

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA Y
AGROINDUSTRIA**

**EVALUACIÓN Y REDISEÑO DEL SISTEMA DE CALENTAMIENTO
Y ENFRIAMIENTO DEL BIORREACTOR LIFLUS GX**

**REDISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL AUTOMÁTICO DE
TEMPERATURA DEL BIORREACTOR TIPO TANQUE AGITADO
LiFlus GX**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO**

DAVID ALEXANDER ESPINOZA AGUILAR
david.espinoza@epn.edu.ec

DIRECTOR: MARÍA AUGUSTA PÁEZ LARA
maria.paez@epn.edu.ec

DMQ, septiembre 2023

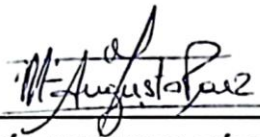
CERTIFICACIONES

Yo, DAVID ALEXANDER ESPINOZA AGUILAR declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



DAVID ALEXANDER ESPINOZA AGUILAR

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por DAVID ALEXANDER ESPINOZA AGUILAR, bajo mi supervisión.



MARÍA AUGUSTA PÁEZ LARA
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

DAVID ALEXANDER ESPINOZA AGUILAR

MARÍA AUGUSTA PÁEZ LARA

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo a mi familia, especialmente a mi mami Vilma quien ha sido mi mayor apoyo, fuente de inspiración y pilar fundamental durante toda mi vida. ¡Mami, lo logramos!

De igual manera, a mi hermano Erick quien me ha demostrado que soy su mayor ejemplo a seguir y por quien yo daría la vida sin dudarlo un segundo. ¡Te amo mija!

Dedico, también, este trabajo a un pequeño ser de cuatro patitas, a mi amada gatita Liv que ilumina todos mis días con su pelaje amarillo brillante como el sol y me demuestra su amor con mordidas y rasguños.

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a mi mami Vilma que se ha desvivido por mi y por mis hermanos durante toda nuestra vida, quien me ha apoyado incondicionalmente y me ha dado su amor sin pedir nada a cambio. Este logro se lo debo a usted, la amo.

Agradezco a mi pa, David, por apoyarme, por ser siempre ese despertador infalible y por los sánduches de desayuno, lo amo.

A mis hermanos Erick y Vanessa que a pesar de las peleas y enojos siempre me apoyaron y creyeron en mí, además, de alegrarse de cada uno de mis logros. Los amo.

A mis primos Alexis y Luis que desde niños fueron mis mejores amigos y me han apoyado en las buenas y las malas.

A mi mejor amiga Karlita quien desde que nos conocemos ha sido ese apoyo incondicional, no únicamente académico, sino también emocional. Gracias por acompañarme en cada momento de la carrera y de la vida desde que coincidimos, por aceptar formar parte del proyecto más loco que tuve, el AICHE, que si bien no estaba en tus planes, lo hiciste por mí. ¡Te quiero mucho!

A Sami quien tardó en aparecer en mi vida, pero lo hizo en el momento indicado, quien me ha acompañado cada noche, luchando contra el sueño, mientras hacía este trabajo. Gracias por ser mi pareja de baile y de vida, también gracias por todo tu amor a cambio del mío.

A mis amigos Namie, Nahir, Daniel, Edwin y Dani (compi) con quienes no únicamente compartí aula o hice trabajos, sino con quienes también disfruté de fiestas, salidas, giras y que me apoyaron en este largo camino.

A la Escuela Politécnica Nacional y a cada uno de los profesores con los que tuve el agrado de coincidir.

Finalmente, aunque no sea tan creyente, a Dios por darme la dicha de vivir esta aventura junto a todas estas personas que tanto amo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1 Objetivo general	2
1.2 Objetivos específicos.....	2
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Biorreactores.....	3
1.4.2 Sistemas de calentamiento y enfriamiento en biorreactores STR.....	5
1.4.3 Control automático de temperatura en biorreactores	7
2 METODOLOGÍA.....	9
2.1 Formulación del modelo matemático para el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX.....	9
2.1.1 Determinación de las dimensiones y áreas del biorreactor.....	9
2.1.2 Determinación de los coeficientes de transferencia de calor	10
2.1.3 Determinación de parámetros del control automático SI/NO para el calentamiento.....	12
2.1.4 Determinación de parámetros del control automático proporcional puro para el enfriamiento.....	13
2.2 Validación del modelo matemático para el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX.....	14
2.2.1 Fermentación de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	14
2.2.2 Determinación de parámetros cinéticos.....	15
2.2.3 Determinación del calor de fermentación.....	15
2.3 Diseño del control automático de temperatura para el biorreactor LiFlus GX sin emplear chaqueta de calentamiento	16
3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	18
3.1 Configuración y funcionamiento actual del biorreactor LiFlus GX.....	18
3.1.1 Áreas y coeficientes de transferencia de calor.....	19
3.1.2 Control automático de temperatura	20

3.2	Modelo matemático del comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX.....	23
3.2.1	Descripción matemática del crecimiento microbiano.....	23
3.2.2	Descripción matemática de los perfiles de temperatura.....	25
3.2.3	Ecuaciones de control automático de temperatura.....	29
3.3	Evaluación del control automático de temperatura actual.....	29
3.3.1	Crecimiento microbiano.....	30
3.3.2	Temperatura del medio de cultivo como variable controlada.....	31
3.3.3	Variables manipuladas del control automático actual.....	33
3.4	Diseño propuesto del control automático de temperatura.....	35
3.4.1	Descripción matemática del rediseño del control de temperatura.....	36
3.4.2	Evaluación del sistema de control de temperatura propuesto.....	38
3.5	Conclusiones.....	42
3.6	Recomendaciones.....	43
4	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	44
5	ANEXOS.....	48

RESUMEN

El biorreactor LiFlus GX cuenta con un sistema de enfriamiento conformado por un tubo en U por el que circula agua fresca y un controlador proporcional puro de temperatura que incorpora una válvula solenoide. El calentamiento se logra mediante una chaqueta metálica que incorpora una niquelina y un control automático SI/NO. Entre la chaqueta y el tanque del equipo existe un espacio vacío que resulta la principal falencia ya que dificulta la transferencia de calor hacia el medio de cultivo y compromete la integridad de la niquelina. En este sentido, el presente trabajo propone el rediseño del sistema de control automático de temperatura sin usar la chaqueta y con el tubo en U únicamente. Para esto, se planteó el modelo matemático que describa el comportamiento actual del biorreactor y se validó mediante fermentaciones de *Saccharomyces cerevisiae* en YPD al 5% de glucosa. Los cambios propuestos del rediseño se incorporaron al modelo matemático y se compararon los resultados predictivos con los obtenidos del comportamiento actual.

El modelo describe satisfactoriamente el comportamiento del control actual con desviaciones promedio de 0.67% y 2.78% para la temperatura del medio de cultivo y del agua de calentamiento, respectivamente. La incorporación de un controlador proporcional puro y una válvula solenoide en el rediseño permite la disminución del tiempo de estabilización de temperatura (60 minutos), de la energía entregada por la niquelina (162 J/min) y del consumo total de agua (120.11 L). Sin embargo, la válvula solenoide del control actual y la niquelina mantienen un sobredimensionamiento significativo.

PALABRAS CLAVE: control proporcional puro, control SI/NO, biorreactor, chaqueta de calentamiento, modelo matemático, rediseño.

ABSTRACT

The cooling system of LiFlus GX bioreactor comprises a U-tube with freshwater circulation and a pure proportional temperature controller that incorporates a solenoid valve. Heating is achieved by a metallic jacket, a solid-state relay (SSR) and an automatic ON/OFF control. An empty space between the jacket and the bioreactor tank is identified which becomes the main flaw. This hinders the heat transfer to the culture medium and compromises the integrity of the SSR. In this sense, this work targets the revamping of the automatic temperature control system without the jacket. Then, the mathematical model that describes the current behavior of the bioreactor was formulated and validated through fermentations with *Saccharomyces cerevisiae* in YPD at 5% glucose. Modifications in the revamping were incorporated into the mathematical model and the predictive results were compared with those obtained from the current behavior.

Formulated model successfully describes current behavior with 0.67% and 2.78% deviations for culture medium and heating water temperature, respectively. The implementation of pure proportional controller and solenoid valve provides the decrease of temperature stabilization time (60 minutes), the SSR energy (162 J/min) and total water consumption (120.11 L). However, the original solenoid valve and SSR state oversized.

KEYWORDS: pure proportional control, ON/OFF control, bioreactor, heating jacket, mathematical model, revamping.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El biorreactor LiFlus GX, ubicado en el Laboratorio de Bioprocesos, está diseñado para proporcionar un entorno biológico para diversas aplicaciones de cultivo celular. Está compuesto de un recipiente de vidrio de 2.5 litros de capacidad, acoplado a un cabezal de acero inoxidable que tiene diez puertos para la incorporación de sensores. Adicionalmente, cuenta con un sistema de agitación triple y un aspersor de aire tipo anillo con orificios (Hanil Scientific Inc., 2017).

El sistema de enfriamiento consta de un tubo en U por el que circula agua fresca y un controlador proporcional puro (P) de temperatura que incorpora una válvula solenoide. Este tipo de controlador permite disminuir, mas no eliminar, la desviación con respecto al valor deseado en estado estacionario mediante el aumento del factor de ganancia (Hahn & Edgar, 2003). Su uso en sistemas de control de temperatura se basa en la manipulación del flujo de un fluido de calentamiento o enfriamiento. De estos, el agua resulta un fluido de transferencia de calor apropiado por su alta capacidad calorífica, baja viscosidad y es relativamente económico (Qazi, 2017).

Por otra parte, el sistema de calentamiento del biorreactor está provisto de una chaqueta metálica que incorpora una resistencia eléctrica o niquelina y un control automático SI/NO de temperatura (Hanil Scientific Inc., 2017). Estos controladores son de tipo discontinuo y su salida está totalmente encendida o apagada, sin estado intermedio (Ryniecko et al., 2015). El control SI/NO es el más común en la industria porque los actuadores, relés o válvulas solenoide, son más simples y económicos que los actuadores de controles de tipo continuo (Uriča & Simonová, 2017).

En el biorreactor LiFlus GX, entre la chaqueta metálica y el recipiente de vidrio existe un espacio intermedio que contiene únicamente aire, mismo que actúa como aislante térmico. Al no producirse transferencia de calor hacia el medio de cultivo, el sistema de calentamiento y de control de temperatura resulta inadecuado para aplicaciones de cultivo celular (Bekkouche et al., 2013).

En este sentido, el presente trabajo tiene como finalidad rediseñar el sistema de control automático de temperatura del biorreactor tipo tanque agitado LiFlus GX, sin emplear chaqueta metálica y niquelina para el calentamiento con base en las ineficiencias identificadas en el sistema de control actual.

1.1 Objetivo general

Rediseñar el sistema de control automático de temperatura del biorreactor tipo tanque agitado LiFlus GX

1.2 Objetivos específicos

- Evaluar el control automático de temperatura actual del biorreactor LiFlus GX mediante modelado matemático.
- Diseñar e implementar un control automático de temperatura para el biorreactor LiFlus GX sin emplear chaqueta de calentamiento.
- Determinar las mejoras asociadas al rediseño del control automático de temperatura mediante comparación con el comportamiento actual del biorreactor durante el crecimiento microbiano de *Saccharomyces cerevisiae*.

1.3 Alcance

Inicialmente, se evaluará el sistema de control automático de temperatura del biorreactor LiFlus GX mediante modelado matemático. Para esto se medirán todas las dimensiones del equipo relacionadas con el tanque, agitadores, chaqueta, y tubo en U, para establecer parámetros operativos como área de transferencia de calor, volumen de operación y potencia de agitación. Además, se formulará el modelo matemático dinámico que describa el comportamiento del sistema de control de temperatura actual. Se realizará un análisis de grados de libertad para asegurar que el modelo tiene solución, y se implementará en la plataforma MatLab R2019a.

Posteriormente, se rediseñará el control automático de temperatura de manera que manipule únicamente el flujo de agua, sin hacer uso de la chaqueta de calentamiento y con una válvula solenoide adicional. Estas modificaciones se describirán matemáticamente y se implementarán en el modelo original.

Los resultados predictivos, obtenidos mediante la implementación del nuevo sistema de control, serán comparados con el comportamiento actual del sistema en el contexto del crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae*. Para ello, se realizarán fermentaciones experimentales con glucosa como sustrato y agua precalentada a 90°C como fluido de calentamiento en la chaqueta. Dicho escenario comprenderá condiciones no favorables de operación, es decir, sin reposición de agua y sin sello de neopreno que evite la evaporación

de agua contenida entre la chaqueta y el recipiente de vidrio. Finalmente, se analizarán las mejoras asociadas a este rediseño.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Biorreactores

El biorreactor es un recipiente (vessel) en el que se lleva a cabo una reacción o cambio biológico de enzimas, microorganismos, células animales, células vegetales y tejidos; cuya función básica es proporcionar condiciones óptimas para la fisiología y el metabolismo celular mediante la regulación de varios factores químicos y/o físicos (Zhong, 2011).

- **Tipos de Biorreactores**

En general, la mayoría de los sistemas de reacción biológica se pueden clasificar en sistemas de inmovilización y sistemas de suspensión cuyos requerimientos se cumplen con diferentes tipos de biorreactores que se indican en la Figura 1.1. Los biorreactores de membrana, de lecho empacado y de lecho fluidizado se utilizan principalmente para cultivar células adheridas o reacciones enzimáticas inmovilizadas; mientras que los biorreactores de tanque agitado, de transporte aéreo y de columna de burbujas se utilizan principalmente para cultivos en suspensión (Zhong, 2011).

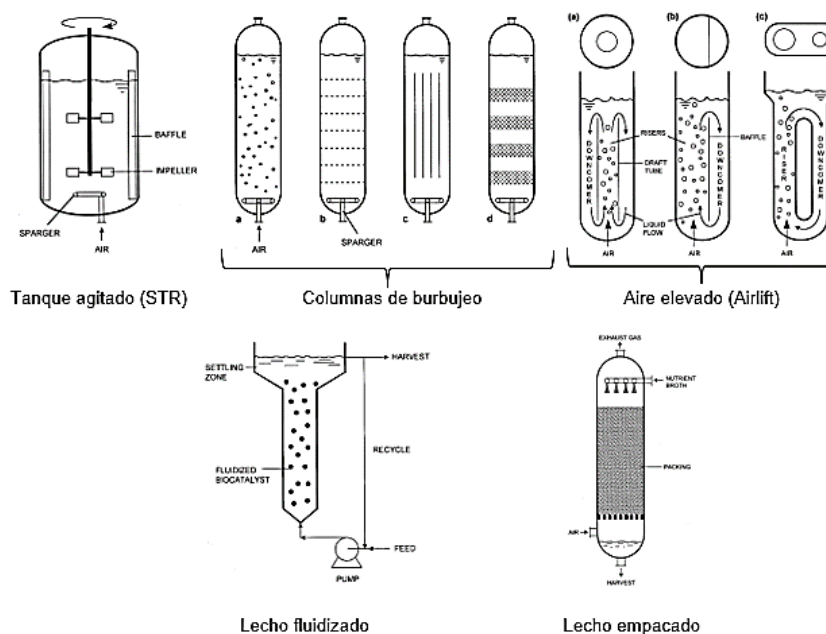


Figura 1.1. Tipos de biorreactores (Chisti & Moo-Young, 2003)

Los biorreactores de membrana están diseñados para la separación in situ de las células del medio e integran la producción y la separación en un solo paso. Las principales ventajas

son la alta densidad celular, la alta productividad volumétrica y el bajo esfuerzo cortante. Sin embargo, las desventajas incluyen la viabilidad celular deficiente, la estabilidad del proceso deficiente (ensuciamiento y obstrucción de la membrana), la falta de homogeneidad del producto y los gradientes de difusión que limitan las aplicaciones a gran escala (Zhong, 2011).

Las columnas de burbujeo constan de una piscina de líquido rociada con gas el cual se introduce en el fondo del recipiente a través de boquillas, placas perforadas o un rociador anular, para aireación, mezcla y circulación de fluidos, sin partes mecánicas móviles. Este diseño básico se puede modificar colocando varios tipos de partes internas dentro del recipiente. Sin embargo, la falta de un impulsor deriva en una mezcla deficiente para cultivos altamente viscosos y gran formación de espuma cuando se opera con alta tasa de aireación (Chisti & Moo-Young, 2003; Zhong, 2011).

En los biorreactores airlift, el volumen de fluido del recipiente se divide en dos zonas interconectadas por medio de un deflector o tubo de aspiración. Sólo una de estas zonas se rocía con aire u otro gas. La zona rociada se conoce como "riser" y la zona que no recibe gas se denomina "downcomer" (Chisti & Moo-Young, 2003).

Los biorreactores de lecho fluidizado son adecuados para reacciones que involucran un biocatalizador de partículas suspendidas en fluido, como la enzima inmovilizada y partículas celulares o flóculos microbianos. Se utiliza una corriente ascendente de líquido para "fluidizar" los sólidos relativamente densos. Geométricamente, es similar a una columna de burbujeo con diferencia de la sección transversal, que se expande cerca de la parte superior para reducir la velocidad superficial del líquido fluidizante a un valor por debajo del necesario para mantener los sólidos en suspensión (Chisti & Moo-Young, 2003).

Los biorreactores de lecho empaquetado son los más frecuentes para sistemas de inmovilización. En estos biorreactores un fluido que contiene nutrientes y sustratos disueltos fluye a través del lecho sólido para satisfacer las necesidades del biocatalizador inmovilizado. Los metabolitos y los productos se liberan en el fluido y se eliminan con el flujo (Chisti & Moo-Young, 2003; Zhong, 2011).

Los biorreactores tipo tanque agitado (STBR), generalmente constan de un recipiente de vidrio, carbonato o acero inoxidable que contiene un eje central accionado por motor que soporta uno o más agitadores que realizan una amplia gama de funciones: transferencia de calor y masa, aireación y mezcla para la homogeneización. Están provistos, también, de deflectores colocados equidistantes alrededor de la periferia del tanque. En el caso de procesos aeróbicos, se requieren dispositivos para la inyección de aire u oxígeno en el

biorreactor en una posición por debajo del impulsor (Chisti & Moo-Young, 2003; Zhong, 2011; Wang & Zhong, 2007).

Los STBR son uno de los biorreactores convencionales debido a sus ventajas, como facilidad de escalado y control, la buena mezcla de fluidos, la capacidad de transferencia de oxígeno y los impulsores alternativos. Sin embargo, este tipo de biorreactor también tiene algunas limitaciones, como el alto consumo de energía, el alto cizallamiento y las preocupaciones sobre el sellado y la estabilidad de los ejes en los biorreactores altos (García-Ochoa et al., 2011).

- **Modalidades de operación**

Los STBR se utilizan principalmente para producciones pequeñas y medianas; la mayoría de los procesos con microorganismos se llevan a cabo en operaciones por lotes o por lotes alimentados, debido a la capacidad de producción generalmente baja o media necesaria, pero también debido a la dificultad de la producción continua en el caso de procesos microbianos industriales (García-Ochoa et al., 2011).

De estos, la fermentación por lotes o batch es un sistema cerrado dinámico en el que todos los componentes del medio, excepto el oxígeno, ácido o base para el control del pH y agentes antiespumantes, se colocan al comienzo del cultivo (Srivastava & Gupta, 2011). Las ventajas de esta modalidad son: una fácil operación, control de contaminación, facilidad de escalado (hasta producción industrial), flexibilidad y la posibilidad de probar diferentes parámetros al mismo tiempo, especialmente cuando se trabaja con pequeños volúmenes en operaciones a escala de laboratorio (Keskin et al., 2019). Sin embargo, la baja productividad, los tiempos de inactividad entre lotes y la acumulación de productos tóxicos figuran como sus principales desventajas (Patakova et al., 2020).

1.4.2 Sistemas de calentamiento y enfriamiento en biorreactores STR

La temperatura es uno de los parámetros críticos durante las fermentaciones que debe controlarse en un biorreactor. De hecho, los microorganismos generalmente se clasifican según su temperatura de crecimiento como termófilos (>50 °C), mesófilos (20 a 50 °C) o psicrófilos (<20°C). Sin embargo, independientemente del tipo de microorganismo existe un rango de temperatura óptimo, bastante estrecho, para el crecimiento. Si se cultiva a una temperatura inferior a la óptima, el crecimiento es inhibido lo que resulta en tasas reducidas de producción celular y síntesis de productos. Por otro lado, si la temperatura de crecimiento es demasiado alta se producirá la muerte y la síntesis de proteínas o de

metabolitos también se verán seriamente afectadas, lo que deriva en disminución del rendimiento del producto o afecta la calidad de este (Zhong, 2011).

La transferencia de calor es prioritaria para el control de la temperatura durante el funcionamiento del biorreactor porque el calor de fermentación y la actividad metabólica de las células absorben o generan energía. Habitualmente, este control se logra fácilmente mediante el intercambio de calor con diferentes aparatos como lo son: chaquetas de calentamiento, serpentines internos (tipo helicoidal y deflector) o un intercambiador de calor externo (de doble tubería, carcasa y tubos, y un intercambiador de calor de placas y espiral) como se muestra en la Figura 1.2 (García-Ochoa et al., 2011).

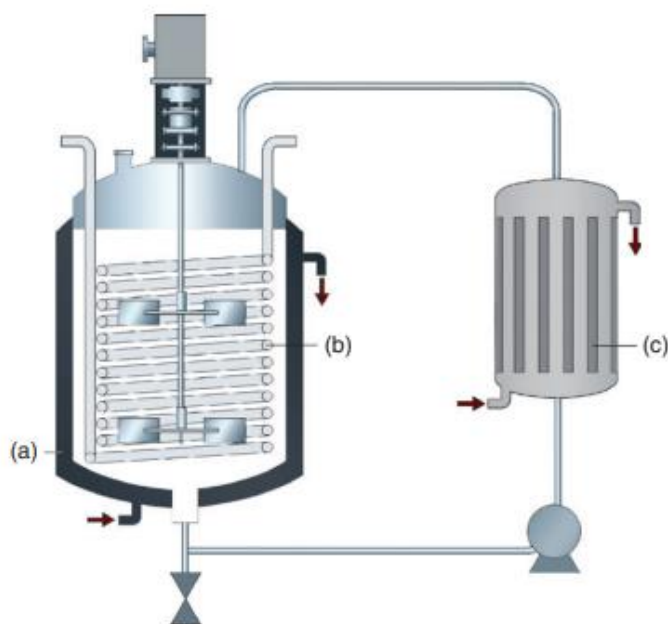


Figura 1.2. Vías de transferencia de calor en un biorreactor de tanque agitado (STBR) (a) chaqueta; (b) serpentines internos; y (c) intercambiador de calor externo (García-Ochoa et al., 2011)

La camisa o chaqueta emplea fluidos de calentamiento o enfriamiento que circulan a través de esta, brinda un área de transferencia de calor baja y son inadecuados para alcanzar la temperatura de operación en un tiempo razonable. Los serpentines internos pueden funcionar con diferentes velocidades de líquido de acondicionamiento y se usan con frecuencia en tanques a diferentes escalas porque proporcionan un área de transferencia de calor relativamente grande. Sin embargo, un problema asociado a esta configuración puede ser el crecimiento de una película de células sobre la superficie de transferencia de calor. Las unidades de intercambiador de calor externas son independientes del

biorreactor, fáciles de ampliar y proporcionan la mejor capacidad de transferencia de calor, generalmente empleados a escala industrial (García-Ochoa et al., 2011).

1.4.3 Control automático de temperatura en biorreactores

De la literatura se ha concluido que los lazos de control por retroalimentación simple proporcional integral (PI) y proporcional integral derivativo (PID) se emplean convencionalmente para el acondicionamiento de temperatura de biorreactores STBR, ya que proporcionan un control más preciso y estable. La aplicación de estos lazos está relacionada con procesos de alta rigurosidad donde se busca eliminar desviaciones por completo (Kumar et al., 2019). En el caso de biorreactores, aunque el rango de temperatura de las fermentaciones es amplio, la inercia de los sistemas de calentamiento y enfriamiento es alto debido a los sistemas de transporte de fluidos con reducida área de circulación. En este sentido, a escala laboratorio generalmente se emplean controles de temperatura que pueden tolerar algunos grados de cambio con respecto al punto establecido (Mitra & Murthy, 2021).

Si el acondicionamiento de temperatura se realiza con calentadores eléctricos el control ON/OFF es el tipo más apropiado a pesar de los inconvenientes que ocasionan durante su operación (Mehendale et al., 2021). Primero el actuador, usualmente un relé, posee una alta frecuencia de encendido – apagado que promueve la reducción de su vida útil. En segundo lugar, no es posible lograr un control de precisión por su baja sensibilidad lo que resulta perjudicial para sistemas con alta inercia térmica. De tal manera que, en este tipo de control, la temperatura deseada fluctúa alrededor del punto de ajuste (histéresis) cuando el relé se enciende y se apaga (Ibrahim, 2019).

Por otra parte, el controlador proporcional o “P”, cuya ley de control es proporcional a la desviación respecto al valor deseado, se emplea en biorreactores para el control de temperatura mediante la manipulación del flujo de un fluido, ya sea de calentamiento o enfriamiento, que circula a través de un serpentín sumergido en el medio de cultivo o en chaquetas que rodean al recipiente donde se lleva a cabo el proceso (Ellis, 2012; Lim et al., 2019).

El controlador proporcional ajusta el caudal del fluido de acondicionamiento mediante el cambio del área del orificio del actuador (válvulas) calculado en función de una señal de error que se mide como la diferencia entre el observado y el deseado (set point) (Qiao et al., 2020). El tipo de válvula empleada depende de la rigurosidad y de la rapidez de respuesta; entre ellas, las válvulas solenoides responden rápidamente a una señal eléctrica, que mediante una corriente que fluye a través de una bobina ubicada en su

interior, genera un campo magnético que provoca el desplazamiento de un vástago metálico. En este sistema de control, se usa un resorte para devolver el actuador y la válvula a sus estados de reposo cuando se elimina el flujo de corriente (Zhang, 2010).

2 METODOLOGÍA

El rediseño del sistema de control automático de temperatura del biorreactor LiFlus GX se trata de un estudio con enfoque mixto, que comprende la evaluación primaria del sistema, en forma cualitativa y cuantitativa. Se contempla la deducción de ecuaciones matemáticas que describan el comportamiento del sistema mediante la incorporación de conceptos fenomenológicos y la posterior reformulación de estas para generar resultados predictivos del rediseño propuesto bajo las mismas condiciones de operación. Además, se incluyen ensayos de crecimiento microbiano que permitan evaluar la validez de los modelos.

2.1 Formulación del modelo matemático para el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX

Para la descripción matemática del comportamiento del biorreactor LiFlus GX durante el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* se identificaron tres sistemas: medio de cultivo, agua de calentamiento y agua de enfriamiento como se indica en el esquema de la Figura 2.1. El comportamiento actual es un escenario desfavorable que excluye la reposición de agua de calentamiento y el uso de sello de neopreno en el espacio intermedio.

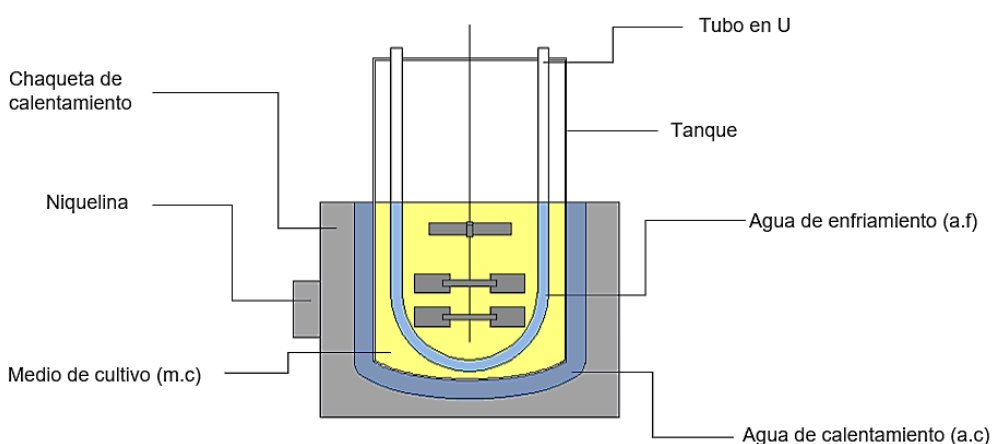


Figura 2.1. Esquema y sistemas identificados en el Biorreactor LiFlus GX

Se plantearon balances de masa y energía en estado transitorio para todos los sistemas y se analizó la consistencia dimensional de las ecuaciones. Se calcularon los grados de libertad del modelo planteado para su resolución en MatLab R2019a mediante el método numérico de Euler simple con un intervalo de tiempo discreto de 1×10^{-3} minutos.

2.1.1 Determinación de las dimensiones y áreas del biorreactor

La altura y los diámetros, internos y externos, de la chaqueta de calentamiento y del tanque del biorreactor LiFlus GX se midieron con flexómetro y calibrador Vernier. A partir de estas

dimensiones se estimaron las áreas de la base y las paredes laterales del tanque. En el caso de la base, se determinó el volumen de agua que puede contener el depósito y, de este valor experimental se restó el volumen correspondiente al de un cilindro dimensionalmente equivalente. El valor obtenido se comparó con el estimado mediante las ecuaciones de la Tabla 2.1 propuestas en la Sección VIII – División 1 del Código Internacional ASME para la construcción de recipientes a presión. En función de un error porcentual se identificó la geometría de la base tanto de la chaqueta de calentamiento como del tanque. El detalle de los cálculos se presenta en el ANEXO I.

Tabla 2.1. Volumen y área para tapas toriesféricas y elipsoidales de recipientes a presión (ASME, 2019)

Geometría de la base	Área [m ²]	Volumen [m ³]
Toriesférica	$0.9578 Di^2$	$0.0809 Di^3$
Elipsoidal	$1.1713 Di^2$	$0.13385 Di^3$

Di : diámetro interno del recipiente

De la misma forma se midieron el diámetro de los agitadores, y la longitud y los diámetros interno y externo del tubo en U por el que circula agua de enfriamiento

2.1.2 Determinación de los coeficientes de transferencia de calor

En la Figura 2.2 se presentan los flujos energéticos relacionados a los tres sistemas identificados.

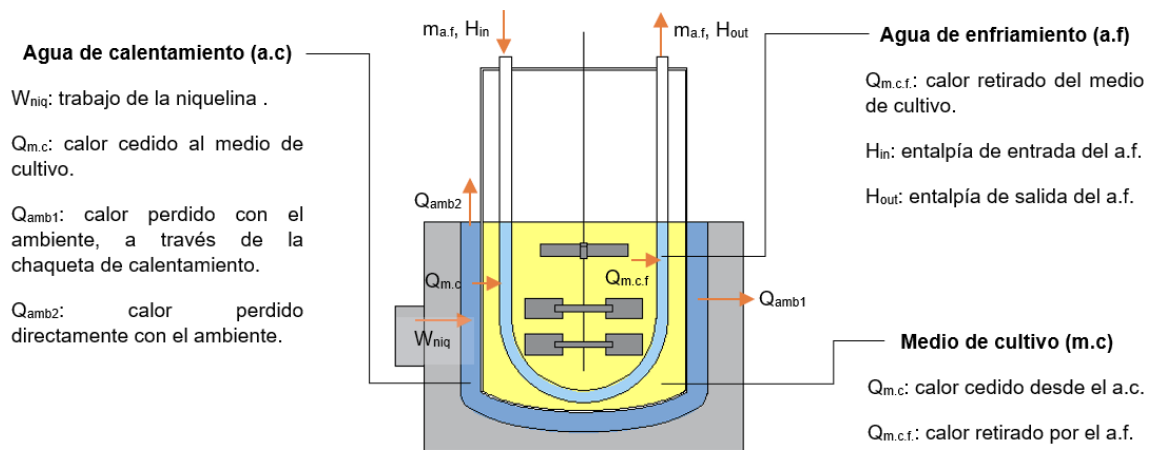


Figura 2.2. Flujos energéticos de los sistemas identificados en el biorreactor LiFlus GX

Los coeficientes de transferencia de calor se calcularon a partir de la resistencia térmica con el fin de modelar el flujo de calor como circuitos térmicos en forma análoga a los circuitos eléctricos que se usan para el flujo de corriente.

Para determinar las resistencias asociadas a mecanismos de transferencia de calor por conducción se consideró radial a través de un cilindro como se muestra en la Ecuación 2.1.

$$R_{conducción} = \frac{\ln\left(\frac{r_e}{r_i}\right)}{2\pi kL}$$

Ecuación 2.1. Resistencia a la transferencia de calor por conducción para un cilindro (Bergman et al., 2011)

Donde,

r_e y r_i : radio externo e interno del cilindro respectivamente, [m],

k : conductividad térmica del material del cilindro, $\left[\frac{W}{m \cdot ^\circ C}\right]$,

L : altura del cilindro, [m].

Los coeficientes convectivos de transferencia de calor se determinaron mediante las correlaciones descritas en la Tabla 2.3, para lo cual se usaron los números adimensionales de Nusselt (Nu), Reynolds (Re), Prandtl (Pr) y Grashof (Gr) en su forma general conocida.

Tabla 2.3. Correlaciones de los coeficientes convectivos de transferencia de calor (Holman, 1999)⁽¹⁾, (da Silva et al., 2017)⁽²⁾, (da Silva et al., 2014)⁽³⁾

Coeficiente de convección	Tipo de convección	Geometría	Correlación	Observaciones
$h_{conv.nat.v}$	natural en espacio cerrado ⁽¹⁾	Ánulo vertical	$Nu = 0.046(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{3}}$	$10^6 < Gr Pr < 10^9$ $1 < Pr < 20$
$h_{conv.for}$	forzada ⁽²⁾	Turbina tipo Rushton	$Nu = 0.10Re^{0.83}Pr^{0.33}V_i^{0.14}$	-
h_{aire}	natural en espacio abierto ⁽¹⁾	Cilindro vertical	$Nu = 0.059(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}$	$10^4 < Gr Pr < 10^9$
h_{ch}	natural en espacio abierto ⁽¹⁾	Cilindro vertical	$Nu = 0.68 + \frac{0.670(Gr \cdot Pr)^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}}$	$Gr Pr < 10^9$
h_i	interna a través de un tubo ⁽³⁾	Tubo en U	$h_i = 1429\left(1 + 0.0146T_m\right)\left(\frac{u^{0.8}}{Di^{0.2}}\right)$	Ecuación válida para agua entre 4°C y 100°C

V_i relación de viscosidades del flujo agitado, T_m temperatura promedio del fluido de enfriamiento, u velocidad del fluido de enfriamiento y D_i diámetro interno del tubo en U

2.1.3 Determinación de parámetros del control automático SI/NO para el calentamiento

El control automático de calentamiento del biorreactor emplea un relé en estado sólido (niquelina) como actuador. Para determinar la potencia que entrega la niquelina se realizó un ensayo en ausencia del tanque con 1000 mL de agua a 21.35°C. Se fijó un valor deseado de 40.78°C y una velocidad de agitación de 100 rpm. La temperatura del agua se registró cada 20 segundos hasta que la misma alcance el valor especificado y previo a que se accione el control automático para el enfriamiento.

Con los datos experimentales obtenidos y planteado el balance de energía, en estado estacionario, para el agua de calentamiento se determinó la potencia entregada por la niquelina (W_{niq}) mediante la Ecuación 2.2. Dicha potencia fue corregida para un volumen de agua de 190 mL, correspondiente a la capacidad nominal de la chaqueta con tanque, bajo el supuesto de que la velocidad de calentamiento es independiente de la cantidad del fluido de calentamiento.

$$W_{niq} = m_{a.c} \cdot Cp \cdot \frac{\Delta T}{\Delta t} - h_{aire} \cdot A_{aire} \cdot (T_{a.c} - T_{amb}) - U_{ch} \cdot A_{ch} \cdot (T_{a.c} - T_{amb})$$

Ecuación 2.2. Balance de energía en estado estacionario del agua de calentamiento

Donde,

$m_{a.c}$: masa de agua de calentamiento, [kg],

Cp : capacidad calorífica a presión constante del agua, $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$,

h_{aire} : coeficiente de convección natural del aire en contacto directo con el sistema, $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

A_{aire} : área de transferencia de calor con el aire, [m^2],

T_{amb} : temperatura ambiente, [$^{\circ}C$],

U_{ch} : coeficiente global de transferencia de calor por el lado de la chaqueta, $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

A_{ch} : área de transferencia de calor por la chaqueta, [m^2]

Δt : intervalo de tiempo total de medición experimental, [s],

ΔT : diferencia de temperatura en el intervalo de tiempo experimental, [$^{\circ}C$],

$T_{a.c}$ = Temperatura del agua de calentamiento, [$^{\circ}C$].

Además, mediante la Ecuación 2.3 se estimó la eficiencia (η) de la niquelina con relación a la potencia máxima establecida por el fabricante.

$$\eta = \frac{(W_{m\acute{a}x} - W_{m\acute{i}n})_{promedio}}{I \cdot \Delta V} \cdot 100$$

Ecuación 2.3. Eficiencia de la niquelina

Donde,

$W_{m\acute{a}x}, W_{m\acute{i}n}$: trabajo experimental máximo y mínimo aportado por la niquelina respectivamente, [W],

I : intensidad de corriente, [A],

ΔV : rango de voltaje de fabricación, [V].

2.1.4 Determinación de parámetros del control automático proporcional puro para el enfriamiento

El control automático de enfriamiento utiliza una válvula solenoide como actuador y un controlador de retroalimentación simple tipo proporcional puro. En principio, se determinó el caudal en estado estacionario de la válvula solenoide, también conocido como *bias*, a través de la estimación de las temperaturas en el equilibrio del agua de calentamiento, del agua de enfriamiento, y del medio de cultivo. Para ello, se plantearon los balances de energía en estado estacionario para los tres sistemas de modo que la única variable desconocida sea el caudal mínimo entregado por la válvula solenoide.

Por otra parte, se estimó la constante de proporcionalidad del controlador, también conocida como ganancia, mediante la Ecuación 2.4. Para esto, se cuantificó el volumen de agua de enfriamiento con una probeta para cuatro desviaciones de temperatura respecto al valor deseado, y se registró el tiempo que permanecía accionada la válvula solenoide.

$$K = \frac{V_{a.f}}{T_{desv} \cdot t_{enc}}$$

Ecuación 2.4. Constante de proporcionalidad del controlador proporcional puro

Donde,

K : constante de proporcionalidad o ganancia del controlador, $\left[\frac{L}{min \cdot ^\circ C}\right]$,

$V_{a.f}$: volumen de agua de enfriamiento, [L],

t_{enc} : tiempo de encendido de la válvula solenoide, [min],

T_{desv} : desviación de temperatura, [°C].

Una vez incorporados al modelo matemático, los valores de la ganancia (K) fueron tomados como referencia, ya que los mismos se variaron de manera iterativa a fin de reducir el número de oscilaciones de la variable manipulada en el control automático proporcional y así lograr una respuesta adecuada del actuador.

2.2 Validación del modelo matemático para el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX

El modelo matemático se validó a través de la fermentación de *Saccharomyces cerevisiae* y la incorporación de parámetros cinéticos obtenidos experimentalmente en el proceso biotecnológico. Previa ejecución de las fermentaciones, se identificaron y corrigieron las fugas del biorreactor, y se realizó una calibración de la termocupla.

2.2.1 Fermentación de *Saccharomyces cerevisiae*

La fermentación se llevó a cabo con levadura de panificación comercial Bakels Platinum y agua precalentada a 90°C como fluido de calentamiento en la chaqueta. No se contempló el uso de sello de neopreno que evite la evaporación del agua de calentamiento ni tampoco reposición para definir un escenario de comportamiento actual en condiciones no favorables. Se utilizó YPD (yeast extract peptone dextrose) como medio de cultivo con 5% de glucosa, mismo que fue esterilizado en la autoclave marca BOYN a 121°C durante 15 minutos. El biorreactor operó a una temperatura de 30°C, velocidad de agitación de 200 rpm y tasa de aireación de 1 VVM. El inóculo se preparó con 5 g de levadura comercial en 50 mL de medio de cultivo y se activó mediante agitación durante 12 horas.

La biomasa generada se determinó cada 30 minutos mediante la densidad óptica (OD), a una longitud de onda de 600 nm, en el espectrofotómetro GENESYS 20 de la marca Thermo Spectronic. El consumo final de sustrato se determinó a través de la concentración de azúcares reductores por el método DNS a una longitud de onda de 540 nm.

Además, cada 15 minutos se registró la temperatura del medio de cultivo medida con la termocupla calibrada del biorreactor y las temperaturas del agua de calentamiento y de enfriamiento medidas con la termocupla digital portable Tipo K de la marca DIGI-SENSE.

2.2.2 Determinación de parámetros cinéticos

Se determinaron el tiempo de la fase de latencia (λ) y la velocidad específica de crecimiento máxima (μ_{max}) como parámetros cinéticos relacionados al crecimiento microbiano de *Saccharomyces cerevisiae*.

El tiempo de latencia se estimó con el criterio de la segunda derivada para la identificación de puntos de inflexión ($f''(x) = 0$). Para esto, se obtuvo una aproximación de la primera derivada como el cociente entre la variación de densidad óptica y el intervalo de tiempo correspondiente. De los valores obtenidos, se interpoló para identificar el tiempo en el cual dicha variación sea igual a 0.

Una vez diferenciada la fase de latencia y con ello el inicio de la fase de crecimiento exponencial, la velocidad específica máxima de crecimiento microbiano (μ_{max}) se determinó mediante la linealización del logaritmo natural de la concentración de biomasa versus el tiempo de fermentación.

De igual manera se estimaron los coeficientes de la ecuación de Arrhenius, factor pre-exponencial (A) y energía de activación (Ea), que relaciona la velocidad de crecimiento específica con la temperatura. Para esto se emplearon los resultados reportados por Wang et al., (2015) en su estudio cinético sobre la tasa de crecimiento específico de la especie de levadura *Saccharomyces cerevisiae* en glucosa a diferentes concentraciones.

En el ANEXO II se puede evidenciar cálculos detallados de los parámetros cinéticos.

2.2.3 Determinación del calor de fermentación

Mediante revisión bibliográfica se definió el rango de temperatura de crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* y las reacciones termoquímicas para las fermentaciones aerobia y anaerobia a partir de glucosa. Se compararon los valores experimentales y los reportados en la literatura de la cantidad de oxígeno disuelto con respecto a la cantidad de sustrato, y se estableció el calor de fermentación máximo factible de alcanzar en las condiciones de operación. Este valor de partida se ajustó en forma iterativa para una fermentación sin control de temperatura y con una concentración inicial de glucosa y un tamaño de inóculo igual a los datos experimentales, hasta alcanzar la temperatura máxima de crecimiento. La ampliación de los cálculos se presenta en el ANEXO III.

Finalmente, para establecer el grado de confianza en la validación se estimó la desviación punto a punto de los valores obtenidos mediante la resolución del modelo matemático respecto a los valores experimentales, tanto para la generación de biomasa como para la temperatura de los sistemas identificados.

2.3 Diseño del control automático de temperatura para el biorreactor LiFlus GX sin emplear chaqueta de calentamiento

Con la finalidad de obtener una retroalimentación simple del sistema de control propuesto y de incorporar la menor cantidad de componentes de control nuevos, se establecieron los siguientes criterios de diseño para el control automático de temperatura.

- Uso únicamente del tubo en U para el sistema de calentamiento y enfriamiento y la eliminación completa de la chaqueta.
- Reutilización de la niquelina para el calentamiento del agua, con su respectivo control automático SI/NO y del control proporcional puro y su correspondiente válvula solenoide para el enfriamiento.
- Evitar el uso de lazos de control automático avanzados de tipo cascada, feedforward y de proporción.

En la Figura 2.3 se detallan los sistemas analizados en el rediseño del sistema de acondicionamiento de temperatura del biorreactor LiFlus GX y sus respectivos aportes energéticos.

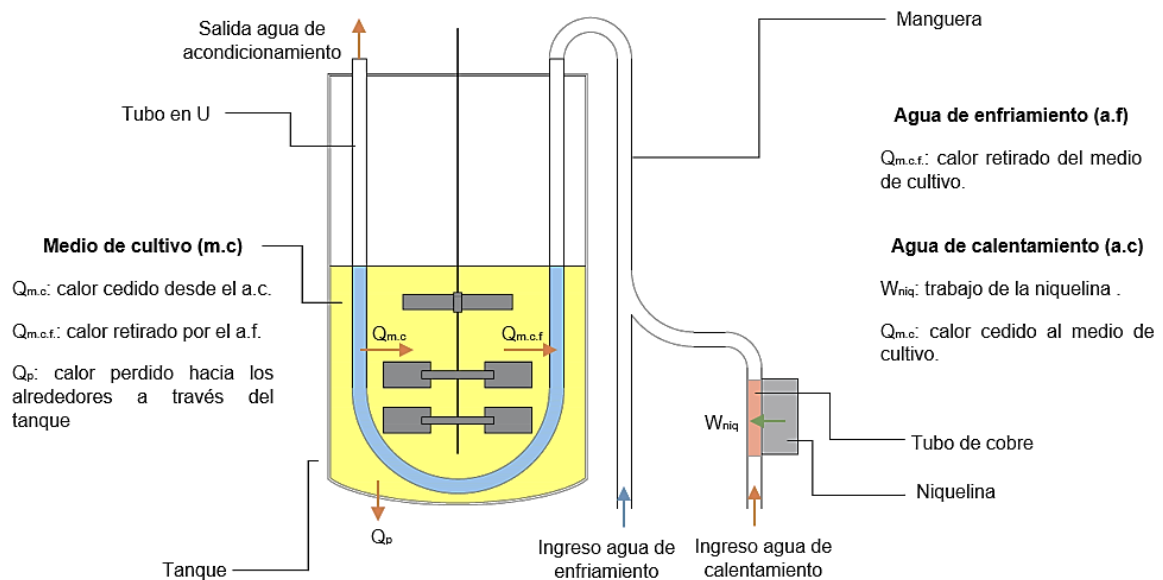


Figura 2.3. Flujos energéticos de los sistemas identificados en el rediseño propuesto para el sistema de acondicionamiento de temperatura del biorreactor LiFlus GX

En este sentido, los coeficientes de transferencia de calor para el medio de cultivo y el agua de calentamiento se estimaron mediante la Ecuación 2.5, dado que los flujos energéticos de ambos sistemas cambian por la ausencia de chaqueta.

$$h_{int} = \frac{3.66 k}{D}$$

Ecuación 2.5. Ecuación de coeficiente de convección interna del agua de calentamiento a través del tubo en U (Bai & Bai, 2019)

Donde,

k : conductividad térmica del agua, $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$,

D : diámetro interno del tubo en U, $[m]$.

Esta correlación se aplica a flujos laminares ($Re < 2100$), que fue el principal ajuste para la circulación del agua de calentamiento a través de un tubo en U que cumpla con la relación $D/L \approx 0$ (Bai & Bai, 2019).

Aunque se reutilizan los controladores SI/NO y proporcional puro del sistema original, los parámetros referidos a potencia de la niquelina y ganancia del controlador se reajustaron mediante iteraciones hasta lograr que las señales de las variables manipuladas sean estables y no representen riesgos mecánicos para sus respectivos actuadores.

Finalmente, todos los cambios se implementaron en un nuevo modelo matemático desarrollado con base en el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX y los resultados predictivos se compararon con los obtenidos previamente a través del software MatLab R2019a.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Configuración y funcionamiento actual del biorreactor LiFlus GX

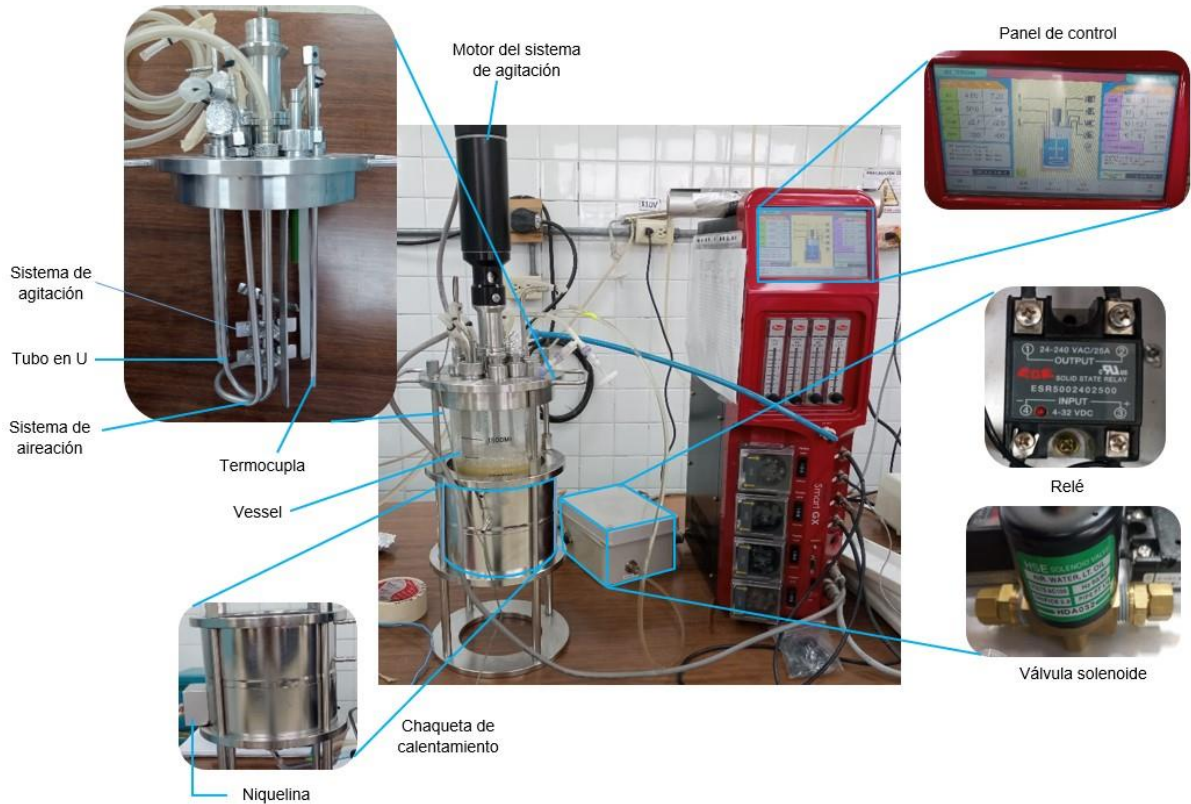


Figura 3.1. Componentes del biorreactor LiFlus GX

El biorreactor, cuyos componentes principales se presentan en la Figura 3.1, cuenta con un tanque de 2.5 litros de capacidad nominal, mismo que está acoplado a un cabezal de acero inoxidable que tiene puertos para la incorporación de sensores de pH, oxígeno disuelto y temperatura. Sobre este está montado el sistema de aspersión tipo anillo con orificios y el sistema de agitación conformado por dos discos de seis paletas planas tipo Rushton y un disruptor de espuma (Hanil Scientific Inc., 2017).

Las dimensiones de los componentes se muestran en la Figura 3.2, donde se identifica un espacio vacío entre la chaqueta y el recipiente cuya capacidad nominal equivale a 190 mL de agua. Dicho espacio resulta ser la principal falencia asociada a la configuración actual del biorreactor LiFlus GX, dado que está lleno de aire al no permitir la circulación de fluidos, lo que dificulta la transferencia de calor y por tanto compromete la integridad de la níquelina durante el acondicionamiento de la temperatura.

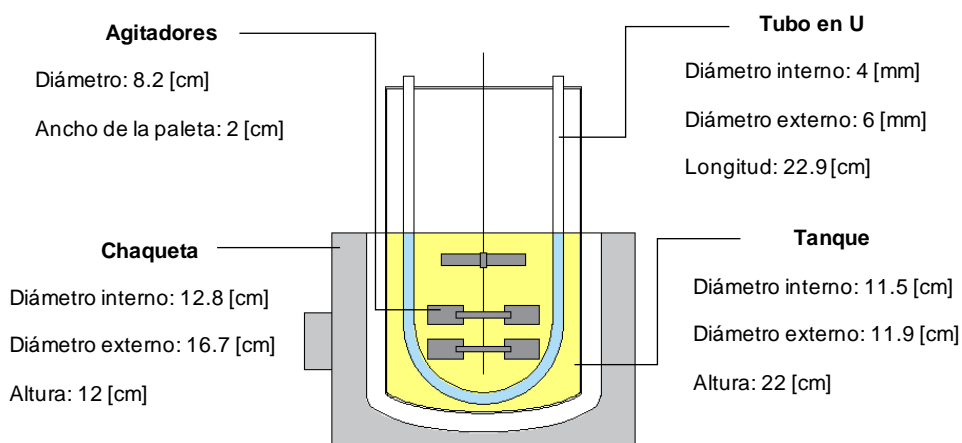


Figura 3.2. Dimensiones del biorreactor LiFlus GX

La geometría de la base de la chaqueta resultó elipsoidal y del tanque toriesférica como se verifica en la Tabla 3.1. La desviación porcentual respecto al volumen experimental en el caso de la forma elipsoidal fue de 8.11% para la chaqueta y 73.24% para el tanque; mientras que cuando se considera toriesférica asciende a 34.66% para la chaqueta y desciende a 4.71% para el tanque.

Tabla 3.1. Volúmenes de la base de la chaqueta y del tanque del biorreactor LiFlus GX

Volumen de la base [mL]	Chaqueta	Tanque
Experimental	265.26	119.19
Elipsoidal	286.77	206.49
Toriesférica	173.33	124.80

3.1.1 Áreas y coeficientes de transferencia de calor

En la Tabla 3.2 se presentan las áreas y los coeficientes de transferencia de calor asociados a la chaqueta de calentamiento, tanque y tubo en U. En el ANEXO IV se detalla el cálculo de estos parámetros.

La mayor área de transferencia de calor corresponde a la chaqueta de calentamiento, que también presenta los coeficientes de transferencia más bajos. Esto se debe a que la chaqueta no está en contacto con el medio de cultivo; por el contrario, a través de esta se suministra energía al agua contenida entre ambos recipientes (chaqueta y tanque) y además incluye las pérdidas de energía con el medio ambiente, lo que dificulta el acondicionamiento de la temperatura.

Tabla 3.2. Parámetros de transferencia de calor.

Componente	Área [m^2]		Coeficiente de transferencia de calor [$\frac{W}{^\circ C m^2}$]	
	Nomenclatura	Valor	Nomenclatura	Valor
Tanque	$A_{a.c}$	4.33×10^{-2}	$U_{a.c}$	132.77
Chaqueta	A_{chaq}	5.59×10^{-2}	U_{chaq}	5.53
	A_{aire}	1.86×10^{-3}	h_{aire}	5.33
Tubo en U	$A_{a.f}$	3.60×10^{-3}	$U_{a.f}$	4065.41

Por otra parte, si bien el área de transferencia de calor del tubo en U resulta ser casi 10 veces inferior al área de la chaqueta, la misma se encuentra en contacto directo con el medio de cultivo y presenta pérdidas energéticas despreciables debido al corto tiempo de residencia del agua que por este circula. Además, dicho parámetro se ve compensado con un elevado coeficiente de transferencia de calor, lo que implica una mayor eficiencia en el mantenimiento de la temperatura debido a la facilidad con la que se transfiere energía entre el tubo en U y el medio de cultivo (Bergman et al., 2011).

3.1.2 Control automático de temperatura

La termocupla del biorreactor es el sensor de temperatura y el primer elemento de los lazos de control. Esta está se ubica dentro del tanque y mide la temperatura del medio de cultivo, dicho valor es transformado en una señal eléctrica que se envía a dos controladores que lo comparan con respecto al valor de referencia o set point. Posteriormente, los controladores entregan una señal, en función del error medido, a dos actuadores distintos. El primero de estos corresponde a un relé de estado sólido marca EGE, acoplado a la chaqueta, cuya intensidad de corriente es de 25 A y un potencial entre 24 y 240 V. El segundo corresponde a una válvula solenoide marca HSE que permite el paso de agua de enfriamiento.

Sin embargo, la termocupla registra valores erróneos de temperatura con una desviación del 57.18% respecto a los valores medidos con la termocupla digital portable Tipo K de la marca DIGI-SENSE como se indica en la Figura 3.3 donde se presenta la curva de calibración.

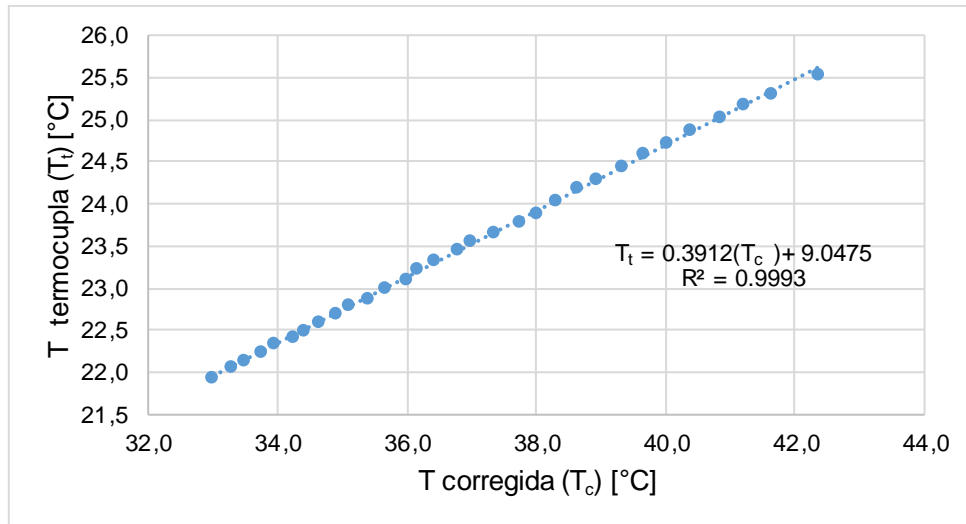


Figura 3.3. Curva de calibración del sensor de temperatura del biorreactor LiFlus GX

En lo que refiere al desempeño de la niquelina, en la Figura 3.4 se evidencia que, previo a los 50 minutos (3000 segundos) de iniciado el proceso de calentamiento, la niquelina aporta trabajo con una frecuencia de encendido y apagado del actuador (relé) que no es uniforme. Este comportamiento se debe a que la niquelina, mediante un aporte energético más reiterado, intenta vencer la inercia del sistema, es decir, grado de “lentitud” con la que el medio alcanza la temperatura deseada (Sala & Picallo-Pérez, 2020).

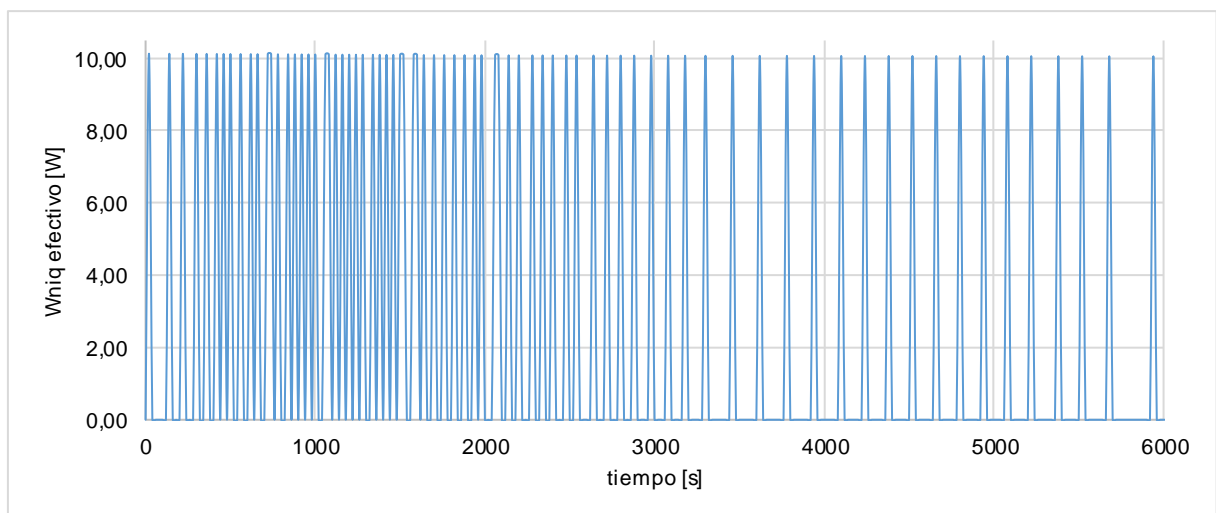


Figura 3.4. Trabajo de la niquelina en función del tiempo (0 a 6000 [s])

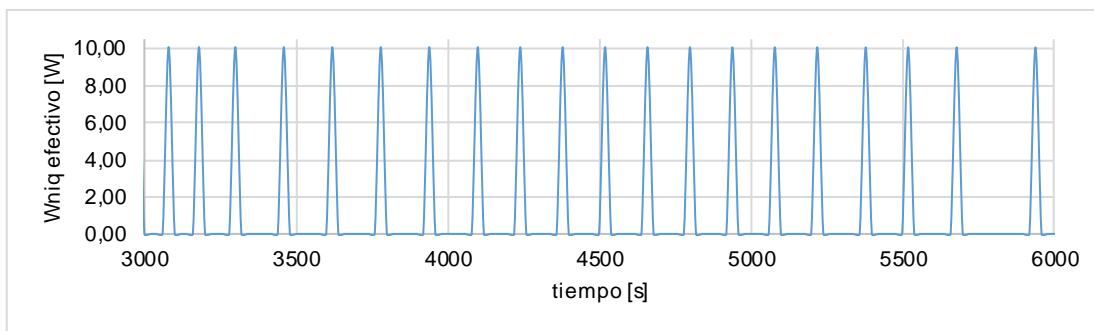


Figura 3.5. Trabajo de la niquelina en función del tiempo (3000 a 6000 [s])

Luego de 3000 segundos, de la Figura 3.5 se observa que el periodo de apagado de la niquelina varía entre 100 a 120 segundos. En tanto que, cerca de los 6000 segundos, que es el tiempo en el que sistema alcanza el valor deseado de temperatura, el actuador permanece más tiempo apagado.

Por otra parte, independientemente del grado de “lentitud” o de inercia, mismo que es proporcional a la diferencia de temperatura, el trabajo que aporta la niquelina es constante (10.09 [W]), comportamiento que es propio de un actuador eléctrico en un sistema de control SI/NO (Ibrahim, 2019). De esta manera, se determinó que el trabajo efectivo medio de la niquelina, respecto a la potencia máxima que la misma puede entregar, es apenas el 0.18%, lo que significa que la niquelina se encuentra sobredimensionada para el sistema de calentamiento requerido en el biorreactor (Ver ANEXO V).

De la Tabla 3.3, se evidencia que el caudal de agua de enfriamiento es proporcional a la desviación de temperatura respecto al valor deseado. A partir de estos resultados, se deduce control automático para el enfriamiento es un proporcional puro o “P”, ya que el caudal es ajustado mediante la apertura de la válvula en función de una señal de error $\epsilon(t)$, que se mide como una desviación del set point (Qiao et al., 2020).

Tabla 3.3. Resultados pruebas experimentales para determinación de la ganancia (K)

Temperatura tanque [°C]		Tsp [°C]		ΔT [°C]	Caudal			K [mL/min·°C]
Sensor	Corregido	Sensor	Corregido		t [s]	Volumen [mL]	q_{af} [L/min]	
22.3	33.88	14	12.66	19.88	4.28	140	1.96	98.7
20	28.00			14.00	3.38	110	1.95	140
17	20.33			6.33	2.14	60	1.68	266
17	20.33	16	17.77	2.56	1.5	40	1.60	626

De esta manera, se determinó una ganancia promedio del controlador proporcional puro igual a 282 [mL/min·°C], mismo que sirvió como base de iteración para el valor incorporado en Matlab R2019a. Por otra parte, del análisis en estado transitorio, el caudal en el equilibrio (q_{af0}) que la válvula solenoide entrega es 2.16 [mL/min].

3.2 Modelo matemático del comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX

3.2.1 Descripción matemática del crecimiento microbiano

El modelo planteado por Hills y Wright (1994) representa de manera acertada el crecimiento microbiano debido a que produce resultados satisfactorios frente a condiciones ambientales variables, es decir, con mayor sensibilidad a los cambios de temperatura. Así, la Ecuación 3.1 describe la generación de biomasa por lotes desde la fase de adaptación hasta la fase estacionaria que incluye también el crecimiento exponencial (Swinnen et al., 2004; Baty & Delignette-Muller 2004).

$$\frac{dx}{dt} = x \mu_{max} \alpha(t) f(x)$$

Ecuación 3.1. Variación de la concentración de biomasa en función del tiempo.

Donde,

x : concentración de biomasa en base seca, $\left[\frac{g}{L}\right]$,

μ_{max} : tasa de crecimiento específica máxima, en $[min^{-1}]$.

En la Figura 3.6 se muestra la dependencia de la velocidad específica máxima de crecimiento con la temperatura a diferentes concentraciones de glucosa a partir de los resultados presentados por Wang et al., (2015) en su estudio de cultivo por lotes con *Saccharomyces cerevisiae*.

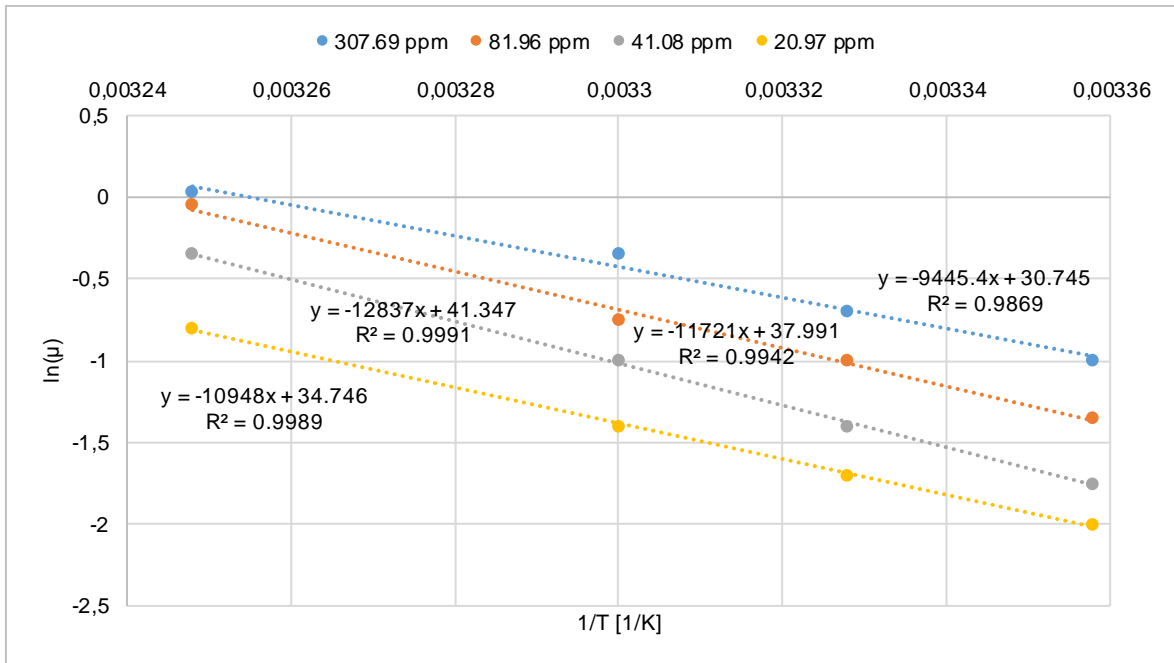


Figura 3.6. Linealización de la ecuación de Arrhenius para el crecimiento de *S. cerevisiae* en glucosa a diferentes concentraciones

El mejor ajuste de la ecuación de Arrhenius con un factor de regresión lineal (R^2) de 0.991 se presenta para una concentración de 41.08 ppm de glucosa. Con la energía de activación y el factor pre-exponencial resultantes y a una temperatura de 30 °C el μ_{max} teórico es igual a 0.37 [h⁻¹] que se desvía en apenas 2.14 % respecto al valor experimental de 0.36 [h⁻¹]. Por lo tanto, mediante la Ecuación 3.2 se estima la variación de la velocidad específica de crecimiento con la temperatura.

$$\mu_{max} = \left(\frac{9.05261 \times 10^{17}}{60} \right) e^{-\frac{1.07 \times 10^5}{8.314 T}}$$

Ecuación 3.2. Velocidad específica de crecimiento en función de la temperatura del medio de cultivo

Por otra parte, la función de inhibición por agotamiento de sustrato $f(x)$ descrita en la Ecuación 3.3 y conocido como modelo logístico representa la transición de la curva de crecimiento a la fase estacionaria que puede fijarse en 1 cuando no se considera limitación de la fuente de carbono.

$$f(x) = 1 - \frac{x}{x_{max}}$$

Ecuación 3.3. Función de inhibición por agotamiento de sustrato

Donde x_{max} es la concentración máxima de biomasa alcanzada en la fase estacionaria igual a 55,21 $\left[\frac{g}{L}\right]$ conforme los datos experimentales.

Respecto a la función de ajuste $a(t)$, que describe la adaptación del inóculo a su nuevo entorno, se considera la Ecuación 3.4 planteada por Hills y Wright (1994) que describe la fase de latencia como un fenómeno intracelular en el caso de una célula estructurada.

$$\alpha(t) = \frac{\mu_{max} t}{e^{\mu_{max} \lambda} - 1} \left(\frac{m - x}{x} \right)$$

Ecuación 3.4. Función de ajuste

Donde,

λ : tiempo de duración de la fase de latencia, 70 [min],

m : concentración de biomasa mínima para la formación de una célula estructurada, y es determinada por la Ecuación 3.5.

$$\frac{dm}{dt} = \mu_{max} m; \quad m(t = 0) = x_0$$

Ecuación 3.5. Generación de biomasa mínima para la formación de una célula estructurada

De manera complementaria se incorpora el consumo de sustrato descrito mediante la Ecuación 3.6 sin considerar una fracción para mantenimiento de biomasa.

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{X/S}} \cdot \left(\mu_{max} \left(\frac{\mu_{max} \cdot t}{e^{\mu_{max} \lambda} - 1} \left(\frac{m - x}{x} \right) \right) \left(1 - \frac{x}{x_{max}} \right) x \right)$$

Ecuación 3.6. Variación de la concentración del sustrato en función del tiempo

Donde,

S : concentración del sustrato, $\left[\frac{g \text{ glucosa}}{L}\right]$

$Y_{X/S}$: rendimiento biomasa-sustrato, $0.5 \left[\frac{g \text{ biomasa}}{g \text{ glucosa}}\right]$ (Ghose et al., 1979).

3.2.2 Descripción matemática de los perfiles de temperatura

El modelo matemático del comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX comprende la variación de temperatura de tres sistemas identificados: medio de cultivo, agua de calentamiento y agua de enfriamiento.

La Ecuación 3.7 describe la variación de la temperatura del medio de cultivo en función del tiempo. El primer término corresponde a la generación de energía durante el proceso fermentativo, en tanto que, el segundo y tercer término se relacionan con el calor aportado por el agua de calentamiento y el calor entregado hacia el agua de enfriamiento, respectivamente.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta\hat{H}_{rx} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)}{(\rho \cdot Cp(S,T))_{medio}} + \frac{U_{a.c} \cdot A_{a.c} \cdot (T_{a.c} - T)}{(\rho \cdot V \cdot Cp(S,T))_{medio}} - \frac{U_{a.f} \cdot A_{a.f} \cdot (T - T_{a.f})}{(\rho \cdot V \cdot Cp(S,T))_{medio}}$$

Ecuación 3.7. Variación de temperatura del medio de cultivo en función del tiempo

Donde,

V : volumen del medio de cultivo, 1 [L],

T : temperatura del medio de cultivo, [°C],

$U_{a.c}$: coeficiente global de transferencia de calor hacia el medio de cultivo, $\left[\frac{J}{min \cdot m^2 \cdot K}\right]$,

$A_{a.c}$: área de transferencia de calor [m^2],

$T_{a.c}$: Temperatura del agua de calentamiento [°C],

$T_{a.f}$: temperatura del agua de enfriamiento, [°C],

$U_{a.f}$: coeficiente global de transferencia de calor hacia el agua de enfriamiento, $\left[\frac{J}{min \cdot m^2 \cdot K}\right]$,

$A_{a.f}$: área de transferencia de calor, [m^2],

ρ : densidad del medio de cultivo, 0.99806 $\left[\frac{kg}{L}\right]$

La capacidad calorífica del medio de cultivo $Cp(S,T)$ se calcula con la Ecuación 3.8 en función de la concentración de sustrato y de la temperatura del medio de cultivo (Darros-Barbosa et al., 2003).

$$Cp(S,T) = (a_1 + b_1S + c_1S^2) + T \cdot (a_2 + b_2S + c_2S^2) + T^2 \cdot (a_3 + b_3S + c_3S^2)$$

Ecuación 3.8. Capacidad calorífica del medio de cultivo en $\frac{J}{g \cdot ^\circ C}$

Los coeficientes a, b y c empleados se muestran en la Tabla 3.4 y corresponden a soluciones acuosas de glucosa para representar la influencia del consumo de sustrato durante la fermentación.

Tabla 3.4. Coeficientes de la capacidad calorífica para soluciones acuosas de glucosa (Darros-Barbosa et al., 2003).

$\left[\frac{a_1}{g \cdot ^\circ C}\right]$	4.15263	$\left[\frac{a_2}{g \cdot ^\circ C^2}\right]$	-0.00107	$\left[\frac{a_3}{g \cdot ^\circ C^3}\right]$	0.174×10^{-4}
$\left[\frac{b_1}{g^2 \cdot ^\circ C}\right]$	-0.03271×10^{-4}	$\left[\frac{b_2}{g^2 \cdot ^\circ C^2}\right]$	1.999×10^{-8}	$\left[\frac{b_3}{g^2 \cdot ^\circ C^3}\right]$	-0.013×10^{-8}
$\left[\frac{c_1}{g^3 \cdot ^\circ C}\right]$	1.994×10^{-8}	$\left[\frac{c_2}{g^3 \cdot ^\circ C^2}\right]$	-0.014×10^{-12}	$\left[\frac{c_3}{g^3 \cdot ^\circ C^3}\right]$	0.0013×10^{-13}

Con respecto al calor de fermentación $\Delta \hat{H}_{rx}$ se estimó que la relación molar de oxígeno y glucosa para el presente proceso fermentativo a 30 °C, es 8.54×10^{-4} mol O₂/ mol de glucosa. Este valor es significativamente inferior al estequiométrico requerido para la fermentación aerobia de *S. cerevisiae* en glucosa (3.84 mol O₂/mol glucosa) (Ghose et al., 1979). La disponibilidad limitada de oxígeno, a pesar de trabajar con una tasa de aireación de 1 VVM, se debe a la baja solubilidad del oxígeno en agua a 30°C (7.6 mg/L) que es el mayor problema en las fermentaciones aerobias (Huang & Tang, 2007; Karbowiak et al., 2010).

Bajo esta premisa, se consideró un calor de fermentación máximo de 6860 J/g_{biomasa} correspondiente al crecimiento de *S. cerevisiae* en glucosa en condiciones anaerobias (Ghose et al., 1979). A partir de este valor, se estimó que el calor de fermentación experimental fue 2017.65 J/g_{biomasa}, ya que al operar de manera adiabática la fermentación de *S. cerevisiae* alcanza temperaturas cercanas a la máxima de crecimiento establecida en 45.4 °C por Salvadó et al., (2011).

La variación de la temperatura del agua de calentamiento se describe mediante la Ecuación 3.9. El primer término corresponde al trabajo aportado por la niquelina, el segundo término se refiere al calor entregado al medio de cultivo, el tercer y cuarto término corresponden a las pérdidas energéticas con el ambiente a través de la chaqueta y con el aire en contacto directo con el sistema, respectivamente.

$$\frac{dT_{a.c.}}{dt} = \frac{\eta \cdot I \cdot (V_{max} - V_{min}) - U_{a.c.} \cdot A_{a.c.} \cdot (T_{a.c.} - T) - U_{chaq.} \cdot A_{chaq.} \cdot (T_{a.c.} - T_{amb}) - h_{aire} \cdot A_{aire} \cdot (T_{a.c.} - T_{amb})}{\rho_{a.c.} \cdot V_{a.c.} \cdot Cp_{a.c.}}$$

Ecuación 3.9. Variación de la temperatura del agua de calentamiento en función del tiempo

Donde,

U_{chaq} : coeficiente global de transferencia de calor por el lado de la chaqueta, $\left[\frac{J}{min \cdot m^2 \cdot K}\right]$,

A_{chaq} : área de transferencia de calor por el lado de la chaqueta de calentamiento, $[m^2]$,

T_{amb} : temperatura ambiente, 18 [°C].

h_{aire} : coeficiente de convección natural correspondiente a las pérdidas directas con el ambiente, $\left[\frac{J}{min \cdot m^2 \cdot K}\right]$,

A_{aire} : área de transferencia de calor de las pérdidas directas con el ambiente, $[m^2]$,

η : eficiencia de la niquelina,

I : intensidad de corriente, 25 A,

V_{max} : voltaje máximo, 240 V,

V_{min} : voltaje mínimo, 24 V.

$V_{a.c}$: volumen de agua de calentamiento, 190 [mL]

$Cp_{a.c}$: capacidad calorífica del agua de calentamiento, $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$,

$\rho_{a.c}$: densidad del agua de calentamiento, $\left[\frac{kg}{L}\right]$.

El cambio de temperatura del agua de enfriamiento en el transcurso de la fermentación se describe mediante la Ecuación 3.10. Dado que el sistema de análisis es abierto, el primer término representa los flujos másicos de entrada y salida acompañados de energía, mientras que, el segundo término corresponde al calor retirado por la circulación del agua de enfriamiento en el tubo en U.

$$\frac{dT_{a.f}}{dt} = \frac{q_{a.f}}{V_{a.f}} \cdot (T_{in} - T_{a.f}) + \frac{U_{a.f} \cdot A_{a.f} \cdot (T - T_{a.f})}{\rho_{a.f} \cdot Cp_{a.f} \cdot V_{a.f}}$$

Ecuación 3.10. Variación de la temperatura del agua de enfriamiento en función del tiempo

Donde,

$q_{a.f}$: caudal de agua de enfriamiento en $\left[\frac{L}{min}\right]$

$\rho_{a.f}$: densidad, 0.998374 $\left[\frac{kg}{L}\right]$,

$V_{a.f}$: volumen nominal del tubo en U, $2.88 \times 10^{-1} [L]$,

$Cp_{a.f}$: capacidad calorífica del agua, 4182.87 $\left[\frac{J}{kg \cdot K}\right]$,

T_{in} : temperatura de entrada del agua de enfriamiento, 18 [°C],

T_{out} : Temperatura de salida del agua de enfriamiento [°C],

3.2.3 Ecuaciones de control automático de temperatura

A partir de la señal medida por el sensor (termocupla) y de la comparación que realiza el controlador con respecto al valor deseado (T_{set}), se definió el error mediante la Ecuación 3.11.

$$e(t) = T - T_{set}$$

Ecuación 3.11. Definición de error para los controladores de temperatura

De esta manera, si el error es menor o igual que cero, lo que significa que la temperatura del medio de cultivo es menor al set point, el controlador SI/NO envía la señal al actuador (relé). Esto implica que la niquelina se encienda y aporte energía al agua de calentamiento y este a su vez proporcione la energía necesaria al medio de cultivo para elevar su temperatura.

$$W_{niq} = \eta \cdot I \cdot \Delta V$$

Ecuación 3.12. Trabajo de la niquelina (señal de salida del relé).

Por otra parte, si el error es mayor a cero la temperatura del medio de cultivo ha excedido el set point, por lo cual el controlador proporcional puro envía la señal a la válvula solenoide que permite el paso del agua de enfriamiento (variable manipulada). Dicha señal descrita en la Ecuación 3.13 es proporcional al error e incluye el caudal de agua de enfriamiento en estado estacionario o bias ($q_{a.f.o}$).

$$q_{a.f} = K \cdot e(t) + q_{a.f.o}$$

Ecuación 3.13. Señal de respuesta del controlador proporcional puro actual

En este contexto, el modelo matemático propuesto contiene 11 variables desconocidas y 11 ecuaciones que las relacionan entre sí, conformadas por 4 ecuaciones diferenciales gobernantes, 4 ecuaciones auxiliares (2 algebraicas y 2 diferenciales) y 3 ecuaciones de control, lo que deriva en que el modelo tiene cero grados de libertad, es decir, posee una única solución.

3.3 Evaluación del control automático de temperatura actual

Luego de la implementación del modelo en MatLab R2019a, con un intervalo de tiempo discreto de 0.001 minutos, se obtuvieron los perfiles dinámicos de generación de biomasa, temperatura del medio de cultivo, temperatura del agua de calentamiento y temperatura del agua de enfriamiento.

3.3.1 Crecimiento microbiano

En la Figura 3.7 se compara la curva de crecimiento microbiano experimental con el perfil obtenido a partir del modelo matemático planteado.

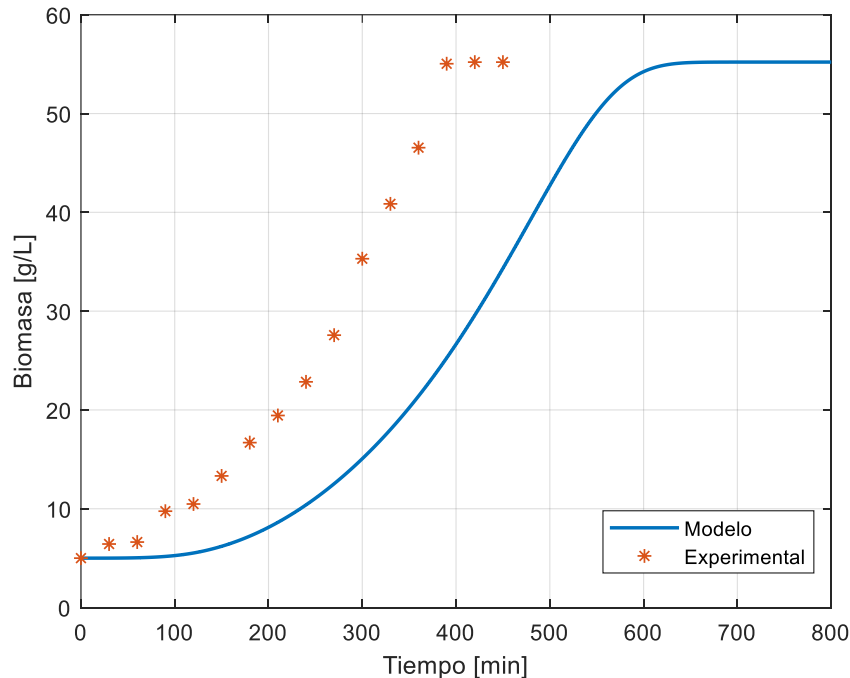


Figura 3.7. Perfil de crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae* a 30 °C en medio YPD con 5 g/L de glucosa

De manera general, la principal diferencia radica en la duración de la fase de latencia y, consecuentemente, el tiempo que tarda en alcanzar la fase estacionaria. Experimentalmente la fase de latencia es 70 minutos, en tanto que, en el modelo dicha fase se extiende hasta aproximadamente 100 minutos. Por otra parte, la fase estacionaria se alcanza luego de 420 minutos; sin embargo, mediante el modelo matemático este tiempo se prolonga hasta los 650 minutos. Esto se refleja en una desviación promedio de 45.06 % del modelo por debajo de los resultados experimentales lo que significa que la descripción matemática del crecimiento microbiano no es precisa. Las desviaciones punto a punto se detallan en el ANEXO VI.

Este comportamiento se debe a que, si bien el modelo de Hills y Wright presenta mayor susceptibilidad a las variaciones de temperatura no es sensible a variaciones pequeñas de λ . De acuerdo con Baty et al., (2002) en su estudio para la determinación de tiempo de adaptación, el ajuste que se logra con el modelo de Baranyi durante la fase de adaptación es 46 % más preciso que los resultados obtenidos con el presente modelo de Hills y Wright.

3.3.2 Temperatura del medio de cultivo como variable controlada

En la Figura 3.8 se presenta el perfil de temperatura del medio de cultivo experimental y el obtenido mediante el modelo matemático.

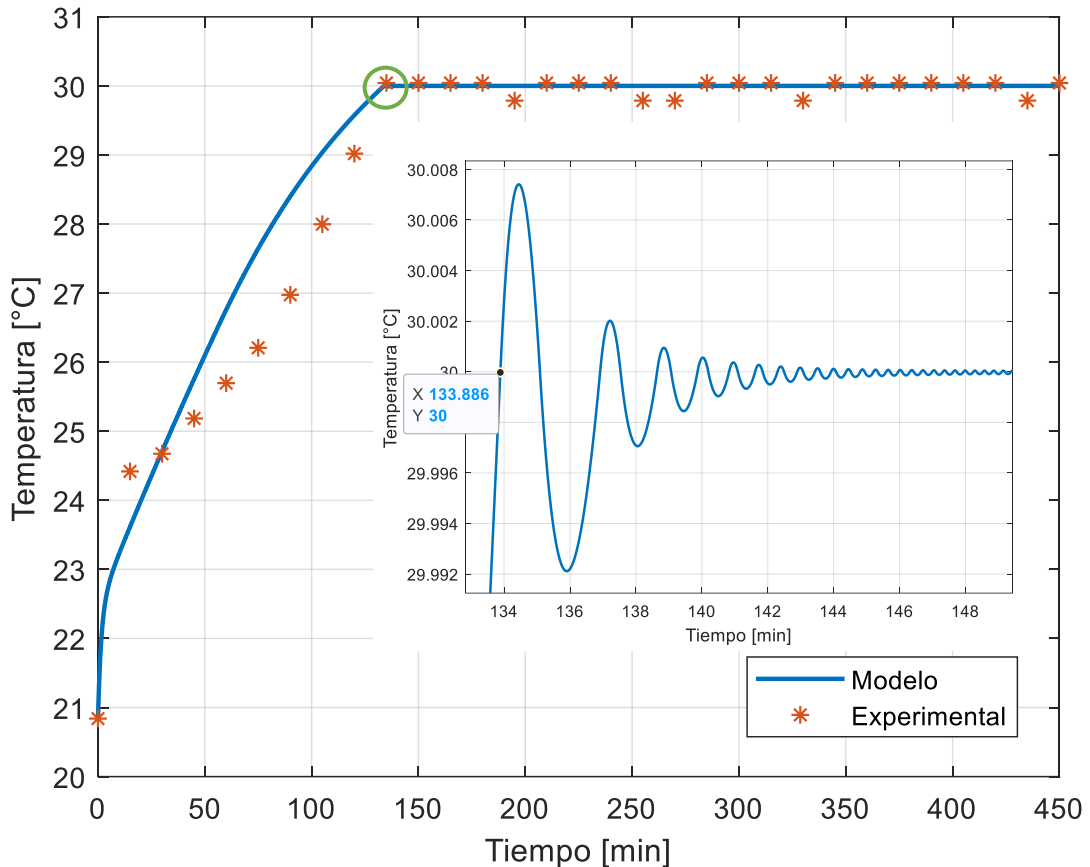


Figura 3.8. Perfil de temperatura del medio de cultivo durante la fermentación aerobia de *Saccharomyces cerevisiae* a 30°C

Durante el periodo de calentamiento, para alcanzar la temperatura deseada, la tendencia de los perfiles experimental y modelado difieren. El perfil experimental es cóncavo mientras el modelado es convexo a pesar de lo cual se estima una desviación promedio de 2.18 %. Por inspección simple la temperatura deseada se alcanza a los 133 minutos con una diferencia de 2 minutos respecto a los datos experimentales. Luego de este tiempo, la curva correspondiente al modelo matemático presenta oscilaciones que si bien tienden a convergencia no logran un valor constante. De hecho, pasados los 150 minutos se identifican límites superior e inferior en las oscilaciones que es un comportamiento característico del trabajo combinado entre el controlador proporcional puro y el controlador SI/NO.

En este segundo periodo de mantenimiento de la curva se calcula una desviación promedio positiva de 0.05 %, de tal manera que, en forma global la desviación promedio del modelo matemático es del 0.67%, lo que significa que la descripción matemática del comportamiento actual del sistema de control del biorreactor es precisa. En el ANEXO VI se puede evidenciar el cálculo de la desviación.

La acción combinada de la niquelina para el calentamiento y la válvula solenoide durante el enfriamiento se manifiesta en la temperatura del agua de calentamiento como se muestra en la Figura 3.9.

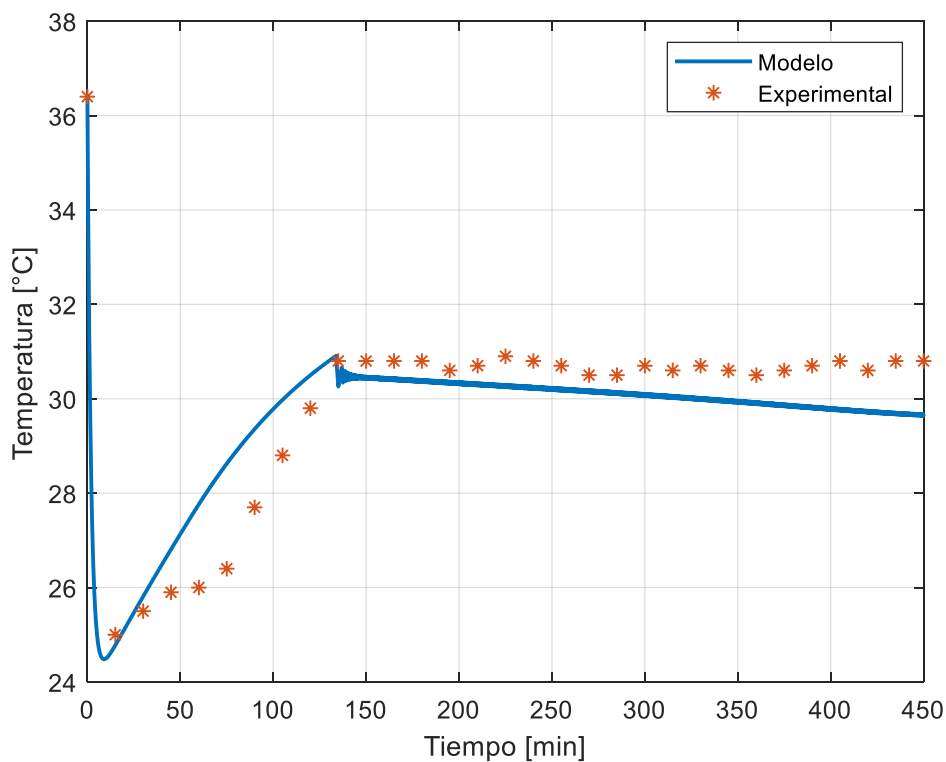


Figura 3.9. Perfil de temperatura del agua de calentamiento en el control automático actual del biorreactor

En principio se observa una caída súbita de temperatura producto de la baja resistencia a la transferencia de calor hacia los alrededores, después de la cual la temperatura se eleva y supera los 30 °C a los 135 minutos. Posterior a este tiempo la desviación respecto a los valores experimentales aumenta de 1.66% a 3.89% debido a la circulación de agua de enfriamiento ya que, cuando la válvula solenoide se abre la niquelina se apaga. Por tanto, la temperatura del agua de calentamiento tiende a descender como consecuencia de la inercia del sistema. En el ANEXO VI se puede evidenciar el cálculo punto a punto de la desviación.

3.3.3 Variables manipuladas del control automático actual

La evaluación del funcionamiento adecuado del control automático de temperatura requiere analizar el comportamiento de las variables manipuladas que reflejan directamente el nivel de rigurosidad al que se exponen los actuadores (niquelina y válvula solenoide) en función de la señal que envía el controlador. Dicho comportamiento se presenta en la Figura 3.10.

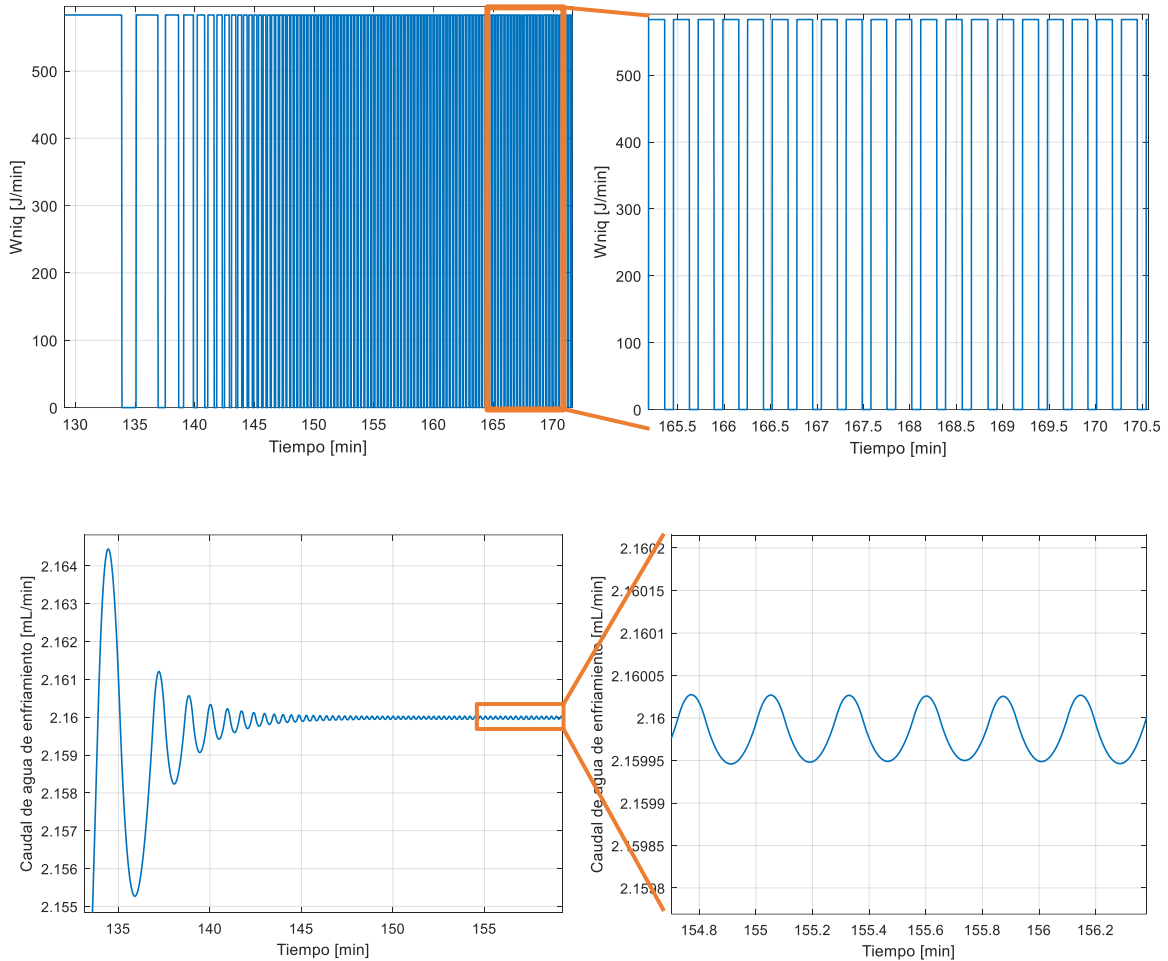


Figura 3.10. Trabajo de la niquelina y caudal de agua de enfriamiento en el control automático actual

Durante los primeros 133 minutos la frecuencia de encendido – apagado de la niquelina es baja y sostenida hasta alcanzar la temperatura deseada. Posteriormente, es notorio el incremento de esta frecuencia que además se sincroniza con la circulación de agua de enfriamiento. El caudal oscila en forma casi despreciable alrededor del valor estacionario lo que sugiere un sobredimensionamiento de la válvula solenoide.

En este escenario, la niquelina trabaja exhaustivamente en el acondicionamiento de la temperatura, ya que la inercia del agua de calentamiento aumenta debido a las pérdidas energéticas por contacto directo con el aire. Además, el comportamiento dinámico de la niquelina sugiere que la banda muerta del controlador SI/NO es angosta y por consiguiente la señal de respuesta hacia el actuador es altamente sensible.

De manera análoga la ganancia del controlador proporcional puro influye fuertemente en el funcionamiento de la válvula solenoide como se muestra en la Figura 3.11 para un intervalo de tiempo de 18 minutos.

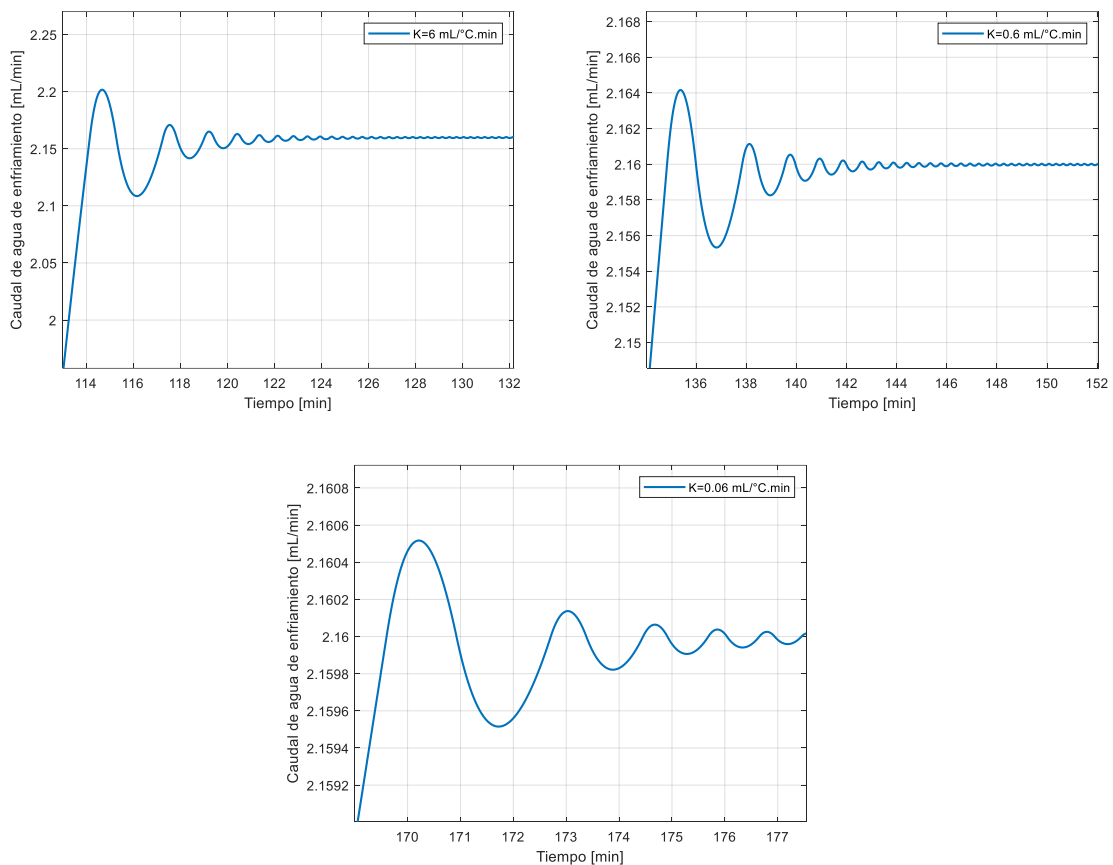


Figura 3.11. Efecto de la ganancia del controlador proporcional puro en el control automático actual

La disminución de la ganancia del controlador en un factor de 10 hasta $0.06 \frac{mL}{^{\circ}C \text{ min}}$ promueve que el caudal de agua de enfriamiento tarde más en estabilizarse y que la amplitud de las oscilaciones disminuya. Este es un comportamiento esperado debido a la relación directa con el error de modo que, valores más bajos de K de rivan en una respuesta más lenta del controlador (Hahn & Edgar, 2003).

En cuanto al tiempo de respuesta no se observan diferencias significativas al aumentar la ganancia del controlador a $6 \frac{mL}{^{\circ}C min}$. En el intervalo de 18 minutos desde el momento de activación del sistema de enfriamiento, el caudal de agua tiende a estabilizarse alrededor del valor de estado estable, pero la amplitud de las oscilaciones aumenta. En este sentido, dado que el tiempo de respuesta es semejante en ambos escenarios, se determina que una ganancia del controlador igual a $0.6 \frac{mL}{^{\circ}C min}$ no implicaría un funcionamiento exhaustivo de la válvula solenoide y, además, dado a que las oscilaciones respecto al caudal en estado estable son menores se supondría un menor consumo de agua.

De esta manera, la principal falencia identificada en el control automático actual de temperatura radica en el sistema de calentamiento, ya que, si bien el usar agua en el espacio entre la chaqueta y el recipiente del biorreactor permite llevar a cabo la fermentación de *S. cerevisiae*, el funcionamiento del actuador es muy demandante. Al inicio del proceso se requiere el aporte de energía durante un intervalo de tiempo alto, seguido de tiempos muertos muy cortos, lo que deriva en daños permanentes en la niquelina.

3.4 Diseño propuesto del control automático de temperatura

En el diagrama P&ID de la Figura 3.12 se compara el control de temperatura actual con el rediseño propuesto para el biorreactor LiFlus GX.

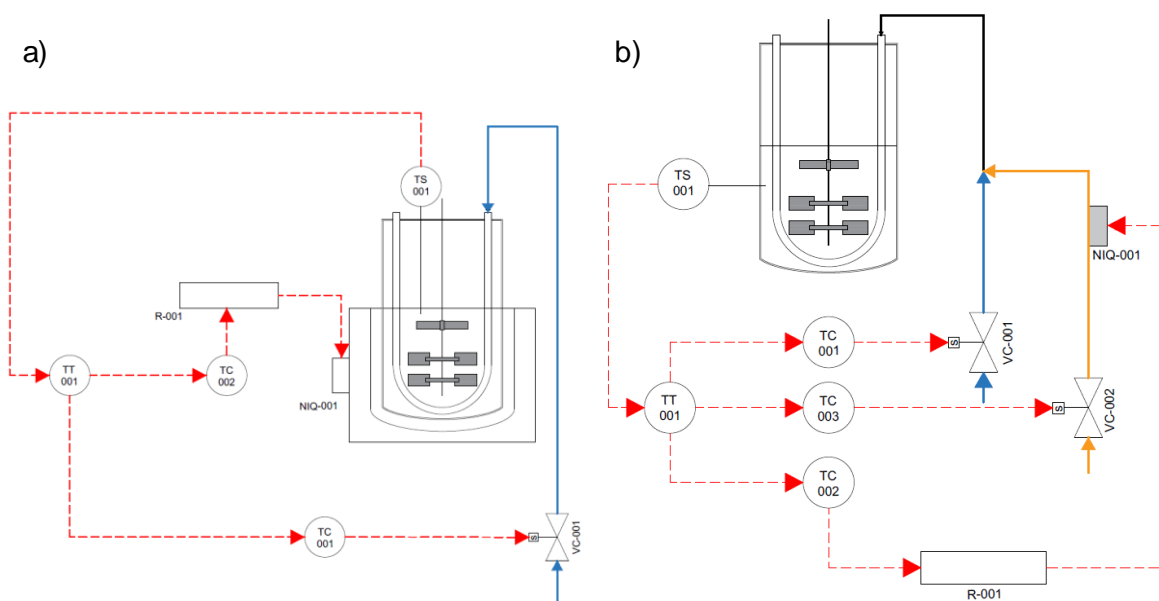


Figura 3.12. Diagramas P&ID de los sistemas de control de temperatura a) actual, b) rediseño. --- Señal eléctrica — Agua de enfriamiento — Agua de calentamiento

El rediseño del control automático de temperatura mantiene los componentes actuales, es decir, la válvula solenoide para el agua de enfriamiento, el relé para la activación de la niquelina, la termocupla calibrada y el controlador proporcional puro. Sin embargo, para prescindir de la chaqueta de calentamiento se propone la incorporación de un controlador proporcional puro y de una válvula solenoide adicional que manipule el flujo de agua de calentamiento.

El funcionamiento del sistema de control propuesto se basa en que la temperatura medida por el sensor (termocupla TS-001) es transformada en una señal de voltaje (señal eléctrica), misma que debe pasar por un acondicionador de señal (transductor TT-001) que permite amplificar dicha señal para que sea enviada a los controladores (TC-001, TC-002, TC-003), los cual en función del error (ecuación 3.11) genera una señal eléctrica que se dirige a los actuadores (VC-001, VC-002, R-001) (Camuffo, 2019; Morris & Langari, 2021). Si el error es negativo, la señal es enviada hacia el relé y hacia la válvula solenoide que manipula el agua de calentamiento, en tanto que, si el error es positivo, dicha señal se envía a la válvula solenoide que manipula el agua de enfriamiento.

3.4.1 Descripción matemática del rediseño del control de temperatura

Dado que el rediseño se implementa exclusivamente en el control automático de temperatura, las ecuaciones que describen el crecimiento microbiano se mantienen igual a aquellas planteadas para el comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX.

La variación de la temperatura del medio de cultivo se describe en la Ecuación 3.14 que comprende el calor generado por la fermentación y el calor retirado por el agua de enfriamiento, y además incorpora la energía que entrega el agua de calentamiento que circula por el tubo en U y el calor perdido hacia los alrededores a través del recipiente de vidrio en ausencia de la chaqueta.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\Delta\hat{H}_{rx} \cdot \left(\frac{dx}{dt}\right)}{(\rho \cdot Cp(S,T))_{medio}} + \frac{U_{a.c} \cdot A_{a.c} \cdot (T_{a.c} - T)}{(\rho \cdot V \cdot Cp(S,T))_{medio}} - \frac{U_{a.f} \cdot A_{a.f} \cdot (T - T_{a.f})}{(\rho \cdot V \cdot Cp(S,T))_{medio}} - \frac{U_p \cdot A_{vessul} \cdot (T - T_{amb})}{(\rho \cdot V \cdot Cp(S,T))_{medio}}$$

Ecuación 3.14. Variación de la temperatura del medio de cultivo con el rediseño del control automático

Donde,

$U_{a.c}$: coeficiente global de transferencia de calor del agua de calentamiento hacia el medio de cultivo, $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

$A_{a.c}$: área de transferencia de calor del tubo en U, $[m^2]$,

U_p : coeficiente global de transferencia de calor de las pérdidas a través del vessel, $\left[\frac{W}{m^2 K}\right]$,

A_{vessel} : área de transferencia del recipiente, $[m^2]$,

T_{amb} : temperatura del aire, $[^\circ C]$.

El coeficiente de transferencia de calor $U_{a.c}$ igual a $592.59 \left[\frac{W}{m^2 K}\right]$ se determinó bajo el supuesto de un flujo laminar ($Re < 2100$) luego de fijar una velocidad de circulación para el agua de calentamiento en $53.36 \left[\frac{cm}{s}\right]$. El área de transferencia de calor $A_{a.c}$ corresponde al área lateral del tubo en U que es igual a $3.06 \times 10^{-3} [m^2]$.

La principal diferencia en el modelo matemático relacionado con el rediseño se refleja en el comportamiento dinámico de la temperatura del agua de calentamiento que se expresa mediante la Ecuación 3.15. En el rediseño se incorpora un bypass del caudal de agua que permite un calentamiento previo con la niquelina para luego circular a través del tubo en U. Por esta razón, en el balance de energía se mantiene el trabajo de la niquelina, pero aparecen los flujos energéticos de entrada y salida.

$$\frac{dT_{a.c}}{dt} = \frac{W_{niq}}{\rho_{a.c} \cdot Cp_{a.c} \cdot V_{a.c}} + \frac{q_{a.c}}{V_{a.c}} \cdot (T_{in} - T_{a.c}) - \frac{U_{a.c} \cdot A_{a.c} \cdot (T - T_{a.c})}{\rho_{a.c} \cdot Cp_{a.c} \cdot V_{a.c}}$$

Ecuación 3.15. Variación de la temperatura del agua de calentamiento con el rediseño del control automático

Donde,

W_{niq} : trabajo aportado por la niquelina de calentamiento

$q_{a.f}$: caudal de agua de enfriamiento en $\left[\frac{L}{min}\right]$ que se describe mediante la ecuación 3.15,

ρ : densidad, $0.98371 \left[\frac{kg}{L}\right]$,

$V_{a.c}$: volumen agua de calentamiento, $2.88 \times 10^{-1} [L]$,

Cp : capacidad calorífica del agua, $4185.43 \left[\frac{J}{kg.K}\right]$,

T_{in} : temperatura de entrada del agua de calentamiento, $18 [^\circ C]$,

La implementación del control proporcional puro adicional que manipula el flujo de agua de calentamiento se modela mediante la Ecuación 3.16. Si el error es menor a cero, implica que la temperatura del medio de cultivo está por debajo del set point, por lo cual el controlador envía la señal a la válvula solenoide adicional que permite el paso del agua de

calentamiento (variable manipulada) y al relé de estado sólido que permite el calentamiento del agua.

$$q_{a.c} = K_c \cdot e(t) + q_{a.c.o}$$

Ecuación 3.16. Señal de salida de la válvula solenoide adicional con el rediseño del control automático

Donde,

K_c : constante de proporcionalidad del control automático proporcional puro para el agua de calentamiento, $\left[\frac{L}{^{\circ}C \text{ min}}\right]$,

$q_{a.c.o}$: caudal de agua de calentamiento entregado por la válvula solenoide en el equilibrio, $[L/min]$.

De esta manera, el modelo matemático propuesto contiene 12 variables desconocidas y 12 ecuaciones que las relacionan entre sí, conformadas por 4 ecuaciones diferenciales gobernantes, 4 ecuaciones auxiliares (2 algebraicas y 2 diferenciales) y 4 ecuaciones de control, lo que deriva en que el modelo tiene cero grados de libertad, es decir, posee una única solución.

3.4.2 Evaluación del sistema de control de temperatura propuesto

En la Figura 3.13 se presenta el comportamiento dinámico de la temperatura del medio de cultivo cuando se implementa el rediseño del sistema de control automático.

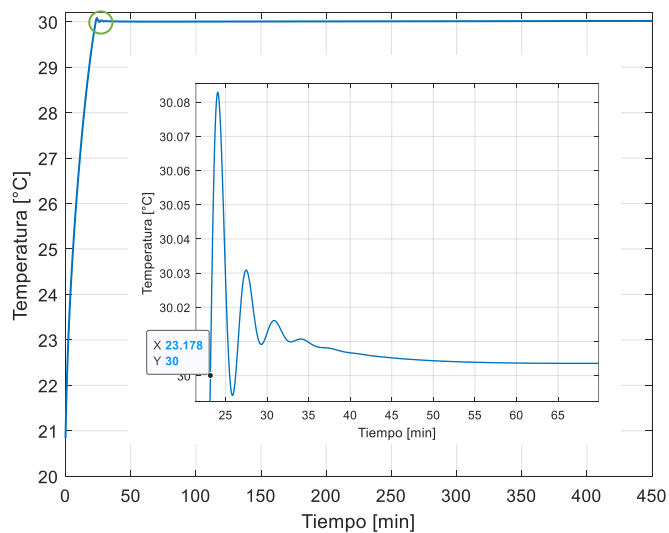


Figura 3.13. Perfil de temperatura del medio de cultivo del sistema de control rediseñado

La temperatura óptima de fermentación se alcanza a los 23 minutos en comparación con 133 minutos en el sistema de control actual, lo que representa una mejora significativa para el acondicionamiento de temperatura. Esto se debe a que el agua de calentamiento ingresa al tubo en U a 82.72°C luego del aporte energético de la niquelina; en tanto que, en la configuración actual del biorreactor LiFlus GX, el agua de calentamiento inicia a 36.4°C y sufre una caída súbita hasta 24.5°C. La transferencia de calor se facilita porque la fuerza motriz es menor bajo la consideración de que el medio de cultivo se encuentra a una temperatura inicial de 20.48°C en ambos escenarios.

Además, en la configuración propuesta el área de transferencia de calor se encuentra en contacto directo con el medio de cultivo y, dado el bajo tiempo de residencia del agua de calentamiento las pérdidas de energía resultan despreciables. Dicho comportamiento contrasta del evidenciado en la configuración del fabricante, en donde el agua de calentamiento entrega un 85.35% de la energía disponible al medio de cultivo.

Por otra parte, en el diseño propuesto la temperatura se estabiliza en 60 minutos, en tanto que para el sistema de control actual, se evidencia oscilación alrededor de 30°C con una amplitud de onda constante pasado los 148 minutos. En el sistema de control actual, la respuesta del control SI/NO es siempre oscilatoria por debido a la histéresis, entonces el tiempo de estabilización depende en su mayoría de la sensibilidad del controlador proporcional puro de enfriamiento. Por lo tanto, la sincronización de los controles proporcionales de calentamiento y de enfriamiento permite la disminución en el tiempo de estabilización de la variable controlada, ya que la respuesta de ambos resulta más modulada. Sin embargo, la temperatura del medio de cultivo se mantiene 0.1 °C por encima del valor deseado, comportamiento propio de controladores proporcionales que solo reducen el error, pero no lo eliminan completamente. Este error persistente se conoce como “error de estado estacionario” o “desviación permanente” (Hahn & Edgar, 2003).

Para evaluar del funcionamiento adecuado del control propuesto se requiere analizar el comportamiento de las variables manipuladas en función de la señal que envían los controladores. En este sentido, en la Figura 3.14 se presenta el comportamiento del caudal de agua de enfriamiento, del trabajo de la niquelina y del caudal de agua de calentamiento.

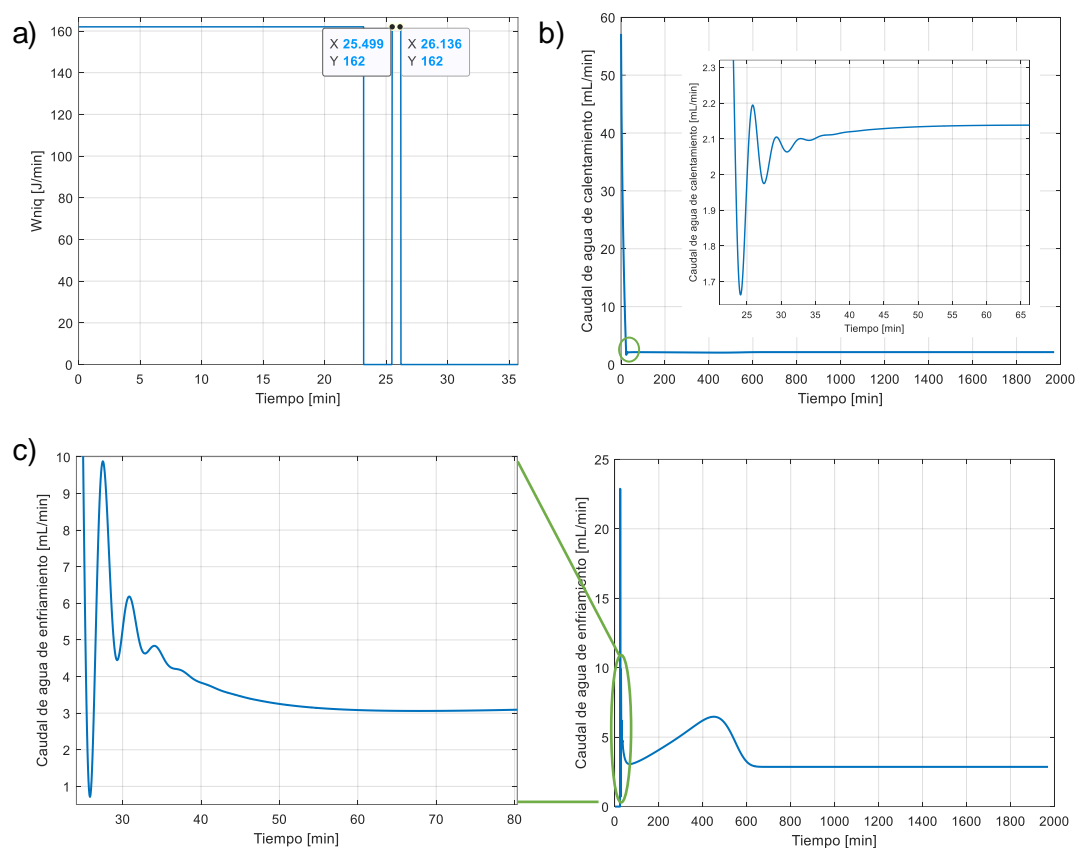


Figura 3.14. Variables manipuladas del sistema de control automático de temperatura rediseñado a) niquelina, b) agua de calentamiento, c) agua de enfriamiento

Entre los 23 y 26 minutos se evidencia un funcionamiento sincronizado de los sistemas de calentamiento y enfriamiento. Durante este tiempo la configuración propuesta implica baja demanda de la niquelina, lo que salvaguarda su integridad ya que, después de alcanzar el valor de temperatura deseado se vuelve a prender una única vez por un lapso corto de aproximadamente 30 segundos. Esto supone que la disminución de temperatura al circular el agua de enfriamiento se promueve únicamente por el calor de reacción generado durante la fermentación. El incremento del caudal de agua de enfriamiento entre los 100 y 600 minutos coincide con la fase de crecimiento exponencial de la levadura y por ende la tasa de generación de calor resulta ser mayor debido a la obtención de productos metabólicos a un ritmo acelerado (Kütt et al., 2023).

En el rediseño la ganancia del controlador proporcional de enfriamiento incrementa de $0.06 \frac{mL}{^{\circ}C \min}$ a $250 \frac{mL}{^{\circ}C \min}$ respecto al control actual de temperatura. Esto a fin de contrarrestar el aporte energético más efectivo del agua de calentamiento mediante una respuesta más sensible del actuador, lo que en principio implicaría un funcionamiento más exhaustivo de la válvula solenoide para el rediseño. Sin embargo, al comparar las oscilaciones de esta

variable manipulada con las oscilaciones presentadas en el modelo del comportamiento actual (Figura 3.10) el rediseño no compromete la integridad de la válvula por desgastes mecánicos, además de que el problema de sobredimensionamiento presentado en un principio desaparece, ya que las variaciones alrededor del caudal en estado estable son mayores.

En lo que respecta al caudal de agua de calentamiento, debido a que al inicio de la fermentación existe la mayor desviación del set point, el caudal es el máximo; sin embargo, posterior a los 23 minutos, esta variable presenta pocas fluctuaciones previo a estabilizarse lo cual resulta beneficioso en el sistema de control propuesto ya que refleja poca inestabilidad y un mínimo desgaste de la válvula solenoide. Este patrón de desempeño se ve fuertemente influenciado por la ganancia del controlador proporcional nuevo, como se muestra en la Figura 3.15. Al fijar la ganancia del controlador en $60 \left[\frac{mL}{^{\circ}C min} \right]$, el caudal de agua de calentamiento tiende a valores negativos, lo cual implica que el sistema de control sea forzado a cerrar súbitamente la válvula solenoide, por consiguiente una ganancia de $6 \left[\frac{mL}{^{\circ}C min} \right]$ resulta adecuado para su implementación en el modelo matemático.

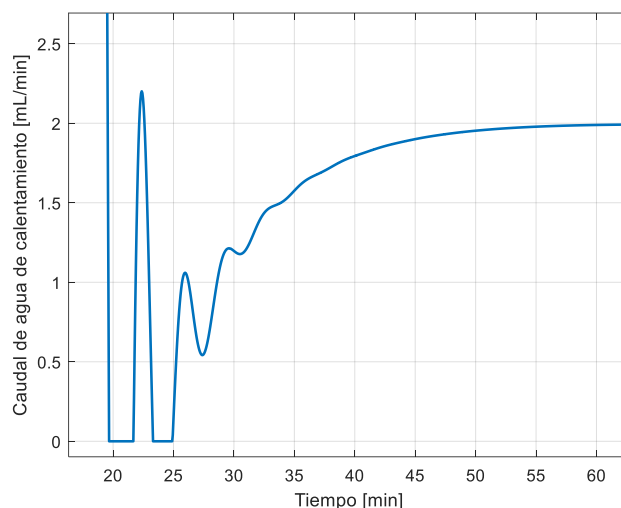


Figura 3.15. Caudal de agua de calentamiento en el rediseño con $K = 60 \left[\frac{mL}{^{\circ}C min} \right]$

Bajo la implementación del nuevo sistema de control de temperatura existen mejoras significativas asociadas a parámetros puntuales que se detallan en la Tabla 3.4. La potencia que la niquelina debe suministrar es menor con un ahorro energético calculado de 72.22 %. Esto se debe principalmente a que, en comparación con el modelo actual, la niquelina no debe vencer la inercia del agua de calentamiento y la chaqueta. Sin embargo, el problema de sobredimensionamiento aumenta, ya que se está empleando únicamente un 3% de la capacidad total del relé.

Tabla 3.4. Parámetros comparativos entre el sistema de control automático de temperatura rediseñado y el actual para el biorreactor LiFlus GX

Sistema de control	Trabajo de la niquelina [J/min]	Consumo de agua de enfriamiento [L]	Consumo de agua de calentamiento [L]	Consumo total de agua [L]
Actual	583.2	1100	0.190	1100.190
Rediseño	162	99.05	21.06	120.11

Otro parámetro, y quizás el más relevante es el consumo de agua durante la fermentación. Bajo el diseño del modelo actual el consumo es elevado debido a que el caudal de agua de enfriamiento no alcanza un valor estable, sino que se mantiene oscilando alrededor de un valor estacionario, comportamiento que difiere al presentado por esta variable en el rediseño. Por su parte, el consumo de agua de calentamiento se eleva; no obstante, dicho incremento no resulta significativo al momento de comparar el consumo total de agua durante la fermentación.

En síntesis, si bien el control propuesto presenta ventajas frente al control actual, las principales desventajas radican en la implementación de una nueva válvula solenoide y su sistema de control proporcional asociado, además de que los problemas de sobredimensionamiento de los actuadores persisten.

3.5 Conclusiones

El modelo matemático formulado describe satisfactoriamente el comportamiento del control automático de temperatura actual con desviación promedio de 0.67% y 2.78% para las temperaturas del medio de cultivo y agua de calentamiento respectivamente. Sin embargo, el ajuste es impreciso para el crecimiento microbiano con una desviación promedio del 45.06%.

La principal falencia identificada del acondicionamiento actual de temperatura radica en el sistema de calentamiento, dado que emplear agua en el espacio vacío entre la chaqueta y el tanque hace que el funcionamiento del actuador (niquelina) sea muy demandante.

El rediseño del sistema de control de temperatura propuesto para el biorreactor LiFlus GX prescinde de la chaqueta de calentamiento y mantiene los componentes del control actual, es decir, la válvula solenoide para el agua de enfriamiento, el relé para la activación de la niquelina. Adicionalmente, se integra una válvula solenoide extra que manipule el flujo de agua de calentamiento mediante un control proporcional puro.

El funcionamiento del sistema de control propuesto se basa en que la temperatura medida por la termocupla es transformada en una señal eléctrica, que pasa por un amplificador de señal previo a ser enviada a los varios 3 controladores que generan una señal eléctrica que se dirige a sus respectivos actuadores.

Las mejoras asociadas al rediseño del control de temperatura son principalmente la disminución de la energía entregada por la niquelina (162 J/min), la disminución global del agua empleada en el acondicionamiento de temperatura (120.11 L).

3.6 Recomendaciones

La integración de un controlador capaz de enviar señales a múltiples actuadores, para disminuir el tiempo de respuesta y mejorar la eficiencia del proceso fermentativo.

Determinar las ganancias de los controles proporcionales a partir de métodos sistemáticos como Ziegler – Nichols, para disminuir la subjetividad que resulta de ensayos iterativos.

Contrastar los resultados de crecimiento microbiano obtenidos mediante el modelo de Hill y Wrigth con los resultados que se puedan obtener mediante otros modelos como es el propuesto por Baranyi.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASME. (2019). Rules for Construction of Pressure Vessels. *American Society of Mechanical Engineers*. <https://www.asme.org/shop/certification-accreditation>.
- Bai, Y., & Bai, Q. (2019). Heat Transfer and Thermal Insulation. *Subsea Engineering Handbook (2ª Ed.)*, 363-408. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812622-6.00014-2>.
- Baty, F., & Delignette-Muller, M. (2004). Estimating the bacterial lag time: which model, which precision? *International Journal of Food Microbiology*, 91, 261-277. <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2003.07.002>.
- Baty, F., Flandrois, J. P., & Delignette-Muller, M. (2002). Modeling the Lag Time of *Listeria monocytogenes* from Viable Count Enumeration and Optical Density Data. *Applied and Environmental Microbiology*, 68(12), 5816-5825. <https://doi.org/10.1128/AEM.68.12.5816-5825.2002>.
- Bekkouche, S., Benouaz, T., Cherier, M., Hemdani, M., Yaiche, M., & Benamrane, N. (2013). Thermal resistances of air in cavity walls and their effect upon the thermal insulation performance. *International Journal of Energy and Environment*, 4(3), 459-466.
- Bergman, T., Lavine, A., Incropera, F., & Dewitt, D. (2011). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. (7ª Ed.). United States: John Wiley & Sons, Inc.
- Camuffo, D. (2019). Measuring Temperature. *Microclimate for Cultural Heritage*, (3ª Ed.), 383-429. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64106-9.00017-1>.
- Chisti, Y., & Moo-Young, M. (2003). Bioreactors. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*, 247-271. <http://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00067-3>.
- da Silva, V., Santos, M. E., de Paiva, J., Silva, M., & de Moraes, D. (2017). Nusselt's correlations in agitated tanks using the spiral coil with Rushton turbine and PBT 45° impeller. Comparison with tanks containing vertical tube baffles. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1331-1342. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.09.035>.
- da Silva, V., Silva, M., Tófanio, J., & de Moraes, D. (2014). External Heat Transfer Coefficient in Agitated Vessels Using a Radial Impeller and Vertical Tube Baffles. *I&EC research*, 53, 13797-13803. <http://dx.doi.org/10.1021/ie5008618>.

- Darros, Barbosa, R., Balaba, M., & Teixeira, A. (2003). Temperature and Concentration Dependence of Heat Capacity of Model Aqueous Solutions. *International Journal of Food Properties*, 6(2), 239-258. <http://doi.org/10.1081=JFP-120017845>.
- García-Ochoa, F., Santos, V., & Gomez, E. (2011). Stirred Tank Bioreactors. *Comprehensive Biotechnology*, 179-198. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00108-2>.
- Ghose, T. K., Fiechter, A., & Blakebrough, N. (1979). *Advances in Biochemical Engineering. Volume II*. Germany: Springer-Verlag Berlin-Heidelberg.
- Hanh, J., & Edgar, T. F. (2003). Process Control Systems. *Encyclopedia of Physical Science and Technology*. 111-126. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00612-8>.
- Hanil Scientific Inc. (2017). LiFlus GX Autoclavable Fermentor. Operating Manual.
- Hills, B. P., & Wright, K. M. (1994). A New Model for Bacterial Growth in Heterogeneous Systems. *J. theor. Biol*, 168, 31-41. <http://doi.org/10.1006/jtbi.1994.1085>.
- Holman, J. (1999). *Transferencia de Calor. (8ª Ed.)*. Madrid, España: McGraw-Hill Interamericana.
- Huang, W., y Tang, I. (2007). Bacterial and Yeast Cultures- Process Characteristics, Products, and Applications. *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, 185-223. <http://doi.org/10.1016/B978-044452114-9/50009-8>.
- Ibrahim, D. (2019). Intermediate Level Projects. *ARM-Based microcontroller projects using MBED*, 135-259. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102969-5.00008-2>.
- Keskin, T., Abubackar, H., Arslan, K., & Azbar, N. (2019). Biohydrogen Production From Solid Wastes. *Biohydrogen*, 321-346. <http://doi.org/10.1016/b978-0-444-64203-5.00012-5>.
- Korbowiak, T., Gougeon, B., Alinc, J., Brachais, L., Debeaufort, F., Voilley, A., y Chassgne, D. (2010). Wine Oxidation and the Role of Cork. *Critical Reviews In Food Science and Nutrition* 50(1):20-52. <http://doi.org/10.1080/10408390802248585>.
- Kumar, M., Prasad, D., Shekher, B., & Sharan, R. (2019). Temperature control of fermentation bioreactor for ethanol production using IMC-PID controller. *Biotechnology Reports*, 22. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2019.e00319>.

- Kütt, M., Orgusaar, K., Stulova, I., Priidik, R., Pismennõi, D., Vaikma, H., Kallastu, A., Zhogoleva, A., Morell, I., & Kriščiunaite, T. (2023), Starter culture growth dynamics and sensory properties of fermented oat drink. *Heliyon*, 9(5). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15627>.
- Lim, K., Patel, D., Seonwoo, H., Kim, J., & Hoon, J. (2019). A fully automated bioreactor system for precise control of stem cell proliferation and differentiation. *Biochemical Engineering Journal*, 150. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2019.107258>.
- Mehendale, N., Hodshil, P., Khedkar, M., Ambelkar, P., & Singh, I. (2021). *Smart Bioreactor*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.3857116>.
- Mitra, S., & Murthy, G. (2021). Bioreactor control systems in the biopharmaceutical industry: a critical perspective. *Systems Microbiology and Biomanufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s43393-021-00048-6>.
- Morris, A., & Langari, R. (2021). Principles of data acquisition and signal processing. *Measurement and Instrumentation, (3^a Ed.)*, 211-241. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817141-7.00008-6>.
- Patakova, P., Branska, B., Lin, Z., Wu, P., Liu, H., Drahokoupil, M., Zhou, Y., Paulova, L., Zhang, J., & Melzoch, K. (2020). Microbial production of butanol from food industry waste. *Food Industry Wastes (2a Ed.)*, 163-180. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817121-9.00008-5>.
- Qazi, S. (2017). Solar Thermal Electricity and Solar Insolation. *Standalone Photovoltaic (PV) Systems for Disaster Relief and Remote Areas*. 203-23. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803022-6.00007-1>.
- Qiao, Y., O'Dwyer, E., Acha, S., y Shah, N. (2020). Optimization and Control of a Rainwater Detention and Harvesting Tank. *Computer Aided Chemical Engineering*, 48, 547-552. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823377-1.50092-6>.
- Ryniecki, A., Wawrzyniak, J., & Pilarska, A. (2015). Basics of Process Control: The On-Off Control System. *PRZEMYSŁ SPOŻYWCZY* 1(11), 28-31. <https://doi.org/10.15199/65.2015.11.6>.
- Sala, J., & Picallo-Pérez, A. (2020). Exergy analysis of heat transfer in buildings. *Exergy Analysis and Thermoconomics of Buildings*, 263-343. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817611-5.00004-7>.

- Salvadó, Z., Arroyo-López, F., Guillamon, J. M., Salazar, G., Querol, A., y Barrio, E. (2011). Temperature Adaptation Markedly Determines Evolution within the Genus *Saccharomyces*. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(7), 2292-2302. <http://doi.org/10.1128/AEM.01861-10>.
- Srivastava, A. K., & Gupta, S. (2011). Fed-Batch Fermentation-Design Strategies. *Comprehensive Biotechnology*, 515-526. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00112-4>.
- Swinnen, I., Bernaerts, K., Dens, E., Geerard, A., Van Impe, J. (2004). Predictive modelling of the microbial lag phase: a review. *International Journal of Food Microbiology*, 94, 137– 159. <http://doi.org/10.1016/j.ijfoodmicro.2004.01.006>.
- Uričaa, T., & Simonováa, A. (2017). Simulation of an on-off controller systems of second order with the use of LabVIEW. *Procedia Engineering*, 192, 905-910. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.06.156>.
- Wang, J., Hsu, J., & Hsien, Y. (2015). A Kinetic Study on the Specific Growth Rate of Yeast Species *Saccharomyces cerevisiae* (BCRC 23269). *The 62nd TwIChE Annual Conference & 2015 Taiwan/Korea/Japan ChE Conference*. <http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.29107.68643>.
- Wang, S., & Zhong, J. (2007). Bioreactor Engineering. *Bioprocessing for Value-Added Products from Renewable Resources*, 131-161. <http://doi.org/10.1016/b978-044452114-9/50007-4>.
- Zhang, P. (2010). Transducers and valves. *Advanced Industrial Control Technology*, 117-152. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4377-7807-6.10004-X>.
- Zhong, J. (2011). Bioreactor Engineering. *Comprehensive Biotechnology*, 165-177. <http://doi.org/10.1016/B978-0-08-088504-9.00097-0>.

5 ANEXOS

ANEXO I

Determinación de la geometría de la base de la chaqueta y del tanque del biorreactor

Mediante la Ecuación A.1 se determinó el volumen asociado a un cilindro dimensionalmente equivalente tanto para la chaqueta de calentamiento como para el tanque.

$$V_{cilindro} = \pi r_i^2 H_i$$

Ecuación A.1. Volumen de un cilindro

Donde,

r : radio interno del recipiente, [cm],

H : altura como cilindro del recipiente, [cm].

El volumen obtenido fue restado del volumen experimental total que alberga cada recipiente para determinar el volumen experimental asociado a la base de cada uno.

Además, a partir de las ecuaciones de volumen presentadas en la Tabla 2.1 se determinaron los volúmenes teóricos de las bases, presentados en las Tablas A.1 y A.2.

Tabla A.1. Determinación de la geometría de la base de la chaqueta.

Chaqueta de calentamiento						
Dimensiones						
Perímetro externo [cm]	52.4	Radio externo [cm]	8.34	Hch (Total) [cm]	12	
Perímetro interno [cm]	40.5	Radio interno [cm]	6.45	Hch (Cilindro) [cm]	9	
Volumen [cm ³]						
Experimental			Calculado		Error [%]	
Total	Cilindro	Tapa	Elipsoidal	Toriesférica	Elipsoidal	Toriesférica
1440	1174.74	265.26	286.77	173.33	8.11	34.66
Por tanto, se deduce que la geometría del fondo de la chaqueta de calentamiento es elipsoidal						

Tabla A.2. Determinación de la geometría de la base del Tanque.

Tanque						
Dimensiones						
Perímetro externo [cm]	37.5	Radio externo [cm]	5.97	Hv (Total) [cm]	11	
Perímetro interno [cm]	36.3	Radio interno [cm]	5.78	Hv (Cilindro) [cm]	8.4	
Volumen [cm ³]						
Experimental			Calculado		Error [%]	
Total	Cilindro	Tapa	Elipsoidal	Toriesférica	Elipsoidal	Toriesférica
1000	880.81	119.19	206.49	124.80	73.24	4.71
Por tanto, se deduce que la geometría del fondo del vessel es toriesférica						

ANEXO II

Determinación de parámetros de cinética microbiana (λ , μ_{max} , parámetros de Arrhenius)

- **Tiempo de latencia**

Tabla A.3. Cálculo de tiempo de latencia (λ)

Tiempo [min]	OD	ΔOD	Δt	Primera derivada	$\Delta(\Delta OD/\Delta t)$	Segunda derivada
				$\Delta OD/\Delta t$		$\Delta(\Delta OD/\Delta t)/\Delta t$
0	0.605	0	0	-	-	-
30	0.778	0.173	30	0.00577	-	-
60	0.802	0.024	30	0.00080	-0.0050	-0.0002
90	1.18	0.378	30	0.01260	0.0118	0.0004
120	1.268	0.088	30	0.00293	-0.0097	-0.0003
150	1.612	0.344	30	0.01147	0.0085	0.0003
180	2.02	0.408	30	0.01360	0.0021	0.0001
210	2.352	0.332	30	0.01107	-0.0025	-0.0001
240	2.764	0.412	30	0.01373	0.0027	0.0001
270	3.336	0.572	30	0.01907	0.0053	0.0002
300	4.272	0.936	30	0.03120	0.0121	0.0004
330	4.944	0.672	30	0.02240	-0.0088	-0.0003
360	5.632	0.688	30	0.02293	0.0005	0.0000
390	6.66	1.028	30	0.03427	0.0113	0.0004
420	6.68	0.02	30	0.00067	-0.0336	-0.0011
450	6.68	0	30	-	-	-

De los datos presentados en la Tabla A.3, se debe interpolar entre los valores de la segunda derivada correspondientes a 60 y 90 minutos, para a partir de la segunda derivada encontrar un punto de inflexión, mismo que representa el cambio de fase de latencia a fase exponencial.

$$\frac{(90 - 60)}{(90 - \lambda)} = \frac{0.0004 - (-0.0002)}{0.0004 - 0}$$

$$\lambda = 70 \text{ minutos}$$

- **Velocidad específica de crecimiento experimental.**

Tabla A.4. Linealización de los resultados experimentales del crecimiento microbiano.

Tiempo [min]	X [gbiomasa/L]	ln(X/X ₀)
0	5.00	0.000
30	6.43	0.251
60	6.63	0.282

Tabla A.4. Linealización de los resultados experimentales del crecimiento microbiano (continuación).

90	9.75	0.668
120	10.48	0.740
150	13.32	0.980
180	16.69	1.206
210	19.44	1.358
240	22.84	1.519
270	27.57	1.707
300	35.31	1.955
330	40.86	2.101
360	46.55	2.231
390	55.04	2.399
420	55.21	2.402
450	55.21	2.402

A partir de los resultados de la linealización se determinó, para la zona de crecimiento exponencial (90 a 490 minutos), el valor experimental de μ_{max} mismo que corresponde a la pendiente de dicha curva.

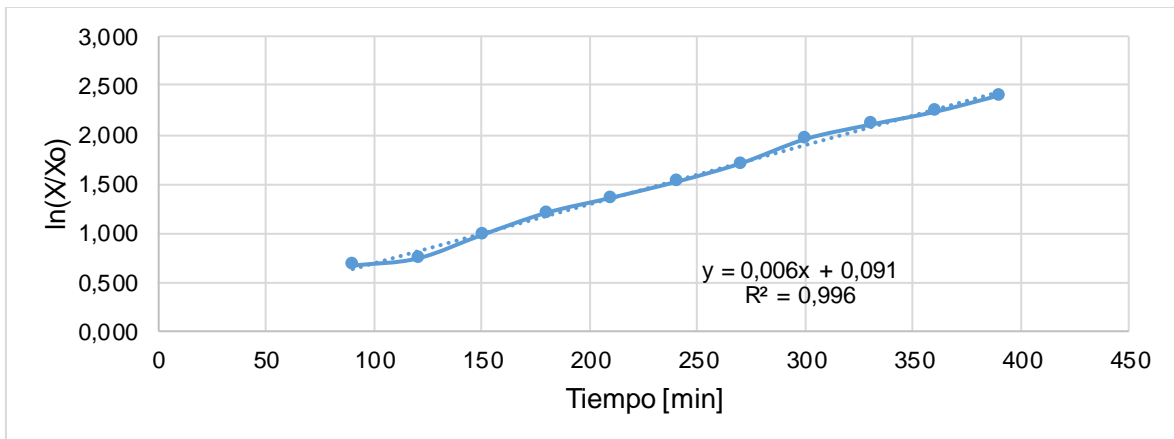


Figura A.1. Determinación de μ_{max} experimental

De esta, se tiene que $\mu_{max} = 0.006 \text{ min}^{-1}$, es decir, 0.36 h^{-1} .

- **Parámetros de Arrhenius**

Para determinar que valores de A y Ea se ajustan de mejor manera al valor experimental de μ_{max} , se empleó la Ecuación A.2, que corresponde a la ecuación de Arrhenius.

$$\mu_{max} = A \cdot e^{-\frac{Ea}{RT}}$$

Ecuación A.2. Ecuación de Arrhenius para la velocidad específica de crecimiento.

Donde, A está en h^{-1} , Ea en $\frac{J}{mol}$, R es igual a $8.314 \frac{J}{mol K}$ y T está en K .

En la Tabla A.5 se presentan los valores de A y Ea determinados para cada concentración de glucosa estudiada por Wang et al., (2015). En tanto que en la Tabla A.6 se presentan los valores estimados de μ_{max}

Tabla A.5. Parámetros de Arrhenius para

	307.69 ppm	81.96 ppm	41.08 ppm	20.97 ppm
A [1/h]	2.25104E+13	3.15705E+16	9.05261E+17	1.23026E+15
Ea [J/mol]	7.85E+04	9.74E+04	1.07E+05	9.10E+04

Tabla A.6. Determinación de μ_{max} .

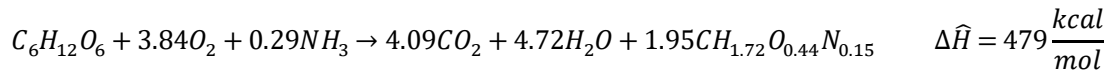
T [K]	μ [1/h]			
	307.69 ppm	81.96 ppm	41.08 ppm	20.97 ppm
293.99	0.25	0.15	0.10	0.08
297.57	0.37	0.25	0.17	0.13
297.82	0.38	0.26	0.17	0.13
298.34	0.40	0.27	0.19	0.14
298.85	0.42	0.29	0.20	0.15
299.36	0.45	0.31	0.22	0.16
300.12	0.48	0.35	0.24	0.18
301.15	0.54	0.39	0.28	0.20
302.17	0.60	0.45	0.32	0.23
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
302.94	0.65	0.50	0.36	0.25
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
302.94	0.65	0.50	0.36	0.25
302.94	0.65	0.50	0.36	0.25
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
302.94	0.65	0.50	0.36	0.25
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26
302.94	0.65	0.50	0.36	0.25
303.19	0.66	0.51	0.37	0.26

ANEXO III

Cálculo de calor de fermentación

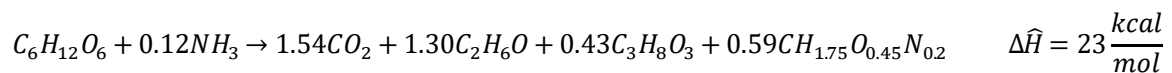
Para la *Saccharomyces cerevisiae* el crecimiento, en glucosa, aerobio y anaerobio, acompañado del calor producido, se describen mediante las siguientes reacciones (ecuaciones A.2 y A.3), respectivamente (Ghose et al., 1979).

Crecimiento aerobio



Ecuación A.2. Crecimiento aerobio de *S. cerevisiae*.

Crecimiento anaerobio



Ecuación A.3. Crecimiento anaerobio de *S. cerevisiae*.

Relación molar de O₂ respecto a la glucosa.

De la ecuación A.2 se tiene que la relación molar de oxígeno respecto a la glucosa es 3.84 moles de O₂/mol de glucosa, en tanto que de la ecuación A.3, dicha relación toma el valor de 0.59 moles de O₂/mol de glucosa.

Por otra parte, experimentalmente se tiene que:

- **Moles de glucosa**

$$n_{glucosa} = 50 \frac{g}{L} \cdot 1L \cdot \frac{1mol}{18g} = 0.278 \text{ moles}$$

- **Moles de O₂ disuelto**

De acuerdo con Karbowski et al., (2010) el oxígeno, a 30°C, tiene una solubilidad de 7.6 mg/L en agua. De esta manera,

$$n_{O_2} = 7.6 \frac{mg}{L} \cdot \frac{1g}{1000mg} \cdot 1L \cdot \frac{1mol}{32g} = 2.375E - 04 \text{ moles}$$

De manera que la relación experimental es de 8.54E-04 moles de O₂/mol de glucosa, lo que supone un crecimiento anaerobio.

Bajo esta premisa, se tomó como el valor máximo de entalpía de reacción las 23 kcal/mol (6860 J/g biomasa) generadas durante el crecimiento anaerobio de *S. cerevisiae* en glucosa. A partir de este valor, mediante iteración, se estimó que la entalpía de reacción experimental fue 2017.65 J/g biomasa. Con dicho valor, y sin control automático de temperatura, la *S. cerevisiae* alcanza temperaturas cercanas a la temperatura máxima de crecimiento (45.4 °C) establecida por Salvadó et al., (2011), lo cual se puede evidenciar en la Figura A.2.

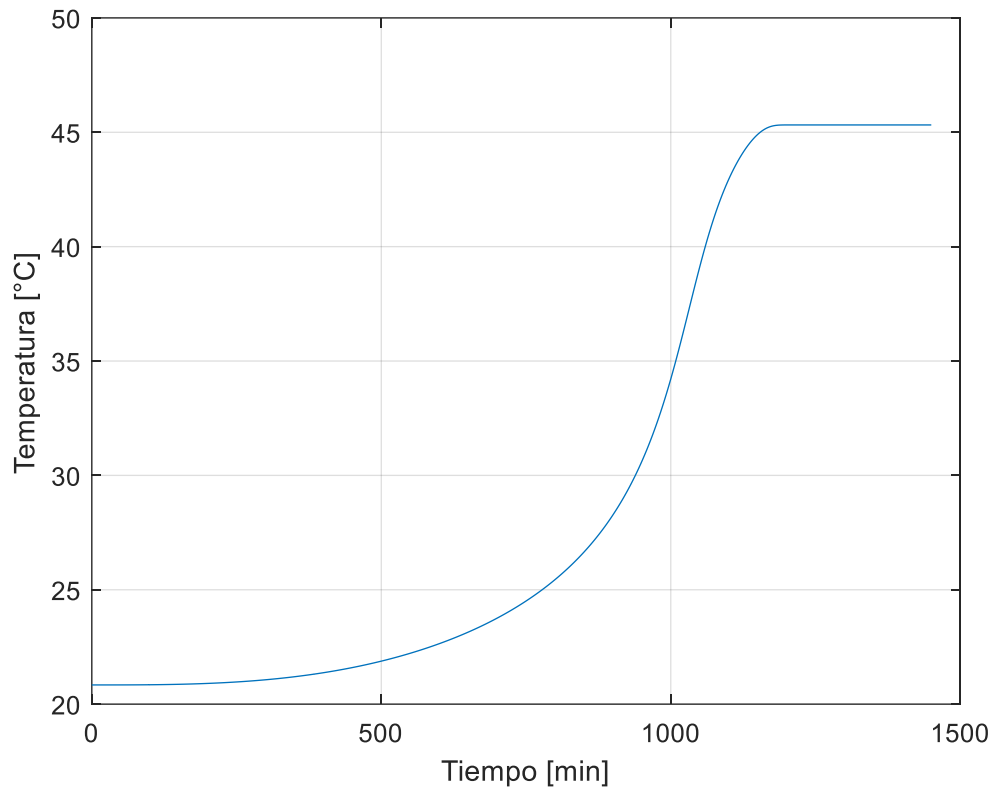


Figura A.2. Perfil de temperatura del crecimiento de *S. cerevisiae* sin control automático de temperatura

ANEXO IV

Determinación de los coeficientes de transferencia de calor

Tabla A.7. Determinación de h_{aire} y h_{ch} .

Tiempo [min]	Aire		Agua de calentamiento		Tf [K]	ΔT [K]	Propiedades a Tf					Gr	Gr.P	Aire		Chaqueta	
	T[°C]	T[K]	Ta.c[°C]	Ta.c[K]			ρ [kg/m ³]	μ [kg/ms]	Pr	k [W/mK]	β [1/K]			Nu	h_{aire} [W/m ² K]	Nu	h_{ch} [W/m ² K]
0	18.00	291.15	36.4	309.55	300.35	18.40	1.18	1.84E-05	0.69	0.027	0.003329449	1.45E+06	9.98E+05	1.86E+01	5.93	1.69E+01	5.37
15	18.00	291.15	25	298.15	294.65	7.00	1.20	1.82E-05	0.69	0.026	0.003393857	6.00E+05	4.14E+05	1.50E+01	4.70	1.37E+01	4.30
30	18.00	291.15	25.5	298.65	294.90	7.50	1.20	1.82E-05	0.69	0.026	0.00339098	6.40E+05	4.42E+05	1.52E+01	4.78	1.39E+01	4.37
45	18.00	291.15	25.9	299.05	295.10	7.90	1.20	1.82E-05	0.69	0.026	0.003388682	6.72E+05	4.64E+05	1.54E+01	4.84	1.41E+01	4.42
60	18.00	291.15	26	299.15	295.15	8.00	1.20	1.82E-05	0.69	0.026	0.003388108	6.80E+05	4.69E+05	1.54E+01	4.86	1.41E+01	4.43
75	18.00	291.15	26.4	299.55	295.35	8.40	1.20	1.82E-05	0.69	0.026	0.003385813	7.12E+05	4.91E+05	1.56E+01	4.91	1.43E+01	4.48
90	18.00	291.15	27.7	300.85	296.00	9.70	1.19	1.83E-05	0.69	0.026	0.003378378	8.14E+05	5.62E+05	1.62E+01	5.09	1.47E+01	4.64
105	18.00	291.15	28.8	301.95	296.55	10.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.026	0.003372113	8.99E+05	6.21E+05	1.66E+01	5.22	1.51E+01	4.75
120	18.00	291.15	29.8	302.95	297.05	11.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.003366437	9.75E+05	6.73E+05	1.69E+01	5.34	1.54E+01	4.85
135	18.00	291.15	30.8	303.95	297.55	12.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336078	1.05E+06	7.24E+05	1.72E+01	5.44	1.56E+01	4.94
150	18.00	291.15	30.8	303.95	297.55	12.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336078	1.05E+06	7.24E+05	1.72E+01	5.44	1.56E+01	4.94
165	18.00	291.15	30.8	303.95	297.55	12.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336078	1.05E+06	7.24E+05	1.72E+01	5.44	1.56E+01	4.94
180	18.00	291.15	30.8	303.95	297.55	12.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336078	1.05E+06	7.24E+05	1.72E+01	5.44	1.56E+01	4.94
195	18.00	291.15	30.6	303.75	297.45	12.60	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336191	1.04E+06	7.14E+05	1.72E+01	5.42	1.56E+01	4.92
210	18.00	291.15	30.7	303.85	297.50	12.70	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.003361345	1.04E+06	7.19E+05	1.72E+01	5.43	1.56E+01	4.93
225	18.00	291.15	30.9	304.05	297.60	12.90	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.003360215	1.06E+06	7.30E+05	1.72E+01	5.45	1.57E+01	4.95
240	18.00	291.15	30.8	303.95	297.55	12.80	1.19	1.83E-05	0.69	0.027	0.00336078	1.05E+06	7.24E+05	1.72E+01	5.44	1.56E+01	4.94

255	18.00	291.1 5	30.7	303.85	297.5 0	12.70	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336134 5	1.04E+0 6	7.19E+0 5	1.72E+0 1	5.43	1.56E+0 1	4.93
270	18.00	291.1 5	30.5	303.65	297.4 0	12.50	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336247 5	1.03E+0 6	7.09E+0 5	1.71E+0 1	5.41	1.56E+0 1	4.92
285	18.00	291.1 5	30.5	303.65	297.4 0	12.50	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336247 5	1.03E+0 6	7.09E+0 5	1.71E+0 1	5.41	1.56E+0 1	4.92
300	18.00	291.1 5	30.7	303.85	297.5 0	12.70	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336134 5	1.04E+0 6	7.19E+0 5	1.72E+0 1	5.43	1.56E+0 1	4.93
315	18.00	291.1 5	30.6	303.75	297.4 5	12.60	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336191	1.04E+0 6	7.14E+0 5	1.72E+0 1	5.42	1.56E+0 1	4.92
330	18.00	291.1 5	30.7	303.85	297.5 0	12.70	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336134 5	1.04E+0 6	7.19E+0 5	1.72E+0 1	5.43	1.56E+0 1	4.93
345	18.00	291.1 5	30.6	303.75	297.4 5	12.60	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336191	1.04E+0 6	7.14E+0 5	1.72E+0 1	5.42	1.56E+0 1	4.92
360	18.00	291.1 5	30.5	303.65	297.4 0	12.50	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336247 5	1.03E+0 6	7.09E+0 5	1.71E+0 1	5.41	1.56E+0 1	4.92
375	18.00	291.1 5	30.6	303.75	297.4 5	12.60	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336191	1.04E+0 6	7.14E+0 5	1.72E+0 1	5.42	1.56E+0 1	4.92
390	18.00	291.1 5	30.7	303.85	297.5 0	12.70	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336134 5	1.04E+0 6	7.19E+0 5	1.72E+0 1	5.43	1.56E+0 1	4.93
405	18.00	291.1 5	30.8	303.95	297.5 5	12.80	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336078	1.05E+0 6	7.24E+0 5	1.72E+0 1	5.44	1.56E+0 1	4.94
420	18.00	291.1 5	30.6	303.75	297.4 5	12.60	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336191	1.04E+0 6	7.14E+0 5	1.72E+0 1	5.42	1.56E+0 1	4.92
435	18.00	291.1 5	30.8	303.95	297.5 5	12.80	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336078	1.05E+0 6	7.24E+0 5	1.72E+0 1	5.44	1.56E+0 1	4.94
450	18.00	291.1 5	30.8	303.95	297.5 5	12.80	1.19	1.83E-05	0.6 9	0.027	0.00336078	1.05E+0 6	7.24E+0 5	1.72E+0 1	5.44	1.56E+0 1	4.94
Promedio															5.33		4.84

Tabla A.8. Determinación de $h_{con.for.}$

Tiempo [min]	Medio		Propiedades a Tf				Re	Vi	Nu	$h_{con.for}$ [W/m ² K]
	T[°C]	T[K]	ρ [kg/m ³]	μ [kg/ms]	Pr	k [W/mK]				
0	20.84	293.99	998.20	9.95E-04	6.92	0.600	2.25E+04	1.00E+00	7.75E+02	5670.95
15	24.42	297.57	996.97	9.16E-04	6.29	0.607	2.44E+04	1.00E+00	8.03E+02	5943.55
30	24.67	297.82	996.87	9.11E-04	6.25	0.607	2.45E+04	1.00E+00	8.05E+02	5962.67
45	25.19	298.34	996.67	9.01E-04	6.17	0.608	2.48E+04	1.00E+00	8.09E+02	6001.31
60	25.70	298.85	996.46	8.90E-04	6.08	0.609	2.51E+04	1.00E+00	8.13E+02	6040.49
75	26.21	299.36	996.26	8.80E-04	6.00	0.610	2.54E+04	1.00E+00	8.18E+02	6080.23
90	26.97	300.12	995.95	8.64E-04	5.88	0.611	2.58E+04	1.00E+00	8.24E+02	6140.91
105	28.00	301.15	995.54	8.44E-04	5.72	0.613	2.64E+04	1.00E+00	8.32E+02	6223.91
120	29.02	302.17	995.13	8.23E-04	5.55	0.615	2.71E+04	1.00E+00	8.41E+02	6309.41
135	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
150	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
165	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
180	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
195	29.79	302.94	994.83	8.08E-04	5.43	0.616	2.76E+04	1.00E+00	8.48E+02	6375.25
210	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
225	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
240	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
255	29.79	302.94	994.83	8.08E-04	5.43	0.616	2.76E+04	1.00E+00	8.48E+02	6375.25
270	29.79	302.94	994.83	8.08E-04	5.43	0.616	2.76E+04	1.00E+00	8.48E+02	6375.25
285	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
300	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
315	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
330	29.79	302.94	994.83	8.08E-04	5.43	0.616	2.76E+04	1.00E+00	8.48E+02	6375.25
345	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
360	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
375	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
390	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53

405	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
420	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
435	29.79	302.94	994.83	8.08E-04	5.43	0.616	2.76E+04	1.00E+00	8.48E+02	6375.25
450	30.04	303.19	994.72	8.03E-04	5.39	0.617	2.78E+04	1.00E+00	8.51E+02	6397.53
Promedio										6290.57

Tabla A.9. Determinación de h_i .

Tout [°C]	Tin [°C]	Tm=(Tout+Tin)/2 [°C]	hi [W/m²K]
21.1	18	19.55	1.11E+04
21.60		19.80	1.11E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.00		20.00	1.12E+04
22.20		20.10	1.12E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.20		20.10	1.12E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.20		20.10	1.12E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.20		20.10	1.12E+04
22.10		20.05	1.12E+04
22.20		20.10	1.12E+04
22.00		20.00	1.12E+04
22.00		20.00	1.12E+04
21.90		19.95	1.12E+04
21.90		19.95	1.12E+04
21.90		19.95	1.12E+04
22.00		20.00	1.12E+04
21.80	19.90	1.12E+04	
21.70	19.85	1.12E+04	
21.80	19.90	1.12E+04	
21.90	19.95	1.12E+04	
Promedio			1.12E+04

Tabla A.10. Determinación punto a punto de los coeficientes globales de transferencia de calor.

Medio de cultivo						Chaqueta						Tubo en U				
Rconv.nat.v	Rconv.fo r	Rvidrio	Rac.tota l	Aa.c.	Ua.c.	Rconv.nat.c h	Rch	Rch.aire	Rch.tota l	Achaq	Uchaq	Rint	Rext	Rtubo.tota l	Aaf	Uaf
5.01E-02	4.07E-03	3.36E-02	0.088	4.33E-02	2.63E+02	3.97E-02	2.25E-02	2.79E+00	2.857	5.59E-02	6.26E+00	2.50E-02	4.35E-02	6.85E-02	3.60E-03	4.06E+03
1.54E-01	3.89E-03		0.192		1.20E+02	1.22E-01		3.49E+00	3.638		4.92E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.06E+03
1.37E-01	3.88E-03		0.174		1.32E+02	1.09E-01		3.44E+00	3.569		5.01E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.43E-01	3.85E-03		0.181		1.28E+02	1.13E-01		3.40E+00	3.532		5.06E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.90E-01	3.83E-03		0.228		1.02E+02	1.51E-01		3.39E+00	3.560		5.02E+00	2.49E-02	4.36E-02	6.85E-02		4.06E+03
2.21E-01	3.80E-03		0.258		8.95E+01	1.75E-01		3.35E+00	3.545		5.04E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.41E-01	3.76E-03		0.178		1.30E+02	1.11E-01		3.24E+00	3.372		5.30E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.35E-01	3.71E-03		0.172		1.34E+02	1.07E-01		3.16E+00	3.288		5.44E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.35E-01	3.66E-03		0.172		1.34E+02	1.07E-01		3.09E+00	3.224		5.55E+00	2.49E-02	4.36E-02	6.85E-02		4.06E+03
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+02	1.07E-01		3.04E+00	3.167		5.65E+00	2.49E-02	4.36E-02	6.85E-02		4.06E+03
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+02	1.07E-01		3.04E+00	3.167		5.65E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+02	1.07E-01		3.04E+00	3.167		5.65E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+02	1.07E-01		3.04E+00	3.167		5.65E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.32E-01	3.62E-03		0.170		1.36E+02	1.05E-01		3.05E+00	3.175		5.63E+00	2.49E-02	4.36E-02	6.85E-02		4.06E+03
1.42E-01	3.61E-03		0.179		1.29E+02	1.12E-01		3.04E+00	3.177		5.63E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+03
1.30E-01	3.61E-03		0.167		1.38E+02	1.03E-01		3.03E+00	3.157		5.67E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+03
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+02	1.07E-01		3.04E+00	3.167		5.65E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+03
1.27E-01	3.62E-03		0.165		1.40E+02	1.01E-01		3.04E+00	3.166		5.65E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.83E-02		4.07E+03
1.38E-01	3.62E-03		0.176		1.32E+02	1.10E-01		3.05E+00	3.186		5.61E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+03
1.60E-01	3.61E-03		0.198		1.17E+02	1.27E-01		3.05E+00	3.203		5.58E+00	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+03

1.42E-01	3.61E-03		0.179		1.29E+0 2	1.12E-01		3.04E+0 0	3.177		5.63E+0 0	2.49E-02	4.36E-02	6.85E-02		4.06E+0 3
1.50E-01	3.61E-03		0.187		1.23E+0 2	1.19E-01		3.05E+0 0	3.189		5.61E+0 0	2.49E-02	4.35E-02	6.84E-02		4.07E+0 3
1.27E-01	3.62E-03		0.165		1.40E+0 2	1.01E-01		3.04E+0 0	3.166		5.65E+0 0	Promedio				4.07E+0 3
1.50E-01	3.61E-03		0.187		1.23E+0 2	1.19E-01		3.05E+0 0	3.189		5.61E+0 0					
1.60E-01	3.61E-03		0.198		1.17E+0 2	1.27E-01		3.05E+0 0	3.203		5.58E+0 0					
1.50E-01	3.61E-03		0.187		1.23E+0 2	1.19E-01		3.05E+0 0	3.189		5.61E+0 0					
1.42E-01	3.61E-03		0.179		1.29E+0 2	1.12E-01		3.04E+0 0	3.177		5.63E+0 0					
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+0 2	1.07E-01		3.04E+0 0	3.167		5.65E+0 0					
1.50E-01	3.61E-03		0.187		1.23E+0 2	1.19E-01		3.05E+0 0	3.189		5.61E+0 0					
1.23E-01	3.62E-03		0.160		1.44E+0 2	9.74E-02		3.04E+0 0	3.157		5.67E+0 0					
1.35E-01	3.61E-03		0.173		1.34E+0 2	1.07E-01		3.04E+0 0	3.167		5.65E+0 0					
Promedio					132.77	Promedio					5.53					

ANEXO V

Determinación de la potencia de la niquelina

Tabla A.11. Determinación de la potencia de la Niquelina.

Tiempo [s]	Tsis [°C]	Tsis [K]	Tamb [°C]	Calor hacia el sistema					Pérdidas directas con el ambiente			Pérdidas por la chaqueta					Wniquelina [W]	(Wmax-Wmin)	
				m [kg]	Cp [J/kg-K]	Δt [s]	ΔT [°C]	Qsis [W]	hp [W/m²K]	(Tsis-Tamb) [°C]	Qp [W]	Rchairs1	Rfor	Rtotal	(UA)ch [W/K]	Uch [W/m²K]			Qch [W]
0	21.35	294.50	18	0.19	4182.85	20	0.00	0.00	3.92	3.35	1.72E-01	2.14E+01	2.43E-02	2.15E+01	4.66E-02	3.61E+00	1.56E-01	0.33	
20	21.35	294.50	18	0.19	4182.85	20	0.26	10.13	3.92	3.35	1.72E-01	2.14E+01	2.43E-02	2.15E+01	4.66E-02	3.61E+00	1.56E-01	10.46	10.13
40	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.00	0.00	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	0.36	
60	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.00	0.00	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	0.36	
80	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.00	0.00	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	0.36	
100	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.00	0.00	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	0.36	
120	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.00	0.00	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	0.36	
140	21.61	294.76	18	0.19	4182.67	20	0.26	10.13	3.99	3.61	1.88E-01	2.11E+01	2.42E-02	2.11E+01	4.74E-02	3.67E+00	1.71E-01	10.49	10.13
160	21.86	295.01	18	0.19	4182.49	20	0.00	0.00	4.06	3.86	2.05E-01	2.07E+01	2.41E-02	2.08E+01	4.81E-02	3.73E+00	1.86E-01	0.39	
180	21.86	295.01	18	0.19	4182.49	20	0.00	0.00	4.06	3.86	2.05E-01	2.07E+01	2.41E-02	2.08E+01	4.81E-02	3.73E+00	1.86E-01	0.39	
200	21.86	295.01	18	0.19	4182.49	20	0.00	0.00	4.06	3.86	2.05E-01	2.07E+01	2.41E-02	2.08E+01	4.81E-02	3.73E+00	1.86E-01	0.39	
220	21.86	295.01	18	0.19	4182.49	20	0.26	10.13	4.06	3.86	2.05E-01	2.07E+01	2.41E-02	2.08E+01	4.81E-02	3.73E+00	1.86E-01	10.52	10.13
240	22.12	295.27	18	0.19	4182.31	20	0.00	0.00	4.12	4.12	2.22E-01	2.04E+01	2.40E-02	2.05E+01	4.88E-02	3.79E+00	2.01E-01	0.42	
260	22.12	295.27	18	0.19	4182.31	20	0.00	0.00	4.12	4.12	2.22E-01	2.04E+01	2.40E-02	2.05E+01	4.88E-02	3.79E+00	2.01E-01	0.42	
280	22.12	295.27	18	0.19	4182.31	20	0.00	0.00	4.12	4.12	2.22E-01	2.04E+01	2.40E-02	2.05E+01	4.88E-02	3.79E+00	2.01E-01	0.42	
300	22.12	295.27	18	0.19	4182.31	20	0.26	10.13	4.12	4.12	2.22E-01	2.04E+01	2.40E-02	2.05E+01	4.88E-02	3.79E+00	2.01E-01	10.55	10.13
320	22.37	295.52	18	0.19	4182.13	20	0.00	0.00	4.19	4.37	2.39E-01	2.01E+01	2.40E-02	2.02E+01	4.95E-02	3.84E+00	2.17E-01	0.46	

340	22.37	295.52	18	0.19	4182.13	20	0.00	0.00	4.19	4.37	2.39E-01	2.01E+01	2.40E-02	2.02E+01	4.95E-02	3.84E+00	2.17E-01	0.46	
360	22.37	295.52	18	0.19	4182.13	20	0.26	10.13	4.19	4.37	2.39E-01	2.01E+01	2.40E-02	2.02E+01	4.95E-02	3.84E+00	2.17E-01	10.58	10.13
380	22.63	295.78	18	0.19	4181.95	20	0.00	0.00	4.25	4.63	2.57E-01	1.99E+01	2.39E-02	1.99E+01	5.02E-02	3.89E+00	2.32E-01	0.49	
400	22.63	295.78	18	0.19	4181.95	20	0.00	0.00	4.25	4.63	2.57E-01	1.99E+01	2.39E-02	1.99E+01	5.02E-02	3.89E+00	2.32E-01	0.49	
420	22.63	295.78	18	0.19	4181.95	20	0.26	10.13	4.25	4.63	2.57E-01	1.99E+01	2.39E-02	1.99E+01	5.02E-02	3.89E+00	2.32E-01	10.62	10.13
440	22.88	296.03	18	0.19	4181.78	20	0.00	0.00	4.30	4.88	2.75E-01	1.96E+01	2.38E-02	1.97E+01	5.08E-02	3.94E+00	2.48E-01	0.52	
460	22.88	296.03	18	0.19	4181.78	20	0.26	10.13	4.30	4.88	2.75E-01	1.96E+01	2.38E-02	1.97E+01	5.08E-02	3.94E+00	2.48E-01	10.65	10.13
480	23.14	296.29	18	0.19	4181.60	20	0.00	0.00	4.36	5.14	2.93E-01	1.94E+01	2.37E-02	1.94E+01	5.14E-02	3.99E+00	2.64E-01	0.56	
500	23.14	296.29	18	0.19	4181.60	20	0.26	10.13	4.36	5.14	2.93E-01	1.94E+01	2.37E-02	1.94E+01	5.14E-02	3.99E+00	2.64E-01	10.68	10.13
520	23.40	296.55	18	0.19	4181.42	20	0.00	0.00	4.41	5.40	3.11E-01	1.92E+01	2.36E-02	1.92E+01	5.20E-02	4.03E+00	2.81E-01	0.59	
540	23.40	296.55	18	0.19	4181.42	20	0.00	0.00	4.41	5.40	3.11E-01	1.92E+01	2.36E-02	1.92E+01	5.20E-02	4.03E+00	2.81E-01	0.59	
560	23.40	296.55	18	0.19	4181.42	20	0.26	10.12	4.41	5.40	3.11E-01	1.92E+01	2.36E-02	1.92E+01	5.20E-02	4.03E+00	2.81E-01	10.72	10.12
580	23.65	296.80	18	0.19	4181.24	20	0.00	0.00	4.46	5.65	3.29E-01	1.90E+01	2.35E-02	1.90E+01	5.26E-02	4.08E+00	2.97E-01	0.63	
600	23.65	296.80	18	0.19	4181.24	20	0.00	0.00	4.46	5.65	3.29E-01	1.90E+01	2.35E-02	1.90E+01	5.26E-02	4.08E+00	2.97E-01	0.63	
620	23.65	296.80	18	0.19	4181.24	20	0.26	10.12	4.46	5.65	3.29E-01	1.90E+01	2.35E-02	1.90E+01	5.26E-02	4.08E+00	2.97E-01	10.75	10.12
640	23.91	297.06	18	0.19	4181.06	20	0.00	0.00	4.51	5.91	3.48E-01	1.88E+01	2.35E-02	1.88E+01	5.31E-02	4.12E+00	3.14E-01	0.66	
660	23.91	297.06	18	0.19	4181.06	20	0.26	10.12	4.51	5.91	3.48E-01	1.88E+01	2.35E-02	1.88E+01	5.31E-02	4.12E+00	3.14E-01	10.78	10.12
680	24.16	297.31	18	0.19	4180.88	20	0.00	0.00	4.55	6.16	3.67E-01	1.86E+01	2.34E-02	1.86E+01	5.37E-02	4.16E+00	3.31E-01	0.70	
700	24.16	297.31	18	0.19	4180.88	20	0.00	0.00	4.55	6.16	3.67E-01	1.86E+01	2.34E-02	1.86E+01	5.37E-02	4.16E+00	3.31E-01	0.70	
720	24.16	297.31	18	0.19	4180.88	20	0.26	10.12	4.55	6.16	3.67E-01	1.86E+01	2.34E-02	1.86E+01	5.37E-02	4.16E+00	3.31E-01	10.82	10.12
740	24.42	297.57	18	0.19	4180.70	20	0.26	10.12	4.60	6.42	3.86E-01	1.84E+01	2.33E-02	1.85E+01	5.42E-02	4.20E+00	3.48E-01	10.85	
760	24.67	297.82	18	0.19	4180.52	20	0.00	0.00	4.64	6.67	4.05E-01	1.82E+01	2.32E-02	1.83E+01	5.47E-02	4.24E+00	3.65E-01	0.77	
780	24.67	297.82	18	0.19	4180.52	20	0.26	10.12	4.64	6.67	4.05E-01	1.82E+01	2.32E-02	1.83E+01	5.47E-02	4.24E+00	3.65E-01	10.89	10.12

800	24.93	298.08	18	0.19	4180.34	20	0.00	0.00	4.69	6.93	4.25E-01	1.81E+01	2.31E-02	1.81E+01	5.51E-02	4.28E+00	3.82E-01	0.81	
820	24.93	298.08	18	0.19	4180.34	20	0.00	0.00	4.69	6.93	4.25E-01	1.81E+01	2.31E-02	1.81E+01	5.51E-02	4.28E+00	3.82E-01	0.81	
840	24.93	298.08	18	0.19	4180.34	20	0.26	10.12	4.69	6.93	4.25E-01	1.81E+01	2.31E-02	1.81E+01	5.51E-02	4.28E+00	3.82E-01	10.92	10.12
860	25.19	298.34	18	0.19	4180.17	20	0.00	0.00	4.73	7.19	4.44E-01	1.79E+01	2.30E-02	1.80E+01	5.56E-02	4.31E+00	4.00E-01	0.84	
880	25.19	298.34	18	0.19	4180.17	20	0.26	10.12	4.73	7.19	4.44E-01	1.79E+01	2.30E-02	1.80E+01	5.56E-02	4.31E+00	4.00E-01	10.96	10.12
900	25.44	298.59	18	0.19	4179.99	20	0.00	0.00	4.77	7.44	4.64E-01	1.78E+01	2.29E-02	1.78E+01	5.61E-02	4.35E+00	4.17E-01	0.88	
920	25.44	298.59	18	0.19	4179.99	20	0.26	10.11	4.77	7.44	4.64E-01	1.78E+01	2.29E-02	1.78E+01	5.61E-02	4.35E+00	4.17E-01	11.00	10.11
940	25.70	298.85	18	0.19	4179.81	20	0.00	0.00	4.81	7.70	4.84E-01	1.77E+01	2.29E-02	1.77E+01	5.65E-02	4.38E+00	4.35E-01	0.92	
960	25.70	298.85	18	0.19	4179.81	20	0.26	10.11	4.81	7.70	4.84E-01	1.77E+01	2.29E-02	1.77E+01	5.65E-02	4.38E+00	4.35E-01	11.03	10.11
980	25.95	299.10	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	4.85	7.95	5.04E-01	1.75E+01	2.28E-02	1.76E+01	5.69E-02	4.41E+00	4.53E-01	0.96	
1000	25.95	299.10	18	0.19	4179.63	20	0.26	10.11	4.85	7.95	5.04E-01	1.75E+01	2.28E-02	1.76E+01	5.69E-02	4.41E+00	4.53E-01	11.07	10.11
1020	26.21	299.36	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	4.89	8.21	5.24E-01	1.74E+01	2.27E-02	1.74E+01	5.74E-02	4.45E+00	4.71E-01	0.99	
1040	26.21	299.36	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	4.89	8.21	5.24E-01	1.74E+01	2.27E-02	1.74E+01	5.74E-02	4.45E+00	4.71E-01	0.99	
1060	26.21	299.36	18	0.19	4179.45	20	0.26	10.11	4.89	8.21	5.24E-01	1.74E+01	2.27E-02	1.74E+01	5.74E-02	4.45E+00	4.71E-01	11.11	10.11
1080	26.46	299.61	18	0.19	4179.27	20	0.26	10.11	4.92	8.46	5.45E-01	1.73E+01	2.26E-02	1.73E+01	5.78E-02	4.48E+00	4.89E-01	11.14	
1100	26.72	299.87	18	0.19	4179.09	20	0.00	0.00	4.96	8.72	5.65E-01	1.71E+01	2.25E-02	1.72E+01	5.82E-02	4.51E+00	5.07E-01	1.07	
1120	26.72	299.87	18	0.19	4179.09	20	0.26	10.11	4.96	8.72	5.65E-01	1.71E+01	2.25E-02	1.72E+01	5.82E-02	4.51E+00	5.07E-01	11.18	10.11
1140	26.97	300.12	18	0.19	4179.01	20	0.00	0.00	4.98	8.97	5.84E-01	1.71E+01	1.26E-02	1.71E+01	5.84E-02	4.53E+00	5.24E-01	1.11	
1160	26.97	300.12	18	0.19	4179.01	20	0.26	10.11	4.98	8.97	5.84E-01	1.71E+01	1.26E-02	1.71E+01	5.84E-02	4.53E+00	5.24E-01	11.22	10.11
1180	27.23	300.38	18	0.19	4179.02	20	0.00	0.00	5.01	9.23	6.05E-01	1.70E+01	1.25E-02	1.70E+01	5.88E-02	4.56E+00	5.43E-01	1.15	
1200	27.23	300.38	18	0.19	4179.02	20	0.26	10.11	5.01	9.23	6.05E-01	1.70E+01	1.25E-02	1.70E+01	5.88E-02	4.56E+00	5.43E-01	11.25	10.11
1220	27.49	300.64	18	0.19	4179.03	20	0.00	0.00	5.05	9.49	6.26E-01	1.69E+01	1.25E-02	1.69E+01	5.92E-02	4.59E+00	5.62E-01	1.19	
1240	27.49	300.64	18	0.19	4179.03	20	0.26	10.11	5.05	9.49	6.26E-01	1.69E+01	1.25E-02	1.69E+01	5.92E-02	4.59E+00	5.62E-01	11.29	10.11

1260	27.74	300.89	18	0.19	4179.04	20	0.00	0.00	5.08	9.74	6.47E-01	1.68E+01	1.24E-02	1.68E+01	5.96E-02	4.62E+00	5.80E-01	1.23	
1280	27.74	300.89	18	0.19	4179.04	20	0.26	10.10	5.08	9.74	6.47E-01	1.68E+01	1.24E-02	1.68E+01	5.96E-02	4.62E+00	5.80E-01	11.33	10.10
1300	28.00	301.15	18	0.19	4179.06	20	0.00	0.00	5.11	10.00	6.68E-01	1.67E+01	1.24E-02	1.67E+01	5.99E-02	4.65E+00	5.99E-01	1.27	
1320	28.00	301.15	18	0.19	4179.06	20	0.00	0.00	5.11	10.00	6.68E-01	1.67E+01	1.24E-02	1.67E+01	5.99E-02	4.65E+00	5.99E-01	1.27	
1340	28.00	301.15	18	0.19	4179.06	20	0.26	10.10	5.11	10.00	6.68E-01	1.67E+01	1.24E-02	1.67E+01	5.99E-02	4.65E+00	5.99E-01	11.37	10.10
1360	28.25	301.40	18	0.19	4179.07	20	0.00	0.00	5.15	10.25	6.89E-01	1.66E+01	1.24E-02	1.66E+01	6.03E-02	4.67E+00	6.18E-01	1.31	
1380	28.25	301.40	18	0.19	4179.07	20	0.26	10.10	5.15	10.25	6.89E-01	1.66E+01	1.24E-02	1.66E+01	6.03E-02	4.67E+00	6.18E-01	11.41	10.10
1400	28.51	301.66	18	0.19	4179.08	20	0.00	0.00	5.18	10.51	7.11E-01	1.65E+01	1.23E-02	1.65E+01	6.06E-02	4.70E+00	6.37E-01	1.35	
1420	28.51	301.66	18	0.19	4179.08	20	0.26	10.10	5.18	10.51	7.11E-01	1.65E+01	1.23E-02	1.65E+01	6.06E-02	4.70E+00	6.37E-01	11.45	10.10
1440	28.76	301.91	18	0.19	4179.10	20	0.00	0.00	5.21	10.76	7.33E-01	1.64E+01	1.23E-02	1.64E+01	6.10E-02	4.73E+00	6.56E-01	1.39	
1460	28.76	301.91	18	0.19	4179.10	20	0.26	10.10	5.21	10.76	7.33E-01	1.64E+01	1.23E-02	1.64E+01	6.10E-02	4.73E+00	6.56E-01	11.49	10.10
1480	29.02	302.17	18	0.19	4179.11	20	0.00	0.00	5.24	11.02	7.54E-01	1.63E+01	1.22E-02	1.63E+01	6.13E-02	4.75E+00	6.76E-01	1.43	
1500	29.02	302.17	18	0.19	4179.11	20	0.26	10.10	5.24	11.02	7.54E-01	1.63E+01	1.22E-02	1.63E+01	6.13E-02	4.75E+00	6.76E-01	11.53	10.10
1520	29.28	302.43	18	0.19	4179.12	20	0.26	10.10	5.27	11.28	7.76E-01	1.62E+01	1.22E-02	1.62E+01	6.16E-02	4.78E+00	6.95E-01	11.57	
1540	29.53	302.68	18	0.19	4179.13	20	0.00	0.00	5.30	11.53	7.98E-01	1.61E+01	1.21E-02	1.61E+01	6.20E-02	4.80E+00	7.15E-01	1.51	
1560	29.53	302.68	18	0.19	4179.13	20	0.00	0.00	5.30	11.53	7.98E-01	1.61E+01	1.21E-02	1.61E+01	6.20E-02	4.80E+00	7.15E-01	1.51	
1580	29.53	302.68	18	0.19	4179.13	20	0.26	10.10	5.30	11.53	7.98E-01	1.61E+01	1.21E-02	1.61E+01	6.20E-02	4.80E+00	7.15E-01	11.61	10.10
1600	29.79	302.94	18	0.19	4179.15	20	0.26	10.10	5.32	11.79	8.20E-01	1.60E+01	1.21E-02	1.61E+01	6.23E-02	4.83E+00	7.34E-01	11.65	
1620	30.04	303.19	18	0.19	4179.16	20	0.00	0.00	5.35	12.04	8.42E-01	1.59E+01	1.21E-02	1.60E+01	6.26E-02	4.85E+00	7.54E-01	1.60	
1640	30.04	303.19	18	0.19	4179.16	20	0.26	10.10	5.35	12.04	8.42E-01	1.59E+01	1.21E-02	1.60E+01	6.26E-02	4.85E+00	7.54E-01	11.69	10.10
1660	30.30	303.45	18	0.19	4179.17	20	0.00	0.00	5.38	12.30	8.65E-01	1.59E+01	1.20E-02	1.59E+01	6.29E-02	4.88E+00	7.74E-01	1.64	
1680	30.30	303.45	18	0.19	4179.17	20	0.00	0.00	5.38	12.30	8.65E-01	1.59E+01	1.20E-02	1.59E+01	6.29E-02	4.88E+00	7.74E-01	1.64	
1700	30.30	303.45	18	0.19	4179.17	20	0.26	10.10	5.38	12.30	8.65E-01	1.59E+01	1.20E-02	1.59E+01	6.29E-02	4.88E+00	7.74E-01	11.73	10.10

1720	30.55	303.70	18	0.19	4179.19	20	0.00	0.00	5.41	12.55	8.87E-01	1.58E+01	1.20E-02	1.58E+01	6.32E-02	4.90E+00	7.94E-01	1.68	
1740	30.55	303.70	18	0.19	4179.19	20	0.00	0.00	5.41	12.55	8.87E-01	1.58E+01	1.20E-02	1.58E+01	6.32E-02	4.90E+00	7.94E-01	1.68	
1760	30.55	303.70	18	0.19	4179.19	20	0.26	10.10	5.41	12.55	8.87E-01	1.58E+01	1.20E-02	1.58E+01	6.32E-02	4.90E+00	7.94E-01	11.78	10.10
1780	30.81	303.96	18	0.19	4179.20	20	0.00	0.00	5.43	12.81	9.10E-01	1.57E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.35E-02	4.92E+00	8.14E-01	1.72	
1800	30.81	303.96	18	0.19	4179.20	20	0.00	0.00	5.43	12.81	9.10E-01	1.57E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.35E-02	4.92E+00	8.14E-01	1.72	
1820	30.81	303.96	18	0.19	4179.20	20	0.26	10.09	5.43	12.81	9.10E-01	1.57E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.35E-02	4.92E+00	8.14E-01	11.82	10.09
1840	31.06	304.21	18	0.19	4179.21	20	0.00	0.00	5.46	13.06	9.32E-01	1.56E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.38E-02	4.95E+00	8.34E-01	1.77	
1860	31.06	304.21	18	0.19	4179.21	20	0.00	0.00	5.46	13.06	9.32E-01	1.56E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.38E-02	4.95E+00	8.34E-01	1.77	
1880	31.06	304.21	18	0.19	4179.21	20	0.26	10.09	5.46	13.06	9.32E-01	1.56E+01	1.19E-02	1.57E+01	6.38E-02	4.95E+00	8.34E-01	11.86	10.09
1900	31.32	304.47	18	0.19	4179.22	20	0.00	0.00	5.49	13.32	9.55E-01	1.56E+01	1.18E-02	1.56E+01	6.41E-02	4.97E+00	8.54E-01	1.81	
1920	31.32	304.47	18	0.19	4179.22	20	0.00	0.00	5.49	13.32	9.55E-01	1.56E+01	1.18E-02	1.56E+01	6.41E-02	4.97E+00	8.54E-01	1.81	
1940	31.32	304.47	18	0.19	4179.22	20	0.26	10.09	5.49	13.32	9.55E-01	1.56E+01	1.18E-02	1.56E+01	6.41E-02	4.97E+00	8.54E-01	11.90	10.09
1960	31.58	304.73	18	0.19	4179.24	20	0.00	0.00	5.51	13.58	9.78E-01	1.55E+01	1.18E-02	1.55E+01	6.44E-02	4.99E+00	8.74E-01	1.85	
1980	31.58	304.73	18	0.19	4179.24	20	0.26	10.09	5.51	13.58	9.78E-01	1.55E+01	1.18E-02	1.55E+01	6.44E-02	4.99E+00	8.74E-01	11.94	10.09
2000	31.83	304.98	18	0.19	4179.25	20	0.00	0.00	5.54	13.83	1.00E+00	1.54E+01	1.17E-02	1.55E+01	6.47E-02	5.01E+00	8.94E-01	1.90	
2020	31.83	304.98	18	0.19	4179.25	20	0.00	0.00	5.54	13.83	1.00E+00	1.54E+01	1.17E-02	1.55E+01	6.47E-02	5.01E+00	8.94E-01	1.90	
2040	31.83	304.98	18	0.19	4179.25	20	0.00	0.00	5.54	13.83	1.00E+00	1.54E+01	1.17E-02	1.55E+01	6.47E-02	5.01E+00	8.94E-01	1.90	
2060	31.83	304.98	18	0.19	4179.25	20	0.26	10.09	5.54	13.83	1.00E+00	1.54E+01	1.17E-02	1.55E+01	6.47E-02	5.01E+00	8.94E-01	11.99	10.09
2080	32.09	305.24	18	0.19	4179.26	20	0.26	10.09	5.56	14.09	1.02E+00	1.54E+01	1.17E-02	1.54E+01	6.49E-02	5.04E+00	9.15E-01	12.03	
2100	32.34	305.49	18	0.19	4179.27	20	0.00	0.00	5.59	14.34	1.05E+00	1.53E+01	1.17E-02	1.53E+01	6.52E-02	5.06E+00	9.35E-01	1.98	
2120	32.34	305.49	18	0.19	4179.27	20	0.00	0.00	5.59	14.34	1.05E+00	1.53E+01	1.17E-02	1.53E+01	6.52E-02	5.06E+00	9.35E-01	1.98	
2140	32.34	305.49	18	0.19	4179.27	20	0.26	10.09	5.59	14.34	1.05E+00	1.53E+01	1.17E-02	1.53E+01	6.52E-02	5.06E+00	9.35E-01	12.07	10.09
2160	32.60	305.75	18	0.19	4179.29	20	0.00	0.00	5.61	14.60	1.07E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.53E+01	6.55E-02	5.08E+00	9.56E-01	2.03	

2180	32.60	305.75	18	0.19	4179.29	20	0.00	0.00	5.61	14.60	1.07E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.53E+01	6.55E-02	5.08E+00	9.56E-01	2.03	
2200	32.60	305.75	18	0.19	4179.29	20	0.26	10.09	5.61	14.60	1.07E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.53E+01	6.55E-02	5.08E+00	9.56E-01	12.11	10.09
2220	32.85	306.00	18	0.19	4179.30	20	0.00	0.00	5.63	14.85	1.09E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.52E+01	6.58E-02	5.10E+00	9.77E-01	2.07	
2240	32.85	306.00	18	0.19	4179.30	20	0.00	0.00	5.63	14.85	1.09E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.52E+01	6.58E-02	5.10E+00	9.77E-01	2.07	
2260	32.85	306.00	18	0.19	4179.30	20	0.00	0.00	5.63	14.85	1.09E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.52E+01	6.58E-02	5.10E+00	9.77E-01	2.07	
2280	32.85	306.00	18	0.19	4179.30	20	0.26	10.09	5.63	14.85	1.09E+00	1.52E+01	1.16E-02	1.52E+01	6.58E-02	5.10E+00	9.77E-01	12.16	10.09
2300	33.11	306.26	18	0.19	4179.31	20	0.00	0.00	5.66	15.11	1.12E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.60E-02	5.12E+00	9.97E-01	2.11	
2320	33.11	306.26	18	0.19	4179.31	20	0.00	0.00	5.66	15.11	1.12E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.60E-02	5.12E+00	9.97E-01	2.11	
2340	33.11	306.26	18	0.19	4179.31	20	0.26	10.09	5.66	15.11	1.12E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.60E-02	5.12E+00	9.97E-01	12.20	10.09
2360	33.37	306.52	18	0.19	4179.33	20	0.00	0.00	5.68	15.37	1.14E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.63E-02	5.14E+00	1.02E+00	2.16	
2380	33.37	306.52	18	0.19	4179.33	20	0.00	0.00	5.68	15.37	1.14E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.63E-02	5.14E+00	1.02E+00	2.16	
2400	33.37	306.52	18	0.19	4179.33	20	0.26	10.09	5.68	15.37	1.14E+00	1.51E+01	1.15E-02	1.51E+01	6.63E-02	5.14E+00	1.02E+00	12.24	10.09
2420	33.62	306.77	18	0.19	4179.34	20	0.00	0.00	5.70	15.62	1.16E+00	1.50E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.65E-02	5.16E+00	1.04E+00	2.20	
2440	33.62	306.77	18	0.19	4179.34	20	0.00	0.00	5.70	15.62	1.16E+00	1.50E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.65E-02	5.16E+00	1.04E+00	2.20	
2460	33.62	306.77	18	0.19	4179.34	20	0.00	0.00	5.70	15.62	1.16E+00	1.50E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.65E-02	5.16E+00	1.04E+00	2.20	
2480	33.62	306.77	18	0.19	4179.34	20	0.26	10.08	5.70	15.62	1.16E+00	1.50E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.65E-02	5.16E+00	1.04E+00	12.29	10.08
2500	33.88	307.03	18	0.19	4179.35	20	0.00	0.00	5.73	15.88	1.19E+00	1.49E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.68E-02	5.18E+00	1.06E+00	2.25	
2520	33.88	307.03	18	0.19	4179.35	20	0.00	0.00	5.73	15.88	1.19E+00	1.49E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.68E-02	5.18E+00	1.06E+00	2.25	
2540	33.88	307.03	18	0.19	4179.35	20	0.26	10.08	5.73	15.88	1.19E+00	1.49E+01	1.14E-02	1.50E+01	6.68E-02	5.18E+00	1.06E+00	12.33	10.08
2560	34.13	307.28	18	0.19	4179.36	20	0.00	0.00	5.75	16.13	1.21E+00	1.49E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.70E-02	5.20E+00	1.08E+00	2.29	
2580	34.13	307.28	18	0.19	4179.36	20	0.00	0.00	5.75	16.13	1.21E+00	1.49E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.70E-02	5.20E+00	1.08E+00	2.29	
2600	34.13	307.28	18	0.19	4179.36	20	0.00	0.00	5.75	16.13	1.21E+00	1.49E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.70E-02	5.20E+00	1.08E+00	2.29	
2620	34.13	307.28	18	0.19	4179.36	20	0.00	0.00	5.75	16.13	1.21E+00	1.49E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.70E-02	5.20E+00	1.08E+00	2.29	

2640	34.13	307.28	18	0.19	4179.36	20	0.26	10.08	5.75	16.13	1.21E+00	1.49E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.70E-02	5.20E+00	1.08E+00	12.38	10.08
2660	34.39	307.54	18	0.19	4179.38	20	0.00	0.00	5.77	16.39	1.24E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.73E-02	5.22E+00	1.10E+00	2.34	
2680	34.39	307.54	18	0.19	4179.38	20	0.00	0.00	5.77	16.39	1.24E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.73E-02	5.22E+00	1.10E+00	2.34	
2700	34.39	307.54	18	0.19	4179.38	20	0.00	0.00	5.77	16.39	1.24E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.73E-02	5.22E+00	1.10E+00	2.34	
2720	34.39	307.54	18	0.19	4179.38	20	0.26	10.08	5.77	16.39	1.24E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.49E+01	6.73E-02	5.22E+00	1.10E+00	12.42	10.08
2740	34.64	307.79	18	0.19	4179.39	20	0.00	0.00	5.79	16.64	1.26E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.48E+01	6.75E-02	5.24E+00	1.12E+00	2.38	
2760	34.64	307.79	18	0.19	4179.39	20	0.00	0.00	5.79	16.64	1.26E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.48E+01	6.75E-02	5.24E+00	1.12E+00	2.38	
2780	34.64	307.79	18	0.19	4179.39	20	0.00	0.00	5.79	16.64	1.26E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.48E+01	6.75E-02	5.24E+00	1.12E+00	2.38	
2800	34.64	307.79	18	0.19	4179.39	20	0.26	10.08	5.79	16.64	1.26E+00	1.48E+01	1.13E-02	1.48E+01	6.75E-02	5.24E+00	1.12E+00	12.46	10.08
2820	34.90	308.05	18	0.19	4179.40	20	0.00	0.00	5.81	16.90	1.28E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.48E+01	6.78E-02	5.25E+00	1.15E+00	2.43	
2840	34.90	308.05	18	0.19	4179.40	20	0.00	0.00	5.81	16.90	1.28E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.48E+01	6.78E-02	5.25E+00	1.15E+00	2.43	
2860	34.90	308.05	18	0.19	4179.40	20	0.00	0.00	5.81	16.90	1.28E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.48E+01	6.78E-02	5.25E+00	1.15E+00	2.43	
2880	34.90	308.05	18	0.19	4179.40	20	0.26	10.08	5.81	16.90	1.28E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.48E+01	6.78E-02	5.25E+00	1.15E+00	12.51	10.08
2900	35.15	308.30	18	0.19	4179.42	20	0.00	0.00	5.83	17.15	1.31E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.47E+01	6.80E-02	5.27E+00	1.17E+00	2.47	
2920	35.15	308.30	18	0.19	4179.42	20	0.00	0.00	5.83	17.15	1.31E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.47E+01	6.80E-02	5.27E+00	1.17E+00	2.47	
2940	35.15	308.30	18	0.19	4179.42	20	0.00	0.00	5.83	17.15	1.31E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.47E+01	6.80E-02	5.27E+00	1.17E+00	2.47	
2960	35.15	308.30	18	0.19	4179.42	20	0.00	0.00	5.83	17.15	1.31E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.47E+01	6.80E-02	5.27E+00	1.17E+00	2.47	
2980	35.15	308.30	18	0.19	4179.42	20	0.26	10.08	5.83	17.15	1.31E+00	1.47E+01	1.12E-02	1.47E+01	6.80E-02	5.27E+00	1.17E+00	12.55	10.08
3000	35.41	308.56	18	0.19	4179.43	20	0.00	0.00	5.85	17.41	1.33E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.47E+01	6.82E-02	5.29E+00	1.19E+00	2.52	
3020	35.41	308.56	18	0.19	4179.43	20	0.00	0.00	5.85	17.41	1.33E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.47E+01	6.82E-02	5.29E+00	1.19E+00	2.52	
3040	35.41	308.56	18	0.19	4179.43	20	0.00	0.00	5.85	17.41	1.33E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.47E+01	6.82E-02	5.29E+00	1.19E+00	2.52	
3060	35.41	308.56	18	0.19	4179.43	20	0.00	0.00	5.85	17.41	1.33E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.47E+01	6.82E-02	5.29E+00	1.19E+00	2.52	
3080	35.41	308.56	18	0.19	4179.43	20	0.26	10.08	5.85	17.41	1.33E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.47E+01	6.82E-02	5.29E+00	1.19E+00	12.60	10.08

3100	35.67	308.82	18	0.19	4179.44	20	0.00	0.00	5.88	17.67	1.36E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.46E+01	6.85E-02	5.31E+00	1.21E+00	2.57	
3120	35.67	308.82	18	0.19	4179.44	20	0.00	0.00	5.88	17.67	1.36E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.46E+01	6.85E-02	5.31E+00	1.21E+00	2.57	
3140	35.67	308.82	18	0.19	4179.44	20	0.00	0.00	5.88	17.67	1.36E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.46E+01	6.85E-02	5.31E+00	1.21E+00	2.57	
3160	35.67	308.82	18	0.19	4179.44	20	0.00	0.00	5.88	17.67	1.36E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.46E+01	6.85E-02	5.31E+00	1.21E+00	2.57	
3180	35.67	308.82	18	0.19	4179.44	20	0.26	10.08	5.88	17.67	1.36E+00	1.46E+01	1.11E-02	1.46E+01	6.85E-02	5.31E+00	1.21E+00	12.64	10.08
3200	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	2.61	
3220	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	2.61	
3240	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	2.61	
3260	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	2.61	
3280	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.00	0.00	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	2.61	
3300	35.92	309.07	18	0.19	4179.45	20	0.26	10.08	5.90	17.92	1.38E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.46E+01	6.87E-02	5.33E+00	1.23E+00	12.69	10.08
3320	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3340	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3360	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3380	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3400	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3420	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3440	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.00	0.00	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	2.66	
3460	36.18	309.33	18	0.19	4179.47	20	0.26	10.08	5.92	18.18	1.41E+00	1.45E+01	1.10E-02	1.45E+01	6.89E-02	5.34E+00	1.25E+00	12.73	10.08
3480	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3500	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3520	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3540	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	

3560	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3580	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3600	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.00	0.00	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	2.70	
3620	36.43	309.58	18	0.19	4179.48	20	0.26	10.07	5.94	18.43	1.43E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.45E+01	6.91E-02	5.36E+00	1.27E+00	12.78	10.07
3640	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3660	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3680	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3700	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3720	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3740	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3760	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.00	0.00	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	2.75	
3780	36.69	309.84	18	0.19	4179.49	20	0.26	10.07	5.96	18.69	1.45E+00	1.44E+01	1.09E-02	1.44E+01	6.94E-02	5.38E+00	1.30E+00	12.83	10.07
3800	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3820	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3840	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3860	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3880	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3900	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3920	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.00	0.00	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	2.80	
3940	36.94	310.09	18	0.19	4179.50	20	0.26	10.07	5.98	18.94	1.48E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.44E+01	6.96E-02	5.40E+00	1.32E+00	12.87	10.07
3960	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
3980	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
4000	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	

4020	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
4040	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
4060	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
4080	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.00	0.00	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	2.84	
4100	37.20	310.35	18	0.19	4179.52	20	0.26	10.07	6.00	19.20	1.50E+00	1.43E+01	1.08E-02	1.43E+01	6.98E-02	5.41E+00	1.34E+00	12.92	10.07
4120	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4140	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4160	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4180	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4200	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4220	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.00	0.00	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	2.89	
4240	37.46	310.61	18	0.19	4179.53	20	0.26	10.07	6.01	19.46	1.53E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.43E+01	7.00E-02	5.43E+00	1.36E+00	12.96	10.07
4260	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4280	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4300	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4320	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4340	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4360	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.00	0.00	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	2.94	
4380	37.71	310.86	18	0.19	4179.54	20	0.26	10.07	6.03	19.71	1.55E+00	1.42E+01	1.07E-02	1.42E+01	7.02E-02	5.45E+00	1.38E+00	13.01	10.07
4400	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	
4420	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	
4440	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	
4460	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	

4480	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	
4500	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.00	0.00	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	2.99	
4520	37.97	311.12	18	0.19	4179.56	20	0.26	10.07	6.05	19.97	1.58E+00	1.42E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.04E-02	5.46E+00	1.41E+00	13.06	10.07
4540	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4560	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4580	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4600	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4620	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4640	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.00	0.00	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	3.03	
4660	38.22	311.37	18	0.19	4179.57	20	0.26	10.07	6.07	20.22	1.60E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.42E+01	7.07E-02	5.48E+00	1.43E+00	13.10	10.07
4680	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4700	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4720	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4740	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4760	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4780	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.00	0.00	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	3.08	
4800	38.48	311.63	18	0.19	4179.58	20	0.26	10.07	6.09	20.48	1.63E+00	1.41E+01	1.06E-02	1.41E+01	7.09E-02	5.49E+00	1.45E+00	13.15	10.07
4820	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	
4840	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	
4860	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	
4880	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	
4900	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	
4920	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.00	0.00	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	3.13	

4940	38.73	311.88	18	0.19	4179.59	20	0.26	10.07	6.11	20.73	1.65E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.41E+01	7.11E-02	5.51E+00	1.47E+00	13.20	10.07
4960	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
4980	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
5000	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
5020	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
5040	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
5060	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.00	0.00	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	3.18	
5080	38.99	312.14	18	0.19	4179.61	20	0.26	10.07	6.13	20.99	1.68E+00	1.40E+01	1.05E-02	1.40E+01	7.13E-02	5.53E+00	1.50E+00	13.24	10.07
5100	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5120	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5140	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5160	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5180	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5200	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.00	0.00	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	3.22	
5220	39.24	312.39	18	0.19	4179.62	20	0.26	10.07	6.14	21.24	1.71E+00	1.40E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.15E-02	5.54E+00	1.52E+00	13.29	10.07
5240	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5260	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5280	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5300	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5320	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5340	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5360	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.00	0.00	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	3.27	
5380	39.50	312.65	18	0.19	4179.63	20	0.26	10.06	6.16	21.50	1.73E+00	1.39E+01	1.04E-02	1.40E+01	7.17E-02	5.56E+00	1.54E+00	13.34	10.06

5860	40.27	313.42	18	0.19	4179.67	20	0.00	0.00	6.21	22.27	1.81E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.23E-02	5.60E+00	1.61E+00	3.42	
5880	40.27	313.42	18	0.19	4179.67	20	0.00	0.00	6.21	22.27	1.81E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.23E-02	5.60E+00	1.61E+00	3.42	
5900	40.27	313.42	18	0.19	4179.67	20	0.00	0.00	6.21	22.27	1.81E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.23E-02	5.60E+00	1.61E+00	3.42	
5920	40.27	313.42	18	0.19	4179.67	20	0.00	0.00	6.21	22.27	1.81E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.23E-02	5.60E+00	1.61E+00	3.42	
5940	40.27	313.42	18	0.19	4179.67	20	0.26	10.06	6.21	22.27	1.81E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.23E-02	5.60E+00	1.61E+00	13.48	10.06
5960	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
5980	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6000	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6020	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6040	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6060	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6080	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6100	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6120	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6140	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6160	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6180	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.00	0.00	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	3.47	
6200	40.52	313.67	18	0.19	4179.68	20	0.26	10.06	6.23	22.52	1.83E+00	1.38E+01	1.02E-02	1.38E+01	7.24E-02	5.62E+00	1.63E+00	13.53	10.06
6220	40.78	313.93	18	0.19	4179.70	20	0.00	0.00	6.25	22.78	1.86E+00	1.37E+01	1.01E-02	1.38E+01	7.26E-02	5.63E+00	1.65E+00	3.51	
6240	40.78	313.93	18	0.19	4179.70	20	0.00	0.00	6.25	22.78	1.86E+00	1.37E+01	1.01E-02	1.38E+01	7.26E-02	5.63E+00	1.65E+00	3.51	
6260	40.78	313.93	18	0.19	4179.70	20	0.00	0.00	6.25	22.78	1.86E+00	1.37E+01	1.01E-02	1.38E+01	7.26E-02	5.63E+00	1.65E+00	3.51	
6280	40.78	313.93	18	0.19	4179.70	-	-	-	6.25	22.78	1.86E+00	1.37E+01	1.01E-02	1.38E+01	7.26E-02	5.63E+00	1.65E+00	0.00	
																		(Wmax-Wmin) _{promedio}	10.09

De esta manera, se determinó que la eficiencia de la niquelina es:

$$\eta = \frac{(W_{max} - W_{min})_{promedio}}{I \cdot \Delta v} \cdot 100$$

$$\eta = \frac{10.09}{25(240 - 24)} \cdot 100$$

$$\eta = 0.18\%$$

ANEXO VI

Cálculo de las desviaciones punto a punto de los resultados obtenidos por el modelo que describe el comportamiento actual del biorreactor LiFlus y los datos experimentales

Tabla A.12. Desviaciones punto a punto del crecimiento microbiano.

Tiempo [min]	x [g _{biomasa} /L]		Desviación [%]
	Experimental	Modelo	
0	5.00	5.00	0.00
30	6.43	5.00	-22.19
60	6.63	5.04	-24.00
90	9.75	5.17	-46.95
120	10.48	5.52	-47.31
150	13.32	6.20	-53.47
180	16.69	7.23	-56.70
210	19.44	8.62	-55.63
240	22.84	10.39	-54.52
270	27.57	12.53	-54.55
300	35.31	15.06	-57.34
330	40.86	18.01	-55.92
360	46.55	21.40	-54.02
390	55.04	25.26	-54.10
420	55.21	29.59	-46.40
450	55.21	34.33	-37.81
Promedio			-45.06

Tabla A.13. Desviaciones punto a punto del perfil de temperatura del medio de cultivo.

Temperatura del medio de cultivo [°C]			
Tiempo [min]	Experimental	Modelo	Desviación [%]
0	20.84	20.84	0.00
15	24.42	23.62	-3.29
30	24.67	24.71	0.14
45	25.19	25.76	2.27
60	25.70	26.76	4.13
75	26.21	27.65	5.48
90	26.97	28.40	5.28
105	28.00	29.04	3.72
120	29.02	29.58	1.91
135	30.04	30.00	-0.13
150	30.04	30.00	-0.14
165	30.04	30.00	-0.14

180	30.04	30.00	-0.14
195	29.79	30.00	0.72
210	30.04	30.00	-0.14
225	30.04	30.00	-0.14
240	30.04	30.00	-0.14
255	29.79	30.00	0.72
270	29.79	30.00	0.72
285	30.04	30.00	-0.14
300	30.04	30.00	-0.14
315	30.04	30.00	-0.14
330	29.79	30.00	0.72
345	30.04	30.00	-0.14
360	30.04	30.00	-0.14
375	30.04	30.00	-0.14
390	30.04	30.00	-0.14
405	30.04	30.00	-0.14
420	30.04	30.00	-0.14
435	29.79	30.00	0.72
450	30.04	30.00	-0.14
Promedio			0.67

Tabla A.14. Desviaciones punto a punto del perfil de temperatura del agua de calentamiento.

Tiempo [min]	Temperatura agua de calentamiento [°C]		Desviación
	Experimental	Modelo	
0	36.4	36.40	0.00
15	25	24.78	-0.91
30	25.5	25.81	1.20
45	25.9	26.81	3.39
60	26	27.77	6.36
75	26.4	28.62	7.77
90	27.7	29.36	5.64
105	28.8	29.98	3.92
120	29.8	30.50	2.29
135	30.8	30.30	-1.66
150	30.8	30.45	-1.15
165	30.8	30.41	-1.28
180	30.8	30.40	-1.32
195	30.6	30.35	-0.81
210	30.7	30.30	-1.33
225	30.9	30.25	-2.16

240	30.8	30.24	-1.85
255	30.7	30.19	-1.69
270	30.5	30.14	-1.20
285	30.5	30.11	-1.28
300	30.7	30.10	-2.00
315	30.6	30.02	-1.94
330	30.7	29.98	-2.40
345	30.6	29.94	-2.21
360	30.5	29.92	-1.94
375	30.6	29.88	-2.40
390	30.7	29.82	-2.96
405	30.8	29.76	-3.51
420	30.6	29.71	-2.98
435	30.8	29.70	-3.69
450	30.8	29.65	-3.89
Promedio			-0.52

ANEXO VII

Script del Modelo matemático del comportamiento actual del biorreactor LiFlus GX

```
clc; clear; close all;
%% Crecimiento microbiano
% Parámetros
xmax=55.21; % [gbiomasa/L] concentración máxima de biomasa
xo=5; % [gbiomasa/L] concentración inicial (inóculo)
lambda=60; % [min] tiempo de la etapa de latencia
So=50; % [gglucosa/L] concentración inicial de sustrato
Yxs=0.5; % [gbiomasa/gglucosa] rendimiento biomasa-sustrato (Ghose et
al., 1979, p. 53)

%% Balance de Energía
%% Medio de cultivo
V=1; % [L] volumen del medio de cultivo

% Dado que la concentración de glucosa del medio no es elevada, las
% propiedades de este se pueden asemejar a las del agua a una temperatura
% media de 30°C.
den=998.06/(1000); % [kg/L] densidad del medio de cultivo

% Parámetros de ecuaciones predictivas de capacidad calorífica para
% soluciones acuosas binarias (Darros-Barbosa et al., 2003, p. 248)
a1=4.15263; % [J/(g.°C)]
b1=-0.03271e-04; % [(J.m^3)/(g^2.°C)]
c1=1.994e-08; % [(J.m^3)/(g^3.°C)]
a2=-0.00107; % [J/(g.°C^2)]
b2=1.999e-08; % [(J.m^3)/(g^2.°C^2)]
c2=-0.014e-12; % [(J.(m^3)^2)/(g^3.°C^2)]
a3=0.174e-04; % [J/(g.°C^3)]
b3=-0.013e-08; % [(J.m^3)/(g^2.°C^3)]
c3=0.0013e-13; % [(J.(m^3)^2)/(g^3.°C^3)]

%% Agua de calentamiento (a.c)
Vac=190e-03; % [L] volumen del agua de calentamiento

% Propiedades a T=30°C;
dh2o=998.06/(1000); % [kg/L] densidad del agua
Cpac=4179.69; % [J/kg.K] capacidad calorífica del agua a Presión
constante

% Parámetros de T.Q. del a.c.
n=0.18/100; % eficiencia de la niquelina
I=25; % [A] intensidad de corriente
Vmax=240; % [V] voltaje máximo
Vmin=24; % [V] voltaje mínimo
Uac=132.77; % [W/m^2.K] coeficiente global de T.Q hacia el medio de
cultivo
Aac=4.33e-02; % [m^2] área de T.Q hacia el meido de cultivo
Uchaq=5.53; % [W/m^2.K] coeficiente global de T.Q por la chaqueta
Achaq=5.59e-02; % [m^2] área de T.Q por la chaqueta
haire=5.33; % [W/m^2.K] coeficiente de convección natural del aire en
contacto directo con a.c.
Aaire=1.86e-03; % [m^2] área de T.Q. con el aire en contacto directo con
el a.c.
```

```

Tamb=18; % [°C] temperatura ambiente

%% Agua de enfriamiento (a.f)
qafo=2.16e-03; % [L/min] caudal de agua de enfriamiento
Vaf=2.88e-01; % [L] volumen de agua de enfriamiento en el tubo en U

% Propiedades del agua a Tm=(Tin+Tout)/2 = 19.975
daf=998.374/1000; % [kg/L] densidad del agua de enfriamiento
Cpaf=4182.87; % [J/kg.K] capacidad calorífica del agua a Presión constante

% Parámetros de T.Q. del a.f.
Uaf=4065.41; % [W/m^2.K] coeficiente global de T.Q hacia el sistema
Aaf=3.06e-03; % [m^2] área de T.Q hacia el agua de enfriamiento
Tin=18; % [°C] temperatura de ingreso del agua de enfriamiento
Tout=21.95; % [°C] temperatura de salida del agua de enfriamiento
(promedio de datos experimentales)

% Reacción
Hrx=6860/3.4; % [J/gbiomasa] entalpía de reacción

% Arrhenius
A=(9.05261E+17)/60; % [1/min]
Ea=1.07E+05; % [J/mol]
R=8.314; % [J/mol.K]

%% Solución EDOS
% Inicialización de variables
%% Biomasa y Sustrato
x(1)=xo; % [gbiomasa/L]
m(1)=xo; % [gbiomasa/L]
S(1)=So; % [gglucosa/L]

%% Temperaturas
T(1)=20.84; % [°C] Temperatura inicial del medio de cultivo
Tac(1)=36.4; % [°C] Temperatura inicial del agua de calentamiento
Taf(1)=(Tin+Tout)/2; % [°C] Temperatura inicial (promedio) del agua de enfriamiento
Tset=30; % [°C] Set point de Temperatura del medio de cultivo

%% Controlador
K=6E-04; % [L/min.°C] constante de proporcionalidad

%% Tiempo
t(1)=0; % [min]
dt=0.001; % [min]

%% Contador
i=1;

while x(i)<xmax
    % Velocidad máxima de crecimiento
    umax(i)=A*exp(-Ea/(R*(T(i)+273.15))); % [1/min]
    % Función de ajuste
    alfa(i)=(umax(i)*t(i)/(exp(umax(i)*lambda)-1))*(m(i)-x(i))/x(i));
    % Función de inhibición
    f(i)=1-(x(i)/xmax);
    % Ecuación del crecimiento
    x(i+1)=x(i)+(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i))*dt; % [gbiomasa/L]

```

```

% Ecuación del consumo de sustrato
S(i+1)=S(i)-(1/Yxs)*(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i))*dt; % [gglucosa/L]
if S(i+1)<0
    S(i+1)=0;
end

%% Balance de energía

%% Medio de cultivo
% Ecuación de la capacidad calorífica a presión constante del medio
%(Darros-Barbosa et al., 2003, p. 244)

Cp(i)=((a1+b1*(S(i)/100000)+c1*(S(i)/100000)^2)+T(i)*(a2+b2*(S(i)/100000)
+c2*(S(i)/100000)^2)+T(i)^2*(a3+b3*(S(i)/100000)+c3*(S(i)/100000)^2))*100
0; % [J/kg.K]
% Generación
Generacion(i)=(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i)*Hrx)/(Cp(i)*den); % [°C/min]
% Calor transferido al medio de cultivo
Qmc(i)=Uac*Aac*(Tac(i)-T(i))*60; % [J/min]
% Calor transferido al agua de enfriamiento
Qmcf(i)=Uaf*Aaf*(T(i)-Taf(i))*60; % [J/min]

%% Perfil de temperatura del medio de cultivo
T(i+1)=T(i)+dt*(Generacion(i)+(Qmc(i)/(Cp(i)*den*V))-
(Qmcf(i)/(Cp(i)*den*V))); % [°C]

%% Control automático
e(i)=T(i)-Tset;
if e(i)>0
    %% Agua de enfriamiento (flujo de agua de enfriamiento)
    qaf(i)=K*e(i)+qafo;
    %% Agua de calentamiento (trabajo de la niquelina)
    Wniq(i)=0;
elseif e(i)<=0
    %% Agua de calentamiento (trabajo de la niquelina)
    Wniq(i)=n*I*(Vmax-Vmin)*60; % [J/min]
    %% Agua de enfriamiento (flujo de agua de enfriamiento)
    qaf(i)=K*e(i)+qafo;
    if qaf(i)<0
        qaf(i)=0;
    end
end

% Pérdidas por la chaqueta
Qamb1(i)=Uchaq*Achaq*(Tac(i)-Tamb)*60; % [J/min]
% Pérdidas directo al ambiente
Qamb2(i)=haire*Aaire*(Tac(i)-Tamb)*60; % [J/min]

%% Perfil de Temperatura del agua de calentamiento
Tac(i+1)=Tac(i)+dt*((Wniq(i)-Qmc(i)-Qamb1(i)-
Qamb2(i))/(dh2o*Vac*Cpac));

%% Agua de enfriamiento
% Flujos máxicos acompañados de energía
Toutf(i)=2*Taf(i)-Tin;
Fm(i)=(qaf(i)/Vaf)*(Tin-Toutf(i)); % [°C/min]

```

```

%% Perfil de Temperatura del agua de enfriamiento
Taf(i+1)=Taf(i)+dt*(Fm(i)+(Qmcf(i)/(daf*Vaf*Cpaf))); % [°C]

%% Concentración de biomasa total
m(i+1)=m(i)+(umax(i)*m(i)*dt); % [gbiomasa/L]

%% Tiempo
t(i+1)=t(i)+dt;

%% Contador
i=i+1;

end

%% Datos experimentales
Xexp=[5 6.429752066 6.628099174 9.752066116 10.47933884 13.32231405
16.69421488 19.43801653 22.84297521 27.57024793 35.30578512 40.85950413
46.54545455 55.04132231 55.20661157 55.20661157];
Texp=[20.83972393 24.41845603 24.67407975 25.1853272 25.69657464
26.20782209 26.97469325 27.99718814 29.01968303 30.04217791 30.04217791
30.04217791 30.04217791 29.78655419 30.04217791 30.04217791 30.04217791
29.78655419 29.78655419 30.04217791 30.04217791 30.04217791 29.78655419
30.04217791 30.04217791 30.04217791 30.04217791 30.04217791 30.04217791
29.78655419 30.04217791];
Texpac=[36.4 25 25.5 25.9 26 26.4 27.7 28.8 29.8 30.8 30.8 30.8 30.8 30.6
30.7 30.9 30.8 30.7 30.5 30.5 30.7 30.6 30.7 30.6 30.5 30.6 30.7 30.8
30.6 30.8 30.8];
Texpaf=[21.1 21.6 22.1 22 22.2 22.1 22.1 22.2 22.1 22.2 22.1 22.2 22 22
21.9 21.9 21.9 22 21.8 21.7 21.8 21.9];
texp=[0:30:450];
t_Texp=[0:15:450];
t_Texpaf=[135:15:450];

%% Gráficas
% Biomasa
figure(1)
plot(t,x)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Biomasa [g/L]')
hold on
plot(texp,Xexp,'*')
hold off
legend('Modelo','Experimental')
grid on
xlim([0 800])

figure(2)
plot(t,T)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Temperatura [°C]')
hold on
plot(t_Texp,Texp,'*')
hold off
legend('Modelo','Experimental')
grid on
axis([0 450 20 31])

```

```

figure(3)
plot(t,Tac)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Temperatura [°C]')
hold on
plot(t_Texp, Texpac, '*')
hold off
legend('Modelo', 'Experimental')
grid on
xlim([0 450])

%% Variables manipuladas
% Trabajo de Niquenila
figure(4)
plot(t(1:end-1), Wniq)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Wniq')
grid on
xlim([0 450])

% Caudal agua de enfriamiento
figure(5)
plot(t(1:end-1), qaf)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Caudal de agua de enfriamiento')
grid on
xlim([0 450])

```

ANEXO VIII

Script del Modelo matemático del rediseño del control de temperatura del biorreactor LiFlus GX

```
clc; clear; close all;
%% Crecimiento microbiano
% Parámetros
xmax=55.21; % [gbiomasa/L] concentración máxima de biomasa
xo=5; % [gbiomasa/L] concentración inicial (inóculo)
lambda=70; % [min] tiempo de la etapa de latencia
So=50; % [gglucosa/L] concentración inicial de sustrato
Yxs=0.5; % [gbiomasa/gglucosa] rendimiento biomasa-sustrato (Ghose et
al., 1979, p. 53)

%% Balance de Energía
%% Medio de cultivo
V=1; % [L] volumen del medio de cultivo

% Dado que la concentración de glucosa del medio no es elevada, las
% propiedades de este se pueden asemejar a las del agua a una temperatura
% media de 30°C.
den=998.06/(1000); % [kg/L] densidad del medio de cultivo

% Parámetros de ecuaciones predictivas de capacidad calorífica para
% soluciones acuosas binarias (Darros-Barbosa et al., 2003, p. 248)
a1=4.15263; % [J/(g.°C)]
b1=-0.03271e-04; % [(J.m^3)/(g^2.°C)]
c1=1.994e-08; % [(J.m^3)/(g^3.°C)]
a2=-0.00107; % [J/(g.°C^2)]
b2=1.999e-08; % [(J.m^3)/(g^2.°C^2)]
c2=-0.014e-12; % [(J.(m^3)^2)/(g^3.°C^2)]
a3=0.174e-04; % [J/(g.°C^3)]
b3=-0.013e-08; % [(J.m^3)/(g^2.°C^3)]
c3=0.0013e-13; % [(J.(m^3)^2)/(g^3.°C^3)]

%% Agua de calentamiento (a.c)
% Parámetros geométricos tubo en U
u=0.5336; % [m/s] velocidad del agua en el tubo en U
Di=0.004; % [m] Diámetro interno tubo en U

qaco=2.16e-03; % [L/min] caudal de agua de calentamiento
Vac=2.88e-01; % [L] volumen de agua de calentamiento en el tubo en U

% Propiedades a T entre 30°C y 90°C;
dh2o=983.71/(1000); % [kg/L] densidad del agua
Cpac=4185.43; % [J/kg.K] capacidad calorífica del agua a Presión
constante
Pr=3.52; % Número de Prandlt del agua
vis=0.001; % [kg/ms] viscosidad del agua

% Parámetros de T.Q. del a.c.
n=0.05/100; % eficiencia de la niquelina
I=25; % [A] intensidad de corriente
Vmax=240; % [V] voltaje máximo
Vmin=24; % [V] voltaje mínimo
Rconv_for=3.68e-03; % [K/W] convección forzada medio de cultivo
Aac=3.06e-03; % [m^2] área de T.Q hacia el meido de cultivo
```

```

Tac_in=18; % [°C] temperatura del agua de calentamiento en el reservorio
Tin_tubo=82.72; % [°C] temperatura del agua de calentamiento al ingreso
al tubo en U
Tout_c=82.72; % [°C] temperatura de salida del agua de calentamiento
(supuesta)

% Determinación Coeficiente Global de T.Q. agua de calentamiento
Re=Di*u*dh2o*1000/vis;
Nu=3.66;
hint=Nu*0.652/Di; % [W/m2K] coeficiente de convección interna del agua
caliente dentro del tubo en U
Rconv_int=1/(hint*Aac); % [K/W]
Rtotal=Rconv_int+Rconv_for; % [K/W] Resistencia total del agua de
calentamiento
Uac=1/(Rtotal*Aac); % [W/m^2.K] coeficiente global de T.Q hacia el medio
de cultivo

%% Agua de enfriamiento (a.f)
qafo=2.16e-03; % [L/min] caudal de agua de enfriamiento
Vaf=2.88e-01; % [L] volumen de agua de enfriamiento en el tubo en U

% Propiedades del agua a Tm=(Tin+Tout)/2 = 19.975
daf=998.374/1000; % [kg/L] densidad del agua de enfriamiento
Cpaf=4182.87; % [J/kg.K] capacidad calorífica del agua a Presión constante

% Parámetros de T.Q. del a.f.
Uaf=4065.41; % [W/m^2.K] coeficiente global de T.Q hacia el sistema
Aaf=3.06e-03; % [m^2] área de T.Q hacia el agua de enfriamiento
Tin=18; % [°C] temperatura de ingreso del agua de enfriamiento
Tout=21.95; % [°C] temperatura de salida del agua de enfriamiento
(promedio de datos experimentales)

% Reacción
Hrx=6860/3.4; % [J/gbiomasa] entalpía de reacción

% Arrhenius
A=(9.05261E+17)/60; % [1/min]
Ea=1.07E+05; % [J/mol]
R=8.314; % [J/mol.K]

%% Solución EDOS
% Inicialización de variables
%% Biomasa y Sustrato
x(1)=xo; % [gbiomasa/L]
m(1)=xo; % [gbiomasa/L]
S(1)=So; % [gglucosa/L]

%% Temperaturas
T(1)=20.84; % [°C] Temperatura inicial del medio de cultivo
Tac(1)=(Tin_tubo+Tout_c)/2; % [°C] Temperatura inicial del agua de
calentamiento
Taf(1)=(Tin+Tout)/2; % [°C] Temperatura inicial (promedio) del agua de
enfriamiento
Tset=30; % [°C] Set point de Temperatura del medio de cultivo

%% Controlador
K=0.25; % [L/min.°C] constante de proporcionalidad
Kc=6E-03;

```

```

%% Tiempo
t(1)=0; % [min]
dt=0.001; % [min]

%% Contador
i=1;

while x(i)<xmax
    % Velocidad máxima de crecimiento
    umax(i)=A*exp(-Ea/(R*(T(i)+273.15))); % [1/min]
    % Función de ajuste
    alfa(i)=(umax(i)*t(i)/(exp(umax(i)*lambda)-1))*(m(i)-x(i))/x(i);
    % Función de inhibición
    f(i)=1-(x(i)/xmax);
    % Ecuación del crecimiento
    x(i+1)=x(i)+(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i))*dt; % [gbiomasa/L]
    % Ecuación del consumo de sustrato
    S(i+1)=S(i)-(1/Yxs)*(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i))*dt; % [gglucosa/L]
    if S(i+1)<0
        S(i+1)=0;
    end

    %% Balance de energía

    %% Medio de cultivo
    % Ecuación de la capacidad calorífica a presión constante del medio
    % (Darros-Barbosa et al., 2003, p. 244)

    Cp(i)=((a1+b1*(S(i)/100000)+c1*(S(i)/100000)^2)+T(i)*(a2+b2*(S(i)/100000)
+c2*(S(i)/100000)^2)+T(i)^2*(a3+b3*(S(i)/100000)+c3*(S(i)/100000)^2))*100
0; % [J/kg.K]
    % Generación
    Generacion(i)=(umax(i)*alfa(i)*f(i)*x(i)*Hrx)/(Cp(i)*den); % [°C/min]
    %% Calor transferido al medio de cultivo
    %% Determinación Uac(i)
    % Resistencia por convección interna dentro del tubo Rconv_int
    Qmc(i)=Uac*Aac*(Tac(i)-T(i))*60; % [J/min]
    % Calor transferido al agua de enfriamiento
    Qmcf(i)=Uaf*Aaf*(T(i)-Taf(i))*60; % [J/min]
    % Calor perdido con el medio
    A vessel=4.33E-02; % [m^2]
    Tamb=18;
    % Propiedades del aire a Tf=(Tsp+Tamb)/2=24°C
    densidad=1.19; % [kg/m^3]
    viscosidad=1.83E-05; % [kg/m.s]
    Prandlt=0.69;
    conduc=0.027; % [W/mK]
    % Determinación Up
    gravedad=9.81; % [m/s^2]
    Tf(i)=(T(i)+Tamb)/2; % [K]
    beta(i)=1/Tf(i);
    Gr(i)=(T(i)-Tamb)*(densidad^2)*(8.40E-
02)^3*beta(i)*gravedad/viscosidad;
    Nup(i)=0.59*(Pr*Gr(i))^(1/4);
    hp(i)=Nup(i)*conduc/(8.40E-02);
    Rp(i)=1/(A vessel*hp(i));
    hforzado=6290.57; % [W/m^2.K]
    Rforzado=1/(A vessel*hforzado);

```



```

Rvessel=0.004;
Rptotal(i)=Rforzado+Rvessel+Rp(i);
Up(i)=1/(Avessel*Rp(i));
Qp(i)=Up(i)*Avessel*(T(i)-Tamb)*60;

%% Perfil de temperatura del medio de cultivo
T(i+1)=T(i)+dt*(Generacion(i)+(Qmc(i)/(Cp(i)*den*V))-
((Qmcf(i)+Qp(i))/(Cp(i)*den*V))); % [°C]

%% Control automático
e(i)=T(i)-Tset;
if e(i)>0
    %% Agua de enfriamiento (flujo de agua de enfriamiento)
    qaf(i)=K*e(i)+qafo;
    %% Agua de calentamiento
    Wniq(i)=0;
    qac(i)=-Kc*e(i)+qaco;
    if qac(i)<0
        qac(i)=0;
    end
elseif e(i)<=0
    %% Agua de calentamiento
    qac(i)=-Kc*e(i)+qaco;
    Wniq(i)=n*I*(Vmax-Vmin)*60; % [J/min]
    %% Agua de enfriamiento (flujo de agua de enfriamiento)
    qaf(i)=K*e(i)+qafo;
    if qaf(i)<0
        qaf(i)=0;
    end
end

%% Agua de calentamiento
% Flujos másicos acompañados de energía
Toutc(i)=2*Tac(i)-Tin_tubo;
Fmc(i)=(qac(i)/Vac)*(Tac_in-Toutc(i)); % [°C/min]

%% Perfil de Temperatura del agua de calentamiento
Tac(i+1)=Tac(i)+dt*(Fmc(i)+((Wniq(i)-Qmc(i))/(dh2o*Vac*Cpac)));

%% Agua de enfriamiento
% Flujos másicos acompañados de energía
Toutf(i)=2*Taf(i)-Tin;
Fm(i)=(qaf(i)/Vaf)*(Tin-Toutf(i)); % [°C/min]

%% Perfil de Temperatura del agua de enfriamiento
Taf(i+1)=Taf(i)+dt*(Fm(i)+(Qmcf(i)/(daf*Vaf*Cpaf))); % [°C]

%% Concentración de biomasa total
m(i+1)=m(i)+(umax(i)*m(i)*dt); % [gbiomasa/L]

%% Tiempo
t(i+1)=t(i)+dt;

%% Contador
i=i+1;
end

```

```

%% Consumo de agua de enfriamiento
qaf_t=findpeaks(qaf);
consumoaf=sum(qaf_t)*t(end)

%% Consumo de agua de calentamiento
qac_t=findpeaks(qac);
consumoac=sum(qac_t)*t(end)

%% Gráficas
% Biomasa
figure(1)
plot(t,x)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Biomasa [g/L]')
grid on

% Temperatura
figure(3)
plot(t,T)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Temperatura [°C]')
axis([0 450 20 30.2])
grid on

%% Variables manipuladas
% Trabajo de Niquenila
figure(4)
plot(t(1:end-1),Wniq)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Wniq [J/min]')
grid on

% Caudal agua de enfriamiento
figure(5)
plot(t(1:end-1),qaf)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Caudal de agua de enfriamiento [L/min]')
grid on

% Caudal agua de calentamiento
figure(6)
plot(t(1:end-1),qac)
xlabel('Tiempo [min]')
ylabel('Caudal de agua de calentamiento [L/min]')
grid on

```