

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño de un sistema de control automático
de temperatura para un biorreactor semicontinuo**

**Andrés Felipe Ortiz Espinoza
Gal Caetano Pinto Guerrero**

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 21 de diciembre de 2023

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE CALIFICACIÓN
DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

Diseño de un sistema de control automático de temperatura para un biorreactor
semicontinuo

Andrés Felipe Ortiz Espinoza
Gal Caetano Pinto Guerrero

Nombre del profesor, Título académico

**José Álvarez B., PhD
Óscar Camacho, PhD**

Quito, 19 de diciembre de 2023

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En la Universidad San Francisco de Quito se cuenta con un biorreactor semi-continuo cuya construcción se culminó en el 2018, sin embargo, existen oportunidades para mejorar el comportamiento de la temperatura en el interior del recipiente. El propósito de este trabajo es el de diseñar un sistema de control automático en el biorreactor para la regulación de la temperatura. Por esto, se realizó un análisis preliminar del biorreactor, para lo que se identificaron las falencias del proceso y se propusieron distintos rediseños. Adicionalmente, mediante una matriz de decisiones se escogió el diseño más apropiado en base al contexto en el cuál este trabajo se desarrolló, además, se llevó a cabo una estimación de costos para su implementación a futuro. Posteriormente, se logró a cabo un modelamiento del sistema mediante balances de materia y energía, con el cuál se realizó la sintonización y validación de un controlador PID, a través de simulación en Simulink, Matlab. Finalmente, se comparó el sistema actual con el modelo con control de temperatura mediante el consumo de azúcar y producción de bioetanol, que experimentalmente dieron una concentración inicial de 92 g/L y final de 58 g/L, respectivamente. De esta forma se logró la validación del modelo con control automático. En conclusión, la simulación de control automático para la temperatura en el biorreactor mostró que con la implementación de estos elementos se puede reducir el tiempo de operación hasta 4 horas, al igual que se la concentración final de producto se puede ver afectada por el control de forma positiva. Con el modelo se pueden realizar estudios posteriores de distintos diseños y su posible implementación.

Palabras clave: biorreactor, control, temperatura, simulación, diseño.

ABSTRACT

At the San Francisco University of Quito there is a semi-continuous bioreactor whose construction was completed in 2018, however, there are opportunities to improve the temperature behavior inside the container. The purpose of this work is to design an automatic control system in the bioreactor for temperature regulation. For this reason, a preliminary analysis of the bioreactor was carried out, for which the shortcomings of the process were identified, and different redesigns were proposed. Additionally, through a decision matrix, the most appropriate design was chosen based on the context in which this work was developed, and a cost estimate was carried out for its future implementation. Subsequently, system modeling was achieved through material and energy balances, with which the tuning and validation of a PID controller was carried out, through simulation in Simulink, Matlab. Finally, the current system was compared with the model with temperature control through sugar consumption and bioethanol production, which experimentally gave an initial concentration of 92 g/L and final concentration of 58 g/L, respectively. In this way, the validation of the model with automatic control was achieved. In conclusion, the simulation of automatic control for the temperature in the bioreactor showed that with the implementation of these elements the operation time can be reduced up to 4 hours, just as the final product concentration can be affected by the control of Positive way. With the model, subsequent studies of different designs and their possible implementation can be carried out.

Keywords: bioreactor, control, temperature, simulation, design.

1. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO	12
1.1 Antecedentes	12
1.1.1 Importancia de los bioprocesos.....	12
1.1.2 Procesos de digestión enzimática.....	13
1.1.3 Transferencia de calor.....	13
1.1.4 Control automático de la temperatura.....	14
1.1.5 Estudio de los controladores.....	15
1.1.6 Biorreactor actual.....	16
1.2 Propuesta del proyecto	17
2. ANÁLISIS PRELIMINAR DEL BIORREACTOR	17
2.1 Fluctuación de la temperatura en el tanque de calentamiento sin reflujo	17
2.3 Cromatografía de gases para medición de alcohol	19
3. DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA DEL BIORREACTOR	20
3.1 Propuestas de diseño	21
3.2 Matriz de decisión	21
3.3 Propuesta económica	22
4. CONTROL DEL PROCESO	22
4.1 Control del diseño para la regulación de la temperatura	22
4.2 Modelado del proceso mediante balances de materia y energía	23
4.3 Validación del sistema de control automático	24
5. RESULTADOS Y DISCUSIONES	24
5.1 Análisis preliminar del sistema de regulación de temperatura del biorreactor	24
5.2 Diseño del nuevo sistema de regulación de temperatura para el biorreactor	27

5.3	Aplicación de la matriz de decisiones	28
5.4	Presupuesto de implementación	29
5.5	Control del diseño propuesto	30
5.6	Modelado del proceso mediante balances de materia y energía	33
5.7	Validación del sistema de control automático	36
6.	CONCLUSIONES	39
7.	REFERENCIAS	40
8.	ANEXOS	42
8.1	ANEXO A. Diseños propuestos	42
8.2	ANEXO B. Matriz de decisiones	46
8.3	ANEXO C. Catálogo de precios	47
8.4	ANEXO D. Parámetros de simulación	50
8.5	ANEXO E. Diagramas de bloques de las ecuaciones configuradas en Simulink	51

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Azúcares totales y bioetanol obtenido.	26
Tabla 2.	Precio de equipos y elementos de control.....	29

ÍNDICE DE TABLAS EN ANEXOS

Tabla B 1.	Matriz de decisiones de diferentes propuestas de diseño.	46
Tabla C 1.	Precios de equipos por catálogo del 2023 para Ecuador.....	47
Tabla D 1.	Parámetros de simulación	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. a) Biorreactor y sistema de calentamiento actual. b) Curva de temperatura obtenida experimentalmente del sistema de calentamiento actual.	25
Figura 2. Diseño obtenido mediante matriz de decisiones.	27
Figura 3. Controlador PID en Simulink.....	31
Figura 4. Diagrama de programación Ladder.....	32
Figura 5. Comparación de temperatura en el biorreactor del sistema modelado con control y el sistema experimental actual sin control.	37
Figura 6. Acoplamiento del modelo cinético en el consumo de azúcares.	38

Figura 7. Concentración de bioetanol a diferentes temperaturas mediante simulación con controlador automático y en el biorreactor sin controlador.	38
--	----

ÍNDICE DE FIGURAS EN ANEXOS

Figura A 1. Diseño propuesto 1.	42
Figura A 2. Diseño propuesto 2.	42
Figura A 3. Diseño propuesto 3.	43
Figura A 4. Diseño propuesto 4.	43
Figura A 5. Diseño propuesto 5.	44
Figura A 6. Diseño propuesto 6.	44
Figura A 7. Diseño propuesto 7.	45
Figura A 8. Diseño propuesto 8.	45
Figura E 1. Diagrama de bloques en Simulink - Reactor.	51
Figura E 2. Diagrama de bloques en Simulink - Tanque de Pre calentamiento.	52
Figura E 3. Diagrama de bloques en Simulink - Resistencia eléctrica.	52
Figura E 4. Diagrama de bloques en Simulink - Tasa de crecimiento celular.	53
Figura E 5. Diagrama de bloques en Simulink - Chaqueta.	53
Figura E 6. Diagrama de bloques en Simulink - Concentración de Oxígeno en equilibrio en la fase líquida.	54
Figura E 7. Diagrama de bloques en Simulink - Concentración de Oxígeno en la fase líquida.	54

Figura E 8. Diagrama de bloques en Simulink - tasa de consumo del oxígeno.	55
Figura E 9. Diagrama de bloques en Simulink – Curva de crecimiento de biomasa.	55
Figura E 10. Diagrama de bloques en Simulink - Producción de bioetanol.....	56
Figura E 11. Diagrama de bloques en Simulink - Consumo de glucosa.	56
Figura E 11. Diagrama de bloques en Simulink - Coeficiente de transferencia de masa.....	57

1. INTRODUCCIÓN DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

1. Importancia de los bioprocesos.

Los bioprocesos se han convertido en una piedra angular de la industria biotecnológica, desempeñando un papel crucial en la obtención de productos de interés, como el bioetanol, a partir de fuentes biológicas. En este contexto, el control automático de la temperatura y su regulación adecuada son factores esenciales para garantizar el éxito y la eficiencia de estos procesos (Camacho et al., 2008). El bioetanol, un biocombustible de gran importancia debido a su capacidad para reducir las emisiones de carbono, se obtiene mediante la fermentación de materiales ricos en azúcares, como los cultivos de biomasa o subproductos agrícolas. La temperatura es un factor crítico que influye directamente en la actividad de los microorganismos y enzimas responsables de la conversión de azúcares en etanol (Nagy, 2007). Por lo tanto, la implementación de sistemas de control automático de la temperatura se convierte en un componente esencial para mantener las condiciones óptimas de fermentación, maximizar la producción de bioetanol y garantizar la calidad del producto final.

La biotecnología ha revolucionado la industria a través de la implementación de bioprocesos, sistemas de producción basados en microorganismos, células vegetales o animales, que utilizan principios biológicos y químicos para obtener productos de interés. Estos bioprocesos han demostrado ser esenciales en diversas industrias, desde la farmacéutica y la alimentaria hasta la energética y la química (Ortega et al., 2017). Por ejemplo, en la industria farmacéutica, los bioprocesos se emplean para la producción de medicamentos biotecnológicos, como insulina y anticuerpos monoclonales. En la industria alimentaria, se utilizan para fermentar

alimentos y bebidas, como el yogur y la cerveza. Además, en la búsqueda de alternativas sostenibles y renovables, se ha destacado la obtención de bioetanol a partir de almidón obtenido de tubérculos, como un ejemplo de bioproceso en la industria energética (Rosales, 2019). Por lo tanto, la versatilidad y relevancia de los bioprosos en la producción de una amplia gama de productos de alto valor, promoviendo la eficiencia y la sostenibilidad en las industrias modernas debe ser implementada y estudiada para optimizar a los mismos.

2. Procesos de digestión enzimática.

El almidón es un polisacárido que permite el almacenamiento de energía en forma de carbohidratos en las plantas; donde, se encuentran compuestos por cadenas largas de monosacáridos (azúcares simples) unidos por enlaces conocidos como glucosídicos. Por lo mismo, para la obtención de bioetanol a partir del almidón se requiere un tratamiento de hidrólisis del mismo, el cual consiste en el rompimiento de los enlaces glucosídicos para formar azúcares más simples y puedan ser utilizados por los microorganismos en la fermentación para obtener bioetanol (Castaño et al., 2011). El proceso de hidrólisis se puede llevar a cabo químicamente, mediante enzimas o una combinación de ambas; en el caso de la hidrólisis enzimática, se realiza una licuefacción y una sacarificación en donde se utilizan las enzimas α -amilasa y glucoamilasa respectivamente (Nielsen et al., 2012).

3. Transferencia de calor.

En los bioprosos, la transferencia de calor es esencial para mantener las condiciones óptimas de temperatura en el interior de los biorreactores, donde se llevan a cabo las reacciones biológicas y químicas. La transferencia de calor se logra principalmente a través de dos mecanismos: conducción y convección. La conducción se refiere a la transferencia de calor a

través de un material sólido, como las paredes del biorreactor, y puede ser eficiente en la mayoría de los casos (Bird et al., 2002). Sin embargo, la transferencia de calor por convección, que implica la transferencia de calor a través de un fluido, puede verse limitada por la viscosidad del medio de cultivo y la formación de capas límite térmicas que reducen la velocidad de transferencia al igual que la sustancia o líquido utilizado (Bird et al., 2002). Estas limitaciones pueden provocar gradientes de temperatura no deseados en el biorreactor, lo que afecta negativamente la actividad de los microorganismos y enzimas utilizadas durante el proceso. Para superar estas limitaciones en la transferencia de calor por convección, se pueden aplicar estrategias como la optimización del diseño del biorreactor para promover una mejor circulación y también tener una agitación adecuada. Además, el uso de intercambiadores de calor eficientes y la monitorización constante de la temperatura ayudan a garantizar una transferencia de calor efectiva (Rommens, 2019).

4. Control automático de la temperatura.

Por otro lado, el control automático en los procesos industriales ha sido un avance fundamental a lo largo de la historia de la ingeniería y la producción industrial. Desde los primeros sistemas de regulación de temperatura en la Revolución Industrial hasta la actualidad, la implementación de sistemas de control automático ha permitido un nivel sin precedentes de precisión, eficiencia y seguridad en una amplia variedad de industrias (Camacho et al., 2008). En el contexto de la producción de bioetanol a partir de biorreactores, la importancia del control automático es innegable. Un biorreactor es un entorno altamente dinámico donde las condiciones, como la concentración de nutrientes, el pH; y, especialmente la temperatura, deben mantenerse dentro de rangos óptimos para asegurar un rendimiento consistente y una alta productividad. La regulación precisa de la temperatura,

como ejemplo, es crucial para mantener las condiciones ideales para las reacciones enzimáticas y microbianas involucradas en la conversión del almidón en bioetanol durante procesos de fermentación (Kumar et al., 2019). Un ligero desequilibrio térmico podría llevar a una disminución en la tasa de producción o incluso a la inactivación de los microorganismos, lo que afectaría negativamente la calidad y la cantidad del producto final (Nagy, 2007). Además de garantizar una producción óptima de bioetanol, el control automático en un biorreactor contribuye a la seguridad operativa al evitar condiciones extremas que puedan resultar en accidentes o fallos del sistema. Asimismo, reduce la necesidad de intervención de operarios constante, lo que disminuye la posibilidad de errores humanos y la variabilidad en los resultados (Camacho et al., 2008).

5. Estudio de los controladores.

Un tipo de controladores automáticos ampliamente utilizados en la industria son los controladores realimentados; donde, los más utilizados son los controladores Proporcional (P), Proporcional Integral (PI) y los Proporcional Integral Derivativo (PID). En este tipo de controladores, la variable controlada se realimenta al controlador para que éste pueda ejecutar la acción de control necesaria sobre la variable que está siendo manipulada (Camacho et al., 2008). Su funcionamiento radica en la medición de un error entre la variable manipulada y el punto de control, de esa manera manteniendo condiciones de operación adecuadas (Camacho et al., 2008). Su principal desventaja radica justamente en su funcionamiento; ya que, al trabajar sobre un error se debe esperar a que el mismo llegue a afectar todo el sistema para poder ejercer la acción de control. Por otro lado, su principal ventaja es su simplicidad y eficiencia en el control de perturbaciones (Camacho et al., 2008).

Por otro lado, otro tipo de controladores ampliamente utilizados en varias áreas de la industria son los Controladores Lógicos Programables o PLC por sus siglas en inglés. Los PLC

emplean una memoria programable que guarda instrucciones de diferentes funciones como pueden ser operaciones lógicas, acciones, control sobre maquinaria y procesos, entre otros (Lascano y Vallejo, 2001). La principal ventaja de los PLC, es que son sumamente rápidos al momento de realizar una acción de control, son fácilmente reprogramables y se pueden usar para distintos tipos de control o equipos; sin embargo, su desventaja es que los mismos requieren personal entrenado para su mantenimiento y programación (Lascano y Vallejo, 2001).

6. Biorreactor actual.

En la Universidad San Francisco de Quito, se cuenta con un biorreactor cuya construcción se culminó en el 2018; sin embargo, el mismo cuenta con diferentes problemas de diseño siendo el más relevante el tiempo que tarda el sistema de calentamiento y enfriamiento para llegar a temperaturas deseadas, causado principalmente debido a la falta de un flujo continuo y a la inexistencia de un sistema de refrigeración (León, 2018). Por lo mismo, se tiene una oportunidad de diseñar un sistema de control automático para la regulación de la temperatura en el biorreactor el cual podría disminuir el tiempo requerido para alcanzar temperaturas deseadas. Adicionalmente, la implementación de un sistema de control de la temperatura óptimo traería importantes ventajas para los procesos que se lleven a cabo en el reactor, ya que de acuerdo con (Higuera, 2005), refiriéndose a la automatización: “haciendo que el proceso productivo sea más flexible, con un ahorro de tiempo, recursos y costos”. Para este trabajo, se conseguiría una disminución del consumo de energía eléctrica puesto que el calentador sumergible estaría prendido durante menos tiempo. De la misma forma, una menor cantidad de enzimas, levadura y sustrato se necesitarán para obtener la misma cantidad de producto, esto asociado a una óptima actividad catalítica por el efecto de la temperatura. Finalmente, y

recalcando que las largas jornadas de trabajo por el tiempo requerido para que el reactor alcance las temperaturas deseadas, se pueden ver reducidas drásticamente gracias a la recirculación y al sistema de enfriamiento, que es inexistente.

1.2 Propuesta del proyecto

En el presente trabajo, se busca diseñar un sistema de control automático en un biorreactor para la regulación de la temperatura. Para lo cual, se debe realizar un diagnóstico preliminar del sistema de regulación de temperatura actual; por consiguiente, proponer un diseño del sistema de regulación de temperatura el cuál contenga elementos de control automático junto con un modelamiento del biorreactor y simular el sistema de control automático escogido para el biorreactor obteniendo una validación del funcionamiento del sistema propuesto.

2. ANÁLISIS PRELIMINAR DEL BIORREACTOR

2.1 Fluctuación de la temperatura en el tanque de calentamiento sin reflujo

El calentamiento del interior del biorreactor se consigue mediante una chaqueta que lo rodea; a su vez, ésta es alimentada mediante un tanque de calentamiento el cual posee una resistencia térmica en su interior para conseguir las temperaturas deseadas, como se muestra en la **Figura 1** en la sección de resultados. El sistema de calentamiento ya posee un controlador PI y la temperatura en el interior del reactor es medida mediante una termocupla; sin embargo, no se conocen sus parámetros de funcionamiento o condiciones de operación. Por lo mismo, se realizó experimentalmente una curva de fluctuación de temperatura dentro del tanque de calentamiento para llegar a determinar el tiempo que tarda el sistema en llegar a las temperaturas deseadas, tomando mediciones cada 5 minutos. En este proyecto, se decidió estudiar el tiempo que tarda la temperatura en el interior del biorreactor en llegar a 70 °C, posteriormente bajar a 50 °C y finalmente a 30 °C y compararlos con las temperaturas alcanzadas en el tanque de calentamiento. Posteriormente, los resultados de este análisis preliminar serán comparados con los obtenidos mediante la simulación del sistema de regulación de temperatura propuesto.

1. Medición de azúcares reductores mediante DNS y grados Brix

Se llevaron a cabo dos experimentos para la obtención de bioetanol, uno a escala de laboratorio y otro empleando el biorreactor; donde, las condiciones de operación y concentración de los diferentes sustratos se encuentran detallados en (Larrea et al., 2020). En ambos casos se optó por realizar simplemente una sola digestión enzimática, la licuefacción; ya que, se contaba con enzima α -amilasa de grado de laboratorio; por lo que, realizar dos digestiones no es conveniente obteniendo así la misma cantidad de azúcares independientemente de realizar una o dos digestiones enzimáticas. Con la concentración de azúcares reductores conocidos es posible determinar la cantidad de bioetanol que se puede llegar a obtener con dicha concentración tanto

experimentalmente como mediante la simulación del biorreactor con el sistema automático de regulación de temperatura.

La determinación de los azúcares reductores presentes después del proceso de licuefacción puede ser lograda mediante dos metodologías. La primera, mediante medición de los grados Brix presentes en la solución; donde, 1 grado Brix es equivalente a 1 gramo de azúcar por cada 100 gramos de la solución (Granda, 2011). Este procedimiento se realiza gracias a un refractómetro el cual mide la cantidad de luz que pasa por la solución (Granda, 2011). Para este proyecto dicho equipo se encuentra en la planta de alimentos de la Universidad San Francisco de Quito; por lo que, se realizó la medición en su departamento. Por otro lado, el segundo método analítico para la determinación de los azúcares reductores es mediante DNS (Ácido 3,5-dinitrosalicílico) y un espectrofotómetro. Los azúcares reductores reaccionan con el DNS al ser sometidos con algo de calor, tornándose de un color amarillento hacia un color rojizo; en donde, la coloración tiende a ser más oscura si la concentración de azúcares reductores en la solución es elevada (Granda, 2011). Posteriormente, con el espectrofotómetro se mide la absorbancia con una longitud de onda de 540nm para comparar el valor obtenido con una curva de calibración determinada con concentraciones conocidas y de esta manera conocer la cantidad de azúcares reductores presentes en nuestra solución (Granda, 2011).

2. Cromatografía de gases para medición de alcohol

Finalmente, se llevó a cabo una cromatografía de gases para hallar la concentración de bioetanol obtenida en ambos experimentos. La cromatografía de gases es una técnica analítica ampliamente utilizada en diferentes campos de la industria como la farmacéutica, alimentaria, ambiental e investigativa; esto, principalmente gracias a su alta resolución y sensibilidad para

analizar muestras complejas en pequeñas concentraciones. La cromatografía de gases permite separar, identificar y cuantificar los compuestos volátiles que se encuentran dentro de una mezcla al vaporizarlos sin que éstos se descompongan. Donde, por la diferencia en la velocidad de distribución de los componentes que existe entre una fase móvil, por lo general helio o nitrógeno, y una fase estacionaria dentro de la columna cromatográfica.

Mediante esta técnica, se pueden realizar cuantificaciones de la concentración de etanol obtenida en las fermentaciones; donde, la muestra de etanol es inyectada en el cromatógrafo para que se vaporice y posteriormente la fase móvil transporta o arrastra los componentes a través de la columna para que el detector registre la concentración. De esta forma, se pueden comparar las concentraciones de bioetanol obtenido en el biorreactor con los obtenidos mediante la simulación del mismo con el sistema de regulación de temperatura. Los resultados obtenidos tanto de la medición de azúcares y la obtención de bioetanol se encuentran detallados en la **Tabla 1** en la sección de resultados.

3. DISEÑO DEL SISTEMA DE REGULACIÓN DE TEMPERATURA DEL BIORREACTOR

1. Propuestas de diseño

En ingeniería química, es importante determinar el diseño o rediseños que van a ser implementados o utilizados. Por lo mismo, en este caso de estudio fue necesario plantear distintos posibles diseños que se pueden estudiar más a fondo, los cuales se encuentran detallados en el **Anexo A**. Posteriormente, se hacen distintos análisis a criterio del cliente, del ingeniero a cargo y del equipo en cuestión; para lo que, parámetros importantes como costos del proyecto propuesto, complejidad de implementación, leyes externas e internas, eficiencia del sistema y posibilidades físicas y químicas pueden ser analizadas (Benalcázar, 2020). En el presente trabajo, se decidió trabajar con una modificación del diseño 8, el cual se puede observar en la **Figura 2** en la sección de resultados, dicho diseño fue escogido después de realizar el procedimiento detallado previamente y realizar una matriz de decisiones.

2. Matriz de decisión

Como se mencionó, para poder determinar adecuadamente qué rediseño se va a utilizar para los posteriores estudios, se tomaron en cuenta los parámetros descritos previamente y se plasmaron en una matriz de decisiones. La matriz de decisiones permite colocar valores de importancia o relevancia a los distintos parámetros que van a ser analizados, estos valores se deciden entre dos o tres personas a cargo del proyecto a criterio de cada uno de ellos; de esta manera, es posible observar que diseño es el más adecuado para continuar estudiando y analizando o que diseño se puede llegar a implementar (Benalcázar, 2020). Para el presente estudio, los valores en la matriz de decisiones van de manera ascendente; donde, valores bajos representan que el diseño no es adecuado, no es viable o es complejo de implementar. Por otro lado, valores altos representan que el diseño es adecuado, viable y su implementación no conlleva problemas. La **Tabla A1** disponible en el **Anexo B** muestra la matriz de decisiones

obtenida posterior al análisis descrito previamente. Cabe resaltar nuevamente que dichos valores y circunstancias pueden variar; por lo que, un re-análisis en el futuro es lo recomendable en caso de querer estudiar un diseño diferente.

3. Propuesta económica

Finalmente, uno de los factores más determinantes al momento de realizar un proyecto suele ser el presupuesto requerido para implementar dicho diseño. La **Tabla 2** descrita en la sección de resultados muestra el presupuesto requerido para implementar el diseño escogido con el cuál se decidió trabajar. Ya que el presente trabajo se enfoca en la simulación para una posible implementación en un futuro, se realizó una propuesta económica en donde se consideraron aspectos como el costo del capital total, representado por el precio de cada uno de los equipos; adicionalmente, se evaluaron los costos operativos del diseño escogido en donde se encuentran plasmadas consideraciones como instalación, mantenimiento o reparación de los equipos al igual que energía y materia prima utilizada (Sansano, 2008). Se entiende que el departamento de Ingeniería Química de la Universidad San Francisco de Quito no posee fines lucrativos del uso del biorreactor; por lo que, análisis de rentabilidad, flujo de caja, valor presente neto (VPN) y tasa interna de retorno (TIR) no fueron tomados en consideración (Fernández et al., 2002).

4. CONTROL DEL PROCESO

4.1 Control del diseño para la regulación de la temperatura

El diseño propuesto considera manipular la temperatura del flujo en la chaqueta que rodea al biorreactor, tanto como si fuera necesario calentar o enfriar el volumen de trabajo del recipiente. Esto es, para elevar la temperatura del reactor se incrementará la temperatura dentro de la chaqueta a través de una resistencia eléctrica sumergible mediante un control retroalimentado, para lo que el controlador modifica la variable manipulada (corriente eléctrica en este caso) en base al error producido por el setpoint y la medición de temperatura dentro de biorreactor (Arántegui, 2011). De forma similar, una serie de tres válvulas permitirán el mezclado de agua a temperatura ambiente con el agua de servicio para reducir su temperatura, lo cual se llevará a cabo mediante control por programación en escalera, que es un lenguaje utilizado para controladores lógicos programables, ampliamente usados en la automatización industrial (Aguilera, 2002).

1. Modelado del proceso mediante balances de materia y energía

Para trabajar en la aplicación de control automático a un proceso es indispensable conocer cómo se comporta el sistema, o en otras palabras, se debe conocer su modelo matemático. Lo anterior permite que se tenga un apropiado diseño y sintonización de controladores (Camacho et al., 2008). Por lo tanto, el primer paso para diseñar el control fue, mediante ecuaciones, describir cómo se relacionan las variables del proceso, que son principalmente temperaturas y concentraciones. Lo mencionado previamente se consiguió a través de balances de energía y materia al igual que la cinética de la etapa de fermentación, como se puede encontrar a mayor detalle en la sección de resultados.

Con el modelo matemático del sistema; en este caso, el biorreactor, tanque de calentamiento y chaqueta, junto con la cinética de reacción de una fermentación, es posible entender de mejor

manera el comportamiento del mismo y analizar cómo diferentes perturbaciones pueden llegar a afectarlo, sin la necesidad de realizar cambios reales, modificar físicamente el biorreactor o llevar a cabo diferentes ensayos de experimentación en el sistema.

2. Validación del sistema de control automático

La validación del sistema de control automático diseñado se lleva a cabo a través de la introducción de diferentes perturbaciones; es decir, cambios inesperados o bruscos que ingresan y cambian las condiciones. Cuando se tiene un controlador automático robusto, el mismo es capaz de rechazarlas y llevar nuevamente al sistema a las condiciones de operación; por otro lado, si el controlador automático no está bien sintonizado, puede llegar a la falla y no conseguir llevar al sistema a las condiciones de operación deseadas lo que representa pérdidas de producto, peligro para el personal y daño en los equipos (Camacho et al., 2008). De igual forma, se pueden analizar parámetros como el ISE y el ISCO; donde, el primer parámetro (ISE) determina el comportamiento ideal del controlador sintonizado, cuyo valor al ser elevado me indica que mi controlador es menos ideal. Por otro lado, el segundo parámetro (ISCO) determina el esfuerzo que deben realizar mis elementos de control, como válvulas, al momento de rechazar perturbaciones; donde, si su valor es elevado quiere decir que más esfuerzo se va a ejercer (Camacho et al., 2008). Generalmente se busca un equilibrio entre ambos parámetros para analizar y validar un controlador.

5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

1. Análisis preliminar del sistema de regulación de temperatura del biorreactor

Como se detalló en la metodología, se decidió estudiar el comportamiento del sistema actual ante el cambio de temperaturas. Obteniendo de esa manera la siguiente figura:

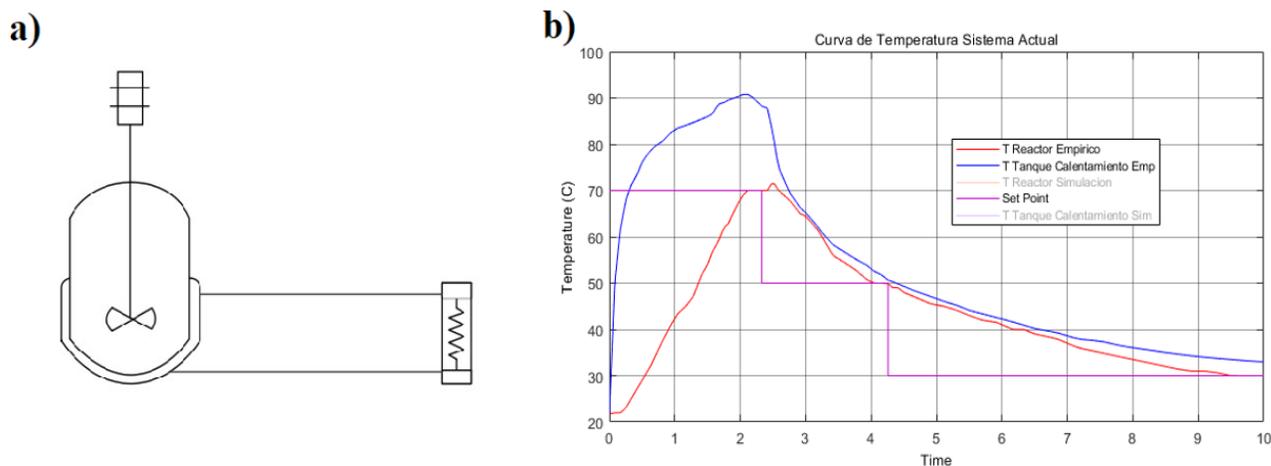


Figura 1. a) Biorreactor y sistema de calentamiento actual. **b)** Curva de temperatura obtenida experimentalmente del sistema de calentamiento actual.

Como se observa en la **Figura 1**, el sistema tarda demasiado tiempo en llegar a temperaturas deseadas. Donde, toma aproximadamente dos horas en apenas llegar a 70 °C y otras dos horas para enfriarse a 50 °C; pero, el biorreactor prácticamente tarda más de 6 horas en total para llegar a enfriarse a 30 °C. Dejando un total de poco más de 10 horas, únicamente para llevar a cabo los cambios de temperatura, e ignorando el tiempo que toma cada uno de los procesos para producir bioetanol.

Todo lo anterior está asociado principalmente a dos factores. Primero, debido a la inexistencia de un sistema de enfriamiento que permita enfriar de manera más rápida el biorreactor y segundo a la ausencia de un flujo forzado del fluido de servicio a través de la chaqueta, provocando que la transferencia de calor se de simplemente por conducción mientras que la convección es ineficiente, haciéndola sumamente lenta e ineficaz.

Por otro lado, mediante la medición de azúcares y obtención de bioetanol es posible determinar parámetros de utilidad para la posterior validación del sistema. La tabla a continuación muestra los resultados obtenidos de azúcares totales y bioetanol producido empleando el biorreactor y en el laboratorio.

Tabla 1. Azúcares totales y bioetanol obtenido.

Laboratorio		Biorreactor	
Azúcares Totales (g/L)	Bioetanol Total (g/L)	Azúcares Totales (g/L)	Bioetanol Total (g/L)
92	58	92	15

Como se puede observar, tanto en laboratorio como en el biorreactor se llegó a obtener alrededor de 92 g/L de azúcares totales, valores que ya han sido reportados en previos estudios (Larrea et al., 2020). Sin embargo, la cantidad de bioetanol obtenido empleando el biorreactor es sumamente baja a comparación de lo obtenido en laboratorio. Esto puede ser generado por la falta de un adecuado sistema de agitación, uso de otra levadura con distintas características, e incluso por contaminación dentro del biorreactor. Por lo mismo, otras mejoras al diseño del biorreactor son necesarias para conseguir mejores rendimientos; donde, conseguir un mejor mezclado es primordial (Rommens, 2019). Con las concentraciones de azúcares obtenidos, mediante la simulación es posible determinar la cantidad de bioetanol que se podría llegar a producir si se tienen distintas condiciones de operación y parámetros, como se muestra en la validación del sistema, llegando a obtener resultados similares a los que se tiene a escala de laboratorio (Rommens, 2019). Adicionalmente, es posible tener un modelamiento más adecuado

y apegado a la realidad permitiendo utilizar la simulación para futuros proyectos de investigación dentro del departamento de Ingeniería Química.

2. Diseño del nuevo sistema de regulación de temperatura para el biorreactor

Como se observó en la **Figura 1**, el calentamiento y enfriamiento del biorreactor tarda demasiado tiempo en llegar a las condiciones requeridas o especificaciones deseadas, provocando de esa manera ineficiencia del proceso como se ha reportado previamente por (Nagy, 2017). Por lo mismo, mediante la matriz de decisiones se inclinó por el siguiente diseño:

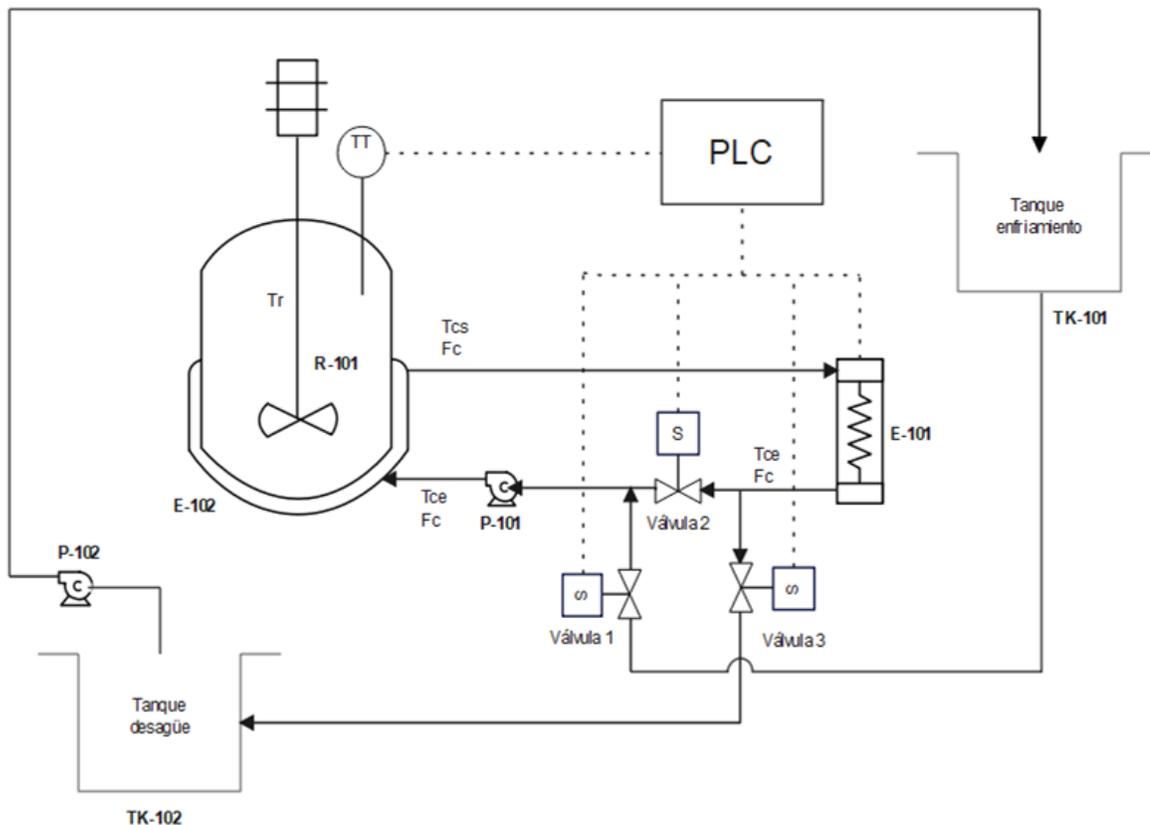


Figura 2. Diseño obtenido mediante matriz de decisiones.

El diseño propuesto cuenta con 3 válvulas que permitirán el ingreso y salida del líquido refrigerante, de esta forma permitiendo una mejor regulación de temperatura. Adicionalmente,

cuenta con una bomba centrífuga incorporada para la entrada del flujo de servicio dentro de la chaqueta, lo que permitiría superar las limitaciones de transferencia de calor por convección (Bird et al., 2002). Por otro lado, Álvarez (2011) recomienda conseguir un mezclado adecuado dentro de la chaqueta, lo cual se puede conseguir mediante la incorporación de deflectores; sin embargo, dicho procedimiento requiere el desmontado de la chaqueta representando mayores costos y posiblemente daños al sistema de regulación de temperatura ya existente por lo que esta consideración debe ser tomada en cuenta en el proceso de construcción del biorreactor (Coronel, 2014). Finalmente, el sistema de regulación de temperatura cuenta con dos tanques que permiten la reutilización del agua a ser utilizada y de esta manera se conseguiría una reducción de costos operativos al igual que menor cantidad de agua desperdiciada durante el procedimiento de calentamiento y enfriamiento, obteniendo así un proceso más sostenible económica y ambientalmente al optimizar recursos naturales (Loayza y Silva, 2013).

3. Aplicación de la matriz de decisiones

La matriz de decisiones que se encuentra detallada en la **Tabla A1** en el **Anexo B** permitió escoger el diseño previo para su estudio y análisis. En este caso se consideraron parámetros como los conocimientos de ingeniería necesarios y su complejidad, la dificultad de implementación haciendo referencia a las modificaciones requeridas en el sistema actual, la dificultad del control automático necesario, los costos de cada uno de los equipos requeridos para poder implementar y en este proyecto dicho parámetro posee bastante peso; finalmente, se analizó la eficiencia que el diseño podría llegar a tener al momento de regular la temperatura. Con estos parámetros, el diseño elegido posee la ponderación más alta; por lo que, fue el escogido para el presente proyecto. Dichos parámetros y valores no son fijos y podrían cambiar a lo largo del tiempo; de igual forma, otros parámetros pueden ser analizados como el impacto del

proyecto a corto y largo plazo, valor agregado a los productos finales obtenidos, repetividad, impacto ambiental, entre otros (Medina et al., 2012). Adicionalmente, existen diferentes metodologías para obtener matrices de decisiones mucho más precisas y complejas (Medina et al., 2012); donde, se asignan pesos y ponderaciones extras a cada categoría y posteriormente se realizan cálculos para determinar qué decisión tomar (Alarcón, 2018). Por ello, si las condiciones de cada parámetro cambian, como puede ser el presupuesto disponible, un re-análisis de los diseños propuestos o nuevos diseños es lo recomendable.

4. Presupuesto de implementación

Finalmente, en general el presupuesto disponible es uno de las mayores limitantes para el desarrollo de proyectos (Benalcázar, 2020). Por ello, se realizó una propuesta económica del diseño propuesto y descrito previamente; donde, al analizar precios y distribuidores dentro del Ecuador en el 2023, se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 2. Precio de equipos y elementos de control.

Equipo	Cantidad	Precio Unidad	Total
Bomba Presurizadora	2	\$105	\$210
PLC	1	\$150	\$150
Válvulas On-Off	3	\$50	\$150
Tubo Flexible (20m)	1	\$20	\$20
Tanques (40L)	2	\$50	\$100
Precio Total			\$630

Como se puede apreciar en la tabla, los valores más elevados son las bombas presurizadoras necesarias para que el sistema funcione y el PLC requerido para implementar los distintos elementos de control; sin embargo, estos precios variarán dependiendo de las

especificaciones de cada bomba y de la marca distribuidora (Benalcázar, 2020); en el **Anexo C** se brinda un catálogo más detallado. De igual forma, los precios de instalación se realizan bajo cotización con un técnico especializado, dichos precios varían entre los \$250 y \$300 USD; pero, al tratarse de elementos que pueden ser instalados sin complicaciones este valor puede ser ahorrado o invertido en otros elementos. Por otro lado, el sistema está diseñado para que los precios por consumo de agua sean nulos ya que la misma puede ser reutilizada indefinidas veces para el enfriamiento o calentamiento del biorreactor, con la necesidad de reemplazarla únicamente en casos excepcionales. En Quito, el precio por metro cúbico de agua para consumo industrial o comercial es de 72 centavos de dólar (EPMAPS, 2019); ya que este sistema ocupa apenas 0.04m^3 este valor puede ser prácticamente ignorado.

5. Control del diseño propuesto

La decisión de la implementación de una bomba se puede sostener en lo constatado por (Bozinovic et al., 1987), dado que explican que a la convección natural, que es la transferencia de calor entre un cuerpo y fluido que se da esencialmente por la diferencia de temperatura entre estos, se le puede incrementar el flujo de calor si el fluido aumenta su movimiento, obteniendo convección forzada. El otro punto importante es la incorporación de electroválvulas que permitan la salida del agua caliente hacia un tanque de desagüe, y que a su vez alimente al sistema con agua a temperatura ambiente desde otro tanque de almacenamiento. Con la garantía de que el coil llevará al setpoint al sistema en caso de que la cantidad de agua ingresada al sistema enfríe en exceso al sistema.

Para lograr una correcta manipulación de estas variables y que la temperatura se comporte de acuerdo con lo esperado, es necesario simular mediante elementos de control su

controladores tipo proporcional se controlaba el intercambio de calor entre aceite térmico y las paredes de un reactor, consiguiendo reducir drásticamente el tiempo de enfriamiento de este sistema.

Además, se optó por crear un diagrama Ladder ya que este es el lenguaje de programación gráfica más amigable para autómatas programables, aunque no sea tan compatible con programas que requieren de cálculos matemáticos (Páez et al., 2015), en trabajos futuros se busca implementar el PLC mediante Simulink PLC Coder; pero, Ladder es una buena alternativa en donde se usan compuertas lógicas para indicar al controlador PLC si se debe abrir o cerrar válvulas, y posteriormente emplear un lenguaje de ladder. El diagrama Ladder permite establecer una idea de cómo debería actuar el PLC, dejando las bases para cuando se requiera programar este tipo de controlador. El diagrama lógico se muestra a continuación:

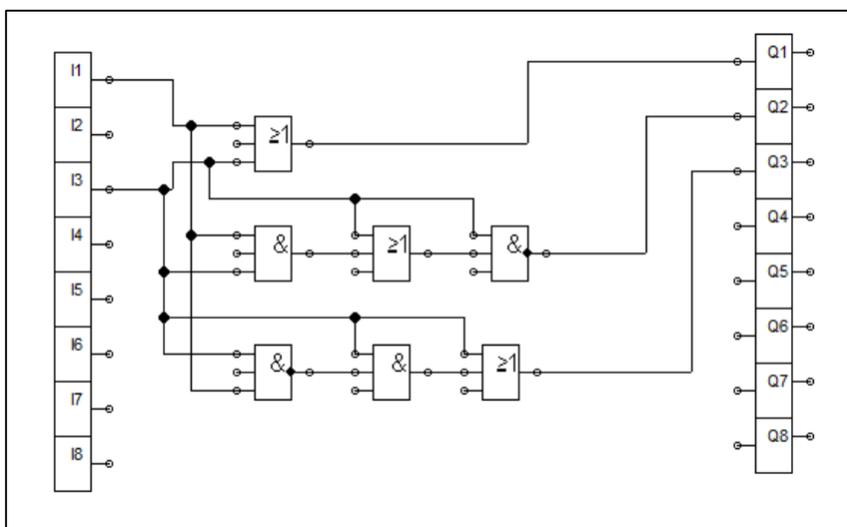


Figura 4. Diagrama de programación Ladder.

Este diagrama está diseñado para que las tres válvulas correspondientes a las salidas Q1, Q2 y Q3 se abran o cierren en base a su configuración normal o ante cambios en el punto de operación de la temperatura. Sin embargo, para simular estas válvulas se requiere de cierto

conocimiento sobre programación de controladores lógicos programables (PLC), por lo que se optó por configurar una serie de bloques Relay en Simulink para mostrar cuál sería el efecto de las válvulas en el proceso de enfriamiento. Los Relay permiten a la salida del bloque cambiar entre valores especificados, cuyo valor varía cuando el relé se activa porque el valor de entrada supera el parámetro de entrada (Mendoza, 2015). Así fue posible abrir y cerrar las válvulas, definiendo un parámetro de tiempo y valiéndose un reloj como variable de entrada.

6. Modelado del proceso mediante balances de materia y energía

Para entender el comportamiento del sistema y posteriormente adaptar un sistema de control es necesario obtener el modelo del proceso. El modelamiento teórico tiene como fin obtener la relación funcional entre variables mediante la aplicación de las leyes de la naturaleza a los fenómenos, aunque esta relación no pueda ser perfecta (Cortés, 2006). En este caso, se ha realizado un modelamiento a partir de balances de energía y de ecuaciones relacionadas al crecimiento de microorganismos.

Tomando en cuenta únicamente la dinámica de la fermentación, se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones:

Concentración de biomasa (levadura) en biorreactor:

$$\frac{dC_x}{dt} = \mu_x C_x \frac{C_s}{K_s + C_s} e^{-K_p C_p} \quad (1)$$

Tasa de crecimiento máximo:

$$\mu_x = A_1 e^{-\left(\frac{E_{a1}}{R(T_r+273)}\right)} - A_2 e^{-\left(\frac{E_{a2}}{R(T_r+273)}\right)} \quad (2)$$

Concentración de producto (etanol) en biorreactor:

$$\frac{dC_p}{dt} = \mu_p C_x \frac{C_s}{K_{s1} + C_s} e^{-K_{p1}C_p} \quad (3)$$

Concentración de sustrato (glucosa) en biorreactor:

$$\frac{dC_s}{dt} = -\frac{1}{R_{sx}} \mu_x C_x \frac{C_s}{K_s + C_s} e^{-K_p C_p} - \frac{1}{R_{sp}} \mu_p C_x \frac{C_s}{K_{s1} + C_s} e^{-K_{p1}C_p} \quad (4)$$

Concentración de oxígeno disuelto en el medio de la reacción:

$$\frac{dC_{O_2}}{dt} = (k_1 a)(C_{O_2}^* - C_{O_2}) - r_{O_2} \quad (5)$$

Coefficiente de transferencia de masa del oxígeno como una función de la temperatura:

$$(k_1 a) = (k_1 a)_0 (1.024)^{T_r - 20} \quad (6)$$

Tasa de consumo de oxígeno:

$$r_{O_2} = \mu_{O_2} \frac{1}{Y_{O_2}} C_x \frac{C_{O_2}}{K_{O_2} + C_{O_2}} \quad (7)$$

Este conjunto de ecuaciones es una modificación de las ecuaciones de Monod tomando en cuenta la cinética de Michaelis-Menten (Aiba, 1978), para lo que se consideraron factores como la inhibición, el efecto de la temperatura en el crecimiento del microorganismo, consumo de oxígeno, etc. Aunque este último no se controle en el biorreactor, pero cuyo efecto es vital para el proceso de fermentación. Adicionalmente, (Nagy, 2007) presenta ecuaciones similares sin embargo ciertos parámetros fueron modificados o ajustado al sistema.

Por otro lado, los balances de energía que se obtuvieron constan de las siguientes ecuaciones:

Balance de energía en el reactor batch:

$$\frac{dT_r(t)}{dt} = \frac{U_1 A_1}{V_r \rho C_p} (T_{cs}(t) - T_r(t)) + \frac{r_{O_2} \Delta H_r}{32 \rho C_{heat}} \quad (8)$$

Balance de energía en chaqueta:

$$\frac{dT_{cs}(t)}{dt} = \frac{F_r}{V_c} (T_{ce}(t) - T_{cs}(t)) - \frac{U_1 A_1}{V_c \rho C_p} (T_{cs}(t) - T_r(t)) - \frac{U_2 A_2}{V_c \rho C_p} (T_{cs}(t) - T_{amb}) \quad (9)$$

Balance de energía en el heater:

$$\frac{dT_{ce}(t)}{dt} = \frac{U_3 A_3 (T_{coil}(t) - T_{ce})}{V_h \rho C_p} + \frac{F_r}{V_h} (T_{cs} - T_{ce}) - \frac{U_2 A_4}{V_h \rho C_p} (T_{ce}(t) - T_{amb}) \quad (10)$$

Balance de energía en el coil:

$$\frac{dT_{coil}(t)}{dt} = \frac{Potencia}{m C_{p,coil}} - \frac{U_3 A_3 (T_{coil}(t) - T_{ce})}{m C_{p,coil}} \quad (11)$$

Para completar los balances se siguió de la mano “Termodinámica” de (Çengel, 2019) en el análisis de energía de volúmenes de control. De esta forma, se tomó en consideración la energía asociada a la entrada y salida de flujos, el intercambio de calor a través de las paredes del sistema sea por convección y conducción, así como el aporte energético de la reacción, aunque no sea de gran dimensión. También, para la ecuación de la temperatura de la resistencia eléctrica (11) se tomó en cuenta la potencia disipada para calentar al fluido en el tanque de precalentamiento, a la vez que se aumenta la temperatura de la resistencia misma. La ecuación coincide con la propuesta por (Henini et al., 2013) para la simulación de un modelo de resistencia eléctrica en un

reactor batch, en el que al igual que en nuestro caso, se cuenta con un espacio anular entre la resistencia eléctrica y el recipiente de calentamiento, a través del cual fluye el agua de servicio.

7. Validación del sistema de control automático

Como también explica (Cortés, 2006), para obtener un modelo de proceso confiable es necesario completar tres etapas: la formulación del modelo, la estimación de parámetros y la validación del modelo. En el subcapítulo anterior se revisó la formulación del modelo, aunque la estimación de parámetros es igualmente importante para que el sistema presente un comportamiento apegado a la realidad. Este segundo paso se logró mediante el uso de correlaciones para calcular parámetros como el flujo de servicio (Fr) o los coeficientes globales de transferencia de calor dentro del sistema (U), así como una amplia revisión bibliográfica para ajustar variables del proceso de fermentación, cálculos de dimensiones del sistema y otro tipo de herramientas. Estos valores obtenidos pueden encontrarse con mayor detalle en el **Anexo D**.

Por lo tanto, el último paso en la obtención del modelo matemático es la validación del sistema. Lo cual implica que, además de que el sistema modelado reaccione oportunamente frente a posibles perturbaciones, se obtengan resultados apegados a la realidad. Así, la primera gráfica que corrobora un correcto comportamiento por parte del sistema se encuentra en la **Figura 5**. En esta, se ve que el modelo de control se adapta de forma adecuada al patrón de temperatura que deja el setpoint, y que, de hecho, permitiría ahorrar dos horas de trabajo al final del proceso. En adición, mediante el ajuste de parámetros de la cinética de fermentación, que corresponden a la ecuación (2), se logró que el modelo muestre una tendencia en el consumo de azúcar acorde a lo que se obtuvo experimentalmente en el biorreactor y de recopilación bibliográfica de (Larrea et al., 2020) y (Rommens, 2019), como se muestra en la **Figura 6**. Por

último se concluye la validación del sistema con las curvas de producción de bioetanol a distintas temperaturas. El resultado esperado sería que los 30°C sea la temperatura óptima, por lo que la mayor producción sea en esta temperatura. Y que también, la concentración final de bioetanol vaya de acuerdo con lo recabado en tesis anteriores. Afortunadamente el resultado es correcto, como se puede revisar en la **Figura 7**, la producción de bioetanol sigue el sentido de temperatura óptima, y esta concentración final concuerda con lo reportado por (Rommens, 2019).

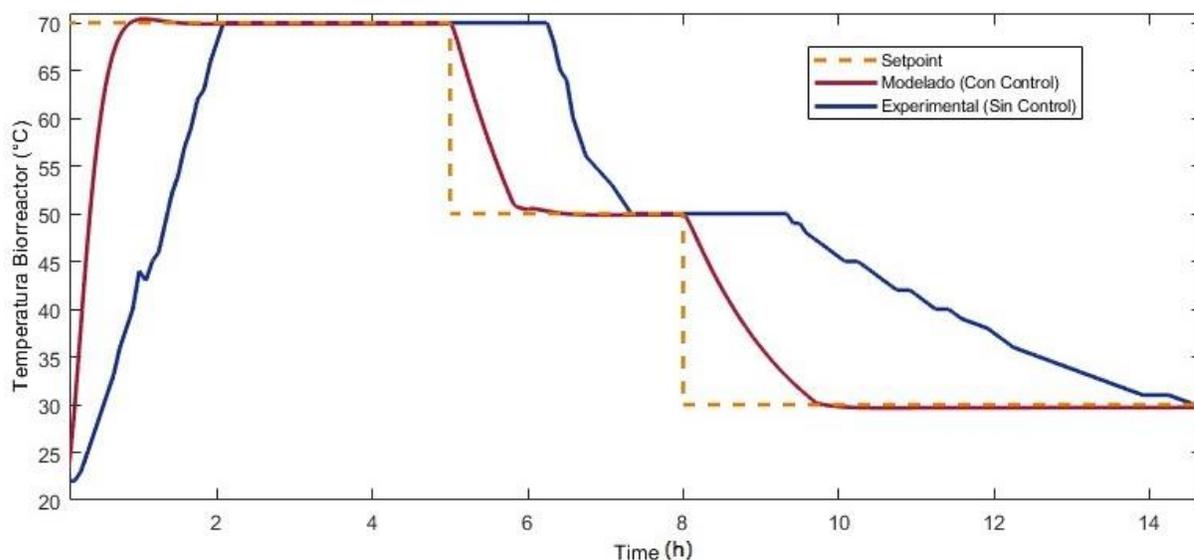


Figura 5. Comparación de temperatura en el biorreactor del sistema modelado con control y el sistema experimental actual sin control.

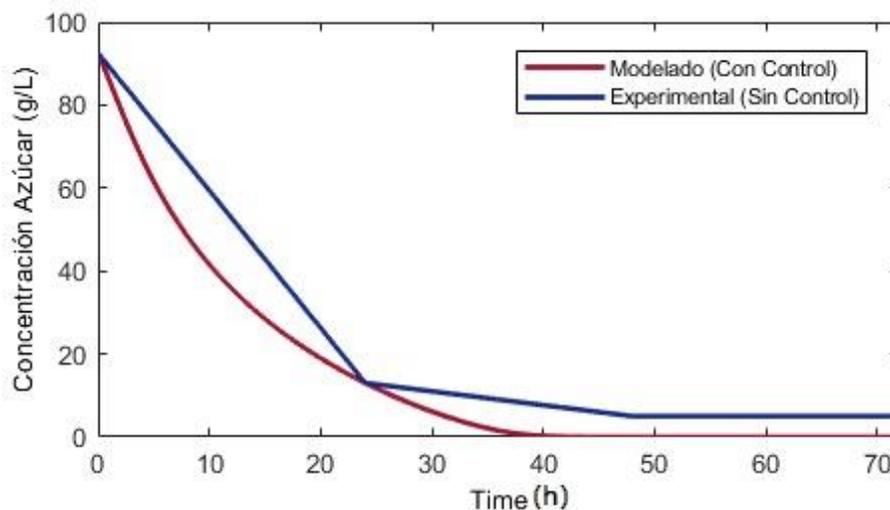


Figura 6. Acoplamiento del modelo cinético en el consumo de azúcares.

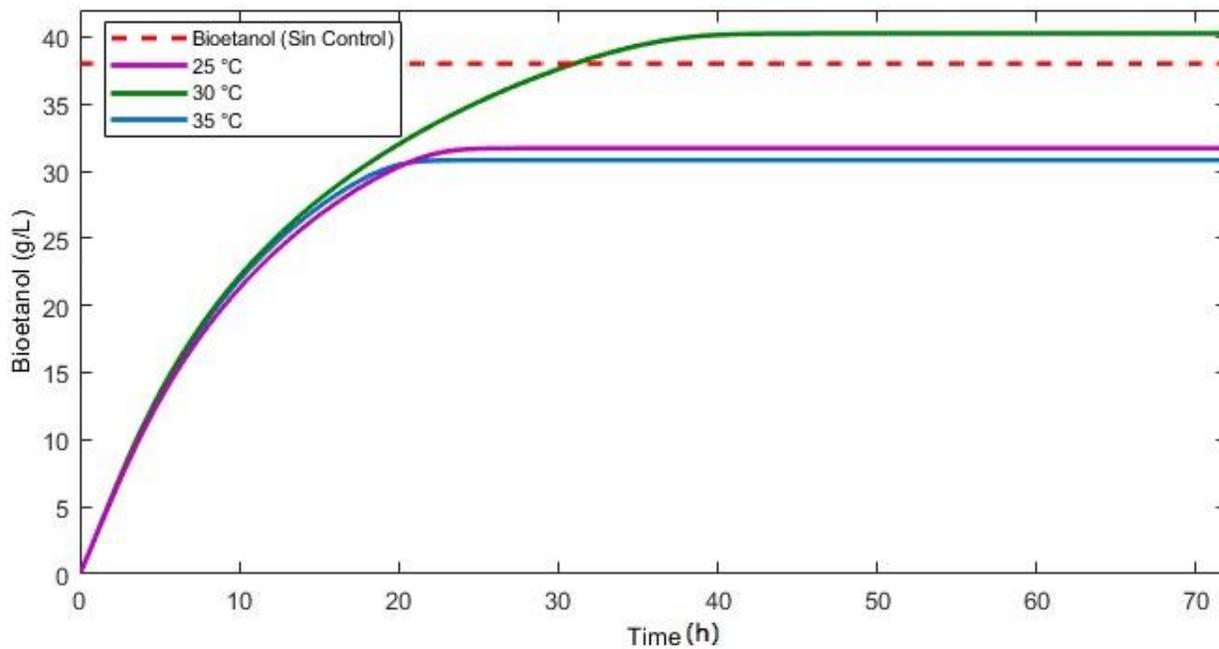


Figura 7. Concentración de bioetanol a diferentes temperaturas mediante simulación con controlador automático y en el biorreactor sin controlador.

6. CONCLUSIONES

Mediante el diseño del control automático escogido para la regulación de la temperatura del biorreactor, se podría llegar a disminuir considerablemente el tiempo que tarda el biorreactor en llegar a condiciones de operación deseadas, principalmente en el enfriamiento del sistema. Adicionalmente, se obtuvo un sistema de control automático fiable el cual modela adecuadamente el comportamiento de los elementos de control como las válvulas y puede ser utilizado para futuras investigaciones. Finalmente, se obtuvo una simulación del comportamiento del biorreactor en la cual se pueden estudiar distintos casos sin necesidad de llevarlos a implementar, evitando gastos innecesarios.

Se recomienda realizar otra propuesta económica si el sistema de regulación de la temperatura quiere ser implementada; al igual que, tener en consideración otros diseños propuestos en este trabajo en caso de que las condiciones económicas sean favorables. Finalmente, la colaboración entre distintas ramas de la ingeniería es necesaria para lograr implementar proyectos con mayor complejidad, como es el caso de una automatización completa del sistema de regulación de temperatura para el biorreactor.

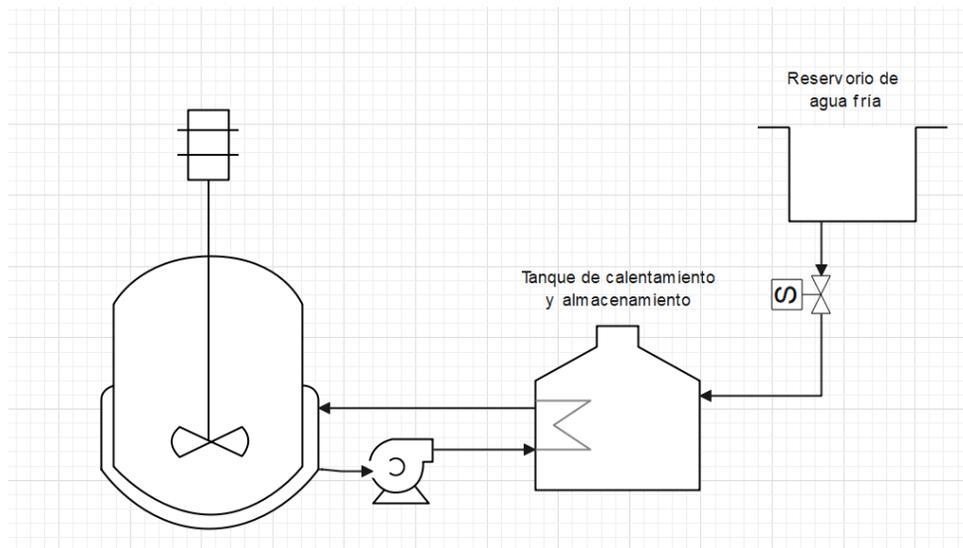
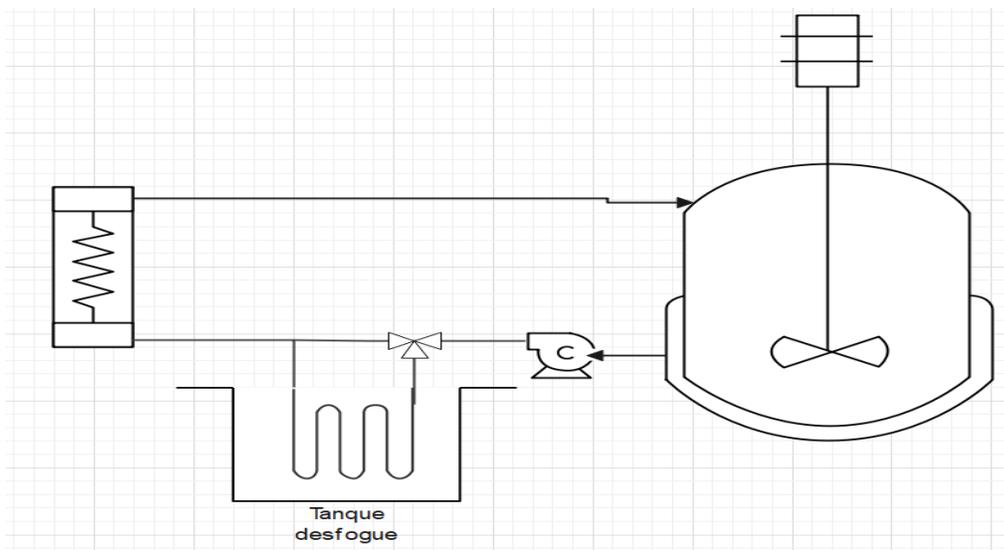
7. REFERENCIAS

- Alarcón Vargas, Diego Adhemar. (2018). Aplicación para la toma de decisiones mediante el Proceso de Jerarquía Analítica. *Fides et Ratio - Revista de Difusión cultural y científica de la Universidad La Salle en Bolivia*, 15(15), 87-110. Recuperado en 12 de diciembre de 2023, de http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2071-081X2018000100007&lng=es&tlng=es
- Álvarez Zapata, H. D. (2011). *Balances de Materia y Energía. Formulación solución y usos en Procesos Industriales*. Editorial ArtBox.
- Camacho, O., Rosales, A., & Rivas, F. (2020). Control de Procesos (1st ed.). Escuela Politécnica Nacional.
- Coronel Aguilar, J. C. (2014). *Diseño y construcción de un reactor tipo batch para el Laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Ambientales de la Universidad Internacional SEK*. Universidad Internacional SEK.
- EPMAPS (2019). Pliego Tarifario EPMAPS Agua de Quito. Recuperado de: <https://www.aguaquito.gob.ec/wp-content/uploads/2019/06/Pliego-Tarifario-EPMAPS-05.2019.pdf>
- Fernández Santana, E., González Jiménez, G., & Mayo Abad, O. (2002). Ingeniería Económica para Ingenieros Químicos. Universidad Tecnológica de la Habana José Antonio Echeverría. <https://www.researchgate.net/publication/321038156>
- Granda Albuja, M. G. (2011). *Determinación de azúcares productos de fermentación e inhibidores de fermentación por HPLC en un proceso de obtención de etanol lignocelulósico*. Repositorio Institucional de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Larrea, F. A., Almeida Streitwieser, D., Salazar, S., Andino, C., Ona, D., Benalcazar, M., Mora, J., & Alvarez-Barreto, J. F. (2020). Comparison of Bioethanol Production of Starches from Different Andean Tubers. *Chemical Engineering Transactions*, 80. ISBN 978-88-95608-78-5

- León Ruiz, M. A. (2018). Diseño y construcción de un bio-reactor. Tesis de pregrado, Universidad San Francisco de Quito. *Repositorio USFQ*. Disponible en:
- Loayza Pérez, J., & Silva Meza, V. (2013). Los procesos industriales sostenibles y su contribución en la prevención de problemas ambientales. *Industrial Data*, 16(1), 108-117. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Recuperado de:
<http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=81629469013>
- Maldonado Benalcázar, A. (2020). *Aplicación y Análisis de Metodologías Multicriterio para la Selección de Proveedores: El caso de subasta inversa*. Universidad de Concepción - Facultad de Ingeniería - Departamento de Ingeniería Industrial.
- Medina-León, A; Nogueira-Rivera, D; Hernández-Nariño, A & Díaz-Navarro, Y. (2012). Consideraciones y criterios para la selección de procesos para la mejora: Procesos Diana. *Ingeniería Industrial*, 33(3), 272-281. Recuperado en 12 de diciembre de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59362012000300007&lng=es&tlng=es
- Mendoza, S. (2015). Modelización del sistema de almacenamiento de energía y de su regulador de un vehículo solar de fines experimentales.
- Nagy, Z. K. (2007). Control basado en modelos de un biorreactor de fermentación de levadura utilizando redes neuronales artificiales diseñadas óptimamente. *Chemical Engineering Journal*, 127, 95-109. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2006.10.015>
- Páez-Logreira, H., Zamora-Musa R., & Bohórquez-Pérez, J. (2015) Programación de Controladores Lógicos (PLC) mediante Ladder y Lenguaje de Control Estructurado (SCL) en MATLAB. *Fac. Ing.*, 24(39), 109-119.
<https://revistas.uptc.edu.co/index.php/ingenieria/article/download/3555/4330?inline=1>
- Sansano, M.F (2008). *Diseño de una columna de Destilación Multicomponente*. Universidad Politécnica de Cartagena. Recuperado de:
<https://repositorio.upct.es/bitstream/10317/136/10/Presupuesto.doc>

8. ANEXOS

8.1 ANEXO A. Diseños propuestos

**Figura A 1.** Diseño propuesto 1.**Figura A 2.** Diseño propuesto 2.

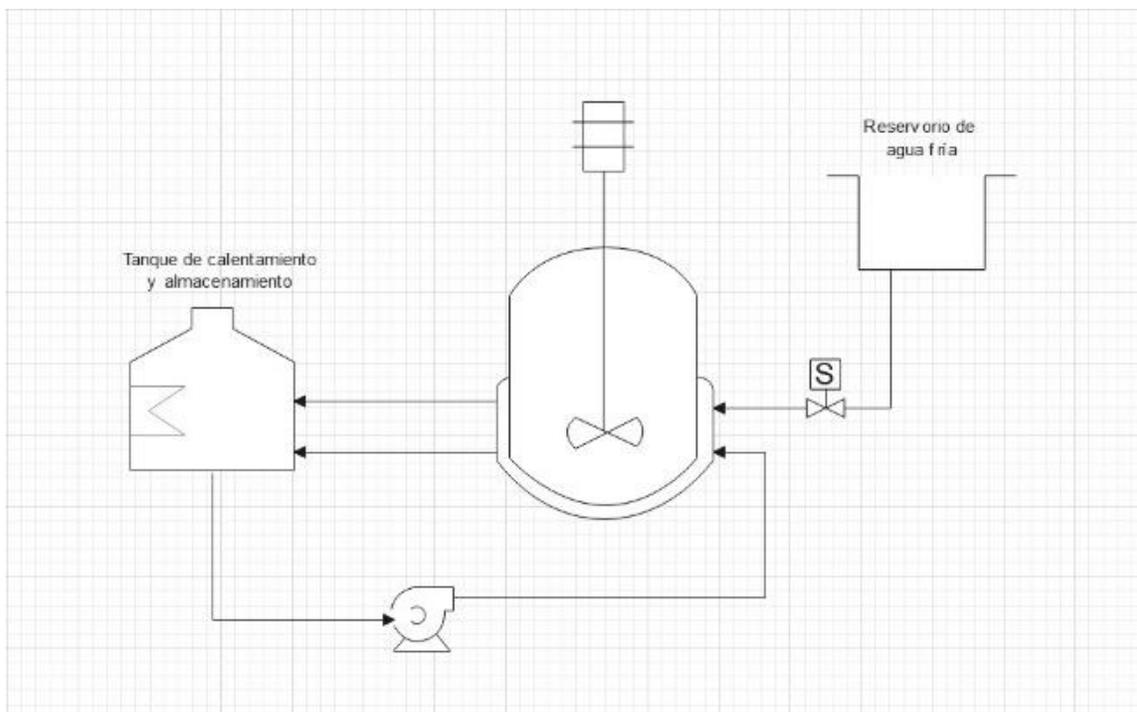


Figura A 3. Diseño propuesto 3.

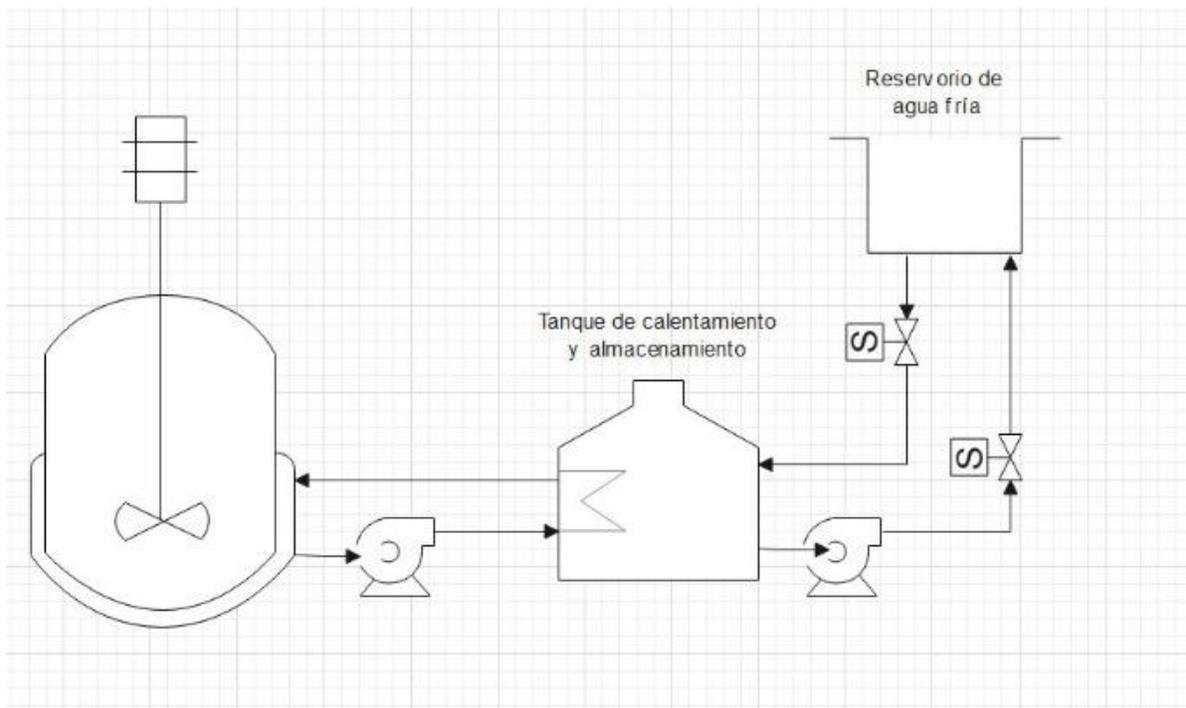


Figura A 4. Diseño propuesto 4.

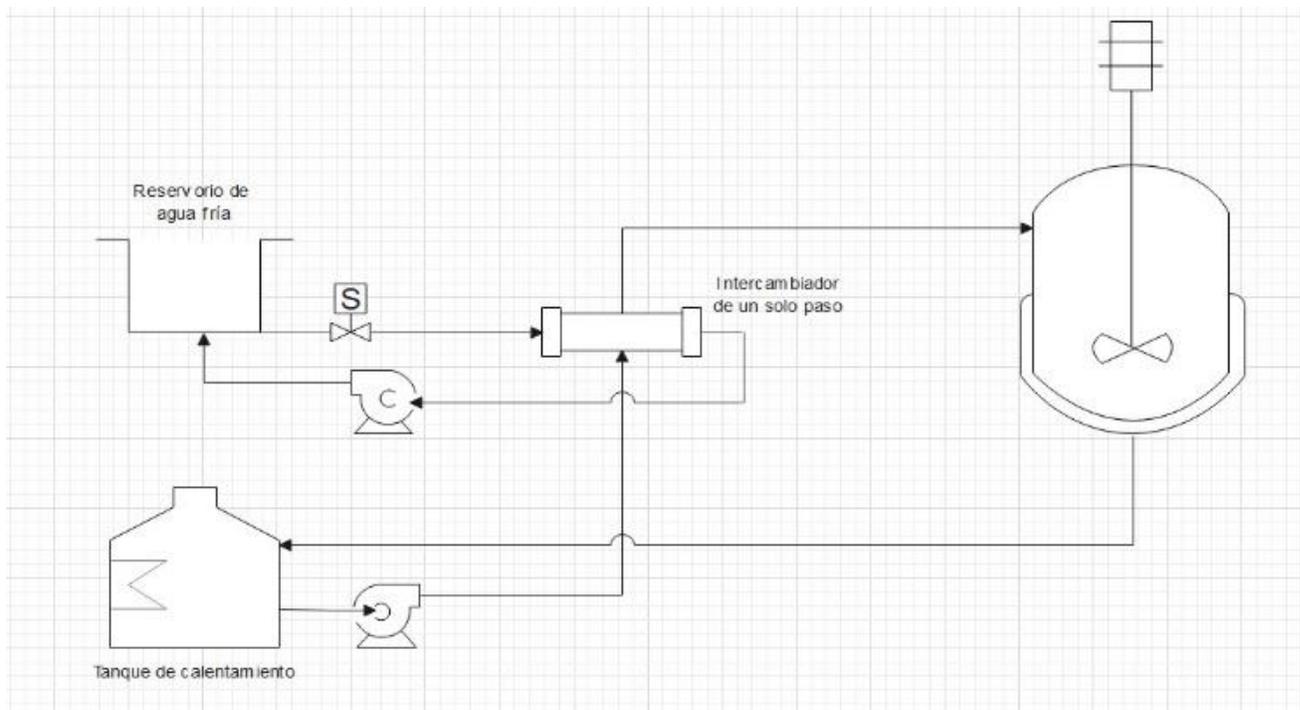


Figura A 5. Diseño propuesto 5.

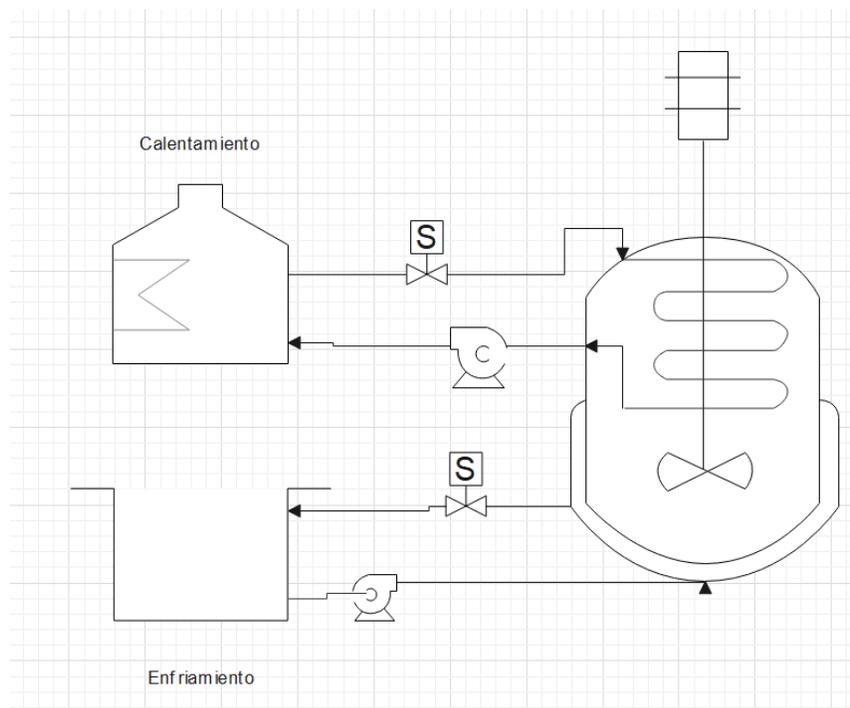


Figura A 6. Diseño propuesto 6.

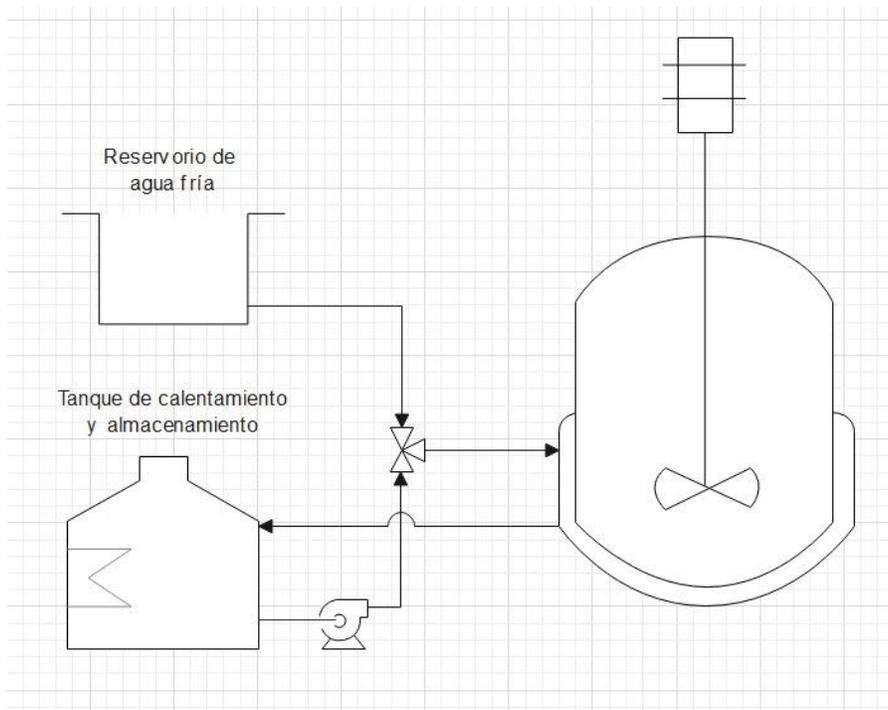


Figura A 7. Diseño propuesto 7.

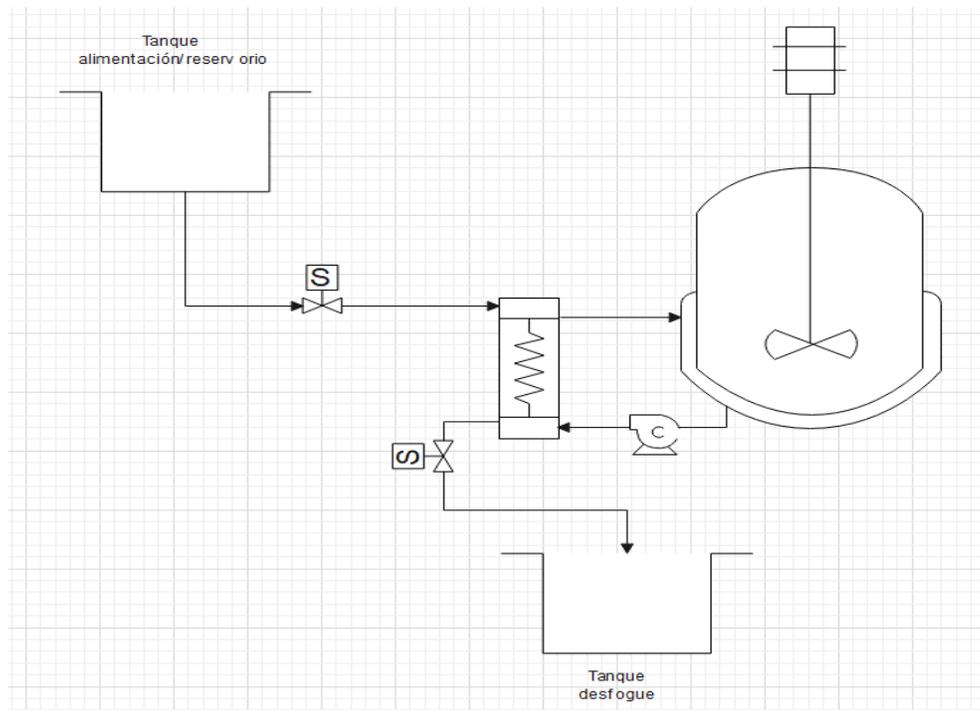


Figura A 8. Diseño propuesto 8.

8.2 ANEXO B. Matriz de decisiones

Tabla B 1. Matriz de decisiones de diferentes propuestas de diseño.

Diseño	Ingeniería	Implementación	Diseño control	Costos	Eficiencia	TOTAL
1.- Alimentación doble a chaqueta	3,5	2,5	4,5	4,5	3	18
2.- Alimentación tanque sin recirculación	3,5	3	4,5	4,5	3,5	19
3.- Alimentación tanque con recirculación	2	2,5	2,5	2	4	13
4.- Con intercambiador de calor	3,5	2,5	3	1	3,5	13,5
5.- Con válvula de mezclado	3	3	2	3	3,5	14,5
6.- Tanque de alimentación y otro de desagüe	3,5	4	3,75	4,5	3,25	19
7.- Coil de calentamiento por dentro	2,5	2	2,75	2	4	13,25
8.- Coil pasa por tanque de enfriamiento	3	3	3,5	5	3,5	18

8.3 ANEXO C. Catálogo de precios

Tabla C 1. Precios de equipos por catálogo del 2023 para Ecuador.

Equipo	Imagen	Precio Unidad	Consideraciones	Link
Bomba Centrífuga Presurizadora		\$110-105	Soportar temperaturas altas. Potencia no tan elevada.	https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-518018292-bomba-agua-presion-caudal-calefonos-truper-16-hp-_JM#position=1&search_layout=stack&type=item&tracking_id=d7ab1930-4cde-4484-893c-17788f50a35f https://kywitiendaenlinea.com/product/presurizador-1-6-hp-127v-1-toma/

Electroválulas

On/Off



\$60-50

Caudales bajos.

Conexión a PLC

https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-528899148-electrovalvula-valvula-solenoide-bronce-1-pulgada-110v-ac-_JM#position=3&search_layout=stack&type=item&tracking_id=658f653f-1ac6-4b15-bb00-ebd73bba0857

PLC



\$200-150

8 entradas y 8

salidas si se busca

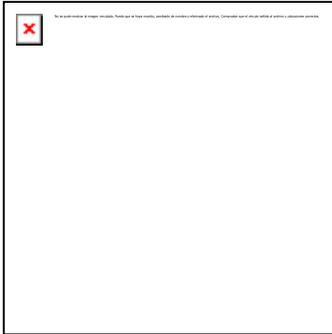
implementar más

elementos a futuro.

https://articulo.mercadolibre.com.ec/MEC-558493518-plc-logo-230-rce-siemens-quito-precio-negociable-original-_JM#reco_item_pos=0&reco_backend=machinalis-seller-items&reco_backend_type=low_level&reco_client=vip-seller_items-above&reco_id=37fd3896-a431-4705-a295-4ab40feda5aa

https://industrialesandes.co/#q=PLC&from_user=&page=0&refinements=%5B%5D&numerics_refinements=%7B%7D&index_name=%22prestashop1782_all_es%22

Tanques de Agua (40
L)



\$50-40

Capacidad de 50
litros.

<https://proferret.com.ec/producto/tanque-tipo-botella-pemd-negro-de-250-litros-rival/?v=05b5755efd2e>

Sensores de nivel



\$40-30

Se recomienda que
sean de mayor
calidad,
dependiendo del
presupuesto.

<https://www.electronicsecuador.com/producto/sensor-flotador-de-nivel-inox-de-10cm-doble-boya/>

8.4 ANEXO D. Parámetros de simulación

Tabla D 1. Parámetros de simulación

Variable	Valor	Unidad
K_s	1.03	g/L
K_p	0.139	g/L
A_1	9.5×10^8	-
A_2	2.55×10^{33}	-
E_{a1}	53800	J/mol
E_{a2}	198500	J/mol
R	8,31	J/molK
μ_p	0.34	h-1
K_{p1}	0.07	g/L
K_{s1}	1.68	g/L
R_{sx}	0.607	-
R_{sp}	0.435	-
$(k_{1a})_0$	38	h-1
μ_{O_2}	0.5	h-1
Y_{O_2}	0.970	mg/mg
K_{O_2}	8.86	mg/L
C_s inicial	92,53	g/L
Variable	Valor	Unidad
F_r	6	L/h
V_c	6	L
U_1	1.4E6	J/hm ² K
A_1	0.1946	m ²
$C_{heat}(agua)$	4.2	J/gK

ρ	1000	g/L
U_2	10340	J/hm ² K
A_2	0.1484	m ²
V_r	4	L
U_3	8,3E6	W/m ² K-J/hm ² K
A_3	0.0125	m ²
V_h	0.662	L
A_4	0,05	m ²
<i>Potencia</i>	3,3E6	J/h
$m(\text{coil})$	270	g
$C_{p,\text{coil}}$	0.460	J/gC
ΔH_r	518	kJ/molO ₂
T_{amb}	20	C

8.5 ANEXO E. Diagramas de bloques de las ecuaciones configuradas en Simulink



Figura E 1. Diagrama de bloques en Simulink - Reactor.

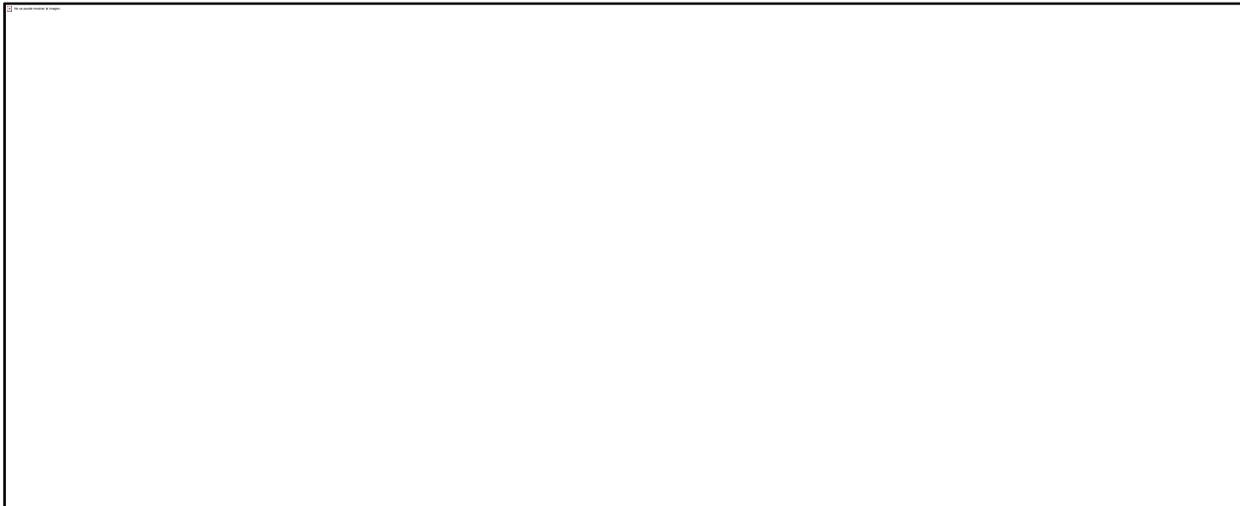


Figura E 2. Diagrama de bloques en Simulink - Tanque de Pre calentamiento.



Figura E 3. Diagrama de bloques en Simulink - Resistencia eléctrica.



Figura E 4. Diagrama de bloques en Simulink - Tasa de crecimiento celular.

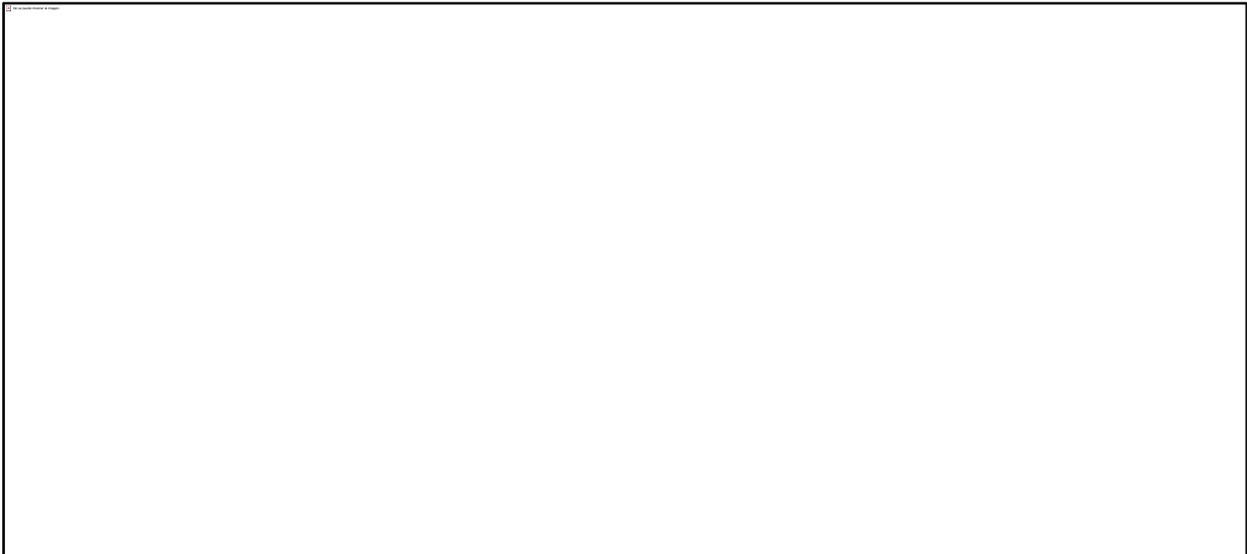


Figura E 5. Diagrama de bloques en Simulink - Chaqueta.

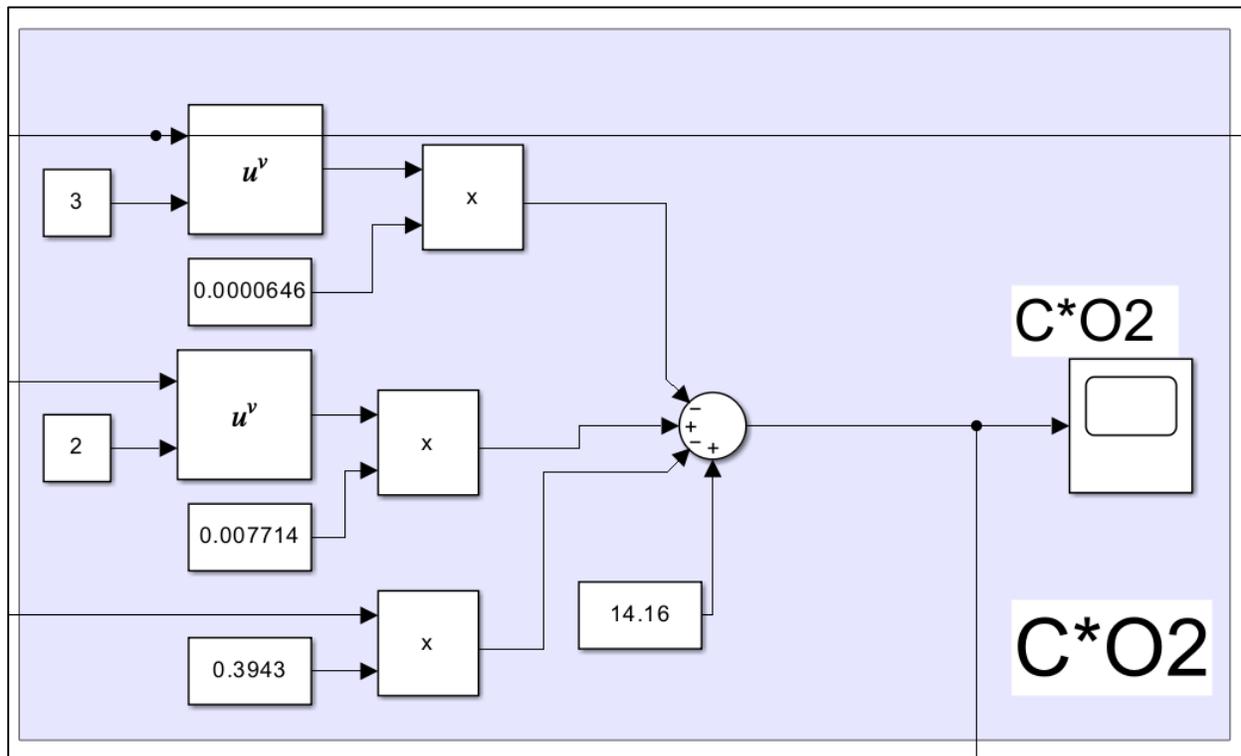


Figura E 6. Diagrama de bloques en Simulink - Concentración de Oxígeno en equilibrio en la fase líquida.

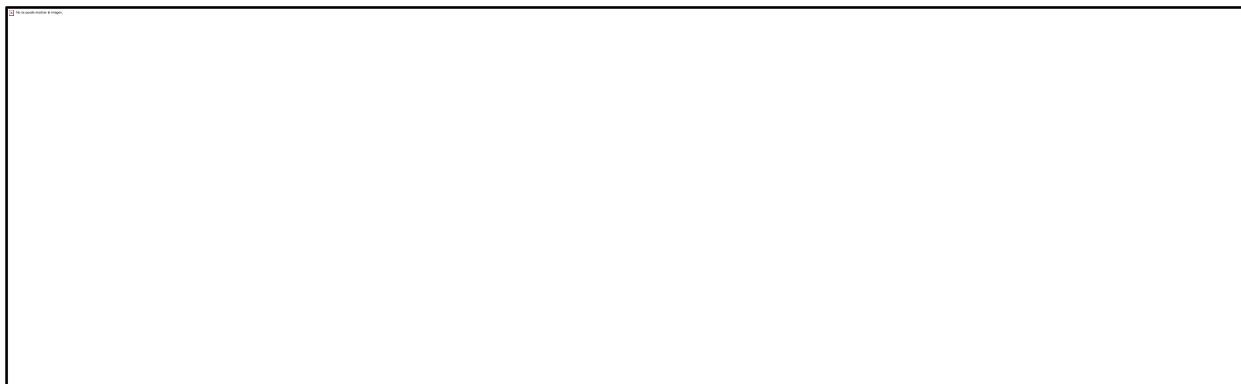


Figura A7. Diagrama de bloques en Simulink - Concentración de Oxígeno en la fase líquida.

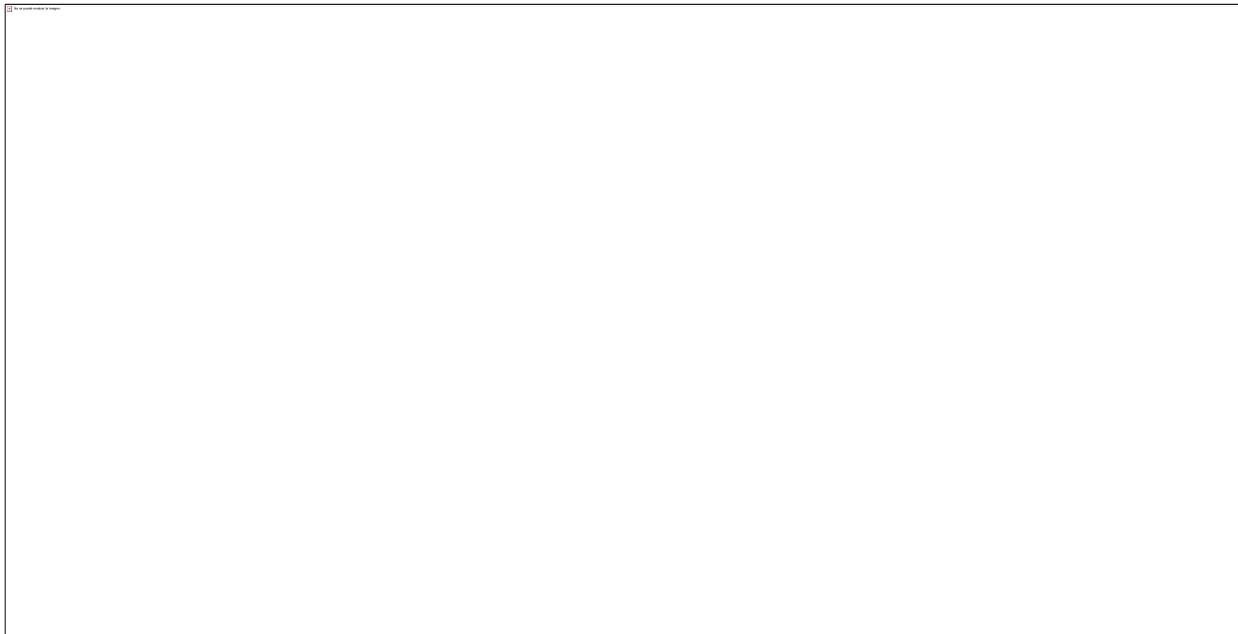


Figura A 89. Diagrama de bloques en Simulink - tasa de consumo del oxígeno.



Figura A 9. Diagrama de bloques en Simulink – Curva de crecimiento de biomasa.

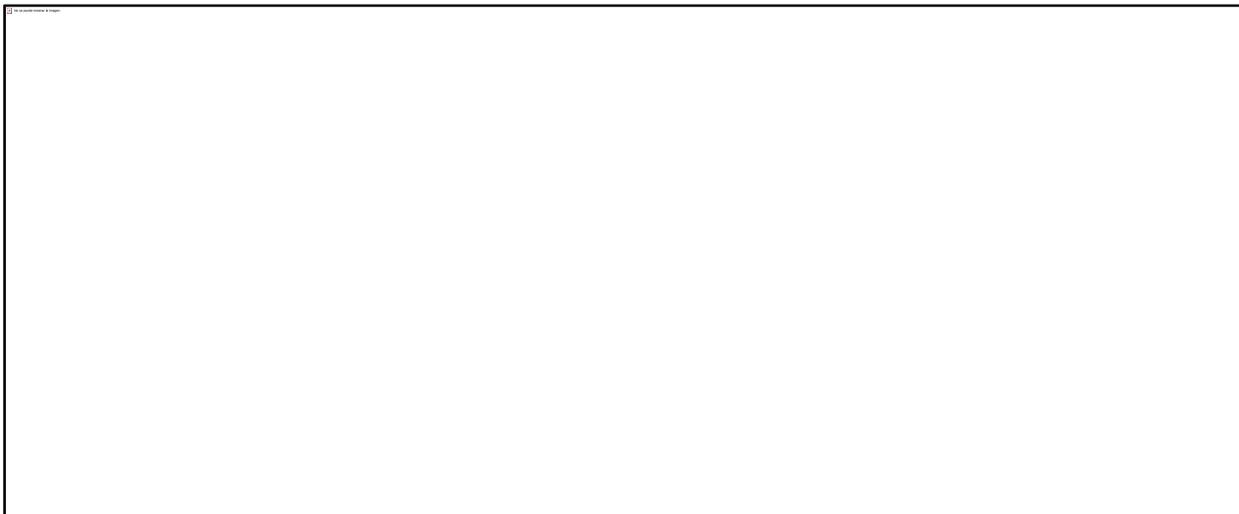


Figura A 10. Diagrama de bloques en Simulink - Producción de bioetanol.



Figura E 101. Diagrama de bloques en Simulink - Consumo de glucosa.

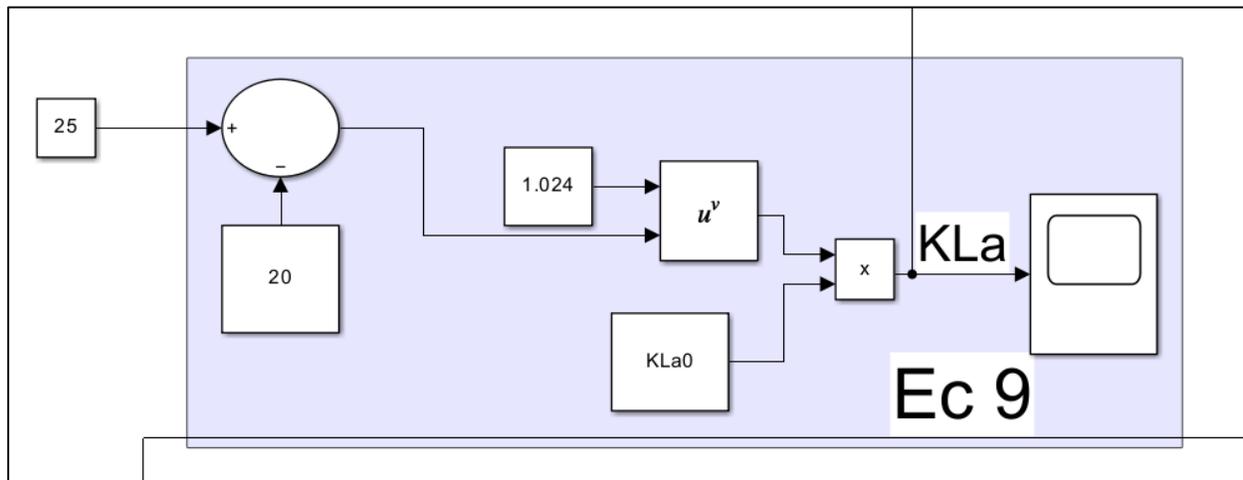


Figura E12. Diagrama de bloques en Simulink - Coeficiente de transferencia de masa.