI!

Seguidamente calculamos la potencia promedio disipada mediante la siguiente formula.

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 \left[\frac{1}{T} \int_{t_H}^{\frac{T}{2}-t_H} V_{T(ON)} \left[\frac{V_{sp} - V_{T(ON)}}{R_L} \right] * \sin(120\pi t) dt \right]$$

Parámetros iniciales conocidos.

$$V_{sp} = 120V$$

$$V_{TON} = 1.5V$$

$I_L = 3.2\text{ A}$ Experimentalmente



Autor: Deyder Esteban Siabato Ruiz
Director: MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

$$R_L = \frac{120V}{3.2A} = 34.3\Omega$$

$$t_H = \frac{\sin^{-1} \left[\frac{I_L * R_L + V_{TON}}{V_{sp}} \right]}{120\pi \text{ rad/s}}$$

$$t_H = \frac{\sin^{-1} \left[\frac{(3.2A)(34.3\Omega) + 1.5V}{120V} \right]}{120\pi \text{ rad/s}}$$

$$t_H = 3.148mS$$

$$f = 60Hz \rightarrow T = \frac{1}{60Hz} = 0,01666s$$

$$\frac{T}{2} = \frac{0,01666s}{2} = 0,008333s = 8,3333 \times 10^{-3}s$$

$$\frac{T}{2} - t_H = 8.3333mS - 3.148mS$$

$$\frac{T}{2} - t_H = 5.193mS$$

Reemplazando estos valores en la integral se tiene:

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 \left[\frac{V_{T(ON)} \left[\frac{V_{sp} - V_{T(ON)}}{R_L} \right]}{T} * \int_{t_H}^{\frac{T}{2} - t_H} \text{sen}(120\pi t) dt \right]$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 \left[\frac{1.5V \left[\frac{120V - 1.5V}{34.3\Omega} \right]}{\frac{1}{60Hz}} * \int_{3.148mS}^{8.333mS} \text{sen}(120\pi t) dt \right]$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2 \left[\frac{1.5V \left[\frac{120V - 1.5V}{34.3\Omega} \right]}{\frac{1}{60Hz}} * \int_{3.148mS}^{8.333mS} \text{sen}(120\pi t) dt \right]$$

$$\overline{P_{Dmax}} = 2.258W$$



Esta es la potencia promedio máxima disipada por el triac para la resistencia calefactora, según el datasheet del triac el BTA41600B la potencia máxima que puede disipar es de 40W, por lo que es funcional para el sistema en cuestión.

Seguidamente necesitamos saber si el dispositivo requiere disipador de calor. Por lo que aplicamos la siguiente formula:

$$T_j - T_a = \overline{P_{Dmax}} * R_{\theta ja}$$

$$T_j = T_a + \overline{P_{Dmax}} * R_{\theta ja}$$

$$T_{jmax} = 150^{\circ}C$$

$$T_a = 35^{\circ}C$$

$$R_{\theta ja} = 55^{\circ}C/W$$

$$T_j = 35^{\circ}C + (2.258 W) * 55^{\circ}C/W$$

$$T_j = 159^{\circ}C$$

Como $T_j > T_{jmax} = 150^{\circ}C$ determinamos que el triac necesita de disipador de calor. Ahora se debe calcular el tipo de disipador que se le debe acoplar al triac que para este tipo de proyecto se decide un disipador de área grande, el cual, T_{jD} es del 48% de la T_{jmax} , por consiguiente:

$$T_{jD} = 0.48 * T_{jmax}$$

$$T_{jD} = 0.48 * 150^{\circ}C$$

$$T_{jD} = 72^{\circ}C$$

De la tabla 11 obtenemos el valor de $R_{\theta da}$ el cual, para un encapsulado TO3P que es el utilizado en el triac. Y este se usa con un contacto directo sin mica.

Tabla 11. Resistencia térmica encapsulado - disipador. Fuente: Blog Electrónica básica

RESISTENCIA TERMICA ENCAPSULADO - DISIPADOR				
TIPO DE ENCAPSULADO	CONTACTO DIRECTO SIN MICA	CONTACTO DIRECTO Y SILICONA	CONTACTO CON MICA	CONTACTO CON MICA SILICONA
TO.3P	0.4	0.2	2.1	1.5
TO.39	1	0.7	2	1.5
TO.126	1.4	1	1.4	1.3
TO.220	0.8	0.5	1.4	1.2
TO.202	0.8	0.5	1.4	1.2
TO.152	0.8	0.5	1.2	0.9
TO.90	0.5	0.3	1	0.7



TO.3P	0.4	0.2	2.1	1.5
TO.59	1.2	0.7	-	-
TO.117	2	1.7	-	-
SOT.48	1.8	1.5	-	-
DIA.4L	1.1	0.7	-	-
TO.66	1.1	0.65	-	-

$$R_{\theta jc} = 0.9^{\circ}\text{C}/\text{W} \text{ Datasheet}$$

$$R_{\theta cd} = 0.4^{\circ}\text{C}/\text{W} \text{ Tabla 11}$$

Finalmente, con la siguiente expresión podemos determinar el valor de la resistencia disipador ambiente, el cual, es la resistencia térmica que debe tener el disipador.

$$T_{jd} = T_a + \overline{P_{Dmax}} * \{R_{\theta jc} + R_{\theta cd} + R_{\theta da}\}$$

$$72^{\circ}\text{C} = 35^{\circ}\text{C} + 2.258 \text{ W} * \left\{30.9 + 0.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + R_{\theta da}\right\}$$

$$\frac{72^{\circ}\text{C} - 35^{\circ}\text{C}}{2.258 \text{ W}} = \left\{0.9 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + 0.4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + R_{\theta da}\right\}$$

$$16.386 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = 1.3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} + R_{\theta da}$$

$$16.386 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} - 1.3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}} = R_{\theta da}$$

$$R_{\theta da} = 15.086 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{W}}$$

Generalmente se debe aislar el circuito de potencia del circuito de control para evitar daños por voltajes y corrientes elevadas, la solución para ello es el uso de optotriac, el cual son dispositivos que activan una carga de alta potencia por medio de un led emisor de luz que, al activarse, pone en saturación el triac lo que hace conducir la corriente en la carga.

Para el circuito de la figura 46, se usó un MOC3021, en el datasheet del componente muestra el circuito para el correcto funcionamiento del mismo, donde se implementa una resistencia para el led, y otra para el triac.

En la entrada del MOC3021 se omite el uso de transistor, la corriente que circula por el led es dada por el datasheet que para este dispositivo es de 15 mA, para hallar la resistencia se usa la ley de ohm.



LED Trigger Current, Current Required to Latch Output (Main Terminal Voltage = 3 V(3))		I_{FT}				mA
MOC3021		—	8	15		
MOC3022		—	—	10		
MOC3023		—	—	5		

$$V = R * I$$

$$V = 5V$$

$$I = 15 \text{ mA}$$

$$R = \frac{V}{I} = \frac{5V}{15mA} = 333.3\Omega \approx 330\Omega$$

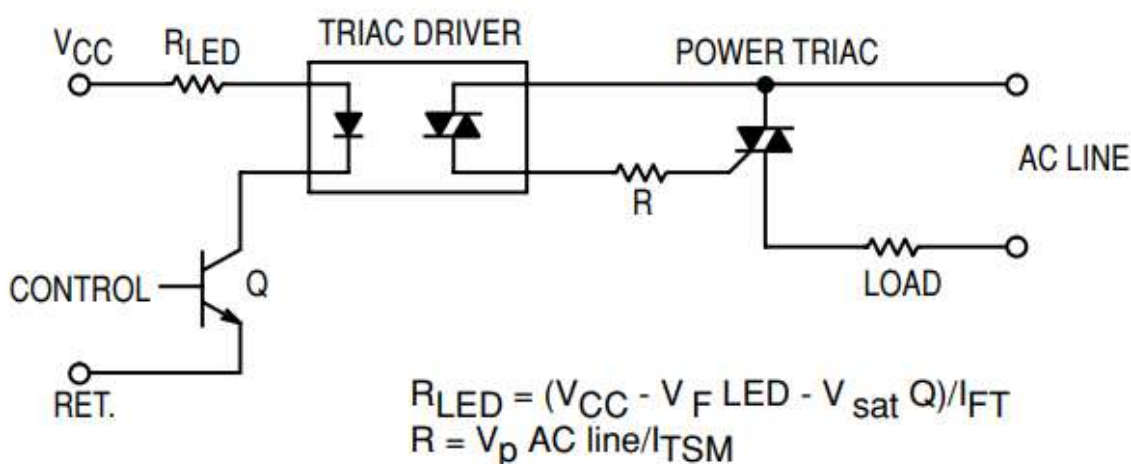


Figura 47. Circuito básico de control MOC3021. Fuente. Datasheet.

En la figura 47 el controlador triac está directamente conectado al terminal 2 del triac, R es una resistencia limitadora de corriente el cual debe restringir la corriente del controlador a un máximo de 1^a según el datasheet del dispositivo. Por consiguiente, $R = \frac{V_p AC}{I_{TSM}}$. La disipación de potencia de esta resistencia limitadora de corriente y el controlador triac es muy baja, ya que el triac transporta la corriente de carga tan pronto como la corriente a través del controlador y la resistencia limitadora de corriente alcance la corriente de activación del triac de potencia.

Ahora para hallar la resistencia R se usa la formula entregada por el datasheet la cual es:

$$R = \frac{V_p AC}{I_{TSM}}$$

$$I_{TSM} = 1A$$



$$V_{pAC} = V_{RMS}/0.707$$

$$V_{pAC} = \frac{120V}{0.707} = 169.73V$$

$$R = \frac{169.73V}{1A} = 169.73$$

3.2.3 Sistema de respaldo

Este sistema se implementa debido a que hay procesos de fermentación anaerobia que duran varias horas para obtener algún resultado, por ello, se implementa este sistema para que el proceso no se pierda en sus totalidad, anteriormente se explicó la importancia de la LCD y adicionalmente se implementó una batería y un inversor. La batería es cargada con una fuente lineal de 24V para que, a la hora de no existir flujo de energía eléctrica, la batería entre en funcionamiento encendiendo el inversor. En la figura 48, se muestra el diseño de la placa de la fuente. Cabe resaltar que en las acotaciones el proyecto está delimitado hasta la etapa del inversor. Para futuras actualizaciones se recomienda implementar la etapa de conmutación para que entre en funcionamiento el inversor.

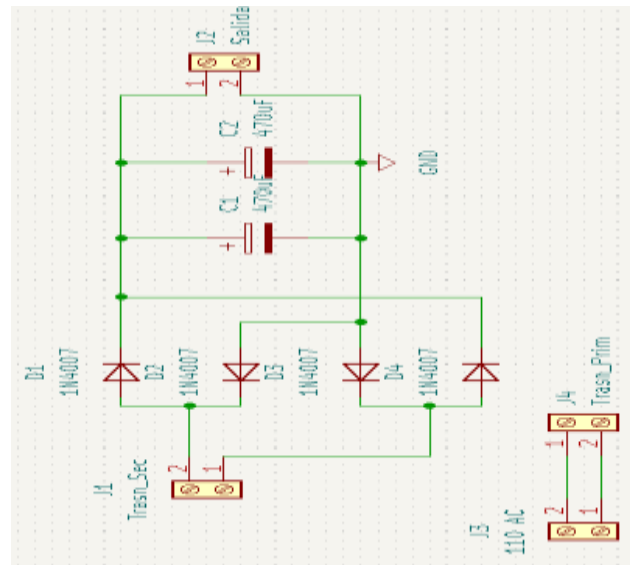


Figura 48. Conexión fuente de 24V. Fuente: Autor.

En la figura 49 está el resultado final del desarrollo de las placas de los circuitos, el cual esta almacenado en una caja que se diseñó para distribuir las salida de actuadores y sensores.



Figura 49. Resultado final sistema de automatización. Fuente: Autor

3.3 Puesta en funcionamiento

3.3.1 Datos de sensores

Se ingresó al recipiente una cantidad de 100g de azúcar junto con 1 litro de agua y se dejó calentar por 1 minuto, pasado este minuto se ingresó el inóculo para posteriormente sellar el autoclave, en la figura 50 se muestra el tipo de inóculo que se agregó para hacer el proceso de fermentación. La temperatura a la que se estableció el sistema fue de 30°C y en cierto momentos se realizaba la agitación de la mezcla. El proceso se realizó durante una hora.



Figura 50. Inoculo para la fermentación anaerobia. Fuente: Autor.

En la figura 51 se evidencia los datos de los sensores que se tomaron durante el tiempo en que se puso en funcionamiento el reactor, el cual muestra el comportamiento de temperatura en cuanto al reactor y al agua que recirculaba en el recipiente, así mismo el nivel de pH y el porcentaje de alcohol que se generaba.

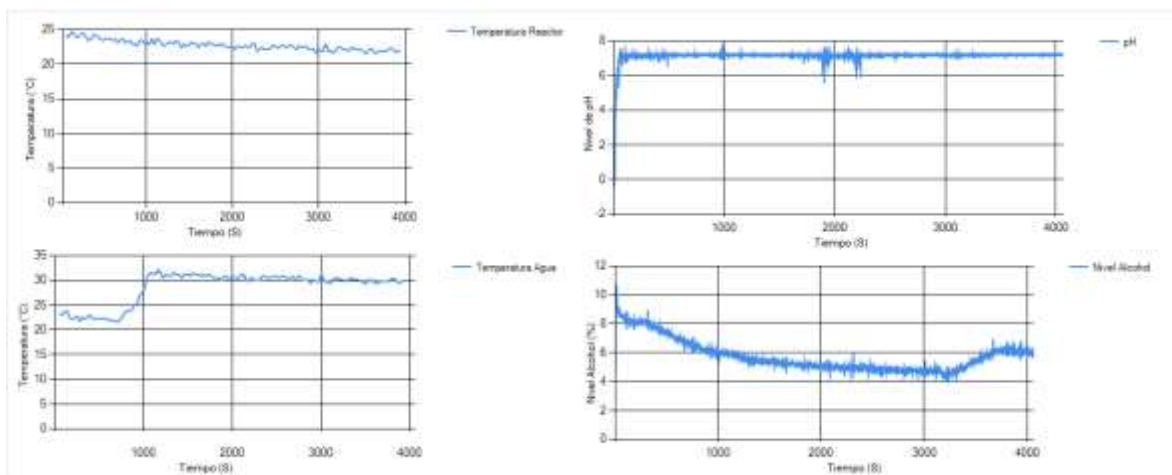


Figura 51. Datos de los sensores. Fuente: Autor.

De la figura 51 la gráfica superior izquierda muestra la temperatura del reactor, esta es un poco baja a comparación a la temperatura del agua debido a que el reactor tiene unas dimensiones amplias y por tanto la temperatura se demora en distribuirse en todo el reactor. Cabe resaltar que el sensor está ubicado en la parte superior del

reactor, por lo que existe una diferencia de temperatura a la del sensor que está cerca de la resistencia calefactora.

La gráfica inferior izquierda muestra los datos del sensor de temperatura del agua, la cual es la que indica el usuario por medio de la interfaz gráfica y en consecuencia del controlador PID que se diseñó se mantiene en ese valor de temperatura que se indicó anteriormente que es de 30°C.

Seguidamente está la gráfica superior derecha en la cual monitorea el valor de pH del líquido que está dentro del reactor, generalmente este valor de pH oscilar entre 6.5 y 7.5 la cual es un valor ideal para el proceso de fermentación. Si existirá un cambio de pH se ingresan sustancias químicas para poder controlarlas, pero este proceso lo realizan las personas que estén realizando el proceso de fermentación.

Finalmente, en la gráfica inferior derecha está el nivel de alcohol que se encuentra dentro del reactor, la gráfica inicialmente muestra valores alrededor del 8% y 10% y luego desciende progresivamente hasta estabilizarse en un valor entre 4% y 5%, está pendiente negativa se produce debido a que el sensor mq3 al iniciar el proceso comienza a calentarse, pasado unos segundos el sensor se estabiliza y comienza a tomar los datos adecuados del ambiente. Aproximadamente pasados 50 minutos comienza a ascender el nivel de alcohol hasta un 6% lo que significa que si se genera alcohol dentro del reactor y esto es durante el transcurso de una hora.



PRESUPUESTO ECONOMICO

En la tabla 11 se detalla el presupuesto que se tuvo para el desarrollo del proyecto.

Tabla 12. Presupuesto económico. Fuente: Autor.

Cantidad	Concepto	Valor unidad	Valor total
1	Sensor de pH	\$ 115.000	\$ 115.000
1	Sensor de alcohol	\$ 16.000	\$ 16.000
2	Modulo max6675	\$ 18.000	\$ 36.000
1	Termocupla tipo K	\$ 15.000	\$ 15.000
1	Raspberry Pi Pico	\$ 35.000	\$ 35.000
1	Atmega 328P	\$ 16.000	\$ 16.000
1	L7812	\$ 3.000	\$ 3.000
1	Fuente de 24V	\$ 65.000	\$ 65.000
4	Manguera ½" (metro)	\$ 2.500	\$ 10.000
1	Válvula de pie	\$ 16.000	\$ 16.000
1	Recipiente para almacenar el agua	\$ 14.000	\$ 14.000
1	Adaptador T de 3/8"	\$ 4.000	\$ 4.000
4	Adaptadores 3/8"	\$ 1.000	\$ 4.000
2	Llave de paso de 1/2"	\$ 2.500	\$ 5.000
1	Codo de 3/8"	\$ 2.000	\$ 2.000
2	Reducción de 1/2" a 3/8"	\$ 2.000	\$ 4.000
3	Adaptadores 3/8" para manguera de media	\$ 1.500	\$ 4.500
1	Adaptador 1/2" para manguera	\$ 2.500	\$ 2.500
1	MDF para caja	\$ 22.000	\$ 22.000
4	Relé 5V	\$ 2.900	\$ 11.600
11	Bornera 2 pines	\$ 700	\$ 7.700
2	Capacitor electrolítico	\$ 300	\$ 600
4	Capacitores cerámicos	\$ 200	\$ 800
1	Oscilador de cuarzo 16 MHz	\$ 600	\$ 600
1	PCB 20x20	\$ 8.000	\$ 8.000
1	Ácido férrico	\$ 3.000	\$ 3.000
6	Tornilla de 1 pulgada	\$ 600	\$ 3.600
3	Tornillo de 3 Pulgadas	\$ 800	\$ 2.400
20	Tuercas 3 mm	\$ 100	\$ 2.000
1	Riel para break	\$ 2.000	\$ 2.000
8	Cable conexiones (metro)	\$ 3.000	\$ 24.000
7	Indicadores leds	\$ 300	\$ 2.100



**AUTOMATIZACIÓN DE UN PROCESO QUÍMICO DE FERMENTACIÓN ANAEROBIA CON UN
REACTOR UBICADO EN LOS LABORATORIOS DE INGENIERÍA QUÍMICA DE LA
UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

4	Termo encogible	\$ 2.000	\$ 8.000
1	Transformador	\$ 35.000	\$ 35.000
1	Triac BTA41600B	\$ 8.000	\$ 8.000
1	Disipador para regulador	\$ 2.500	\$ 2.500
1	Disipador para triac	\$ 6.000	\$ 6.000
4	Transistores 2n2222	\$ 300	\$ 1.200
7	Diodos	\$ 350	\$ 2.450
4	Regletas	\$ 2.000	\$ 8.000
1	Modulo I2C LCD	\$ 7.800	\$ 7.800
1	Pantalla LCD 16x2	\$ 17.000	\$ 17.000
1	Moc3021	\$ 3.000	\$ 3.000
1	Inoculo	\$ 15.000	\$ 15.000
1	Interruptor	\$ 1.900	\$ 1.900
1	Sensor de nivel tipo flotador	\$ 11.000	\$ 11.000
		Total	\$ 584.250



Autor: Deyder Esteban Siabato Ruiz
Director: MsC. Carlos Arturo Vides Herrera

CONCLUSIONES

El control y supervisión de sistemas ayudan a tener una perspectiva en tiempo real del comportamiento de los equipos y del mismo modo presentando información de la planta, por consiguiente, las personas a cargo pueden tomar acciones en cualquier momento dependiendo de las necesidades que se requieran.

En este proyecto se realizó la automatización del proceso químico de fermentación anaerobia mediante dispositivos embebidos programados con software de acceso libre, el cual le permite al usuario visualizar los datos de temperatura, pH y alcohol y así mismo controlar la variable de temperatura y la agitación para homogenizar la mezcla que se está procesando. La temperatura es controlada mediante válvulas que realizan una recirculación del agua almacenada en un recipiente para evitar desperdicios del líquido potable.

En la toma de datos en lazo abierto para el diseño del controlador, se puso en funcionamiento el sistema, pero no se tuvo éxito al primer momento de sacar la función de transferencia con Matlab, por lo que fue necesario tomar varias veces los datos y colocar en la alimentación del sensor dos capacitores cerámicos para que la medición fuera más exacta. De esta manera, al ingresar los datos a Matlab la función de transferencia fue más aproximada con los datos obtenidos manualmente.

Para realizar el control y registrar los datos de los sensores se acondicionaron etapas para que los sensores tomaran lecturas coherentes de acuerdo a la variable de medición.

El diseño de la interfaz gráfica se desarrolló con la garantía de funcionar por un largo periodo de tiempo y así mismo poder utilizar la aplicación en cualquier computador, ya que se entrega un ejecutable de la interfaz gráfica. Este diseño permite la visualización de las variables de medición, el estado de los actuadores, un botón de parada de emergencia y un botón para almacenar los datos del proceso que se esté realizando, de este modo los estudiantes puedan analizar el comportamiento de las variables en el proceso de fermentación anaerobia.

La automatización del proceso es para contribuir a las prácticas de los estudiantes de ingeniería química de la universidad de Pamplona, por esta razón se realiza la puesta en funcionamiento del sistema para verificar si cumple con el objetivo de generar bioetanol, donde de acuerdo a los resultado el reactor es funcional para el tratamiento de sustratos.



OBSERVACIONES Y RECOMENDACIONES

Para iniciar el sistema se debe descargar la aplicación por lo que es indispensable tener acceso a internet a la hora de instalar la aplicación, luego de estar instalada la interfaz gráfica esta funciona sin tener conexión a la red.

Para el correcto funcionamiento se recomienda conectar inicialmente el conversor USB – UART y seguidamente encender el sistema, sino generará error. Para el manejo de la interfaz existe un paso a paso de cómo se debe usar.

Finalmente hacer uso del mantenimiento preventivo para los actuadores y realizar periódicamente la calibración de los sensores de pH y alcohol, ya que estos con el tiempo y el uso, se van descalibrando. En este documento se encuentra la forma de calibración de estos dispositivos.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. L. Shuler y F. Kargi, Bioprocess engineering basic concepts, Turkey: Prentice Hall PTR, 2002.
- [2] U. Rasche, Bioreactors and Fermentors—Powerful Tools for Resolving Cultivation Bottlenecks, Germany: Eppendorf SE.
- [3] «China apuesta por el carbón ante la escasez de energía,» El estímulo, 19 Septiembre 2022. [En línea]. Available: <https://elstimulo.com/elinteres/energia/2022-09-19/china-apuesta-por-el-carbon-ante-la-escasez-de-energia/>. [Último acceso: 30 Septiembre 2022].
- [4] bp, Reviewing World Energy Data for 70 years, London: bp Statistical Review of World Energy 2021, 2021.
- [5] G. Pantaleo y L. Rinaudo, Ingeniería de Software, Buenos Aires : Alfaomega, 2015.
- [6] P. Vannini y M. Rodriguez, «Sustitución de importaciones de Software,» Academia, Argentina, 2013.
- [7] E. R. Daza Bohorquez, Diseño de un sistema de monitoreo y control basado en el software RMTC aplicado al proceso de biodigestion anaerobica, Pamplona: Universidad de Pamplona, 2012.
- [8] D. G. López Vanegas, Diseño e implemetación de un sistema de supervisión y control basado en el sotfware LabVIEW para el proceso de un biorreactor, Pamplona: Universidad de Pamplona, 2019.
- [9] E. López Pérez, *Automatización de un biorreactor piloto*, Oaxaca: Universidad Tecnológica de la Mixteca, 2013.
- [10] C. López, F. Martínez y O. Paredes, «Automatización de un proceso de biodigestión Anaeróbica,» *Revista cubana de ciencias informáticas*, vol. 10, nº Especial UCIENCIA, pp. 1-16, 2016.
- [11] I. V. Ordoñez Ortega, I. Rivera Mariño y E. Franco Mejía, «Propuesta de automatización de un proceso de producción de inóculo de levadura a escala industrial para la producción de etanol,» *12+D*, vol. 13, nº 1, pp. 40-48, 2013.



- [12] W.-Y. Sean, Y.-Y. Chu, L. Lorensia Mallu, J.-G. Chen y H.-Y. Liu, «Energy consumption analysis in wastewater treatment plants using simulation and SCADA system: Case study in northern Taiwan,» *Journal of Cleaner Production*, nº 276, 2020.
- [13] K. Ostrem, Greening waste: anaerobic digestion for treating the organic fraction of municipal solid wastes, Nueva York: Columbia University, 2004.
- [14] L. Constanza Corrales , D. M. Antonilez Romero, J. Bohórquez Macías y M. Corredor Vargas, «Bacterias anaerobias: procesos que realizan y contribuyen a la sostenibilidad de la vida en el planeta,» *NOVA*, vol. 13, nº 23, pp. 55-81, 2015.
- [15] G. I. Puerta Quintero, Fundamentos del proceso de fermentación en el beneficio del café, Colombia: Centro Nacional de Investigaciones de Café, 2010.
- [16] N. Martí Ortega, Phosphorus Precipitation in Anaerobic Digestion Process, Florida: Dissertation.com, 2006.
- [17] E. V. Moreno Rivera y D. F. Vanegas Gutierrez, Diseño y construcción de un biorreactor esterilizable y de bajo costo para el estudio de crecimiento de microorganismos, Colombia : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2017.
- [18] D. Bailey y E. Wrigth, Practical SCADA for Industry. IDC Technologies, Great Britain: ElSevier, 2003.
- [19] J. Gómez Sarduy, Temas especiales de instrumentación y control, Cuba: Empresa Editorial Poligráfica Félix Varela, 2008.
- [20] G. Galeano, Programación de sistemas embebidos en C, Mexico: Alfaomega, 2009.
- [21] R. Cayssials, Sistemas embebidos en FPGA, Argentina: Alfaomega, 2014.
- [22] «Raspberry Pi,» Raspberry Pi Pico, [En línea]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>. [Último acceso: 14 Octubre 14].
- [23] «Arduino.Cl,» [En línea]. Available: <https://arduino.cl/>. [Último acceso: 14 Octubre 2022].



- [24] «Cypress Embedded in Tomorrow,» PSoC 5LP: CY8C58LD, [En línea]. Available: <https://www.infineon.com/cms/en/product/microcontroller/32-bit-psoc-arm-cortex-microcontroller/32-bit-psoc-5-lp-arm-cortex-m3/>. [Último acceso: 14 Octubre 2022].
- [25] «ESPRESSIF SYSTEMS,» ESP32, [En línea]. Available: <https://www.espressif.com/en>. [Último acceso: 14 Octubre 2022].
- [26] E. Mandado Pérez, P. Mariño Espiñera y A. Lago Ferreiro, Instrumentación Electronica, España: Marcombo, 1995.
- [27] A. Ramón Pallás, Sensores y acondicionamiento de la señal, Marcombo, 2001.
- [28] D. Aranda , Electrónica: Técnicas digitales y microcontroladores., Buenos Aires : Manuales USERS, 2014.
- [29] L. G. Corona Ramírez , G. Abarca Jiménez y J. Mares Carreño, Sensores y Actuadores, Aplicaciones con Arduino, Mexico: Patria S.A, 2014.
- [30] V. Group, «Direct Industry,» Compare Connect Buy, 2022. [En línea]. Available: <https://www.directindustry.es/fabricante-industrial/>. [Último acceso: 26 Octubre 2022].
- [31] L. Llamas, «DETECTOR DE GASES CON ARDUINO Y LA FAMILIA DE SENSORES MQ,» Ingeniería, informática y diseño , 21 Octubre 2016. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/arduino-detector-gas-mq/>. [Último acceso: 26 Octubre 2022].
- [32] J. S. S.A., « Lider muncial en válvulas a selenoide y controles de nivel,» [En línea]. Available: <http://www.jefferson.com.ar/en/down/Catalogo%20Neumatica-Hidraulica.pdf>. [Último acceso: 12 Octubre 2022].
- [33] «Cómo funcionan las bombas de agua,» EUROINNOVA , [En línea]. Available: <https://www.euroinnova.edu.es/blog/como-funcionan-las-bombas-de-agua>. [Último acceso: 12 Octubre 2022].
- [34] R. P. Ltd, RP2040 Datasheet A microcontroller by raspberry pi, Synopsys, Inc, 2022.



- [35] S. Priyanka, D. Sakshi, M. Shruti y S. Smriti, «Alcohol Detection based Engine Locking System using MQ-3 Sensor,» *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. IV, nº 4, pp. 979-981, 2017.
- [36] e.-. G. M. Central, «PH Sensor E-201-C Technical Manual Rev,» [En línea]. Available: <https://www.e-gizmo.net/oc/kits%20documents/PH%20Sensor%20E-201-C/PH%20Sensor%20E-201-C.pdf>. [Último acceso: 27 Octubre 2022].
- [37] Microsoft, «Visual Studio | Visual Basic,» 6 Junio 2022. [En línea]. Available: <https://opdhsblobprod01-secondary.blob.core.windows.net/contents/b7723308076447179610ee123efb2587/9343b99deb4d8b259ee9b7d869a145cd?skoid=2d004ef0-5468-4cd8-a5b7-14c04c6415bc&sktid=975f013f-7f24-47e8-a7d3-abc4752bf346&skt=2022-10-29T03%3A01%3A40Z&ske=2022->. [Último acceso: 29 Octubre 2022].
- [38] E. Medina, «Thonny IDE Python,» MuyLinux, 19 Febrero 2018. [En línea]. Available: <https://www.muylinux.com/2018/02/19/thonny-ide-python/>. [Último acceso: 31 Octubre 2022].

