



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**SIMULACIÓN DE LA HIDROLISIS DE LA SACAROSA POR  
INVERTASA INMOVILIZADA PARA LA PRODUCCIÓN DE  
AZUCAR INVERTIDO EN UN TANQUE AGITADO**

**Trabajo de Integración Curricular**

Tipo: Proyecto Técnico

Presentado para optar al grado académico de:

**INGENIERO QUÍMICO**

**AUTOR:** DENNIS JOSUÉ CÓRDOVA VELASCO

**DIRECTOR:** Ing. DANIEL ANTONIO CHUQUIN VASCO, MSc.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Dennis Josué Córdova Velasco

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, DENNIS JOSUÉ CÓRDOVA VELASCO, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 25 de abril de 2023



---

**Dennis Josué Córdova Velasco**  
**185011523-7**

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS**  
**CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: El Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto Técnico, **SIMULACIÓN DE LA HIDROLISIS DE LA SACAROSA POR INVERTASA INMOVILIZADA PARA LA PRODUCCIÓN DE AZUCAR INVERTIDO EN UN TANQUE AGITADO**, realizado por el señor: **DENNIS JOSUÉ CÓRDOVA VELASCO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

	<b>FIRMA</b>	<b>FECHA</b>
Ing. Marco Raúl Chuiza Rojas, Mgs <b>PRESIDENTE DEL TRIBUNAL</b>		2023-04-25
Ing. Daniel Antonio Chuquin Vasco, Mgs <b>DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-04-25
Ing. Juan Pablo Chuquin Vasco, Mgs. <b>ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR</b>		2023-04-25

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar la realización de mi tesis en primer lugar a mi madre, Paulina, quien con su ejemplo de lucha y perseverancia me inspiró a ser un hombre valiente y de valores, a no rendirme jamás y dar lo mejor de mí en todo momento. También a mi padre, quien me enseñó a caminar por la vida con sabiduría, disciplina y carácter. Dedico también esta tesis a mis hermanos, amigos y maestros, quienes han sido guía, apoyo y amistad en esta travesía tan hermosa como es la vida universitaria.

Dennis

## AGRADECIMIENTO

En honor a la gratitud, quiero dar mi agradecimiento a mis padres, por darme su apoyo incondicional en todo momento, por ser mis maestros de la vida, por cobijarme en su seno con amor y virtud, por conducirme con mano firme y a la vez afectuosa por la senda del trabajo honrado y honesto. Gracias mamá, gracias papá, su esfuerzo valió la pena, y hoy que ya soy un profesional, este logro es gracias a ustedes.

Agradezco también a mis maestros, que con su conocimiento y sabiduría hicieron de mi un estudiante lucido, ávido y curioso por aprender más acerca las ciencias y el saber, su labor valerosa fue muy importante en mi formación académica y profesional, les quedo muy agradecido. Y con una mención especial no puedo si no dar mi agradeciendo al Ingeniero Daniel Chuquin, quien fue el que me ayudó a la realización de mi tesis.

Agradezco a mis amigos por brindarme su apoyo, amistad, compañía y estar presente cuando lo necesité.

Dennis

## ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	xi
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN.....	1

### CAPÍTULO I

1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA.....	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Justificación.....	4
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. <i>Objetivo general</i> .....	4
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i> .....	4

### CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Antecedentes de investigación.....	5
2.1.1. <i>Inversión de la sacarosa para producción de azúcar invertido</i> .....	5
2.1.2. <i>Simulaciones de hidrólisis enzimáticas</i> .....	7
2.2. Referencias teóricas.....	9
2.2.1. <i>Producción de azúcar en el país</i> .....	9
2.2.2. <i>Edulcorantes</i> .....	9
2.2.3. <i>Azúcar invertido</i> .....	10
2.2.4. <i>Descripción de los compuestos</i> .....	11
2.2.4.1. <i>Sacarosa</i> .....	11
2.2.4.2. <i>Glucosa</i> .....	12
2.2.4.3. <i>Fructosa</i> .....	12
2.2.5. <i>Hidrolisis enzimática</i> .....	13
2.2.5.1. <i>Hidrolisis</i> .....	13

2.2.5.2.	<i>Hidrolisis enzimática</i>	13
2.2.5.3.	<i>Hidrolisis de la sacarosa</i>	13
2.2.5.4.	<i>Cinética de la hidrolisis de la sacarosa</i>	14
2.2.6.	<b>Catalizadores</b>	15
2.2.6.1.	<i>Biocatalizadores</i>	16
2.2.6.2.	<i>Invertasa (fructohidrolasa)</i>	16
2.2.7.	<b>Inmovilización enzimática</b>	17
2.2.8.	<b>Reactor</b>	18
2.2.8.1.	<i>Biorreactor</i>	18
2.2.9.	<b>Simulación de procesos</b>	19
2.2.10.	<b>DWSIM</b>	19
2.2.10.1.	<i>Características</i>	20
2.2.10.2.	<i>Interfaz de la plataforma DWSIM</i>	23
2.2.11.	<b>Marco legal</b>	24
2.2.11.1.	<i>Software libre en el Ecuador</i>	24

### CAPÍTULO III

3.	<b>MARCO METODOLÓGICO</b>	26
3.1	<b>Etapas de la metodología</b>	26
3.2	<b>Enfoque metodológico</b>	27
3.3	<b>Establecimiento de parámetros de funcionamiento</b>	27
3.3.1	<i>Generalidades del proceso</i>	27
3.3.2	<i>Parámetros generales de la simulación (Condiciones iniciales de operación)</i>	28
3.3.3	<i>Parámetro de funcionamiento del reactor CSTR</i>	29
3.3.3.1	<i>Diseño del reactor</i>	29
3.3.4	<i>Parámetros cinéticos de la reacción de hidrolisis</i>	31
3.3.4.1	<i>Ecuación cinética de la reacción</i>	31
3.3.5	<i>Definición del paquete termodinámico</i>	33
3.4	<b>Simulación en DWSIM</b>	34
3.4.1	<i>Diseño del flowsheet</i>	37
3.4.2	<i>Descripción del flowsheet</i>	37
3.4.3	<i>Configuración de los flujos de entrada</i>	37
3.4.4	<i>Configuración del reactor CSTR</i>	39
3.4.5	<i>Configuración del calentador</i>	41
3.5	<b>Análisis de sensibilidad</b>	42



3.5.1	<i>Procedimiento para el análisis de sensibilidad</i> .....	42
3.6	<b>Tratamiento de datos</b> .....	43

## CAPÍTULO IV

4.	<b>MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS</b> .....	44
4.1	<b>Resultados de la simulación en DWSIM</b> .....	44
4.2	<b>Validación de resultados de la simulación</b> .....	46
4.3	<b>Balance de masa del sistema</b> .....	47
4.3.1	<i>Balance de masa en el mezclador</i> .....	47
4.3.2	<i>Balance de masa en el tanque</i> .....	49
4.3.3	<i>Balance de masa del calentador</i> .....	50
4.3.4	<i>Balance de masa del reactor</i> .....	52
4.4.	<b>Resultados del análisis de sensibilidad</b> .....	53
4.4.1	<i>Variación de la cantidad de biocatalizador</i> .....	53
4.4.1.1	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-1</i> .....	53
4.4.1.2	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-2</i> .....	54
4.4.1.3	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-3</i> .....	55
4.4.1.4	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-4</i> .....	55
4.4.1.5	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-5</i> .....	56
4.4.1.6	<i>Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-6</i> .....	57
4.4.1.7	<i>Comparativa de resultados del análisis variación de cantidad de biocatalizador</i> .....	58
4.4.2	<i>Efecto de la temperatura</i> .....	58
4.4.2.1	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-1</i> .....	58
4.4.2.2	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-2</i> .....	59
4.4.2.3	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-3</i> .....	60
4.4.2.4	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-4</i> .....	60
4.4.2.5	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-5</i> .....	61
4.4.2.6	<i>Resultado del análisis de variación de la temperatura A-6</i> .....	62
4.4.2.7	<i>Comparativa de resultados del análisis de variación de la temperatura</i> .....	63
4.4.3	<i>Efecto de la concentración</i> .....	64
4.4.3.1	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A-1</i> .....	64
4.4.3.2	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A-2</i> .....	64
4.4.3.3	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A-3</i> .....	65
4.4.3.4	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A-4</i> .....	66

4.4.3.5	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A_5</i> .....	66
4.4.3.6	<i>Resultado del análisis de variación de la concentración A_6</i> .....	67
4.4.3.7	<i>Comparativa de resultados del análisis de variación de la concentración</i> .....	68
4.4.4	<i>Efecto de la presión</i> .....	68
4.5	<b>. Resultados del análisis estadístico en Statgraphics Centurión 19</b> .....	69
<b>CONCLUSIONES</b> .....		74
<b>RECOMENDACIONES</b> .....		76
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>		
<b>ANEXOS</b>		

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1-2:</b> Clasificación de los edulcorantes .....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Propiedades químicas del azúcar invertido .....	11
<b>Tabla 3-2:</b> Propiedades químicas de la sacarosa.....	11
<b>Tabla 4-2:</b> Propiedades químicas de la glucosa .....	12
<b>Tabla 5-2:</b> Propiedades químicas de la fructosa .....	12
<b>Tabla 6-2:</b> Condiciones cinéticas de la reacción de la hidrólisis de la sacarosa.....	15
<b>Tabla 7-2:</b> Ventajas y Desventajas de las enzimas inmovilizadas en procesos industriales.....	18
<b>Tabla 8-2:</b> Características de la plataforma DWSIM.....	20
<b>Tabla 1-3:</b> Descripción de los compuestos del proceso de producción de azúcar invertido.....	28
<b>Tabla 2-3:</b> Condiciones Iniciales de operación para la simulación .....	28
<b>Tabla 3-3:</b> Datos iniciales de diseño de reactor .....	30
<b>Tabla 4-3:</b> Parámetros cinéticos de reacción de la hidrólisis de la sacarosa .....	33
<b>Tabla 5-3:</b> Definición de variables del análisis de sensibilidad .....	43
<b>Tabla 6-3:</b> Parámetros del análisis de sensibilidad .....	43
<b>Tabla 1-4:</b> Resultados de las corrientes de la simulación .....	45
<b>Tabla 2-4:</b> Resultado de la simulación en el biorreactor CSTR.....	46
<b>Tabla 3-4:</b> Validación de la simulación en DWSIM.....	46
<b>Tabla 4-4:</b> Pruebas de Múltiple Rangos .....	69
<b>Tabla 5-4:</b> Características Estadísticas entre las muestras .....	70
<b>Tabla 6-4:</b> Verificación de Varianza .....	71

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

<b>Ilustración 1-2:</b> Reacción de la hidrólisis de la sacarosa por invertasa .....	14
<b>Ilustración 2-2:</b> Mecanismo de funcionamiento de los catalizadores .....	15
<b>Ilustración 3-2:</b> Representación 3D de la invertasa.....	17
<b>Ilustración 4-2:</b> Logo DWSIM .....	20
<b>Ilustración 5-2:</b> Interfaz plataforma DWSIM.....	23
<b>Ilustración 1-3:</b> Metodología de la simulación. ....	26
<b>Ilustración 2-3:</b> Esquema del biorreactor CSTR .....	29
<b>Ilustración 3-3:</b> Proceso de elección de paquete termodinámico .....	33
<b>Ilustración 4-3:</b> Panel de elección de los componentes en DWSIM.....	34
<b>Ilustración 5-3:</b> Panel de elección de paquete termodinámico en DWSIM .....	35
<b>Ilustración 6-3:</b> Panel de definición de sistema de unidades.....	35
<b>Ilustración 7-3:</b> Panel de configuración de cinética de reacción de la hidrólisis de la sacarosa	36
<b>Ilustración 8-3:</b> Diagrama de producción de Azúcar Invertido .....	37
<b>Ilustración 9-3:</b> Panel de configuración de entrada de la sacarosa .....	38
<b>Ilustración 10-3:</b> Panel de configuración de entrada de agua.....	39
<b>Ilustración 11-3:</b> Panel de configuración del biorreactor CSTR .....	40
<b>Ilustración 12-3:</b> Panel de configuración del calentador .....	41
<b>Ilustración 13-3:</b> Desarrollo del análisis de sensibilidad.....	42
<b>Ilustración 1-4:</b> Simulación finalizada del proceso de obtención de azúcar invertido.....	44
<b>Ilustración 2-4:</b> Resultados obtenidos de la simulación .....	45
<b>Ilustración 3-4:</b> Diagrama de balance de masa en el mezclador.....	47
<b>Ilustración 4-4:</b> Diagrama de balance de masa en el tanque .....	49
<b>Ilustración 5-4:</b> Diagrama de balance de masa en el calentador.....	50
<b>Ilustración 6-4:</b> Diagrama de balance de masa del biorreactor CSTR.....	52
<b>Ilustración 7-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_1 (0.05 Kg).....	54
<b>Ilustración 8-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_2 (0.14 Kg).....	54
<b>Ilustración 9-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_3 (0.23 Kg).....	55
<b>Ilustración 10-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_4 (0.32 Kg).....	56
<b>Ilustración 11-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_5 (0.41 Kg).....	56
<b>Ilustración 12-4:</b> Resultados del análisis de tiempo de reacción A_6 (0.5 Kg).....	57
<b>Ilustración 13-4:</b> Comparativa entre resultados del efecto de la cantidad de carga de biocatalizador .....	58
<b>Ilustración 14-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_1 (0.05 Kg).....	59

<b>Ilustración 15-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_2 (0.14 Kg) .....	59
<b>Ilustración 16-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_3 (0.23 Kg) .....	60
<b>Ilustración 17-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_4 (0.32 Kg) .....	61
<b>Ilustración 18-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_5 (0.41 Kg) .....	61
<b>Ilustración 19-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la temperatura A_6 (0.5 Kg) .....	62
<b>Ilustración 20-4:</b> Comparativa entre resultados del efecto de la temperatura .....	63
<b>Ilustración 21-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_1 (0.05 Kg) .....	64
<b>Ilustración 22-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_2 (0.14 Kg) .....	65
<b>Ilustración 23-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_3 (0.23 Kg) .....	65
<b>Ilustración 24-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_4 (0.32 Kg) .....	66
<b>Ilustración 25-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_5 (0.41 Kg) .....	67
<b>Ilustración 26-4:</b> Resultados del análisis del efecto de la concentración A_6 (0.5 Kg) .....	67
<b>Ilustración 27-4:</b> Comparativa entre resultados del efecto de la concentración .....	68
<b>Ilustración 28-4:</b> Comparativa entre resultados del efecto de la presión .....	69
<b>Ilustración 29-4:</b> Gráfica comparativa de Cajas y Bigotes .....	72
<b>Ilustración 30-4:</b> Gráfica de Residuos .....	73

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

**ANEXO A:** RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE LA CANTIDAD DE BIOCATALIZADOR

**ANEXO B:** RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE CONCENTRACIÓN DEL SUSTRATO

**ANEXO C:** RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA

## RESUMEN

El objetivo del presente Trabajo de Integración Curricular es realizar un estudio acerca de las condiciones óptimas en la producción de azúcar invertido a través la reacción de hidrólisis enzimática empleando invertasa como biocatalizador en un reactor de tanque agitado que tiene como característica que el biocatalizador se encuentra inmovilizado en el software de simulación DWSIM. Para ello, se empleó un análisis de sensibilidad de las variables críticas que influyen en el proceso. Para la identificación de dichos parámetros a través de una simulación se diseñó el biorreactor CSTR o tanque agitado con un volumen de control de 500 L, a su vez se dedujo la ecuación cinética de la reacción siendo esta de tipo Arrhenius; y por medio de bibliografía se obtuvo las constantes cinéticas para posteriormente ingresar en la configuración del simulador. Para el análisis de sensibilidad las variables que se estudiaron son: carga de biocatalizador, concentración inicial del sustrato, temperatura y presión que influyen en el proceso, siendo la conversión de la sacarosa la variable dependiente que ofrecía información acerca de la eficiencia del proceso. Donde se demostró que las condiciones óptimas de carga del biocatalizador son: 0.32 Kg, la fracción molar de sacarosa que ingresa al reactor debe ser de 0.5 a 0.6, la temperatura optima del proceso es de 70 °C y la presión no influye en el proceso. Se concluye que la principal variable crítica que afecta en el proceso es la carga del biocatalizador ya que influye directamente en el tiempo de reacción, la estabilidad térmica y no conversión de los reactivos debido al efecto de reactivo limitante. Se recomienda que para la producción de azúcar invertido se realice un previo análisis de costos anual para deducir el volumen de control del biorreactor.

**Palabras clave:** < HIDRÓLISIS DE LA SACAROSA >, < AZÚCAR INVERTIDO >, < INVERTASA INMOVILIZADA >, < BIOCATALIZADOR >, < REACTOR TANQUE AGITADO >, < ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD >, < DWSIM (SOFTWARE) >, < EDULCORANTES >.

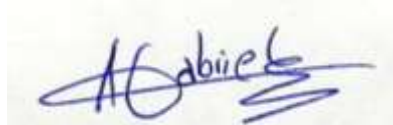
0801-DBRA-UPT-2023



## ABSTRACT

The objective of this Curricular Integration Project consists of carrying out a study about the optimal conditions for the production of invert sugar through the enzymatic hydrolysis reaction using invertase as biocatalyst in a stirred tank reactor whose characteristic is that the biocatalyst is immobilized in the simulation software DWSIM. For this purpose, a sensitivity analysis of the critical variables that influence the process was used. For the identification of these parameters through a simulation, the CSTR bioreactor or stirred tank was designed with a control volume of 500 L, and the kinetic equation of the reaction was derived, being this one of Arrhenius type; and by means of bibliography the kinetic constants were obtained to later enter into the simulator configuration. For the sensitivity analysis, the variables studied were: biocatalyst load, initial substrate concentration, temperature and pressure that influence the process, being the sucrose conversion the dependent variable that offered information about the efficiency of the process. It was demonstrated that the optimum loading conditions of the biocatalyst are: 0.32 kg; the molar fraction of sucrose entering the reactor should be 0.5 to 0.6, the optimum temperature of the process is 70 °C and the pressure does not influence the process. It is concluded that the main critical variable that affects the process is the biocatalyst loading since it directly influences the reaction time, thermal stability and non-conversion of the reagents due to the limiting reagent effect. It is recommended that for the production of invert sugar a previous annual cost analysis should be performed to deduce the bioreactor control volume.

**Key words:** < SACCHAROSE HYDROLYSIS >, < INVERTED SUGAR >, < IMMOBILIZED INVERTASE >, < BIOCATALYZER >, < STIRRING TANK REACTOR >, < SENSITIVITY ANALYSIS >, < DWSIM (SOFTWARE) >, < EDULCORANTS >.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.  
Ced: 1103696132



## INTRODUCCIÓN

En el presente Trabajo de Integración Curricular se desarrolla una simulación, en la cual se obtiene los parámetros óptimos de operación para la producción de azúcar invertido por la reacción de hidrólisis enzimática en un biorreactor de tanque agitado que tiene la característica que el biocatalizador se encuentra de manera inmovilizada en el reactor. El azúcar invertido es un compuesto formado por fructosa y glucosa, tiene como característica que es de un 30 a 40% más endulzante que el azúcar, por lo que suele ser empleado en la industria alimenticia, agrícola y farmacéutica como edulcorante de tipo natural, debido a su naturaleza y su obtención por medios ácidos, las industrias no suelen emplearlos por cuestiones económicas; pero debido al desarrollo de biocatalizadores y técnicas como la inmovilización, se desecha su obtención por medios ácidos ya que éstas pueden desarrollar compuestos nocivos para la salud, es por esta razón que actualmente la obtención de azúcar invertido por biocatalizadores es una línea de investigación en desarrollo, que da paso a la química verde, y a la reducción de gastos en la industria.

A través de la simulación en el software multiplataforma DWSIM, se busca identificar las variables críticas que afectan directamente sobre el proceso, debido a que la naturaleza de las enzimas empleadas como biocatalizadores son afectadas por variables como: concentración de sustrato inicial, temperatura, pH y la cantidad de carga del biocatalizador. Se empleó un esquema de análisis de sensibilidad obteniendo dichos parámetros buscados para que la obtención del producto sea rentable a nivel industrial.

Por otro lado, la simulación de procesos industriales es una línea de investigación que nos permite obtener resultados en gran medida aproximadas a la experimentación de campo real, esto supone que se está convirtiendo en una herramienta útil en futuras generaciones ya que nos permite el ahorro de recursos e interpretación precisa de procesos en tiempos muy cortos de investigación, también se puede emplear como herramienta didáctica para el desarrollo de conocimientos en universidades.

DWSIM, frente a otros simuladores de tipo comercial, cuenta con la ventaja de que es de código libre o gratuito, lo que permite que la comunidad de investigadores modifique el código de programación del software para un desarrollo avanzado, y así obtener resultados más fiables.

## CAPÍTULO I

### 1. DIAGNÓSTICO DEL PROBLEMA

#### 1.1 Antecedentes

El dulce siempre ha sido un sabor básico muy importante para la humanidad, aunque la dulzura siempre está relacionada con el aumento de peso o la caries dentales. Los edulcorantes entraron en la industria alimentaria a partir del año 1800 y ahora son básicos en los alimentos. A pesar de su larga relación con la alimentación, los edulcorantes han estado en el centro de atención por muchas razones. Desde que son la opción perfecta para los diabéticos, hasta los peligros relacionados con la toxicidad, el cáncer y otros problemas de salud asociados con su consumo, los edulcorantes han recorrido un largo camino (Carocho et al., 2017, p. 302-317).

Los edulcorantes son ampliamente usados en la industria alimentaria, por lo que representan un sustituto del azúcar y su uso se ha extendido en los últimos años debido a la creciente preocupación por el progresivo incremento de los índices de obesidad en las personas que habitan en las regiones más industrializadas del mundo. Los edulcorantes como un sustituto de la sacarosa (azúcar), se ve tentativo para los consumidores actuales, que se fijan más en las calorías que ingieren en pro de mantener un balance adecuado en la ingesta energética. Esto, juntamente con que no se ha podido encontrar en ciertos casos concretos sustitutos de la sacarosa, existe prácticamente un sustituto de menor contenido calórico para todos los alimentos procesados.

No obstante, actualmente existe una tendencia hacia los edulcorantes naturales, que por sus métodos de obtenciones menos contaminantes que sus homólogos artificiales, representan una alternativa de consumo y endulzamiento en alimentos procesados; en el caso de los alimentos como helados, galletas, bollería y productos farmacéuticos optan por el azúcar invertido por sus propiedades específicas y beneficios que aportan al producto terminado, gracias a esto se ha ido popularizando más en las industrias.

La obtención del azúcar invertido tiene su origen en los años 60 que a partir del lanzamiento de bebidas energéticas con bajo contenido calórico, generó un impacto mundial en la industria alimenticia, que ha ido incrementando por la demanda de los mercados actuales.

Por otro lado, el desarrollo tecnológico actual nos abre puertas hacia el desarrollo de tecnologías, como es el caso de la simulación, que por medio de cálculos computacionales a través de software permiten describir modelos y comportamientos, que aplicados al desarrollo de procesos industriales se muestran como una herramienta de estudio a los procesos químicos, físicos, biológicos, técnicos y de operaciones unitarias. La simulación de procesos químicos como una herramienta para la ingeniería química ofrece una solución de las ecuaciones de balance de

materia y energía para procesos químicos en estado estacionario o dinámico, así como del dimensionamiento y la obtención de costos de los equipos involucrados en un proceso que en muchas de las ocasiones la aplicación industrial es demasiado costosa, es por esta razón, que la simulación es una alternativa de estudio de bajo coste y alta eficiencia de cálculo.

## **1.2 Planteamiento del problema**

En la actualidad la industria alimenticia crece de manera acelerada, debido a la demanda de los mercados y la competitividad que existe por ofrecer mejores productos al público, por lo que el desarrollo de tecnologías y productos es vital no solo para los consumidores, sino también para el desarrollo de una industria amigable con el medio ambiente de manera sustentable, reduciendo el impacto ambiental que genera.

El uso de edulcorantes naturales son a menudo empleados en la industria alimenticia como sustitutos del azúcar con el beneficio de un bajo índice de contenido calórico; en este trabajo de titulación se tratará en específico la producción de azúcar invertido que es la mezcla equimolar de fructosa y glucosa, cuyas propiedades son más solubles y con un mayor poder endulzante que la sacarosa, hasta un 30%, y con la propiedad que el azúcar invertido no presenta problemas de cristalización; esto hace al azúcar invertido más fácil de incorporar en preparados alimenticios, aumentando el tiempo de vida útil de los mismos (De Oliveira et al., 2020, pp. 1-9).

El azúcar invertido tiene importantes aplicaciones en las industrias de bebidas y alimentos para la elaboración de mermeladas, cremas no cristalizantes, miel artificial, azúcar líquido, etc (Kumar et al., 2008, pp. 792-794).

El proceso de producción del azúcar invertido se da por medio de la hidrólisis ácida, pero este proceso plantea varios problemas, como la coloración marrón del producto terminado, la alteración de la textura y el sabor, y la formación de hidroximetil furfural (HMF), que es cancerígeno; por otro lado, el proceso enzimático para la obtención del azúcar invertido se prefiere a la hidrólisis ácida debido a su mayor especificidad, productos claros, mayores rendimientos y mayor grado de pureza (Lincoln & More, 2017, p. 804).

El presente proyecto de titulación plantea la simulación y validación del proceso de producción del azúcar invertido en un reactor de tanque agitado mediante la multiplataforma para procesos químicos DWSIM, cuyos resultados serán comparados con otros sistemas de producción de azúcar invertido, los datos comparados a evaluar son provenientes de artículos de alto impacto, por lo que se analizará la eficiencia del proceso.

### **1.3 Justificación**

El proceso de producción de azúcar invertido por el método de hidrólisis ácida se considera drástica debido a las condiciones de altas temperaturas y pH, donde el producto se colorea. A su vez produce subproductos no necesarios en el proceso, lo que implica más procesos en su purificación y posterior aplicación en los productos alimenticios.

El método presentado para simular es el método enzimático, cuyo proceso es preferible ya que el producto obtenido es incoloro, en donde la transformación basada en enzimas es rentable y amigable con el medio ambiente (Kumar et al., 2008, pp. 792-794).

Por ese motivo, se ha optado por simular y validar un sistema de producción de azúcar invertido por invertasa inmovilizada mediante el software multiplataforma DWSIM que permita corroborar su eficiencia frente al sistema convencional y comparar los resultados con los valores calculados en artículos de relevancia. Por otro lado, actualmente la simulación de procesos permite recrear los procesos químicos para evaluar y analizar su comportamiento, de esta manera la simulación de procesos industriales se muestra como una vía alternativa para el estudio de los mismos, cuyos costes y estudios suelen resultar muy elevados en contraparte a la simulación, esto permite predecir resultados con rapidez en la toma de decisiones.

DWSIM como programa multiplataforma se emplea para la simulación de procesos químicos, es de código abierto y la información ingresada es de acceso público para cualesquiera otros estudios y puede ser utilizado como guía para el desarrollo de futuros proyectos.

### **1.4 Objetivos**

#### ***1.4.1 Objetivo general***

- Simular y validar el proceso de producción del azúcar invertido por el método enzimático (invertasa inmovilizada) mediante el software de simulación multiplataforma DWSIM.

#### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Diseñar las características del reactor que se ajustan a las condiciones de desarrollo de la hidrólisis de la sacarosa con invertasa inmovilizada para la producción de azúcar invertido.
- Realizar un análisis de sensibilidad para la determinar las condiciones óptimas del proceso.
- Determinar los parámetros óptimos de operación del reactor.
- Validar la simulación de proceso de la hidrólisis de sacarosa con invertasa inmovilizada con referencias bibliográficas de alto impacto.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1 Antecedentes de investigación

##### 2.1.1 *Inversión de la sacarosa para producción de azúcar invertido*

La aplicación de enzimas en la industria alimenticia como biocatalizadores tiene un alto impacto por sus características favorables y bajos efectos nocivos ambientales, es por esta razón que las investigaciones de uso industrial y métodos de empleo han mejorado y optimizado los bioprocesos industriales, de esta forma innovando el diseño de biorreactores para que sean aptos para las industrias.

En el estudio de la cinética de la reacción realizada por De Oliveira et al., (2020, pp. 1-9), determinaron las condiciones óptimas de reacción que se encontraban en 60°C – 70°C y un pH de 5, donde se obtuvieron los siguientes parámetros termodinámicos: energía de activación (= 301,57 kJ mol), entalpía ( $298,76 \leq \Delta H^* \leq 298,89$  kJ mol), entropía ( $579,88 \leq \Delta S^* \leq 589,27$  J K mol) y energía libre de Gibbs ( $100,29 \leq \Delta G^* \leq 108,47$  kJ mol); donde el uso de biocatalizador inmovilizado en la producción continua de azúcar invertido en PBR mostró un rendimiento máximo (96,0%) en poco tiempo (15 min). Indicando que los resultados obtenidos en el presente estudio proporcionan una buena indicación de que la aplicación de un proceso continuo de producción de azúcar invertido utilizando una fase inmovilizada, a partir de una fuente diferente de enzimas comerciales, es una aplicación prometedora en la industria alimentaria. Por lo que las condiciones para la simulación del proyecto serán las indicadas para la operatividad del proceso. Los estudios con biocatalizadores inmovilizados muestran que aumentan la eficiencia y rendimientos de los procesos de hidrolisis, es caso presentado en el estudio realizado por Chirinoso et al., (2017, pp. 200–212), en el cual compararon las condiciones del proceso de hidrólisis del extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) para la producción de fructosa con el método de hidrolisis ácida y enzimática, concluyeron que a temperaturas de 50°C y un pH de 5 con un tiempo de 127,5 min se obtuvo un mayor rendimiento en comparación con la aplicación del método de hidrolisis por ácido con ácido fosfórico.

Así mismo, Soares et al., (2019, pp. 348–360) en su investigación estudió la aplicación de ultrasonido para mejorar la reacción de la hidrolisis de la sacarosa, para ello se realizó un procesamiento ecográfico en tres diferentes situaciones a diferentes temperaturas, donde se determinó un aumento en la tasa de hidrólisis de sacarosa hasta un 33% a temperaturas de 40 °C y un 30% a 30 °C, en donde se evidencio que la eficiencia catalítica de la invertasa mejoró un 27% bajo

sonicación, esto podría emplearse en la industria como apoyo en los reactores para un aumento en el rendimiento de la reacción de la hidrólisis de la sacarosa.

Vargas & Cuellar, (2019, pp. 115–125) desarrollaron un estudio del comportamiento catalítico de la enzima invertasa en función de temperatura y el pH, donde inmovilizaron con nanopartículas de ferrita cobalto, determinando que el pH y la temperatura operacional óptimo es de 5.0 y 50°C respectivamente.

Las variaciones de biorreactores empleados y sus medios de inmovilización permiten dar una selectividad a la hora de emplear en su uso industrial, por lo que los factores que determinan la selección son las condiciones de operatividad, la eficiencia y conversión del reactor.

Es por ello que en el estudio de Amaya-Delgado et al., (2006, pp. 3-11), plantearon la comparación de la invertasa como biocatalizador de la reacción de la hidrólisis de la sacarosa tanto en solución como inmovilizada, obteniéndose azúcar invertido de dicho proceso, para ello emplearon un reactor de lecho empacado y variando las condiciones cinéticas de la reacción como pH, concentración, temperatura, etc. Sus resultados mostraron que la estabilidad térmica de la invertasa inmovilizada con respecto al libre aumento un 75% a 70°C, y obteniendo una producción continua por 38 horas de vida útil del biocatalizador.

Tomotani & Vitolo, (2007, pp. 662–667), evaluaron el comportamiento en un proceso continuo de la invertasa inmovilizada en un biorreactor de membrana a una velocidad de alimentación de 1,6 h y a una agitación de 100 rpm. Obteniendo como resultado rendimientos del 100% (actividad media de 0,88 mmol/h mg) y del 99% (actividad media de 1,02 mmol/h mg) cuando se utilizaron una membrana UF y MF, respectivamente, en una operación continua de estado estacionario de 20 horas.

Kumar et al., (2008, pp. 792-794) emplearon tubos de PVC como medio inmovilizador para la conversión de sacarosa en azúcar invertido en un reactor de flujo continuo, a condiciones de 50°C de temperatura y una solución de 0.5 M de sacarosa en el reactor, dando como resultado un rendimiento del 97% e indicando que en este sistema de reactor el PVC se utiliza como transportador de enzima y como recipiente de reacción y no se necesita una camisa térmica para mantener la temperatura del reactor, también evidenciando que no hay necesidad de agitar la mezcla de reacción ya que los productos formados pueden eliminarse continuamente, dando como resultado costos bajos de operación y mantenimiento del reactor.

En la investigación realizada por Zamora et al., (2011, pp. 61–63), se evaluó el efecto de la concentración, temperatura y flujo volumétrico en la reacción de la inversión de la sacarosa, donde se trabajó a una condición de temperatura de 45 y 50°C y un flujo volumétrico de 3.0 y 4.0 mL/min, en dicho trabajo se determinó que la reacción más óptima fue para 1.0 mol/L de sacarosa, con una temperatura de 50°C y un flujo volumétrico de 3 mL/min, alcanzando una conversión máxima del 95.4% en un reactor esférico.

En el estudio para la ampliación de las condiciones de lote para una hidrólisis de sacarosa en un reactor de tanque agitador realizada por Martínez et al., (2017, pp. 39-42), se analizaron diferentes criterios de escalado utilizados para operar el biorreactor de 0,5 L para explorar la producción de azúcar invertido a gran escala. Después de los estudios de inversión del modelo, se realizó un sistema de reacción a escala de 5 L en un reactor agitado de 7 L. evidenciaron que la concordancia entre la predicción teórica y los datos obtenidos de los experimentos realizados en el prototipo de biorreactor indica que tanto el modelo cinético como estas condiciones experimentales pueden reproducirse con éxito cuando se amplía el proceso; por lo tanto, esta información constituye una herramienta valiosa para realizar con éxito este tipo de operaciones a gran escala con fines industriales.

Dado que la industria busca abaratar costos en sus procesos y en la utilización de materia prima, Mafra et al., (2018, pp. 145-157) en un estudio realizado en un reactor de lote alimentado, demostró que la hidrólisis de sacarosa catalizada por invertasa inmovilizada demostró ser económicamente factible en una ventana operativa construida sobre la base de métricas económicas para un proceso de lote alimentado, con tres alimentaciones intermitentes de sacarosa para restaurar la concentración de sustrato en 100 g L cuando la conversión alcanza el 95%, indicando que la eficiencia catalítica ( $k/K$ ) de la invertasa se redujo aproximadamente diez veces después de la inmovilización, probablemente debido a retrasos en la difusión. La invertasa inmovilizada podría reciclarse diez veces en lotes de 4 h de hidrólisis de sacarosa a 40 °C y pH 6.0, manteniendo la conversión de reacción por encima del 75%.

### **2.1.2 Simulaciones de hidrólisis enzimáticas**

Sitaraman et al., (2019, pp. 348-360), realizaron simulaciones computacionales de hidrólisis enzimática celulósico-biomasa utilizando un modelo computacional-fluidodinámico (CFD) acoplado a un modelo químico-cinético. Para ello se empleó una estrategia de subciclo escalonado en el tiempo para eludir las grandes disparidades en las escalas de tiempo con respecto a la física del transporte y la cinética química.

En lo que respecta a transformación de glucosa, Herrera & Meers, (2013, pp. 123-138), diseñaron una simulación de la hidrólisis enzimática de almidón para la obtención de bioetanol, donde se aplicó los parámetros de Michaelis-Menten, para determinar la cinética de la reacción ; simuló las etapas de la hidrólisis en un reactor de tanque agitado (CSTBR) empleando Matlab, donde los resultados permitieron evaluar el efecto de temperatura, estabilidad y concentración de alimentación, con ello establecer parámetros de operación estables y de alto rendimiento.

La investigación realizada por Bali et al., (2017, pp. 225-234.), donde estudió la paramétrica del proceso de hidrólisis y su eficiencia. Las reconstrucciones tridimensionales también se utilizan

para el modelado de la hidrólisis de la lactosa a escala de poros, teniendo en cuenta las limitaciones de transporte de masa y aplicando la misma cinética de hidrólisis que en el modelo macroscópico. Empleando capas reconstruidas que se utilizan posteriormente para la predicción de propiedades de transporte efectivas a través de la solución numérica de las ecuaciones de transporte relevantes. La metodología se utiliza para la investigación de la hidrólisis de la lactosa, empleando un modelo macroscópico de difusión y reacción convectiva. Concluyendo que hubo una mayor ventaja en comparación con otros métodos aplicados siendo óptimo para un escalado industrial.

Montiel, (2017, pp. 87-96), presentó una investigación donde diseñó y simuló la producción de etanol a partir de bagazo de caña en el software de simulación Aspen Plus, donde simuló los procesos: proceso de obtención de etanol a partir del pretratamiento por explosión de vapor, al proceso de obtención de etanol a partir del pretratamiento térmico, proceso de obtención de etanol a partir del pretratamiento Organosolv, concluyo que se encontró que el proceso LHW produce 14,119.9 Kg/h de etanol combustible (18,524.2 L/h), a una concentración de 99.7% mol; del proceso Organosolv se obtiene 15,143.4 Kg/h de etanol combustible (19,866.4 L/h), a una concentración de 99.8% mol y del proceso se obtuvo 14,777.4 Kg/h de etanol combustible (19,543.5 L/h), a una concentración de 99.8% mol, esto debido a la determinación de parámetros cinéticos calculados por medio de los parámetros de Michaelis-Menten.

González Quiroga et al., (2010, pp. 22-56) diseñó un modelo cinético para la hidrólisis enzimática de bagazo de caña, empleando el mecanismo de Michaelis-Menten modela para macro fluido un reactor CSTR's, donde determina que por medio de una alimentación distribuida en el reactor se puede alcanzar altas eficiencias de conversión de los reactivos, siendo una vía alternativa en procesos industriales.

Godoy et al., (2019, pp. 392-399) diseñaron un estudio acerca de la hidrólisis enzimática del bagazo de caña de azúcar sometido a deslignificación o pretratamiento hidrotermal en el cual se estudiaron dos estrategias operativas: se realizaron experimentos por lotes con diferentes cargas de sólidos (5-20% p/v) y las pruebas de lotes alimentados alcanzaron un contenido acumulado de sólidos del 24% (p/v). donde se comprobó que los modelos cinéticos de la hidrólisis pueden dar óptimos resultados para su aplicación en las industrias.

En la simulación enzimática diseñada por Jimenez et al., (2020, pp.151-167), modeliza los parámetros cinéticos de una hidrólisis enzimática, donde los materiales lignocelulósicos son el objeto de estudio, empleó una metodología que se compone de tres pasos: proceso experimental, aproximación al modelo semifísico basado fenomenológicamente y estimación de parámetros. Donde las concentraciones de celulosa, celobiosa y glucosa se controlaron utilizando una celulosa comercial con una actividad enzimática de 96FPU/mL a 50 °C, pH 4.8, 130 rpm durante 74 h.



empleando la ecuación cinética de Michaelis–Menten para determinar la conversión de la celulosa a glucosa.

Padierna, et al., (2022, pp. 145–155), en su estudio modelaron un proceso de hidrólisis enzimática de materiales amiláceos considerando el problema de identificación de parámetros como base para la construcción del modelo. La metodología utilizada se basa en el modelo semifísico de base fenomenológica (PBSM). Esta metodología visualiza que la estructura de un modelo dinámico solo puede mejorar con nuevos balances de masa o energía sugeridos por las suposiciones del modelo. Además, se incluye un algoritmo informático en la metodología para validar si el modelo es estructuralmente identificable localmente o saber si los parámetros no son identificables. Además, se utiliza un algoritmo de optimización para obtener los valores numéricos de los parámetros identificables y, por lo tanto, garantizar la validez del resultado. La comparación mostró errores bajos de 7,96% para licuefacción y 7,35% para sacarificación. Estos errores muestran una mejora significativa en comparación con los modelos anteriores y validan la metodología de modelado propuesta.

## **2.2 Referencias teóricas**

### ***2.2.1 Producción de azúcar en el país***

La industria azucarera ecuatoriana es pequeña relativamente, ya que la actividad azucarera representa el 8.7 %de PIB agrícola del país, por lo que el constante cambio e innovación de tecnología ha sido una de las prioridades para los productores del azúcar, dando a lugar a varias entidades reguladoras en el país como:

- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar del Ecuador (CINCAE)
- Fundación para la Investigación Azucarera del Ecuador (FIADE)

La CINCAE actualmente maneja cinco áreas de investigación: Fitomejoramiento (Programa de Variedades), Entomología, Fitopatología, Suelos y Fertilizantes y Laboratorio Químico (Asociación ecuatoriana de técnicos azucareros, 2018, p. 1).

### ***2.2.2 Edulcorantes***

El término edulcorante, hace referencia a aquel aditivo alimentario empleado como sustituto del azúcar que es capaz de mimetizar el efecto dulce del azúcar y que, habitualmente, y con menor aporte energético. Algunos son obtenidos de manera natural mientras que otros de forma sintética, en este último caso se denominan edulcorantes artificiales (García-Almeida et al., 2013, pp. 17-31).

Las condiciones para que un edulcorante sea utilizable por la industria alimentaria, este debe cumplir con varios requisitos que hacen que el producto sea apto para su comercio, entre ellos tenemos:

- que su sabor dulce sea percibido inmediatamente;
- que tenga la capacidad de degradarse rápidamente;
- ser lo más parecido posible al azúcar común;
- que su aporte calórico sea más bajo al del azúcar común (Alonso, 2010, pp. 3-12).

**Tabla 1-2:** Clasificación de los edulcorantes

Calóricas	Naturales	Azúcares	Sacarosa, glucosa, dextrosa, fructosa, lactosa, maltosa, galactosa y trehalosa, tagatosa, sucromalat.
		Edulcorantes Naturales calóricos	Miel, jarabe de arce, azúcar de palma o de coco y jarabe de sorgo
	Artificiales	Azúcares modificados	Jarabe de maíz de alto fructosa, caramelo, <b>azúcar invertido</b> .
		Alcoholes de azúcar	Sorbitol, xilitol, manitol, eritritol, maltitol, isomaltulosa, lactitol, glicerol.
Acalóricas	Naturales	Edulcorantes naturales sin calorías	Luo Han Guo, Stevia, taumatina, pentadina, bazeína.
	Artificiales	Edulcorantes artificiales	Aspartamo, sucralosa, sacarina, acesulfame K, ciclamato, neohesperidina DC, alitamo, Advantamo.

Fuente: (Alonso, 2010, pp. 3-12)

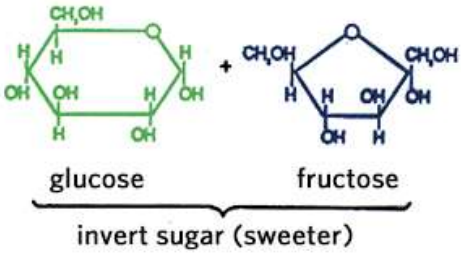
Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

### 2.2.3 *Azúcar invertido*

Se conoce como azúcar invertido a la mezcla equimolar de los azúcares (+) D-glucosa y (-) D-fructosa obtenida a partir de la inversión (hidrolisis) de la sacarosa. El grado de inversión puede variar de poco a total. Comercialmente se utiliza los grados medio y total. En el azúcar invertido, la mitad de la sacarosa se ha descompuesto mientras la otra mitad permanece inalterada. En el azúcar invertido total no queda sacarosa pues toda se ha convertido en glucosa y fructosa.

El término invertido hace referencia al comportamiento frente a la luz polarizada. La sacarosa, punto de partida, es dextrógira (+66, 5°) al igual que la glucosa (+52, 5°), mientras que la fructosa es levógira (-92°). Por tanto, las propiedades ópticas quedan invertidas de dextrógiras en la sacarosa a levógiras en el azúcar invertido; de ahí su nombre.

**Tabla 2-2:** Propiedades químicas del azúcar invertido

<b>Azúcar Invertido</b>	
<b>Nombre IUPAC</b>	(2R,3 S,4 R,5 R)-2,3,4,5,6-pentahidroxihexanal;(3S,4 R,5 R)-1,3,4,5,6-pentahidroxihexano-2-ona
<b>Formula molecular</b>	C <sub>12</sub> H <sub>24</sub> O <sub>12</sub>
<b>Densidad</b>	1.360 +/- 0.01
<b>Masa Molar</b>	360.31

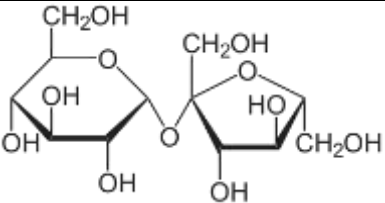
Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

## 2.2.4 Descripción de los compuestos

### 2.2.4.1 Sacarosa

La palabra azúcares es el término general usado en química de carbohidratos para todos los mono y disacáridos nutritivos como glucosa, fructosa, galactosa, maltosa y sacarosa. Azúcar es el nombre técnico y legal del disacárido sacarosa.

**Tabla 3-2:** Propiedades químicas de la sacarosa

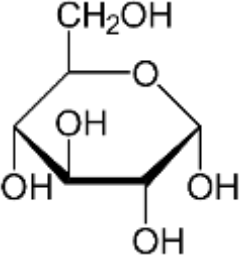
<b>Sacarosa</b>	
<b>Nombre IUPAC</b>	(2R,3R,4S,5S,6R)-2-[(2S,3S,4S,5R)-3,4-dihidroxi-2,5-bis(hidroximetil)oxolan-2-il] oxi-6-(hidroximetil) oxano-3,4,5-triol
<b>Formula molecular</b>	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>
<b>Densidad</b>	1,587 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa Molar</b>	342,29754(6) g/mol
<b>Punto de fusión</b>	459 K (186 °C)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

### 2.2.4.2 Glucosa

Es un monosacárido, es una hexosa y aldosa, podría considerarse uno de los compuestos más importantes dado que es la principal fuente de energía de los seres vivos, se encuentra presente en las frutas y puede ser extraída para su uso comercial en forma de jarabe para endulzar alimentos procesados.

**Tabla 4-2:** Propiedades químicas de la glucosa

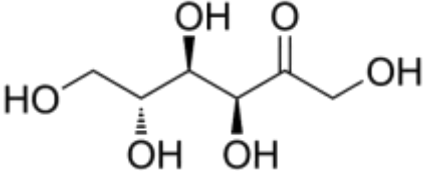
<b>D-Glucosa</b>	
<b>Nombre IUPAC</b>	(2R,3S,4R,5R)-2,3,4,5,6-Pentahidroxihexanal
<b>Formula molecular</b>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
<b>Densidad</b>	1540 kg/m <sup>3</sup>
<b>Masa Molar</b>	180,063388 g/mol
<b>Punto de fusión</b>	419 K

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

### 2.2.4.3 Fructosa

Es un monosacárido, compuesto por 6 átomos de carbono y un grupo cetona (es una cetohehexosa), con un nivel energético de 4 kilocalorías por gramo. A menudo presente en las frutas junto con la glucosa, se le considera un azúcar natural, empleado comúnmente como edulcorante en bebidas energéticas y en la industria alimenticia.

**Tabla 5-2:** Propiedades químicas de la fructosa

<b>D-Fructosa</b>	
<b>Nombre IUPAC</b>	(3S,4R,5R)-1,3,4,5,6-pentahidroxihexan-2-ona
<b>Formula molecular</b>	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>
<b>Densidad</b>	1587 kg/m <sup>3</sup> ;
<b>Solubilidad en agua</b>	3.75 kg/l a 20°C

<b>Masa Molar</b>	180.16 g/mol
<b>Punto de fusión</b>	376,15 K

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

## 2.2.5 *Hidrolisis enzimática*

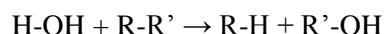
### 2.2.5.1 *Hidrolisis*

Al hablar de hidrolisis se manejan varios conceptos que desde el punto de vista de la Química General e Inorgánica se refiere a la reacción que disocia el agua en cationes hidronios ( $H^+$ ) y en aniones hidroxilos ( $OH^-$ ) por la acción de sustancias en una reacción.

Por otro lado, en la Química Orgánica se refiere al rompimiento de enlaces por la adición de iones de agua en productos de la hidrolisis (Flores et al., 2008, pp. 135-159).

### 2.2.5.2 *Hidrolisis enzimática*

El concepto de hidrolisis enzimática es empleado para describir la hidrolisis producida por las enzimas hidrolasas (enzimas capaces de aumentar la velocidad de reacción de la hidrolisis de un enlace), producen un efecto catalítico hidrolizante, rompiendo enlaces de agua (Schiweck et al., 2007, pp. 4-33).

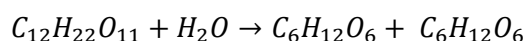


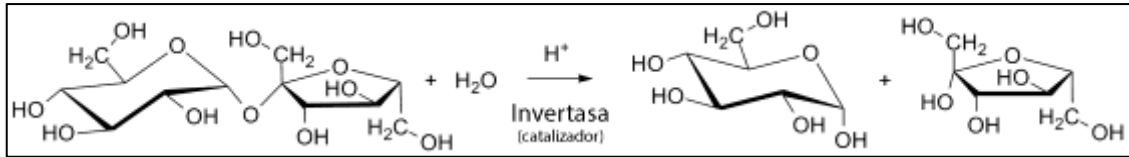
### 2.2.5.3 *Hidrolisis de la sacarosa*

La inversión de la sacarosa que se basa en el hecho que la velocidad de reacción para la inversión de una solución acidificada de la 10 sacarosa es dependiente de la temperatura y del tiempo de exposición esa temperatura dada para un pH determinado la velocidad de reacción puede ser controlada mediante mediciones polarimétricas (Schiweck et al., 2007, pp. 4-33)

La velocidad de reacción se define como el incremento de concentración de un producto o la disminución de la concentración de un reactivo por unidad de tiempo.

Dentro del estudio de la cinética de la hidrolisis de la sacarosa el proceso descrito de la reacción origina glucosa y fructosa según la reacción:





**Ilustración 1-2:** Reacción de la hidrólisis de la sacarosa por invertasa

**Fuente:** (Schiweck et al., 2007, pp. 4-33)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

#### 2.2.5.4 Cinética de la hidrólisis de la sacarosa

La reacción de la hidrólisis de la sacarosa por invertasa obedece al modelo cinético de Michaelis – Menten que pertenece a la cinética enzimática, debido a las altas concentraciones elevadas de sustrato ( $[S] \gg k_M$ ) la velocidad de reacción es independiente del sustrato, por lo que es un proceso cinético de orden cero. Los valores de los parámetros cinéticos de la reacción son constantes y específicos, a su vez, debido a que la hidrólisis se realiza mediante la inmovilización de la enzima invertasa, estos parámetros muestran mayores a diferencia cuando se trabaja sin la inmovilización de las enzimas. Dado que el catalizador al ser inmovilizado en esferas porosas estas tienen comportamiento de reacción catalítica heterogénea, por lo que la ecuación cinética empleada para la simulación está definida por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{V_{max} * [S]}{K_M + [S]}$$

Donde:

V= Velocidad de reacción

Vmax = Velocidad máxima de reacción

KM = Constante de Michaelis-Menten

[S] = Concentración del sustrato

**Tabla 6-2:** Condiciones cinéticas de la reacción de la hidrólisis de la sacarosa

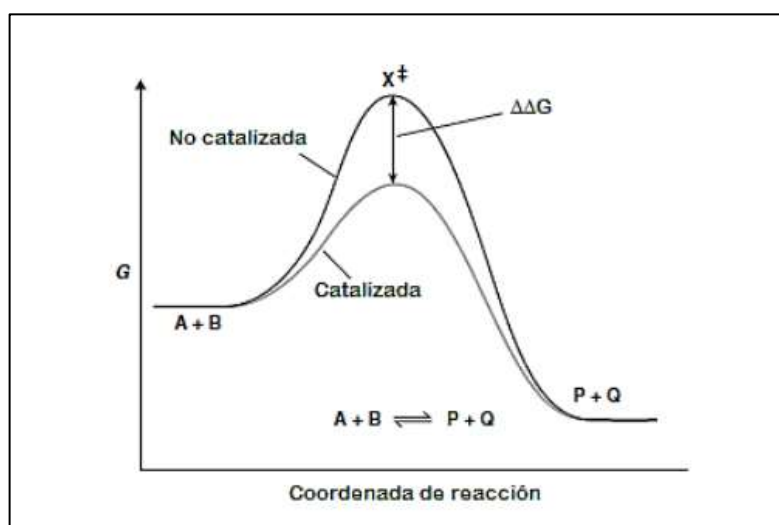
Condición cinética	Cantidad	Unidad
Velocidad de reacción máxima ( $v_{\text{máximo}}$ )	144.93	mM min <sup>-1</sup>
Numero de facturación ( $K_{\text{gato}}$ )	20.09	Min <sup>-1</sup>
Energía de activación (E)	34.77	kJ mol <sup>-1</sup>
Entalpia de activación ( $\Delta H$ )	32.04	kJ mol <sup>-1</sup>
Energía libre de Gibbs ( $\Delta G$ )	83.61	kJ mol <sup>-1</sup>
Energía de activación ( $\Delta S$ )	-157.16	J mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>

Fuente: (De Oliveira et al., 2020, pp. 1-9).

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

### 2.2.6 Catalizadores

Los catalizadores se pueden definir como moléculas que aumentan o disminuyen la velocidad de una reacción hacia el lado de la reacción termodinámicamente favorable, mediante la disminución de la barrera energética de dicha reacción. En la Ilustración 2-2 se puede observar un esquema simplificado del mecanismo de funcionamiento de los catalizadores. El catalizador interactúa con los sustratos (A y B) formando un complejo transitorio el cual reduce significativamente la energía de activación de la reacción (G), para luego dar lugar a los productos (P y Q) previo a la liberación del catalizador, el cual no se ve afectado durante la reacción.



**Ilustración 2-2:** Mecanismo de funcionamiento de los catalizadores

Fuente: (Castañeda, 2016, pp. 12-78)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

Los catalizadores que actúan en reacciones bioquímicas, Son conocidos como biocatalizadores. Y aquellos biocatalizadores que provienen de origen proteico, conocidos como enzimas. Las enzimas son proteínas de elevado peso molecular y altamente específicas. En los seres vivos participan en reacciones metabólicas de forma eficiente para luego ser liberadas sin alteración funcional. Lo que permite que la enzima pueda emplearse en sucesivas reacciones, lo que las convierte en uno de los catalizadores más eficientes de la naturaleza.

Desde los inicios de la enzimología aplicada existen amplias controversias sobre si las enzimas aisladas de los organismos vivos pueden actuar como biocatalizadores de la misma forma que actúan en el organismo de origen.

Sin embargo, hasta la actualidad, las enzimas han logrado aislarse, purificarse, inmovilizarse y emplearse exitosamente en diversos procesos tecnológico, convirtiéndose en un área de especial interés para la industria en general (Castañeda, 2016, pp. 12-78).

#### 2.2.6.1 *Biocatalizadores*

Una creciente demanda de productos alimenticios y agrícolas donde las reacciones catalíticas son necesarios para formación o descomposición de productos de alta demanda industrial impulsa una nueva tecnología donde las enzimas actúan como catalizadores acelerando o ralentizando aquellas reacciones que son difíciles de controlar, por lo que sus usos hoy en día son incalculables.

Las técnicas de uso de estas macromoléculas ofrecen ventajas, como es el caso de la inmovilización, que mejora las propiedades enzimáticas (estabilidad y reutilización).

#### 2.2.6.2 *Invertasa (fructohidrolasa)*

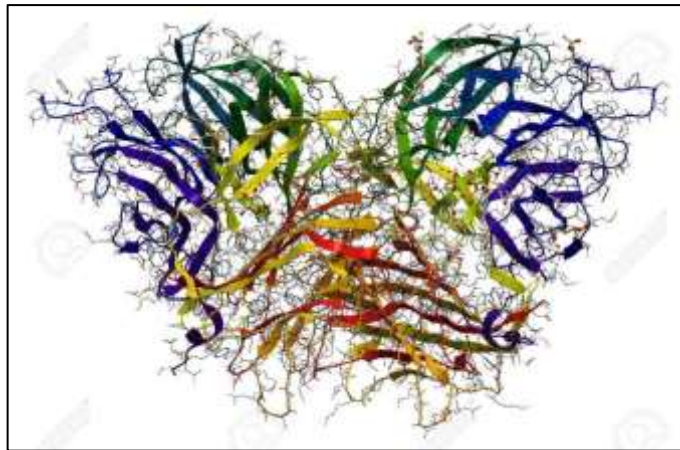
La invertasa ( $\beta$ -D-fructofuranosido, fructohidrolasa o beta-fructofuranosidasa) es una enzima empleada como catalizador en las reacciones de hidrolisis de sacarosa y glúcidos relacionados. en la industria es usada como biocatalizador en la reacción de la hidrolisis de la sacarosa para la producción de azúcar invertido.

La invertasa está ampliamente distribuida entre la biosfera. Se caracteriza principalmente en plantas y microorganismos. *Saccharomyces cerevisiae* comúnmente llamada levadura de panadería es la cepa principal utilizada para la producción de invertasa comercialmente. Se encuentran en el cultivo silvestre, en la piel de las uvas y otras frutas. Aunque también se pueden usar plantas como la pera japonesa (*Pyrus pyrifolia*), el guisante (*Pisum sativum*), la avena (*Avena sativa*), pero generalmente microorganismos como *S. \_cerevisiae*, *Candida utilis*, *A. niger* se consideran ideales para su estudio (Kulshrestha et al., 2013, pp. 792-797).



A diferencia de la mayoría de las otras enzimas, la invertasa exhibe una actividad relativamente alta en un amplio rango de pH (3.5 - 4.5) con el pH cercano óptimo de 4.5. La actividad enzimática alcanza un máximo a 55 °C (Kulshrestha et al., 2013, pp. 792-797).

En vista del alto potencial comercial de la enzima, se han realizado varios intentos para obtener una preparación inmovilizada altamente activa y estable adecuada para la aplicación comercial, esto debido a que el uso de invertasa inmovilizada para la hidrólisis continua de la sacarosa puede ser ventajoso porque los cambios en el pH producidos como resultado de la inmovilización pueden aprovecharse para prevenir la formación de oligosacáridos por la actividad de la transferasa asociada con la enzima soluble (Kotwal & Shankar, 2009, pp. 311-322).



**Ilustración 3-2:** Representación 3D de la invertasa

**Fuente:** (123RF, 2018, p. 1.)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

### **2.2.7 Inmovilización enzimática**

El uso de enzimas inmovilizadas como biocatalizadores se ha convertido en un proceso de rutina para la fabricación de muchos productos industriales, y a diferencia de la industria farmacéutica y algunas partes de la industria química, los requisitos de la industria alimenticia son producir cantidad muy grandes de productos sensibles a los costos. En este caso, el costo del biocatalizador (enzima inmovilizada) debe ser bajo, por lo, tanto debe mostrar una buena estabilidad operativa que permita realizar una gran cantidad de ciclos (Basso & Serban, 2019, pp. 19-46).

**Tabla 7-2:** Ventajas y Desventajas de las enzimas inmovilizadas en procesos industriales

Ventajas y Desventajas de las enzimas inmovilizadas en procesos industriales	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"><li>• Fácil separación del biocatalizador</li><li>• Reducción de los costos del procesamiento posterior.</li><li>• Uso múltiple del biocatalizador (Reciclaje).</li><li>• Mejor estabilidad, especialmente hacia disolvente orgánicos y temperaturas más altas</li><li>• La coinmovilización con otras enzimas es posible</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Menor actividad enzimática en comparación con la enzima nativa</li><li>• Costos adicionales para los transportistas e inmovilización</li><li>• Velocidades de reacción más bajas en comparación con las enzimas nativas</li><li>• Sujeto a ensuciamiento</li><li>• Eliminación de la enzima inmovilizada agotada (incineración)</li></ul>

**Fuente** (Basso & Serban, 2019, pp. 19-46).

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

## 2.2.8 *Reactor*

### 2.2.8.1 *Biorreactor*

Las reacciones de flujo continuo pueden, en principio, clasificarse en los modos «one pot» y «tándem» en función del número de reactores utilizados, que pueden interpretarse como reacciones de flujo continuo operadas por un solo reactor y múltiples reactores, respectivamente. Además, ejecutar una reacción en flujo continuo traería las siguientes ventajas en comparación con los modos por lotes:

- 1) mejor efecto de transferencia de masa / calor,
- 2) operación de la unidad más simple y configuración de respuesta,
- 3) trabajo y escalado más fáciles.

En este sentido, las reacciones de flujo continuo han logrado logros extraordinarios en la síntesis de productos farmacéuticos, productos naturales, productos químicos peligrosos y polímeros.

La introducción de la técnica de flujo continuo en las reacciones biocatalíticas está ganando notablemente cada vez más atención, y varias revisiones demostraron que la inmovilización de proteínas y los reactores enzimáticos inmovilizados han facilitado el desarrollo de procesos biocatalíticos de flujo continuo, por lo que el diseño de los biorreactores que pueden aplicar aquella técnica permitirá paso a la química verde y reducción de costos en producción (Hu et al., 2022, p. 1).

### **2.2.9 Simulación de procesos**

La simulación cada vez se vuelve un instrumento necesario en cualquier área de trabajo de desarrollo ingenieril, es por eso, que hemos enmarcado su importancia en los siguientes:

Es más barato y rápido que construir físicamente el sistema real para probar la fundamentación teórica.

Descubrir errores de diseño en el modelo propuesto, en lugar de hacerlo en el sistema real.

Instrumento de estimación y pronóstico para futuras investigaciones.

En base a resultados obtenidos de la simulación podemos tomar decisiones a tiempo, ahorrando costos y evitando pérdidas de materiales e insumos.

Estrategia de planeación al diseñar y construir equipos o procesos de fabricación.

La simulación proporciona un control sobre el tiempo, debido a que es un fenómeno que se puede acelerar o retardar según se desee, acelerando el proceso de producción de un producto con un mínimo riesgo.

Desde cualquier punto de vista, el incluir métodos y técnicas de simulación en un proceso, sistema, procedimiento, etc, asegura un análisis mucho más conveniente tanto en consumo de recursos físicos como de logística; además de que se consiguen resultados confiables un margen de error mínimo y evitando pérdidas producto de una planificación sin bases de conocimiento (Álvarez & García, 2013, pp. 24-45).

### **2.2.10 DWSIM**

DWSIM es un simulador de procesos químicos compatible con CAPE-OPEN y tiene una interfaz gráfica fácil de usar con muchas características donde se puede procesar diversos procesos químicos comerciales (DWSIM, 2022, p. 1). Al ser un simulador de libre distribución permite a generar estudios de procesos industriales y optimización de producción, lo que beneficia a los ingenieros químicos a dar una solución adecuada de los problemas de procesos a través de análisis, diseño y optimización de los procesos.

Por esa razón este software permite reproducir virtualmente el sistema de producción de azúcar invertido y obtener los datos necesarios para la validación del proceso y la determinación de su eficiencia.



**Ilustración 4-2:** Logo DWSIM

**Fuente:** (DWSIM, 2022, p. 1).

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

### 2.2.10.1 Características

DWSIM es capaz de simular procesos de equilibrio vapor-líquido-líquido-sólido en estado estacionario con los siguientes modelos termodinámicos y operaciones de unidades:

**Tabla 8-2:** Características de la plataforma DWSIM

Características de la plataforma	
<b>Modelos Termodinámicos</b>	Ley de Raoult Peng-Robinson/Soave-Redlich-Kwong EOS PC-SAFT EOS GERG-2008 EOS Peng-Robinson con Lee-Kesler Enthalpy Peng-Robinson-Stryjek-Vera 2 (PRSV2) NRTL (EN INGLÉS) UNIQUAC UNIFAC UNIFAC-LL UNIFAC modificado (Dortmund) UNIFAC modificado (NIST) Chao-Seader Grayson-Streed Lee-Kesler-Plöcker CoolProp Mesas de vapor IAPWS-IF97 IAPWS-08 Agua de mar Agua agria

	<p>Aceite negro</p> <p>Zócalo CAPE-OPEN</p>
<p><b>Operación de la unidad y modelos de bloques lógicos</b></p>	<p>Mezclador/Splitter</p> <p>Bomba</p> <p>Válvula</p> <p>Calentador</p> <p>Enfriador</p> <p>Compresor</p> <p>Expansor</p> <p>Intercambiador de calor</p> <p>Separador de gas-líquido</p> <p>Columna de destilación de acceso directo</p> <p>Columna de destilación rigurosa</p> <p>Columna de absorción rigurosa</p> <p>Separador compuesto</p> <p>Tubo de tubería</p> <p>Placa de orificio</p> <p>Reactor de conversión</p> <p>Reactor de equilibrio</p> <p>REACTOR Gibbs</p> <p>PFR</p> <p>CSTR</p> <p>Tanque</p> <p>Separador de solidos</p> <p>Filtro de sólidos</p> <p>Bloque de reciclaje</p> <p>Bloque de reciclaje de energía</p> <p>Ajustar Bloque</p> <p>Bloque de especificaciones</p> <p>Operación de la unidad CAPE-OPEN</p> <p>Operación de calculo</p>

	<p>Operación de la unidad de script de Python</p> <p>Operación de la unidad de diagrama de flujo</p>
<b>Herramientas de diagrama de flujo</b>	<p>Gerente de reacciones</p> <p>Gerente de ensayos de petróleo</p> <p>Caracterización a granel de fracciones de petróleo</p> <p>Caracterización de destilación de fracciones de petróleo</p>
<b>Análisis paramétrico</b>	<p>Análisis de sensibilidad</p> <p>Optimización de diagrama de flujo</p>
<b>Utilidades de diagrama de flujo</b>	<p>Verdadero Punto Crítico (EOS)</p> <p>Envoltentes de fase</p> <p>Sobres binarios</p> <p>Sobres ternarios</p> <p>Propiedad de flujo frío del petróleo</p> <p>Hidratos de gas natural</p> <p>Dimensionamiento del separador gas-liquido</p> <p>Dimensionamiento de la válvula (PSV)</p> <p>Dimensionamiento de válvulas (Proceso)</p>
<b>Informes de resultados</b>	<p>Exportar a PDF</p> <p>Exportar a texto</p> <p>Exportación a ODS/ODT</p>
<b>Manipulación de datos</b>	<p>Guardar/cargar datos del diagrama de flujo</p> <p>Importación de datos compuestos</p> <p>Importación/exportación de datos de parámetros de interacción</p> <p>Exportación de datos compuestos</p>
<b>Misceláneo</b>	<p>Secuencias de comandos de Python</p>

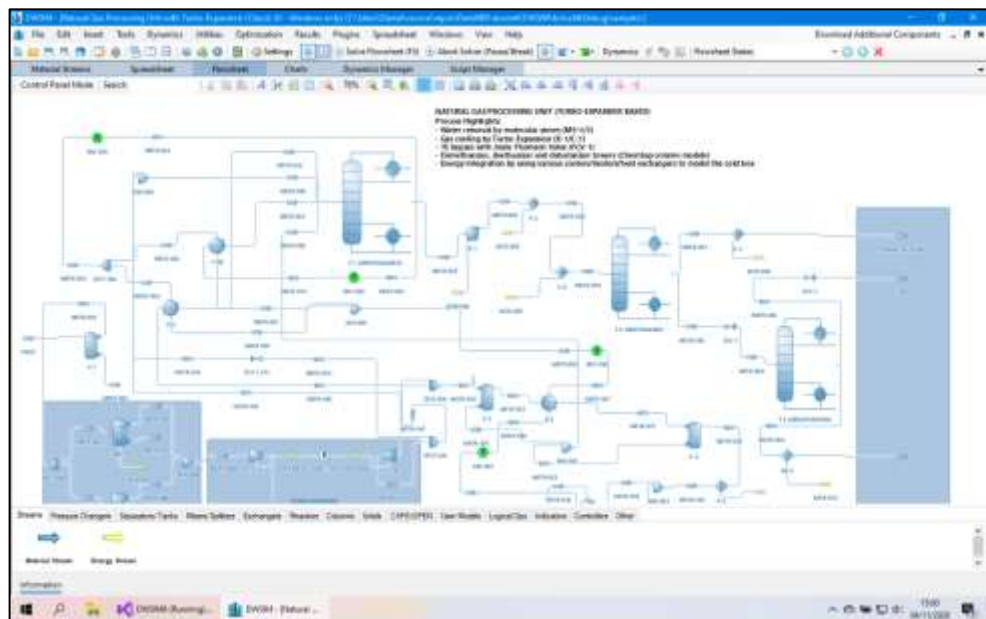
	<p>Creador de compuestos</p> <p>Regresión lineal de datos VLE</p> <p>Utilidad de evaluación comparativa del rendimiento del sistema</p>
--	---

Fuente: DWSIM, 2020

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

### 2.2.10.2 Interfaz de la plataforma DWSIM

Al ejecutar DWSIM en Windows se tiene la opción de dos interfaces gráficas de usuario (GUI): Classic y multiplataforma, esta última también conocida como IU "Nueva". La interfaz de usuario clásica es la basada en Windows Forms, con todas las funciones.



**Ilustración 5-2:** Interfaz plataforma DWSIM

Fuente: (DWSIM, 2022, p. 1).

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

## **2.2.11 Marco legal**

### **2.2.11.1 Software libre en el Ecuador**

- **Decreto N°. 1014**

Emitido en abril de 2008, donde se basa en los siguientes ejes:

1. Cumplimiento de recomendaciones internacionales: “La Carta Iberoamericana de Gobierno Electrónico recomienda el uso de estándares abiertos y software libre como herramientas informáticas”
2. Con los siguientes objetivos:
  - Alcanzar la soberanía y autonomía tecnológica.
  - Alcanzar un ahorro significativo de recursos públicos.

- **Ley COESC (Código Orgánico de la Economía Social del Conocimiento)**

**Artículo 135.-** Excepción a la reproducción. - No constituye reproducción de un software, a los efectos previstos en el presente Título, la introducción de este en la memoria interna del respectivo aparato, para efectos de su exclusivo uso personal.

**Artículo 136.-** Uso lícito del software. - Salvo pacto en contrario, será lícito el aprovechamiento del software para su uso en varias estaciones de trabajo mediante la instalación de redes, estaciones de trabajo u otros procedimientos similares.

**Artículo 137.-** Excepción a la transformación. - No constituye transformación, a los efectos previstos en el presente Título, la adaptación de un software realizada por el propietario u otro usuario legítimo para la utilización exclusiva del software.

**Artículo 142.-** Tecnologías libres. - Se entiende por tecnologías libres al software de código abierto, los estándares abiertos, los contenidos y el hardware libres. Los tres primeros son considerados como Tecnologías Digitales Libres.

Se entiende por software de código abierto al software en cuya licencia el titular garantiza al usuario el acceso al código fuente y lo faculta a usar dicho software con cualquier propósito. Especialmente otorga a los usuarios, entre otras, las siguientes libertades esenciales:

- La libertad de ejecutar el software para cualquier propósito;
- La libertad de estudiar cómo funciona el software, y modificarlo para adaptarlo a cualquier necesidad. El acceso al código fuente es una condición imprescindible para ello;
- La libertad de redistribuir copias; y,
- La libertad de distribuir copias de sus versiones modificadas a terceros (Del Pozo, 2016, p. 5).



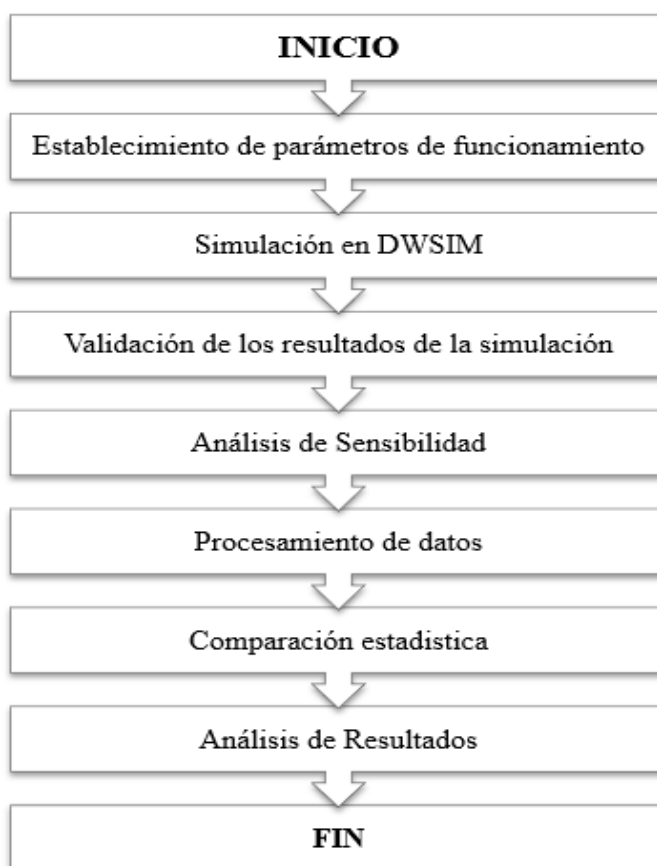
- Constitución de la Republica 2008: Dentro de la constitución del Ecuador se define los sectores donde se emplean tecnologías como hardware y software. Donde se habla en los artículos: 322, 334, 347, 385, 386, 387 y 423.
- Plan Nacional de Seguridad Integral: En este documento, en el capítulo 4 “La Seguridad Integral desde el Buen Vivir”, se aclara y extiende el concepto de soberanía tecnológica en los distintos ámbitos que plantea dicho documento, que involucra además a la Soberanía Tecnológica y Ciencia, por lo tanto, constituye una de las garantías que debe proporcionar el Estado, que de hecho está en la constitución del 2008.

## CAPÍTULO III

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Etapas de la metodología

La metodología empleada en el presente trabajo de titulación está hecha en base a las revisiones bibliográficas en el capítulo anterior, por lo que se encuentra dividida en las siguientes etapas detalladas en la Ilustración 1-3:



**Ilustración 6-3:** Metodología de la simulación.

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

El presente trabajo de integración curricular estudia las condiciones óptimas a las que se da la reacción de la hidrólisis de la sacarosa por invertasa inmovilizada en medios industriales, por lo que parte de la simulación del proceso, para ello se realizará un análisis de sensibilidad para determinar dichas condiciones, modificando las variables a las que es sensible el proceso, pudiendo emplearse para posteriores estudios.

Al obtener todos los datos previstos se realiza un análisis estadístico para validar los datos obtenidos en la simulación, aportando confiabilidad en el estudio.

### 3.2 Enfoque metodológico

**Fuente primaria:** Información y datos obtenidos por las simulaciones realizadas por el autor en DWSIM y procesamiento de datos en Excel y Statgraphics Centurion XVI.I.

**Fuente secundaria:**

- Artículos científicos de alto impacto, cuartil 1, 2 y 3.
- Libros físicos y digitales en relación con la temática investigada.
- Repositorio digital de la biblioteca de la ESPOCH.
- Sitios web oficiales de los softwares empleados en el trabajo.

### 3.3 Establecimiento de parámetros de funcionamiento

Para el desarrollo de la simulación se tuvo en consideración la información descrita por la investigación de Santos et al., (2007, pp. 31-38) “*Modelling thermal stability and activity of free and immobilized enzymes as a novel tool for enzyme reactor design.*”, donde establece un modelo cinético de hidrólisis enzimática para predecir la actividad enzimática con respecto a la temperatura en un curso de tiempo determinado, así como la vida media y el rango de temperatura operativo para el diseño de reactores enzimáticos.

A su vez se empleó los datos del artículo científico de Diestra Balta et al., (2015, pp. 303-312) “*Mathematical modeling of the effect of temperature on the activity and thermal stability of the inulinase of Kluyveromyces marxianus NRRL Y- 7571*”, que derivan de la investigación anterior obteniendo los parámetros cinéticos de reacción para la sacarosa, también estableciendo la actividad y velocidad de inactivación a diferentes temperaturas.

Por otro lado, para el desarrollo de los parámetros del reactor se empleó la investigación desarrollada por: Martínez et al., (2017, pp. 39-42) “*Scaling-up batch conditions for efficient sucrose hydrolysis catalyzed by an immobilized recombinant Pichia pastoris cells in a stirrer tank reactor.*”, donde especifica las características del reactor CSTR que se utilizó en dicha investigación.

#### 3.3.1 Generalidades del proceso

Los compuestos empleados para la simulación provienen de la base de datos CAPE-OPEN descrita en la Tabla 1-3, donde sus especificaciones permiten la interoperabilidad *plug and play* en un entorno de modelado de procesos en un modelo determinado de procesos de terceros.

**Tabla 9-3:** Descripción de los compuestos del proceso de producción de azúcar invertido

Compuesto	Formula	CAS NUMBER	Estado normal
Sacarosa	C <sub>12</sub> H <sub>22</sub> O <sub>11</sub>	57-50-1	Sólido
Agua	HOH	7732-18-5	Líquido
Glucosa	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	50-99-7	Líquido
Fructosa	C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> O <sub>6</sub>	5748-7	Líquido

Realizado por: Córdova, Dennis, 2022.

### 3.3.2 Parámetros generales de la simulación (Condiciones iniciales de operación)

Los parámetros iniciales de operación son procedentes del artículo científico: “*Scaling-up batch conditions for efficient sucrose hydrolysis catalyzed by an immobilized recombinant Pichia pastoris cells in a stirrer tank reactor*”, desarrollada por: Martínez et al., (2017, pp. 39-42) donde indican las condiciones para un máximo desempeño en la producción de azúcar invertido, al ser los primeros en desarrollar un escalado de las condiciones de operación para la producción industrial se toma en cuenta la información proporcionada para el desarrollo de la simulación en DWSIM, dichas condiciones se especifican en la Tabla 2-3.

**Tabla 10-3:** Condiciones Iniciales de operación para la simulación

Parámetros	Entradas			
	Sacarosa (S-01)	Agua (S-02)	S-03	Unidades
	Cantidad			
Flujo molar	4.369*10 <sup>-1</sup>	2.912*10 <sup>-1</sup>	7.2816*10 <sup>-1</sup>	Mol/seg
Composición	Fracción molar			
	0.60	0.40	-	-
Flujo volumétrico	3.49	0.3159	6.9092	L/min
Temperatura	20	25	60	°C
Presión	1	1	1	atm
Concentración	-	-	1.75	Molar

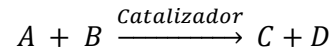
Fuente: (Martínez et al., 2017, pp. 39-42)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2022.

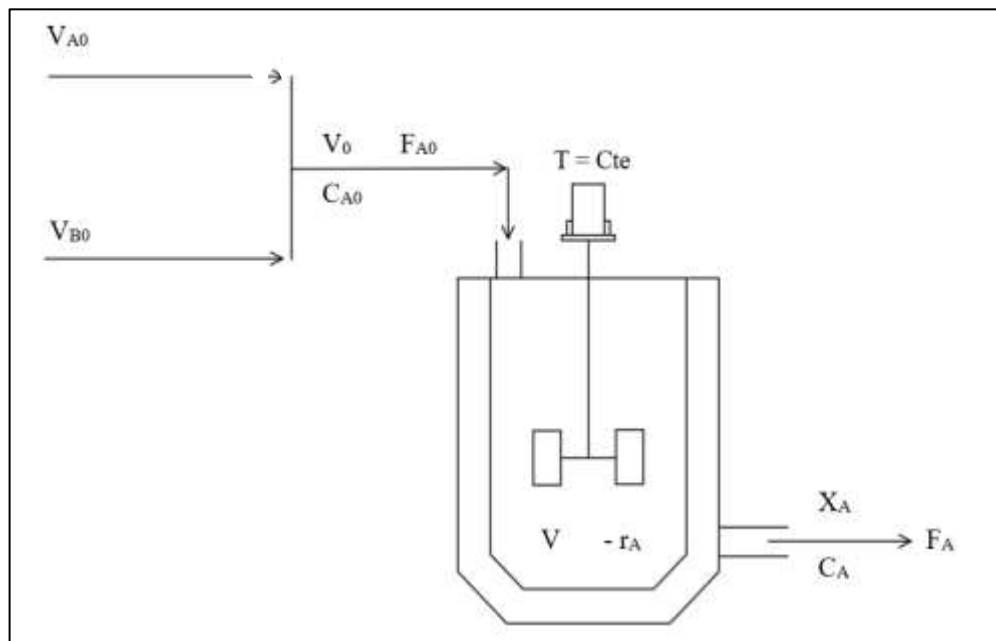
### 3.3.3 Parámetro de funcionamiento del reactor CSTR

#### 3.3.3.1 Diseño del reactor

Por lo que se realiza una reacción dentro del reactor de tipo:



Existen dos especies en la alimentación que se mezclan homogéneamente en el tanque de almacenamiento para posteriormente enviarse al reactor y obtener el producto deseado, de forma simplificada se lo representa en el siguiente diagrama:



**Ilustración 7-3:** Esquema del biorreactor CSTR

Realizado por: Córdova, D., 2022.

Donde:

$V$  (L) = Volumen de control del reactor

$-r_A$  (mol/L\*min) = Cinética de la reacción

$V_{A0}$  (L/min) = Flujo volumétrico de A

$V_{B0}$  (L/min) = Flujo volumétrico de B

$V_0$  (L/min) = Flujo volumétrico de entrada

$F_{A0}$  (mol/min) = Flujo molar de entrada

$C_{A0}$  (mol/L) = Concentración Inicial

$X_A$  = Conversión

$C_A$  (mol/L) = Concentración Final

$F_A$  (mol/min) = Flujo molar de salida

**Tabla 11-3:** Datos iniciales de diseño de reactor

Parámetro	Nomenclatura	Cantidad	Unidad
Volumen de control	V	500	Litros
Concentración inicial	$C_{A0}$	1.75	Molar
Constante cinética	K	$2.438 \cdot 10^{-3}$	$\text{Min}^{-1}$
Conversión teórica	$X_A$	83	%

Fuente: (Pérez et al., 2011, p. 21)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

La conversión teórica corresponde la predicción descrita por Martínez et al., (2017, pp. 39-42), correspondiente a un 83% donde se emplea como base para el estudio, siendo un valor empleado para el diseño del reactor.

- **Ecuación de diseño del reactor CSTR**

$$\frac{V}{F_{A0}} = \frac{X_A}{-r_A}$$

Concentración para sistemas líquidos

$$(-r_A) = KC_A$$

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A)$$

Flujo molar de alimentación

$$(-r_A) = kC_{A0}(1 - X_A)$$

$$F_{A0} = \frac{V(-r_A)}{X_A}$$

$$F_{A0} = \frac{V(kC_{A0}(1 - X_A))}{X_A}$$

$$F_{A0} = \frac{500 \text{ L} (2.438 \cdot 10^{-1} \text{ min}^{-1} * 1.75 \text{ M} (1 - 0.83))}{0.83}$$

$$F_{A0} = 43.69 \frac{\text{mol}}{\text{min}}$$

- **Flujos Volumétricos**

Para el cálculo de los flujos volumétricos se encuentra descrita en la sección 4.3.1, debido a que su obtención deriva de un balance masa en el mezclador.

### 3.3.4 *Parámetros cinéticos de la reacción de hidrolisis*

#### 3.3.4.1 *Ecuación cinética de la reacción*

La cinética química empleada en el presente trabajo se ajusta a la cinética enzimática descrita por Michaelis – Menten, donde se indica que una fase que tenga una concentración alta de sustrato, en este caso sacarosa, la velocidad de reacción es constante por lo que se le considera de orden cero, esto debido a que la reacción se hace independiente de la concentración del sustrato.

La velocidad de reacción o actividad enzimática se puede expresar mediante la siguiente ecuación (1), donde **K** es la constante enzimática y **E** es la concentración de una enzima activa.

$$v = KE \quad (1)$$

Dado que en el proceso de reacción la temperatura varia, la constante puede ser expresada por la ecuación de Arrhenius, obteniendo la siguiente ecuación:

$$K = k_0 * e^{-\frac{E_a}{RT}} \quad (2)$$

Las enzimas tienen la característica que a elevadas temperaturas se desnaturalizan por lo que predecir la descomposición es de suma importancia para determinar la velocidad a la que se produce dicho fenómeno, suponiendo que el proceso anterior dicho es de primer orden se obtiene las siguientes ecuaciones:

$$\frac{dE}{dt} = -E_d * E \quad (3)$$

$$E = E_0 * e^{-k_d * t} \quad (4)$$

Donde  $E_0$  es la concentración de la enzima activa en un inicio.

Debido a que la constante de desnaturalización es un parámetro cinético que depende de la temperatura, puede expresarse por medio de la ecuación de Arrhenius:

$$K_d = K_{d0} * e^{-\frac{E_d}{RT}} \quad (5)$$

Las constantes  $E_0$  y  $k_0$ , pueden unirse en una constante definida como  $V_0$  por lo que su expresión queda de la siguiente manera:

$$v_0 = E_0 * k_0 \quad (6)$$

El modelo final de la cinética puede expresarse mediante la relación de los dos principales fenómenos: la activación representada por las bajas temperaturas y la desactivación representado por las altas temperaturas; por lo que al final queda de la siguiente manera:

$$v = v_0 * \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) * \exp\left[-\left(K_{d0} * \exp\left(-\frac{E_d}{RT}\right) * t\right)\right] \quad (7)$$

Donde:

$V_0$  (UI/mL) = Velocidad Inicial

$E_a$  (cal/mol) = Constante de energía de activación

$R$  (cal/mol\*k) = Constante Universal de los Gases

$T$  (K) = Temperatura

$K_{d0}$  ( $\text{min}^{-1}$ ) = Constante

$E_d$  (cal/mol) = Constante de energía de activación para la desactivación enzimática

$t$  (min) = Tiempo

Los parámetros cinéticos proporcionados por el estudio de Diestra Balta et al., (2015, pp. 303-312) son empleados para reemplazar las variables de la ecuación cinética de la hidrólisis de la sacarosa, descritos a continuación en la Tabla 4-3.



**Tabla 12-3:** Parámetros cinéticos de reacción de la hidrólisis de la sacarosa

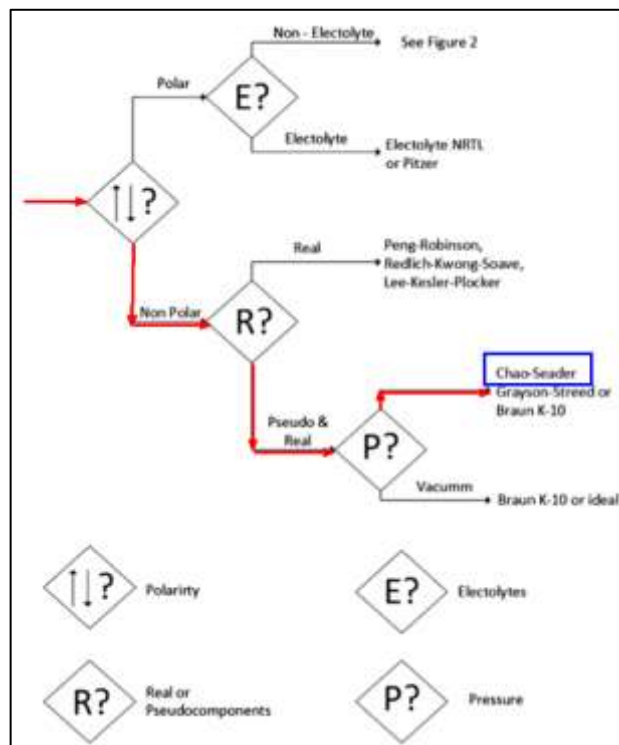
Parámetro cinético	Abreviación	Cantidad	Unidad
Velocidad Inicial de reacción	$V_0$	$1.05 \cdot 10^8$	(UI/mL)
Constante de energía de activación	$E_a$	9483.3	(cal/mol)
Constante de energía de activación para la desactivación enzimática	$E_d$	62995.5	(cal/mol)
Constante Universal de los gases	R	1.987207	(cal/mol*k)
Constante cinética	K	$2.438 \cdot 10^{-3}$	(min <sup>-1</sup> )

Fuente: (Diestra Balta et al., 2015, pp. 303-3012)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

### 3.3.5 Definición del paquete termodinámico

Debido a la naturaleza de los compuestos se realiza una selección del paquete termodinámico, a través de una sección por medio de la definición si es un compuesto polar o no, si su comportamiento es real o pseudo real. En la Ilustración 3-3 se define a continuación:

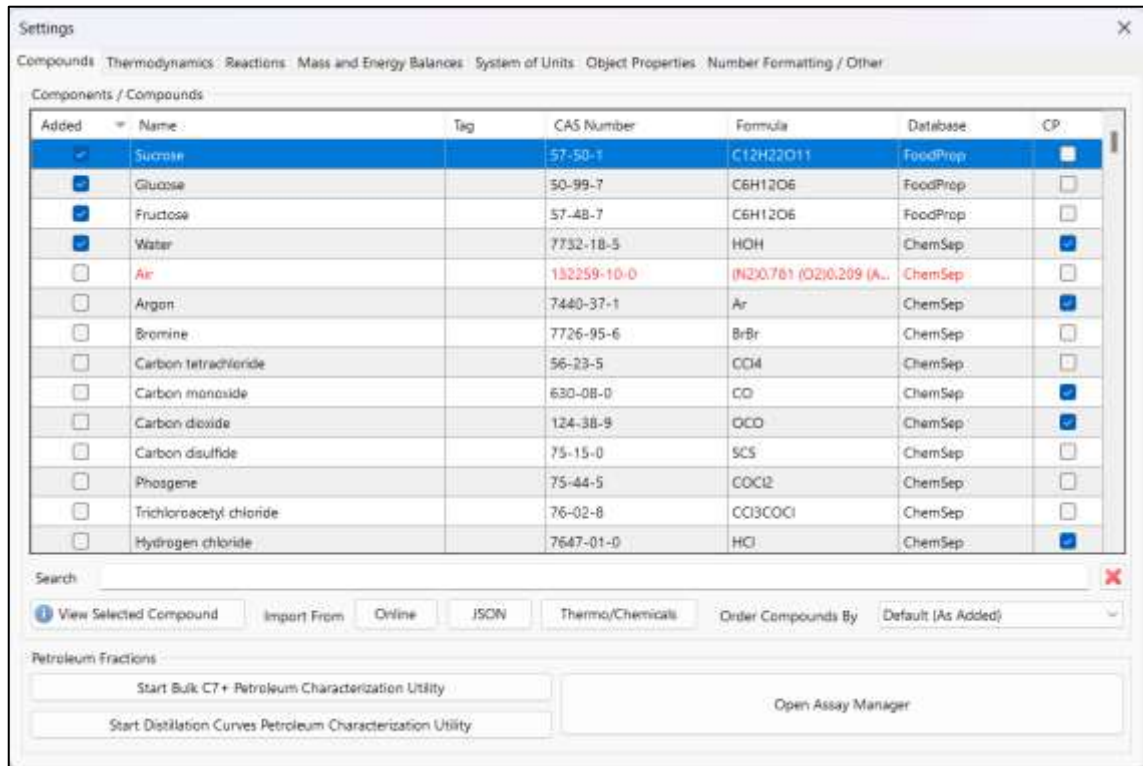


**Ilustración 8-3:** Proceso de elección de paquete termodinámico

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

### 3.4 Simulación en DWSIM

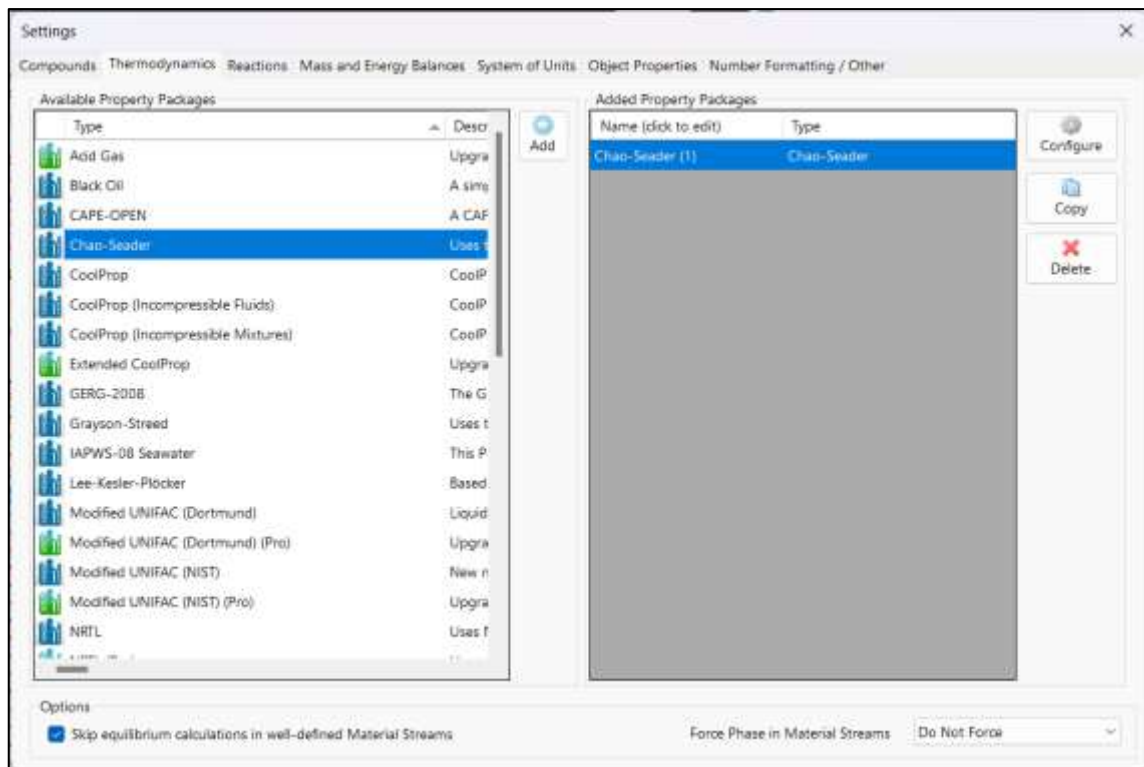
En esta sección se emplean los parámetros de funcionamiento descritas en las Tablas 1-3 y 2 -3, como base de la simulación del proceso de producción de azúcar invertido por invertasa inmovilizada en un biorreactor de tanque agitado.



**Ilustración 9-3:** Panel de elección de los componentes en DWSIM

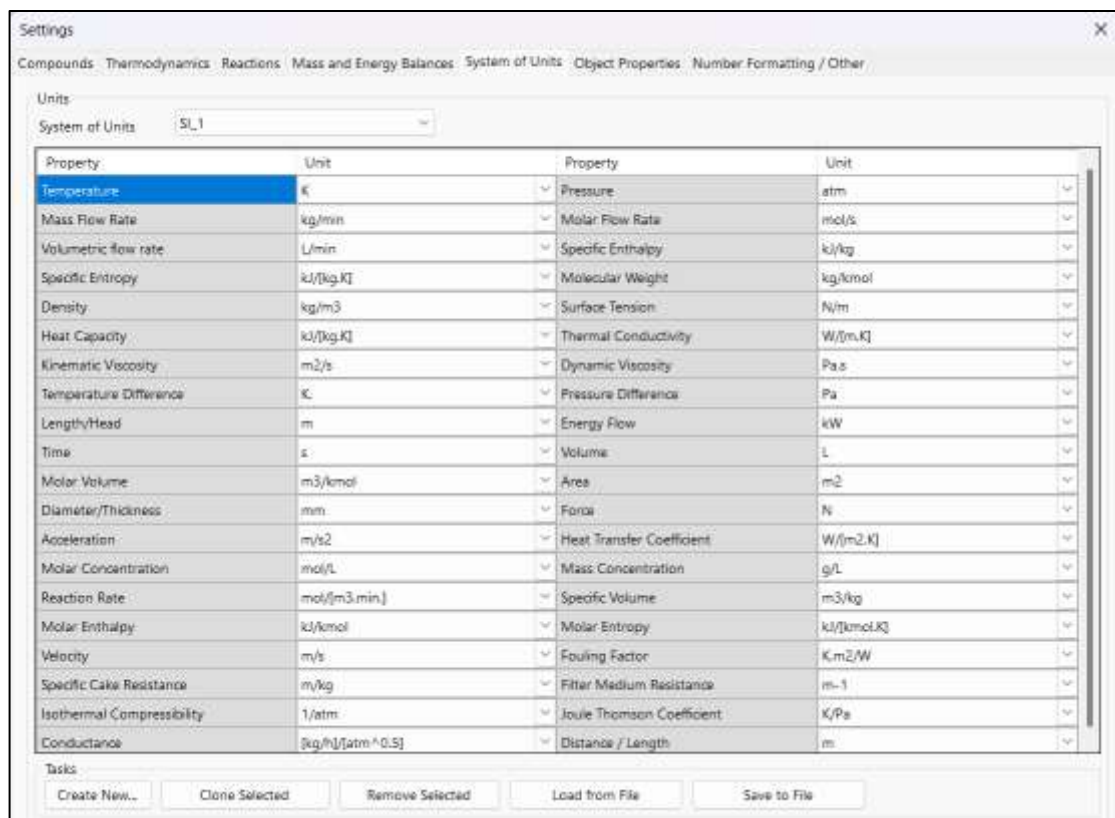
**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

Para la selección del paquete termodinámico se considera la Ilustración 8-3, donde el paquete termodinámico Chao Seader es más recomendada según el tipo de compuesto con el que se trabaja en la simulación



**Ilustración 10-3:** Panel de elección de paquete termodinámico en DWSIM

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.



**Ilustración 11-3:** Panel de definición de sistema de unidades

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

En la Ilustración 7-3 se describe la configuración de la cinética de reacción de hidrolisis de la sacarosa, siendo de tipo: reacción catalítica heterogénea, donde la cinética de la reacción es descrita en la ecuación (7) y las constantes son reemplazadas con los parámetros cinéticos descritos en la Tabla 4-3.

Heterogeneous Catalytic Reaction

Identification

Name: Hidrolisis de la sacarosa

Description: La reacción de hidrolisis de la sacarosa obedece al modelo cinético de Michaelis – Menten, que a concentraciones elevadas de sustrato ([S] >> kM) la velocidad de reacción es independiente del sustrato, por lo que es un proceso cinético de orden cero. Los valores de los parámetros cinéticos de la reacción son constantes y específicos. Dado

Components and Stoichiometry

Name	Molar Weight	$\Delta H_f$ (kJ/kg)	Include	BC	SC
Sucrose	342,3	-5601,6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	-1
Glucose	180,16	-5745	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1
Fructose	180,16	-5865,69	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	1
Water	18,0153	-13422,7	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	-1

Stoichiometry: OK Balance Heat of Reaction (kJ/kmol\_BC) 67459

Equation:  $C_{12}H_{22}O_{11} + HOH \leftrightarrow C_6H_{12}O_6 + C_6H_{12}O_6$  Base Component: Sucrose

Heterogeneous Kinetic Reaction Parameters

Basis: Molar Concentrations Phase: Liquid Tmin (K) 290 Tmax (K) 2000

Kinetics Specification:  Simple  Advanced Python Script  Help

Reaction Rate (Base Component) = Numerator / Denominator

Numerator:  $(1.05 \cdot 10^8) \cdot \exp(-9483.3 / (1.987207 \cdot T)) \cdot \exp(-2.49 \cdot 10^4) \cdot \exp(-62995.5 / (1.987207 \cdot T)) \cdot 960$

Denominator: 1

Expression Variables: Temperature (T) in K, reactant amounts (R1, R2, ..., Rn) and product amounts (P1, P2, ..., Pn) in the selected amount unit, reaction rate (r) in the selected velocity unit.

Amount Units: mol/m<sup>3</sup> Rate Units: mol/[kg.min.]

Use '.' as the decimal separator on math expressions.

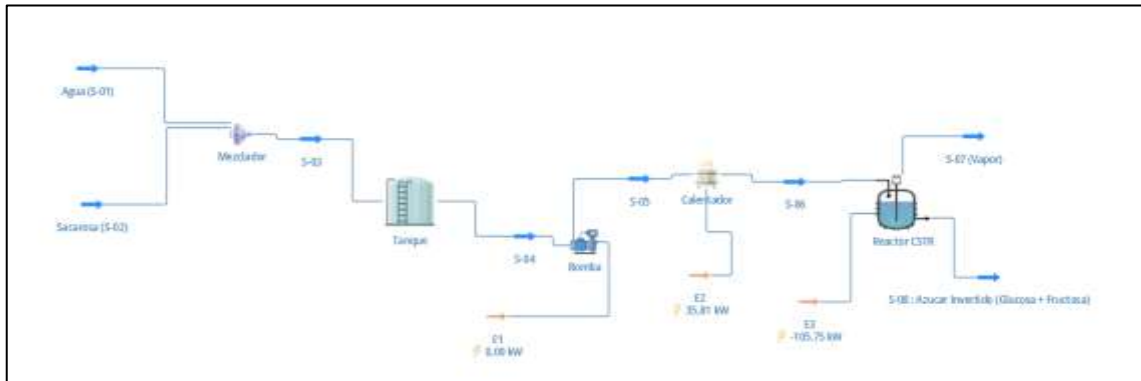
Cancel OK

**Ilustración 12-3:** Panel de configuración de cinética de reacción de la hidrolisis de la sacarosa

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

### 3.4.1 Diseño del flowsheet

Para el diagrama de producción de azúcar invertido se basa en un estudio de diseño para la producción industrial, siendo el mismo aplicado para el desarrollo de la simulación en DWSIM.



**Ilustración 13-3:** Diagrama de producción de Azúcar Invertido

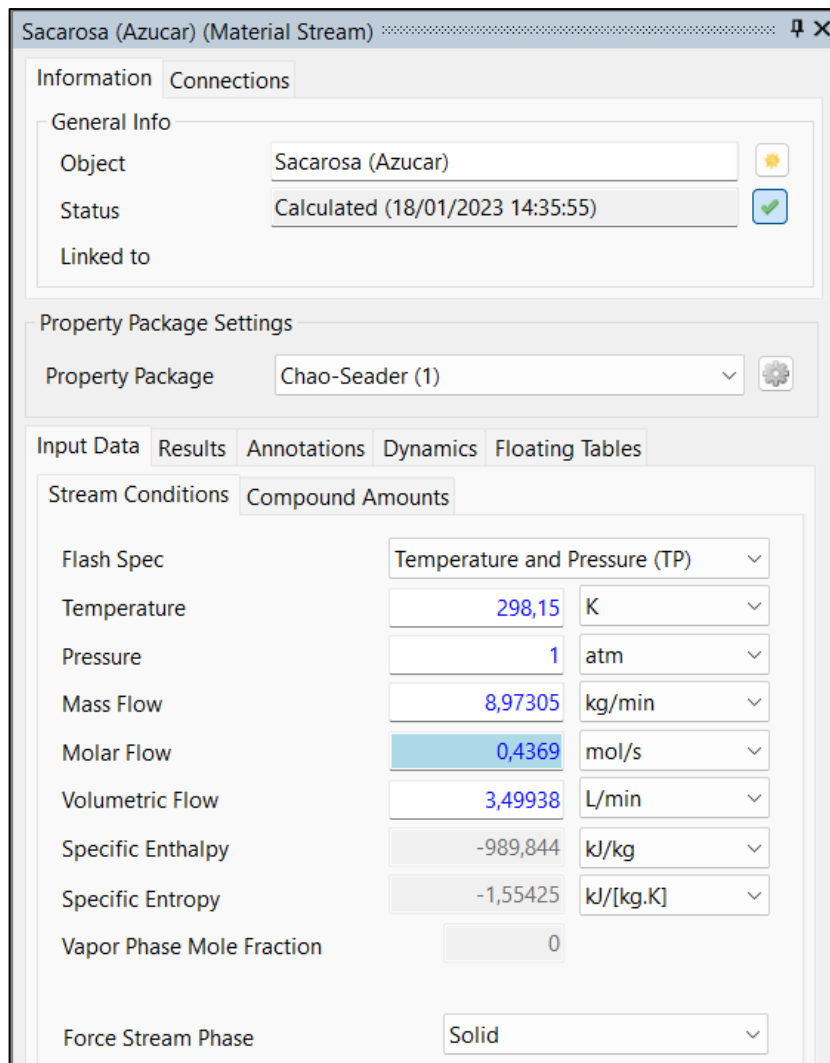
**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

### 3.4.2 Descripción del flowsheet

Como se muestra en la Ilustración 8-3, se mezclan dos corrientes de alimentación que son: sacarosa (S-02) y agua (S-01), estas ingresan a un mezclador para posteriormente ingresar a un tanque donde se almacena y distribuye la mezcla homogénea, luego una bomba transporta la mezcla desde el tanque hacia un calentador donde este dará tratamiento térmico a la mezcla para el posterior ingreso al reactor CSTR que será el que se encargará de dar a lugar la reacción de hidrólisis y se obtiene como productos vapor y la mezcla de glucosa y fructosa (Azúcar Invertido).

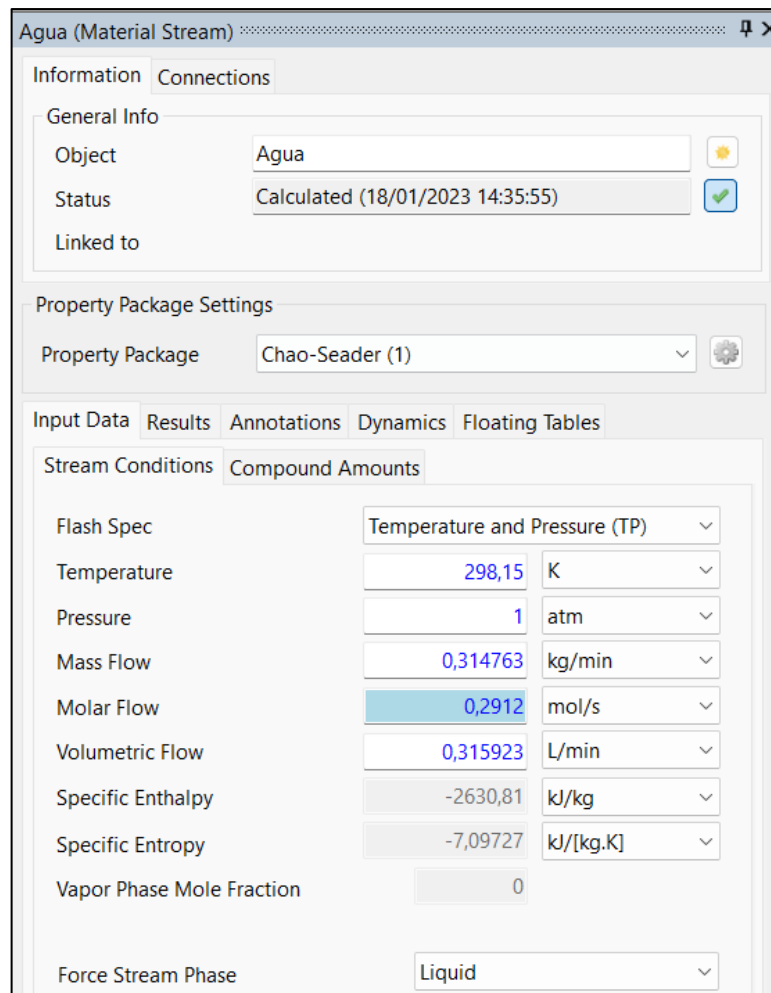
### 3.4.3 Configuración de los flujos de entrada

Posterior al diseño del flowsheet y a las configuraciones de las reacciones se especifica las condiciones de operabilidad de los componentes, como entradas (S-01 y S-0.2), calentador, tanque, bomba y reactor (CSTR).



**Ilustración 14-3:** Panel de configuración de entrada de la sacarosa

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.



**Ilustración 15-3:** Panel de configuración de entrada de agua

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

#### 3.4.4 Configuración del reactor CSTR

Las condiciones de operación del reactor se basan en el diseño de reactor antes descrito en la **Sección 3.3.3:** Diseño del reactor, donde se define el volumen de control a la cual opera el proceso, a su vez la reacción empleada se describe en la Ilustración 8-3, siendo de opera en un estado isotérmico el calentador será quien provea el precalentamiento de la mezcla. La cantidad de catalizador es parte del estudio derivando de la cantidad necesaria de catalizador para que la conversión de la reacción sea la mayor.

Reactor CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR))

**General Info**

Object: Reactor CSTR

Status: Calculated (18/01/2023 21:50:10)

Linked to:

**Connections**

Inlet Stream: 11

Outlet Stream 1: Azucar Invertido (Glucosa + Fructos)

Outlet Stream 2: Vapor

Energy Stream: E3

**Calculation Parameters**

Reaction Set: Activación enzimática

Calculation Mode: Isothermic

Outlet Temperature: 333 K

Reactor Volume: 650 L

Headspace: 150 L

Reactor Pressure Drop: 0 Pa

Catalyst Amount: 0,41 kg

**Results**

General | Reactions | Conversions

Property	Value	Units
Temperature Difference	0	K.
Heat Load	-52,3747	kW
Liquid residence time	6,18861E+06	s
Vapor residence time	0	s

**Property Package Settings**

Property Package: Chao-Seader (1)

**Ilustración 16-3:** Panel de configuración del biorreactor CSTR

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.



### 3.4.5 Configuración del calentador

Calentador (Heater)

General Info

Object: Calentador

Status: Calculated (18/01/2023 21:48:25) ✓

Linked to:

Connections

Inlet Stream: C3

Outlet Stream: 11

Energy Stream (Primary): E2

Energy Stream (Secondary):

Calculation Parameters

Calculation Type: Outlet Temperature

Pressure Drop: 0 Pa

Efficiency (0-100%): 90

Outlet Temperature: 333 K

Temperature Change: 92,9978 K

Outlet Vapor Fraction: 0

Heating/Cooling: 23,836 kW

Property Package Settings

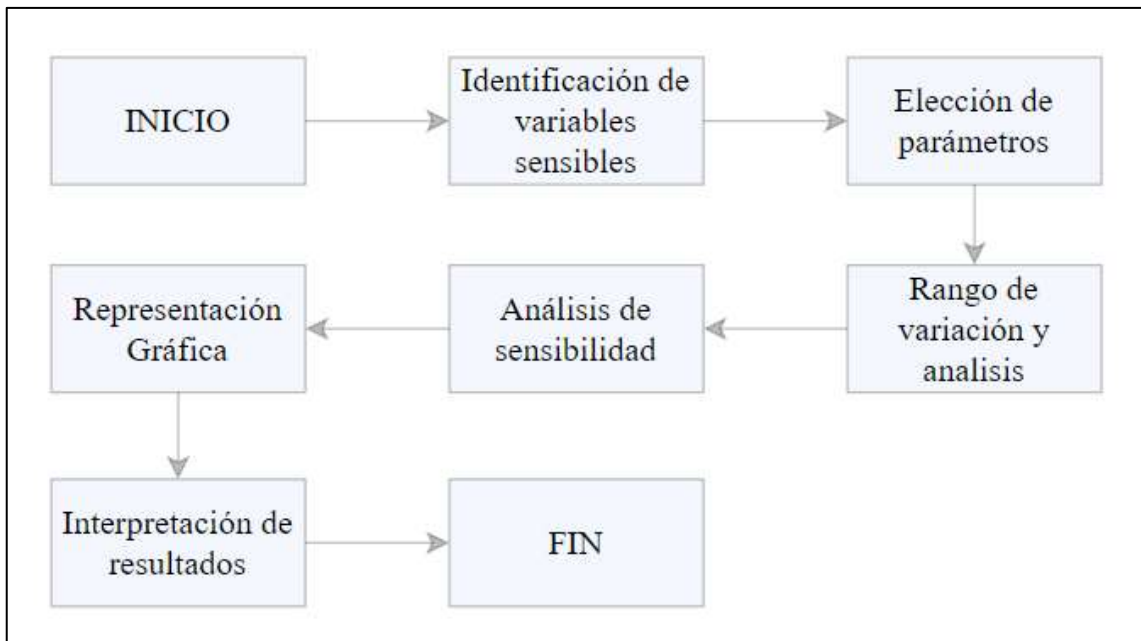
Property Package: Chao-Seader (1)

**Ilustración 17-3:** Panel de configuración del calentador

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

### 3.5 Análisis de sensibilidad

#### 3.5.1 Procedimiento para el análisis de sensibilidad



**Ilustración 18-3:** Desarrollo del análisis de sensibilidad

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

En el desarrollo del análisis de sensibilidad se debe considerar las variables que influyen en el proceso y afectan en la obtención de los productos esperados, por ello considerar las propiedades tanto químicas como físicas son de suma importancia para el estudio del proceso. Para el proceso estudiado se toma como consideración especial la concentración del sustrato (Sacarosa), cantidad de biocatalizador, la temperatura y la presión que se da en el proceso.

**Tabla 13-3:** Definición de variables del análisis de sensibilidad

<b>Variables Independientes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Variables Dependientes</b>	<b>Unidades</b>	<b>Repeticiones</b>	<b>Rango de variación</b>
Cantidad de catalizador	Kg	Conversión del sustrato	%	6	0.05 – 0.5
Concentración del sustrato (Fracción molar)	-	Conversión del sustrato	%	9	0.3 – 0.8
Temperatura	K	Conversión del sustrato	%	50	280 - 400
Presión	atm	Conversión del sustrato	%	20	0 - 5

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

Se aplican diversos métodos para la obtención de datos ya sea forma manual o automáticamente, según el programa permita dicha funcionalidad, por ellos se define los rangos de operación y repeticiones que se adecuan a cada caso.

**Tabla 14-3:** Parámetros del análisis de sensibilidad

<b>Número de análisis</b>	<b>Biocatalizador (g)</b>	<b>Variación de concentración del sustrato (Fracción molar)</b>	<b>Variación de temperatura (K)</b>	<b>Variación de la presión (atm)</b>
A_1	50	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3
A_2	100	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3
A_3	200	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3
A_4	300	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3
A_5	400	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3
A_6	500	0.4 – 0.8	300 - 350	1 - 3

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

### 3.6 Tratamiento de datos

Al terminar con la simulación, análisis de sensibilidad se procede a validar los datos obtenidos de la simulación con el estudio de referencia de donde se obtuvo la información, posteriormente se evalúa los resultados dando una interpretación de estos.

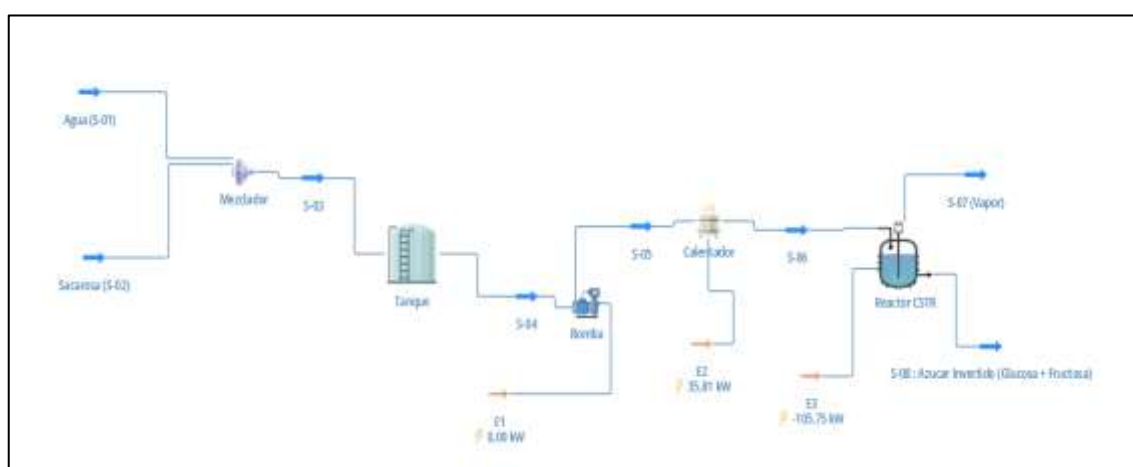
## CAPÍTULO IV

### 4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

#### 4.1 Resultados de la simulación en DWSIM

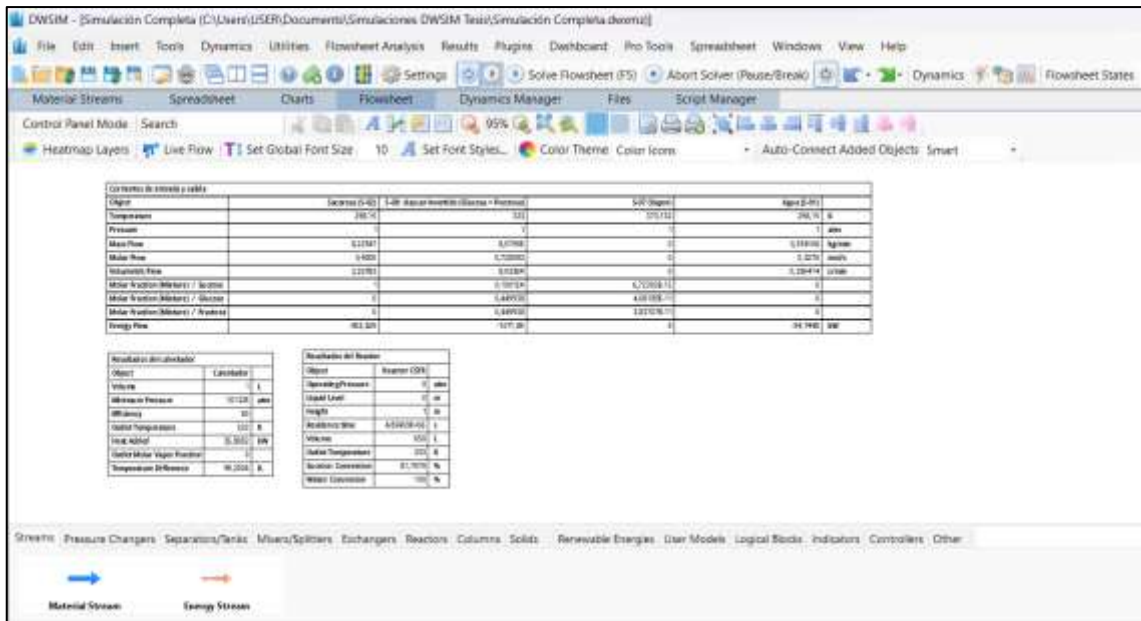
En la Ilustración 1-4 se indica la simulación finalizada del proceso de la producción del azúcar invertido por invertasa inmovilizada, ejecutada en DWSIM.

Donde se aprecian modificaciones en la estructura de la línea de producción, ya que en estudios anteriores solo se consideraba el diseño del reactor y la reacción que daba en el mismo, que al no poseer datos específicos de una línea de producción se desarrolló un planteamiento de su desarrollo. Es por esta razón que se empleó datos que el simulador da por defecto en los componentes.



**Ilustración 19-4:** Simulación finalizada del proceso de obtención de azúcar invertido

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.



**Ilustración 20-4:** Resultados obtenidos de la simulación

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

Los resultados obtenidos en la simulación están contenidos en la Tabla 1-4:

**Tabla 15-4:** Resultados de las corrientes de la simulación

<b>Flujos</b>	<b>S-01</b>	<b>S-02</b>	<b>S-03</b>	<b>S-04</b>	<b>S-05</b>	<b>S-06</b>	<b>S-07</b>	<b>S-08</b>	<b>Unidades</b>
<b>Propiedades</b>									
Temperatura	298.1 5	298.1 5	233.7 9	233.7 6	233.7 6	333	373.13	333	K
Presión	1	1	1	1	1	1	1	1	atm
Flujo molar	0.400 5	0.327 6	0.728 1	0.728 1	0.728 1	0.728 1	0	0.728 0	Mol/seg
Fracción molar (Sacarosa)	1	0	0.55	0.55	0.55	0.55	0	0.100 1	-
Fracción molar (Agua)	0	1	0.45	0.45	0.45	0.45	6.72*10 <sup>-12</sup>	-	-
Fracción molar (Mezcla)/Fructosa	0	0	0	0	0	0	4.08*10 <sup>-11</sup>	0.449	-
Fracción molar (Mezcla)/Glucosa	0	0	0	0	0	0	3.38*10 <sup>-11</sup>	0.449	-

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

**Tabla 16-4:** Resultado de la simulación en el biorreactor CSTR

Propiedad	Reactor	Unidad
Presión de operación	1	atm
Tiempo de residencia	489538	S
Volumen Total	650	L
Volumen Libre	150	L
Volumen de trabajo	500	L
Temperatura de salida	333	K
Conversión de la sacarosa	85.17	%
Conversión del agua	99.99	%

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

## 4.2 Validación de resultados de la simulación

Luego de obtener los resultados mediante la simulación en DWIM, es importante realizar una validación de los resultados con una fuente bibliográfica de alto impacto por su nivel de confiabilidad, mediante un método comparativo se aplica una fórmula de porcentaje de error. El artículo científico empleado para la validación de resultados fue realizado por Martínez et al., (2017, pp. 39-42).

Para la validación de los resultados se considera la conversión de la sacarosa en el reactor, por lo que se consideró las condiciones dadas por el autor para la validación.

**Fórmula:** Error porcentual

$$E(\%) = \left| \frac{V_{Autor} - V_{DWSIM}}{V_{Autor}} \right| * 100 \%$$

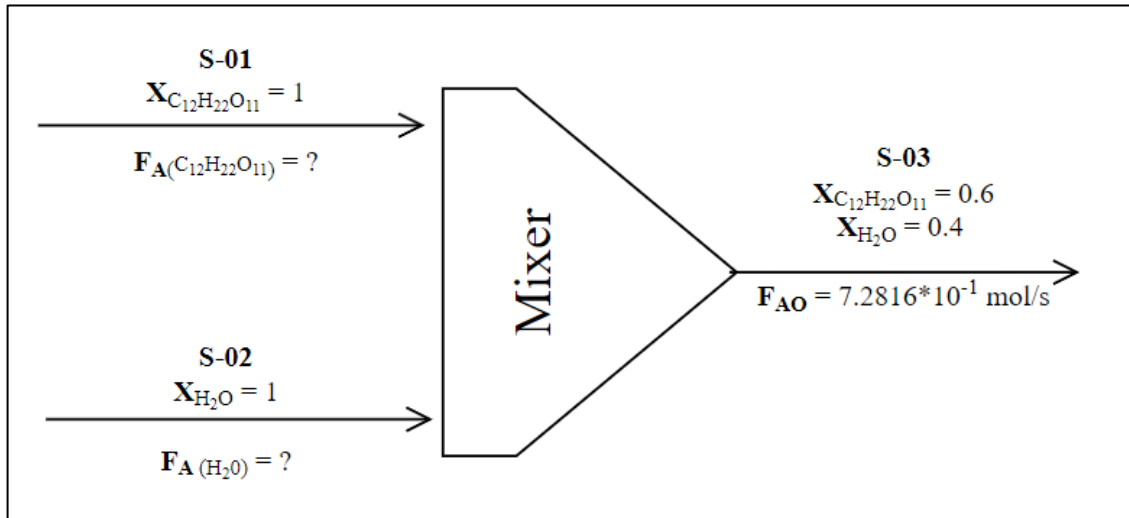
**Tabla 17-4:** Validación de la simulación en DWSIM

Variable	Detalle	Unidades	DWSIM	Martínez et al., (2017, pp. 39-42)	Error
Reactor tanque agitado CSTR	Conversión: Sucrose (sacarosa)	%	85.17	84.02	1.368

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

### 4.3 Balance de masa del sistema

#### 4.3.1 Balance de masa en el mezclador



**Ilustración 21-4:** Diagrama de balance de masa en el mezclador

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

- **Balance General de masa del mezclador**

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida}$$

$$S - 01 + S - 02 = S - 03$$

$$X_{S-01}(S - 01) + X_{S-02}(S - 02) = X_{S-03}(S - 03)$$

Donde:

S-01 = Flujo molar de entrada de la sacarosa

S-02 = Flujo molar de entrada del agua

S-03 = Flujo molar de salida del mezclador

$X_{S-01}$  = Fracción molar de sacarosa

$X_{S-02}$  = Fracción molar del agua

$X_{S-03}$  = Fracción molar de salida del mezclador

- **Balance de masa de la sacarosa**

$$X_{S-01} = 0.55$$

$$X_{S-01}(S - 01) + 0(S - 02) = X_{S-03}(S - 03)$$

$$X_{S-01}(S - 01) = X_{S-03}(S - 03)$$

$$S - 01 = \frac{(S - 03)X_{S-03}}{X_{S-01}}$$

$$S - 01 = \frac{(43.69 \frac{mol}{min}) * 0.55}{1}$$

$$S - 01 = 24.029 \frac{mol}{min}$$

$$S - 01 = 0.400 \frac{mol}{s}$$

- **Balance de masa del agua**

$$X_{S-02} = 0.45$$

$$0(S - 01) + X_{S-02}(S - 02) = X_{S-03}(S - 03)$$

$$X_{S-02}(S - 02) = X_{S-03}(S - 03)$$

$$S - 02 = \frac{(S - 03)X_{S-03}}{X_{S-02}}$$

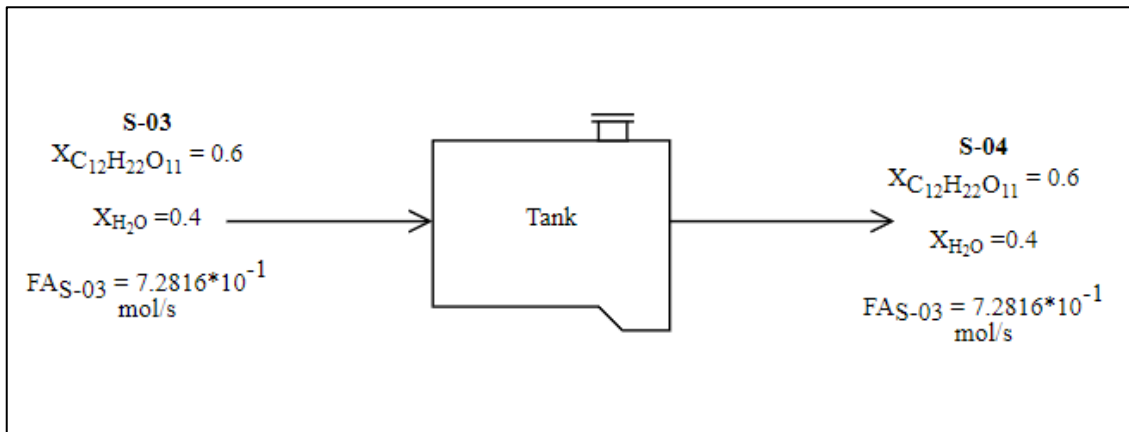
$$S - 02 = \frac{(43.69 \frac{mol}{min}) * 0.45}{1}$$

$$S - 02 = 19.660 \frac{mol}{min}$$

$$S - 02 = 0.327 \frac{mol}{s}$$



### 4.3.2 Balance de masa en el tanque



**Ilustración 22-4:** Diagrama de balance de masa en el tanque

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

$$\textit{Entrada} = \textit{Salida}$$

$$S - 03 = S - 04$$

$$X_{S-03}(S - 03) = X_{S-04}(S - 04)$$

Donde:

S-03 = Flujo molar de entrada

S-04 = Flujo molar de salida

$X_{S-03}$  = Fracción molar de entrada

$X_{S-04}$  = Fracción molar de salida

- **Balance de masa de la sacarosa**

$$X_{S-03} = 0.55$$

$$X_{S-03}(S - 03) = X_{S-04}(S - 04)$$

$$0.55(7.2816 \cdot 10^{-1}) = 0.55(7.2816 \cdot 10^{-1})$$

$$0.400 \frac{\text{mol}}{\text{s}} = 0.400 \frac{\text{mol}}{\text{s}}$$

- **Balance de masa del agua**

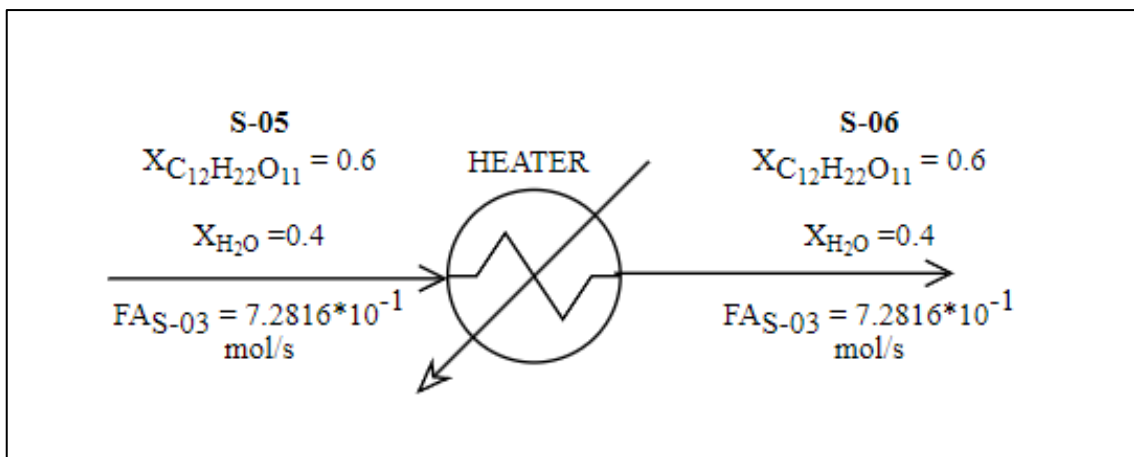
$$X_{S-03} = 0.45$$

$$X_{S-03}(S - 03) = X_{S-04}(S - 04)$$

$$0.45(7.2816 * 10^{-1}) = 0.45(7.2816 * 10^{-1})$$

$$0.327 \frac{mol}{s} = 0.327 \frac{mol}{s}$$

#### 4.3.3 Balance de masa del calentador



**Ilustración 23-4:** Diagrama de balance de masa en el calentador

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$S - 05 = S - 06$$

$$X_{S-05}(S - 05) = X_{S-06}(S - 06)$$

Donde:

S-05 = Flujo molar de entrada

S-06 = Flujo molar de salida

$X_{S-05}$  = Fracción molar de entrada

$X_{S-06}$  = Fracción molar de salida

- **Balance de masa de la sacarosa**

$$X_{S-05} = 0.55$$

$$X_{S-05}(S - 05) = X_{S-06}(S - 06)$$

$$0.55(7.2816 * 10^{-1}) = 0.55(7.2816 * 10^{-1})$$

$$0.400 \frac{mol}{s} = 0.400 \frac{mol}{s}$$

- **Balance de masa del agua**

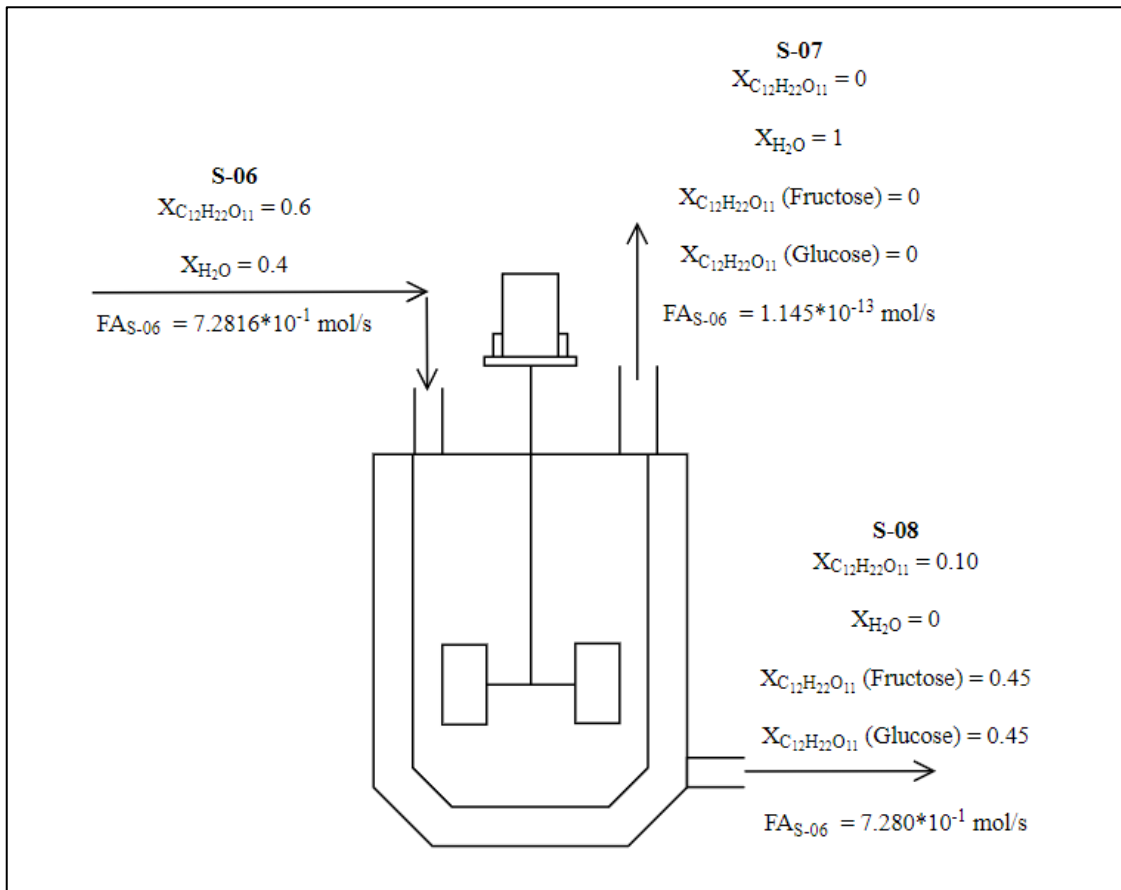
$$X_{S-05} = 0.45$$

$$X_{S-05}(S - 05) = X_{S-06}(S - 06)$$

$$0.45(7.2816 * 10^{-1}) = 0.45(7.2816 * 10^{-1})$$

$$0.327 \frac{mol}{s} = 0.327 \frac{mol}{s}$$

#### 4.3.4 Balance de masa del reactor

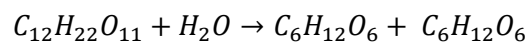


**Ilustración 24-4:** Diagrama de balance de masa del biorreactor CSTR

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

El balance de masa para un producto ya sea fructosa o glucosa son iguales, debido a que son equimolares en la reacción, es por esta razón que se centrara el cálculo para uno de ellos para evitar cálculos innecesarios.

- **Reacción Química**



$$7.2816 \cdot 10^{-1} \frac{\text{mol}}{\text{s}} (0.55) \times \frac{1 \frac{\text{mol sacarosa}}{\text{s}}}{1 \frac{\text{mol fructosa}}{\text{s}}} = 0.400 \frac{\text{mol fructosa}}{\text{s}}$$

$$\text{Entrada} = \text{Salida}$$

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Generación} - \text{Consumo}$$

- **Balance de masa para la fructosa**

$$S - 08 = Fructosa_{producido} + (S - 06)X_{S-06}$$

$$S - 08 = 0.400 \frac{mol}{s} + (7.2816 * 10^{-1})0.049$$

$$S - 08 = 0.364 \frac{mol}{s}$$

#### **4.4. Resultados del análisis de sensibilidad**

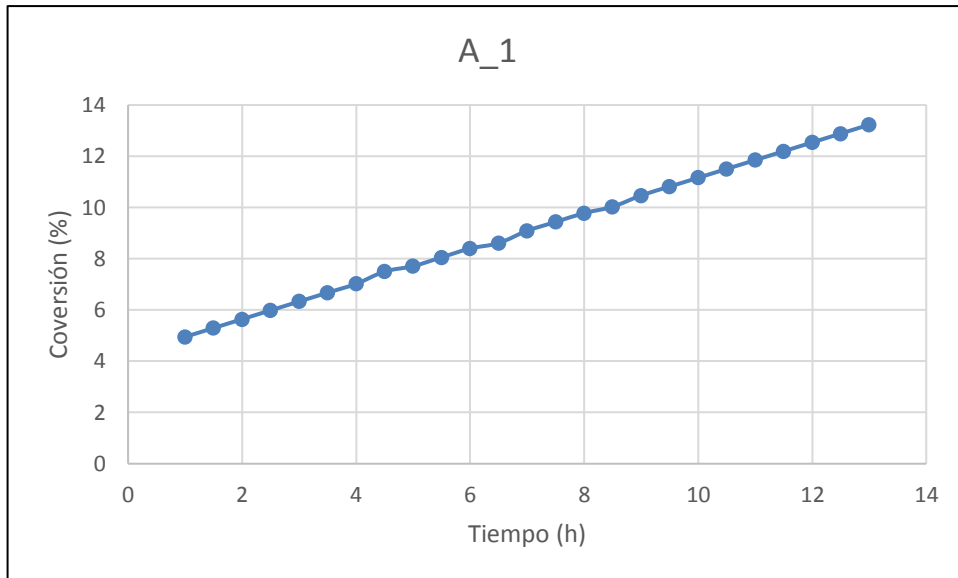
En el análisis de sensibilidad se estudió las variables críticas que afectan directamente en el proceso, con el fin de analizar el efecto que tienen en las variables dependientes, siendo la conversión de la sacarosa en el biorreactor CSTR la variable crítica que determina la eficiencia del proceso. Las variables independientes, rangos empleados y repeticiones fueron propuestos en la Tabla 14-3.

##### **4.4.1. Variación de la cantidad de biocatalizador**

La variación de la cantidad del biocatalizador es una variable independiente que nos proporciona información de cómo afecta está directamente en el proceso, siendo que la cantidad que entra en contacto con el biocatalizador es la que resulta en el producto esperado. Los rangos especificados para este análisis fueron de 0.05 Kg a 0.5 Kg de biocatalizador, siendo el tiempo la variable dependiente donde se aprecia tiempo de reacción en que dio la conversión de la sacarosa en un plazo máximo de 14 horas.

##### **4.4.1.1. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-1**

En la Ilustración 7-4 se muestra los resultados de la simulación con un rango de análisis de 25 repeticiones y una carga inicial de biocatalizador de 0.05 kg, de donde se aprecia el tiempo de reacción hasta llegar a una conversión máxima del sustrato de 13.23 % en un tiempo de 13 horas, siendo una baja conversión teniendo en cuenta el tiempo; esto se debe a que 0.05 kg de biocatalizador no puede catalizar toda la cantidad de reactivos ingresados, por lo que gran parte de estos no reaccionan.

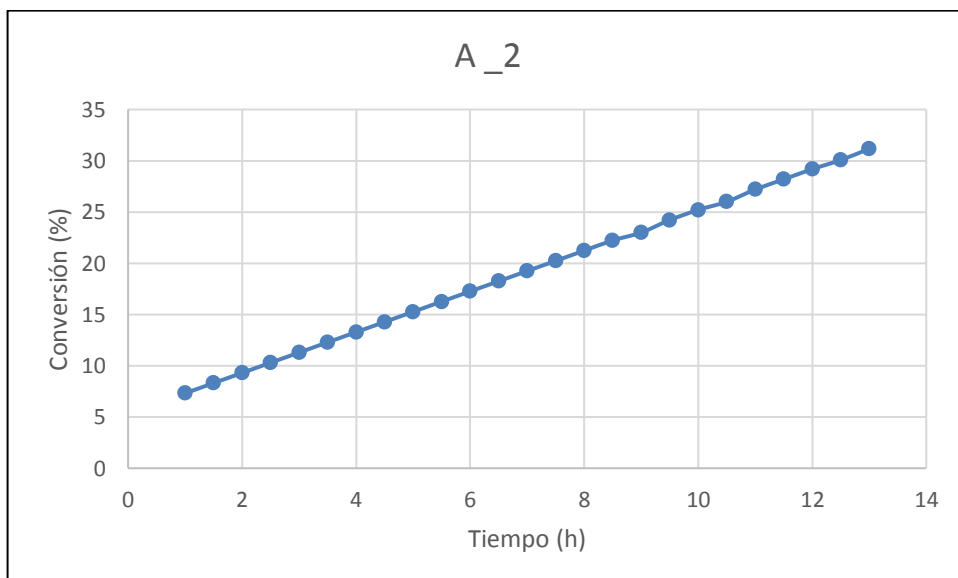


**Ilustración 25-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_1 (0.05 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.1.2. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-2

En la Ilustración 8-4 se muestra que la conversión del sustrato (sacarosa) aumenta proporcionalmente al aumento de la cantidad de carga de biocatalizador en el equipo, la conversión aumenta hasta un 31.17 % en un tiempo de 13 horas, incrementando un 18 % de conversión en el mismo rango de tiempo, pero sin alcanzar una alta efectividad en el proceso.

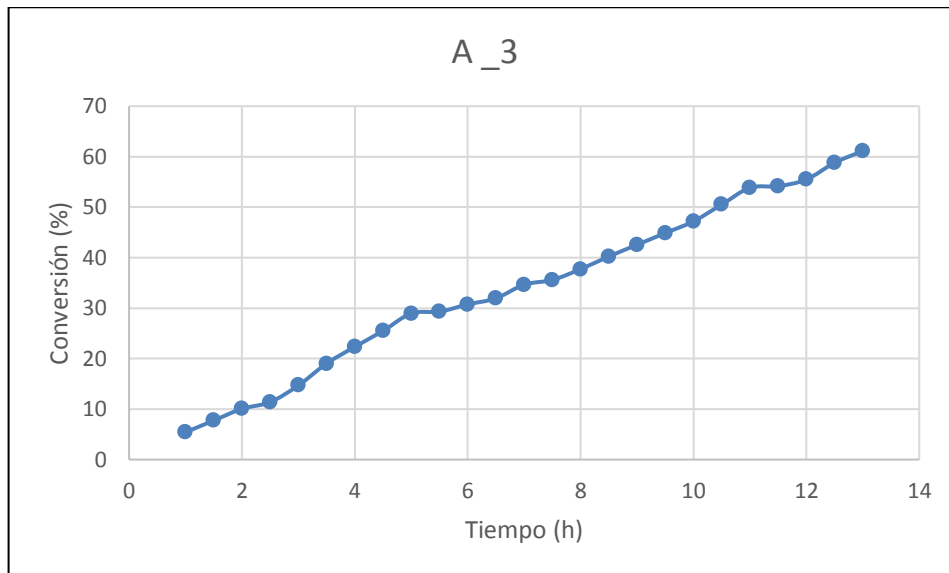


**Ilustración 26-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_2 (0.14 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.1.3. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A\_3

En la Ilustración 9-4 Se muestran los resultados de la prueba A\_3, donde la carga del biocatalizador aumentó hasta 0.23 Kg, lo que aumento la conversión del sustrato hasta un 61.12 % en un lapso de 13 horas siendo un incremento de casi el doble de la conversión versus a la anterior prueba con una menor carga de biocatalizador.

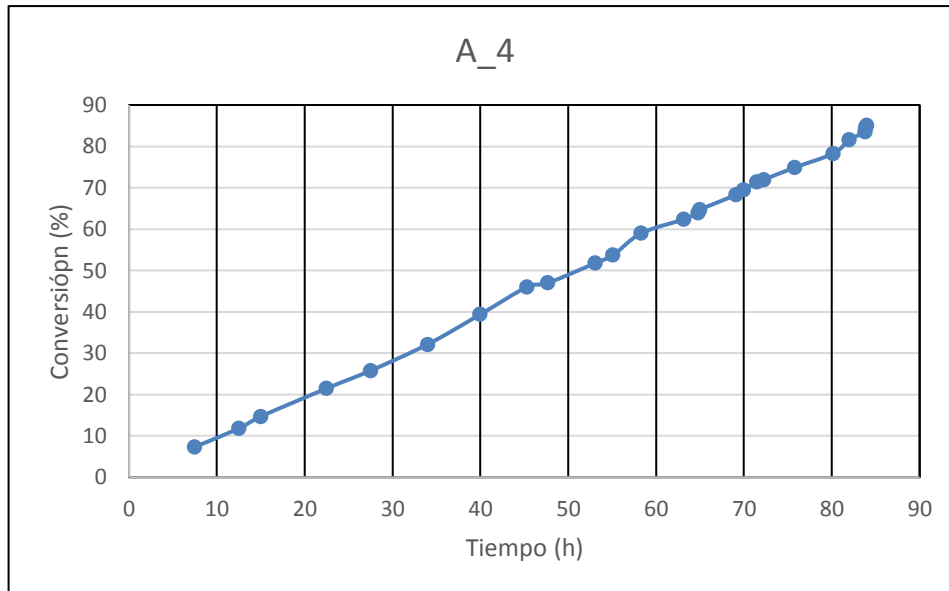


**Ilustración 27-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_3 (0.23 Kg)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.1.4. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-4

En el análisis A\_4 los resultados se encuentran representados en la Ilustración 10-4, donde se aprecia una conversión máxima de 83.81 % en un lapso de 13 horas, alcanzo la máxima conversión teórica del sustrato (sacarosa), donde se puede observar que los datos siguen una tendencia lineal de crecimiento según aumenta el tiempo.

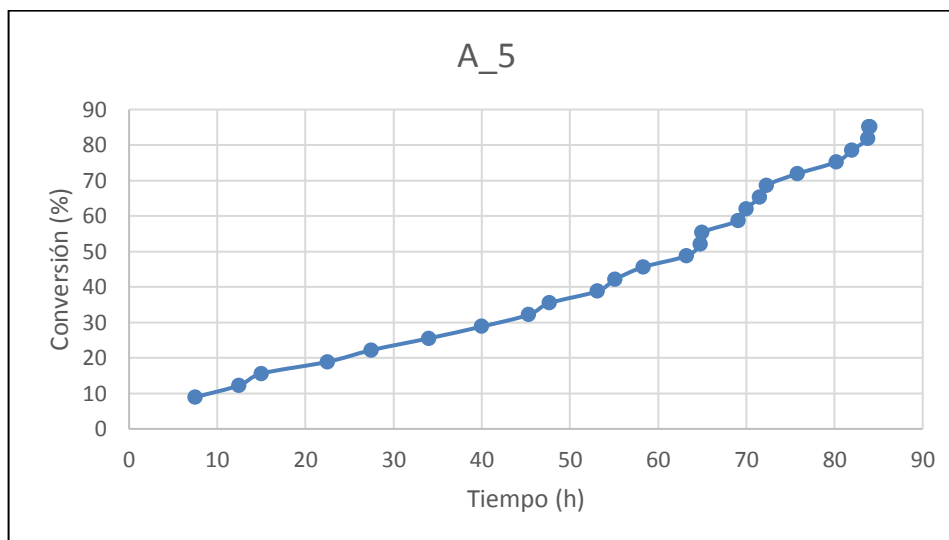


**Ilustración 28-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_4 (0.32 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.1.5. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-5

En la Ilustración 11-4 se aprecia los resultados de la reacción con una carga del biocatalizador en el equipo de 0.41 kg, indicándonos que su conversión máxima llega al 83.80 % en un tiempo de 13 horas.



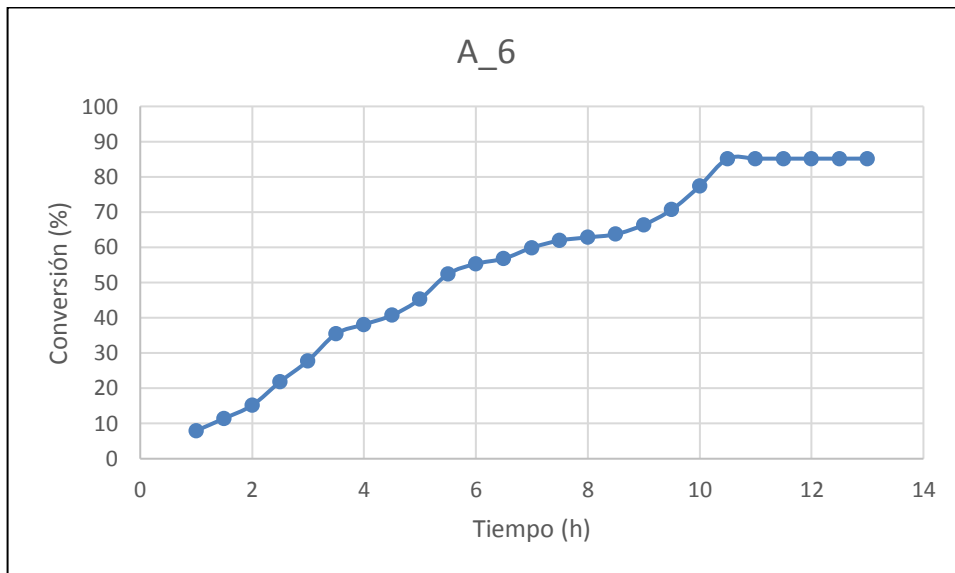
**Ilustración 29-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_5 (0.41 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.



#### 4.4.1.6. Resultado del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador A-6

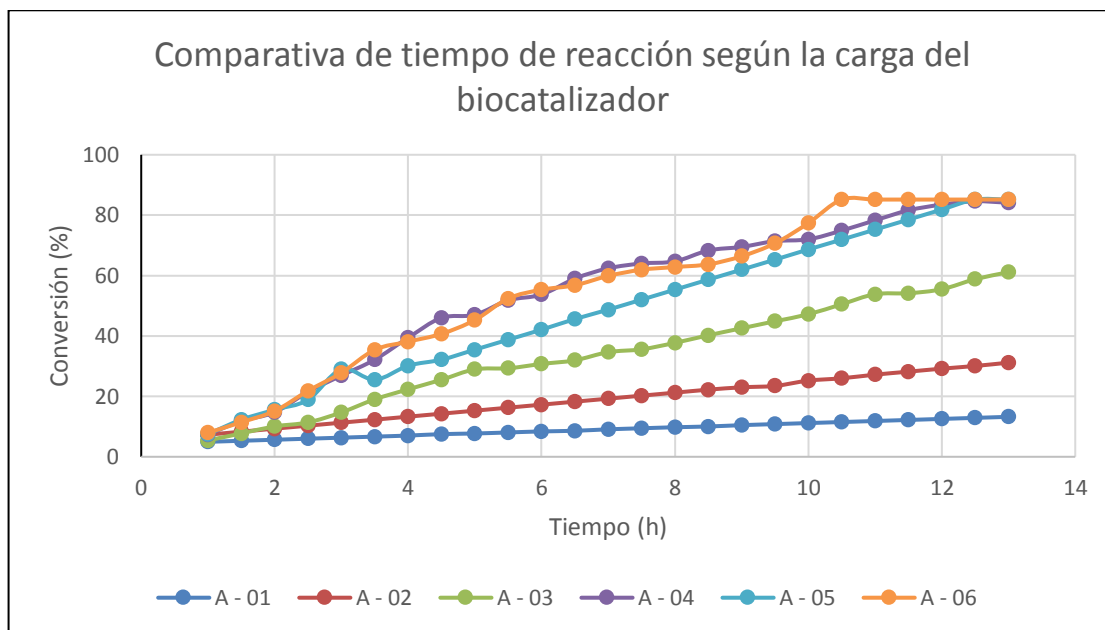
En la Ilustración 12-4 se puede apreciar los resultados de la prueba A\_6 donde se introdujo una carga del biocatalizador de 0.5 Kg en el biorreactor, obteniendo una conversión máxima del sustrato de 85.17 % en las 11 horas, posteriormente existe una estabilidad en la conversión debido a que ese es el punto máximo de la conversión y a partir de allí conversión se mantiene constante; esto supone que a partir de ese punto el incremento de la carga de biocatalizador no tendría efecto en la reacción, lo que se traduce como pérdida directa a la industria.



**Ilustración 30-4:** Resultados del análisis de tiempo de reacción A\_6 (0.5 Kg)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.1.7. Comparativa de resultados del análisis de variación de la cantidad de biocatalizador



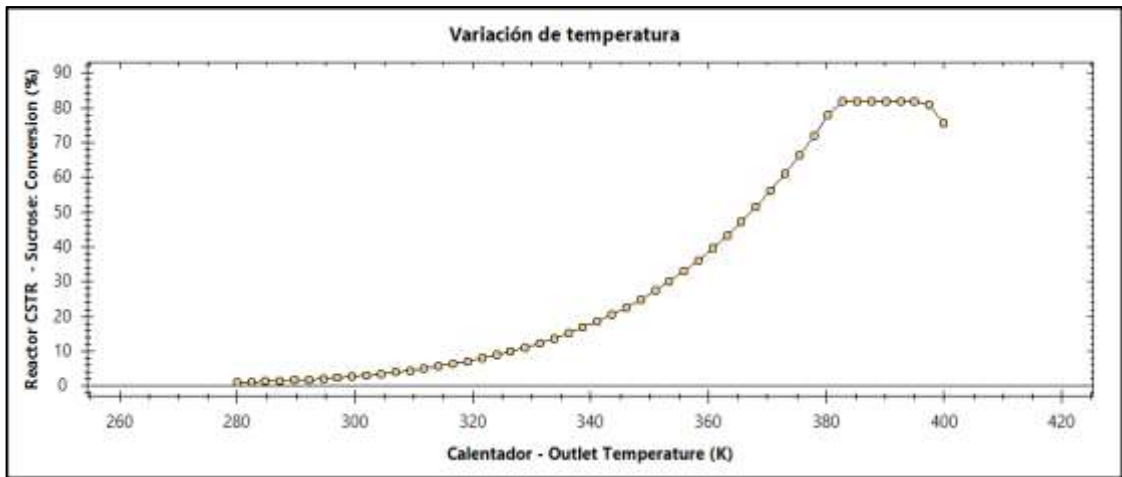
**Ilustración 31-4:** Comparativa entre resultados del efecto de la cantidad de carga de biocatalizador

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

#### 4.4.2. Efecto de la temperatura

##### 4.4.2.1. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-1

En la Ilustración 14-4 se puede observar los resultados del análisis A\_1 perteneciente a la variación de la temperatura, en el mismo se emplea una carga mínima de biocatalizador de 0.05 Kg y se varía la temperatura en un rango de 280 K a 400 K (7 °C – 127 °C), en la ilustración se puede apreciar como la conversión del sustrato aumenta de forma proporcional a la temperatura hasta los 382.85 K (109.85 °C) y se estabiliza hasta los 395.10 K (122.10 °C) y a partir de ese punto hay un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática, en donde el biocatalizador deja de tener efecto en la reacción.

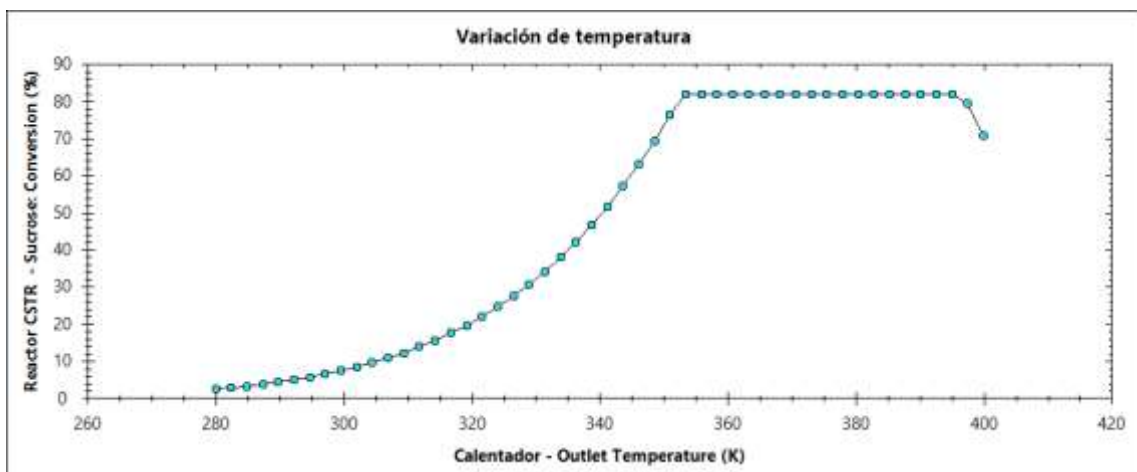


**Ilustración 32-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_1 (0.05 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

4.4.2.2. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-2

En la Ilustración 15-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_2 con una carga del biocatalizador de 0.14 Kg, en ella se observa un ascenso de la conversión del sustrato (sacarosa) según incrementa la temperatura hasta una temperatura de 353.46 K (80.46 °C) donde a partir de esa temperatura la conversión llega a su límite máximo y se estabiliza, siendo constante hasta los 395.10 K (122.10 °C) ya que posteriormente existe un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática.

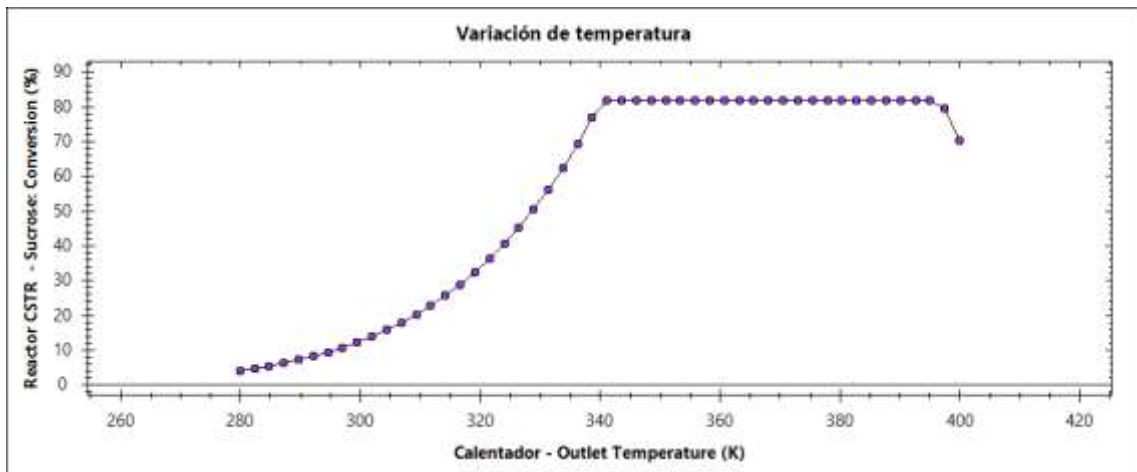


**Ilustración 33-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_2 (0.14 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.2.3. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-3

En la Ilustración 16-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_3 con una carga del biocatizador de 0.23 Kg, en ella se observa un ascenso de la conversión del sustrato (sacarosa) según incrementa la temperatura hasta una temperatura de 341.22 K (68.22 °C) donde a partir de esa temperatura la conversión llega a su límite máximo y se estabiliza, siendo constante hasta los 395.10 K (122.10 °C) ya que posteriormente existe un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática.

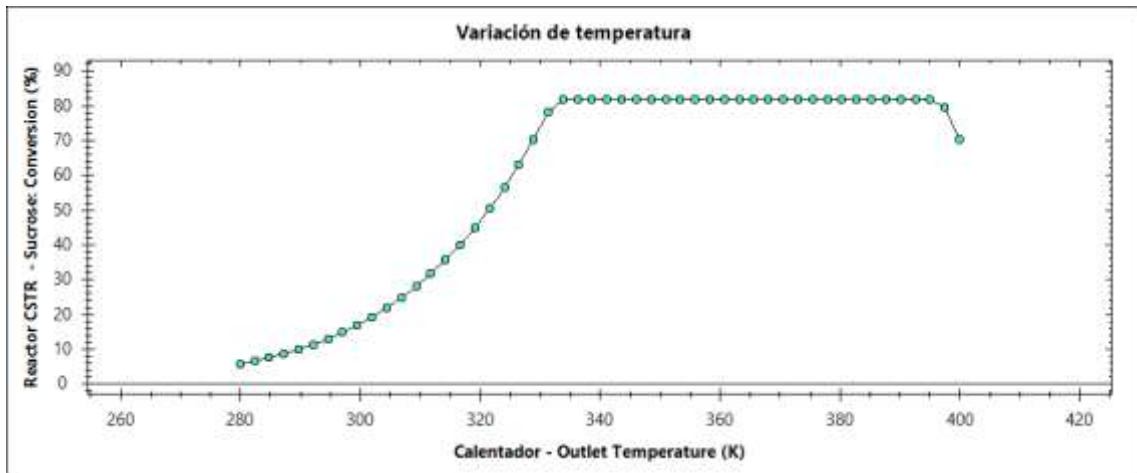


**Ilustración 34-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_3 (0.23 Kg)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.2.4. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-4

En la Ilustración 17-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_4 con una carga del biocatizador de 0.32 Kg, en ella se observa un ascenso de la conversión del sustrato (sacarosa) según incrementa la temperatura hasta una temperatura de 333.87 K (60.87 °C) donde a partir de esa temperatura la conversión llega a su límite máximo y se estabiliza, siendo constante hasta los 395.10 K (122.10 °C) ya que posteriormente existe un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática.

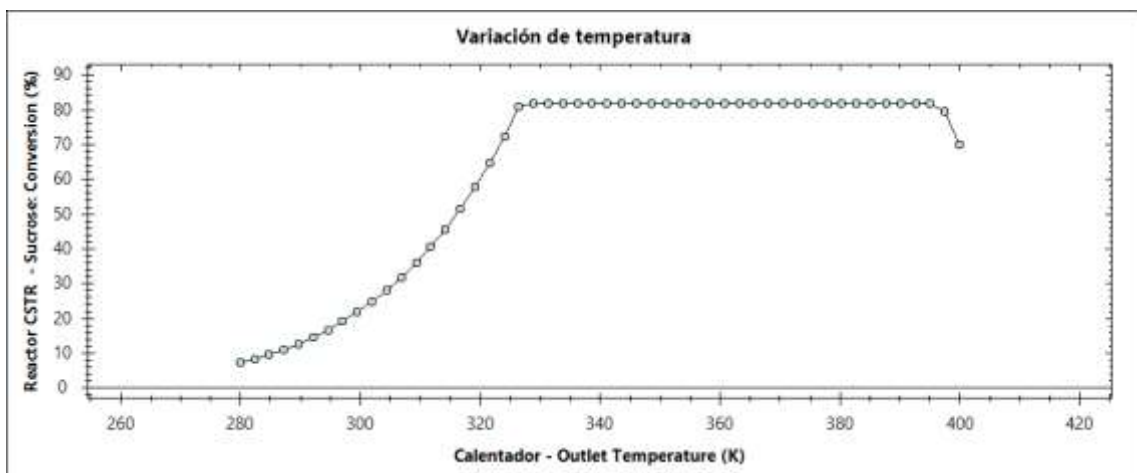


**Ilustración 35-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_4 (0.32 Kg)

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

4.4.2.5. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-5

En la Ilustración 18-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_5 con una carga del biocatalizador de 0.41 Kg, en ella se observa un ascenso de la conversión del sustrato (sacarosa) según incrementa la temperatura hasta una temperatura de 328.98 K (55.98 °C) donde a partir de esa temperatura la conversión llega a su límite máximo y se estabiliza, siendo constante hasta los 395.10 K (122.10 °C) ya que posteriormente existe un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática.

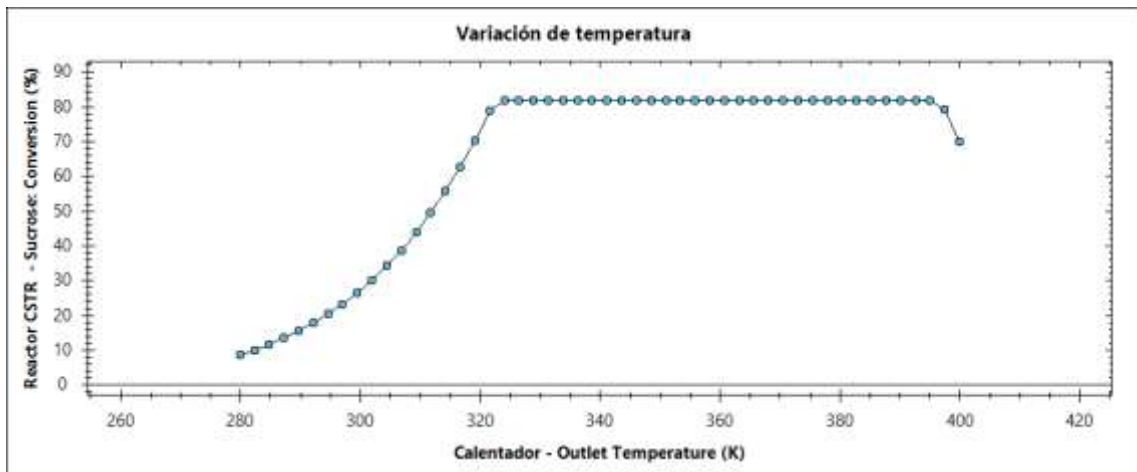


**Ilustración 36-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_5 (0.41 Kg)

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

#### 4.4.2.6. Resultado del análisis de variación de la temperatura A-6

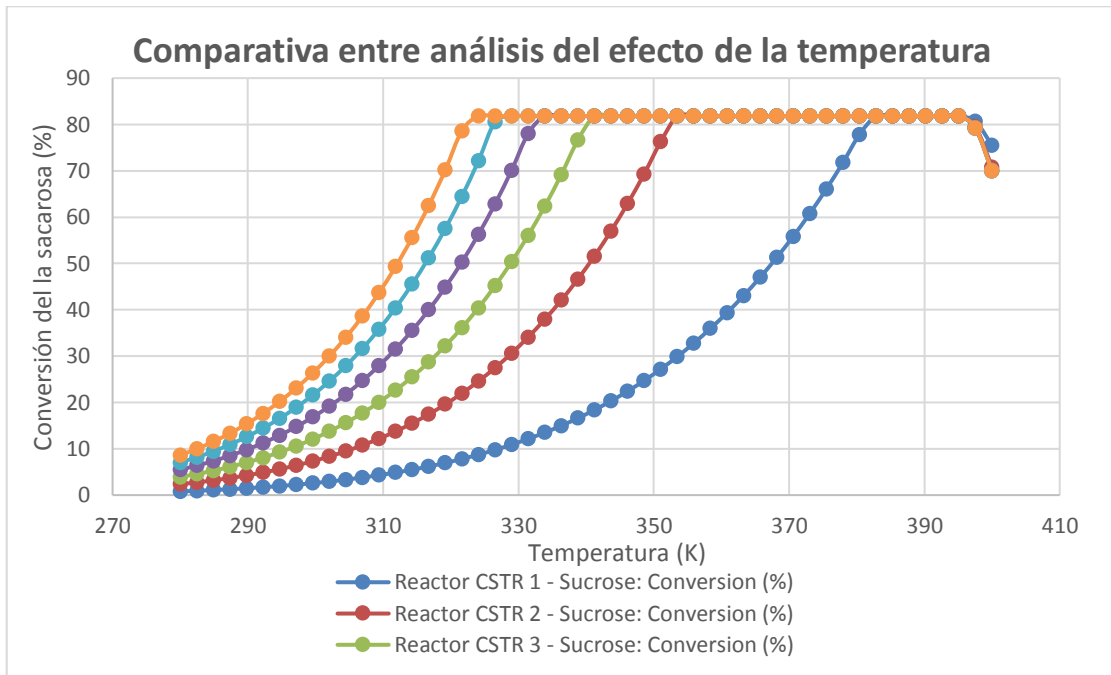
En la Ilustración 19-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_6 con una carga del biocatalizador de 0.5 Kg, en ella se observa un ascenso de la conversión del sustrato (sacarosa) según incrementa la temperatura hasta una temperatura de 324.08 K (51.08 °C) donde a partir de esa temperatura la conversión llega a su límite máximo y se estabiliza, siendo constante hasta los 395.10 K (122.10 °C) ya que posteriormente existe un descenso de la conversión debido al efecto de la inactivación enzimática.



**Ilustración 37-4:** Resultados del análisis del efecto de la temperatura A\_6 (0.5 Kg)

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.2.7. Comparativa de resultados del análisis de variación de la temperatura



**Ilustración 38-4:** Comparativa entre resultados del efecto de la temperatura

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

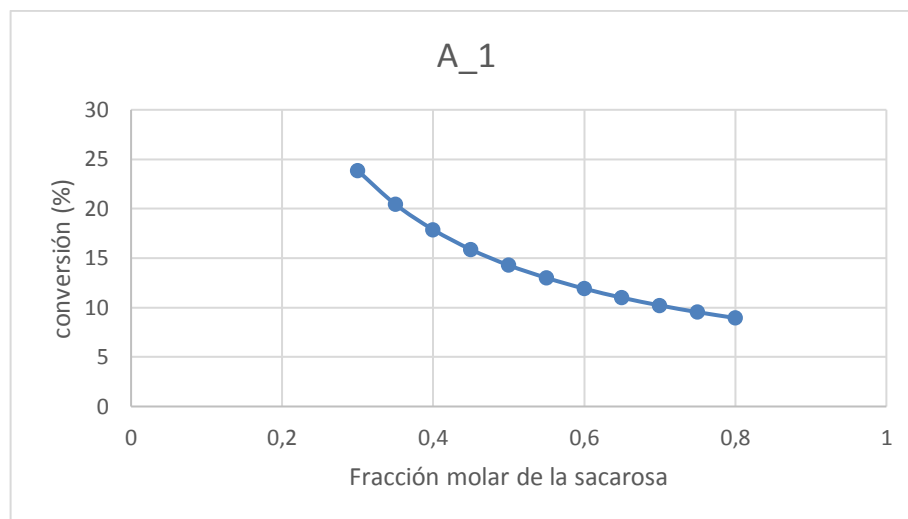
Al realizar una comparativa de cada una de las pruebas se puede analizar el efecto que tiene la temperatura en el proceso con una carga diferente de biocatalizador en el biorreactor siendo la carga del biocatalizador una variable crítica al buscar una alta eficiencia en el proceso, que se puede interpretar en la conversión del sustrato.

En la Ilustración 20-4 se observa como existe relación directa entre la carga del biocatalizador y la temperatura aumentado o disminuyendo la estabilidad de la misma ya que se aprecia que la prueba A\_1 tiene menor rango estabilidad térmica teniendo que alcanzar altas temperaturas que van desde los 382.85 K (109.85 °C) hasta los 395.10 K (122.10 °C) para alcanzar el punto máximo de conversión del sustrato, a diferencia de la prueba A\_6 donde el rango de estabilidad térmica se reduce considerablemente siendo el punto de inflexión a una temperatura de 324.08 K (51.08 °C) para alcanzar el punto máximo de conversión del sustrato, con esta información se puede deducir de una mayor carga de biocatalizador ofrece una mayor estabilidad térmica en el proceso, suponiendo un ahorro energético en la industria debido a que necesita menos recursos para llegar a un máximo punto de conversión del sustrato.

#### 4.4.3. Efecto de la concentración

##### 4.4.3.1. Resultado del análisis de variación de la concentración A\_1

En la Ilustración 21-4 se observa el efecto de la concentración inicial del sustrato frente a una carga determinada de biocatalizador; en la prueba A\_1 con una carga de 0.05 Kg muestra que hay una mínima conversión de 23.86 %, esto debido a la baja carga de biocatalizador.



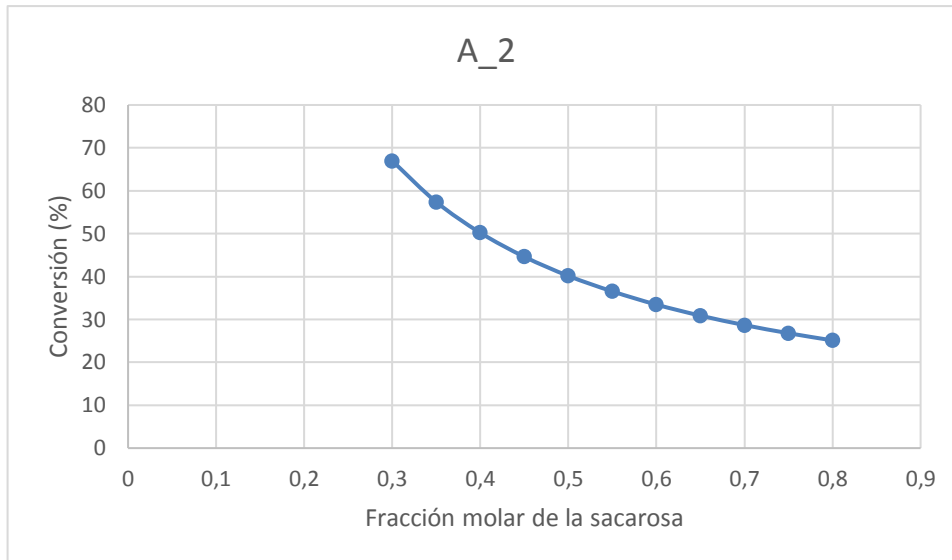
**Ilustración 39-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_1 (0.05 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

##### 4.4.3.2. Resultado del análisis de variación de la concentración A\_2

En la Ilustración 22-4 de la prueba A\_2 se observa la una carga del 0.14 Kg de biocatalizador, donde se puede apreciar que a una baja fracción molar hay aumento de la conversión del sustrato, pero al mismo tiempo existiendo una baja conversión del agua, dando una baja eficiencia al producir bajas concentraciones de fructosa y glucosa.

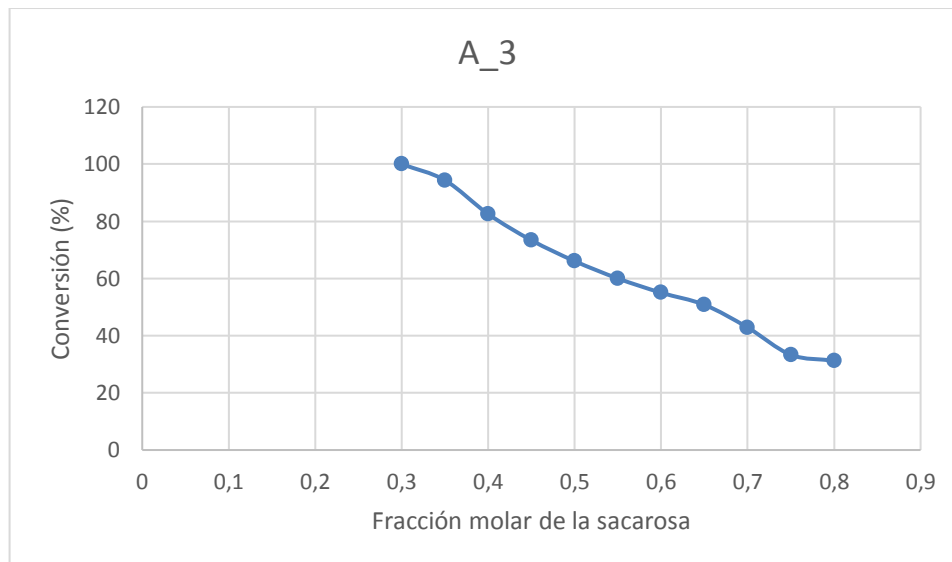




**Ilustración 40-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_2 (0.14 Kg)  
**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

4.4.3.3. *Resultado del análisis de variación de la concentración A\_3*

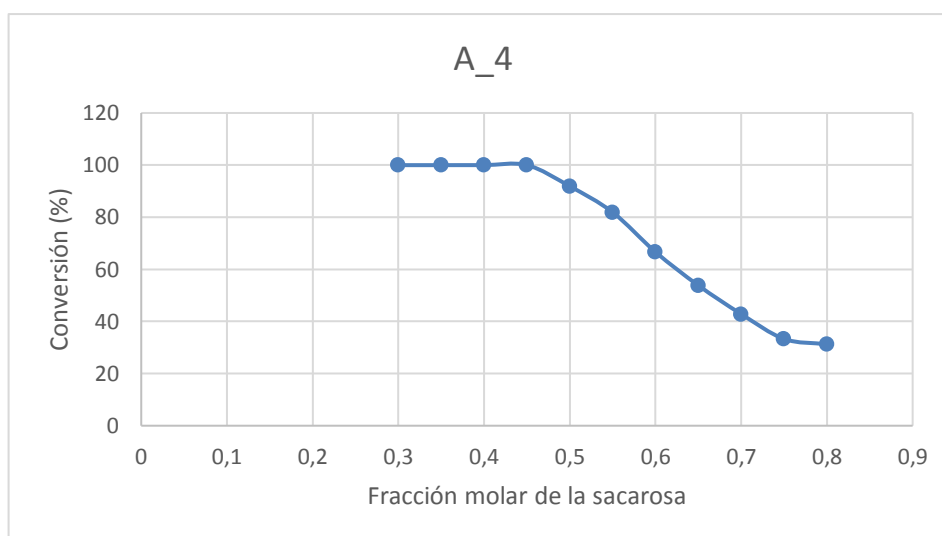
En la Ilustración 23-4 se muestran los resultados de la prueba A\_3, donde se puede apreciar que se alcanzó una máxima



**Ilustración 41-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_3 (0.23 Kg)  
**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.3.4. Resultado del análisis de variación de la concentración A\_4

En la Ilustración 24-4 se aprecia los resultados de la prueba A\_4 de la variación del la concentración del sustrato, en donde se puede observar que a una baja fracción molar existe un conversión del 100 % de la sacarosa, siendo constante hasta una fracción molar de 0.45, esto se debe a que la prueba se realizó con una carga mayor de biocatalizador en comparación a la prueba anterior; por otro lado al aumentar la concentración molar del sustrato, la cantidad reaccionada de agua disminuye produciendo un efecto de reactivo limitante sobre el agua, por lo tanto disminuyendo el rendimiento de la reacción.

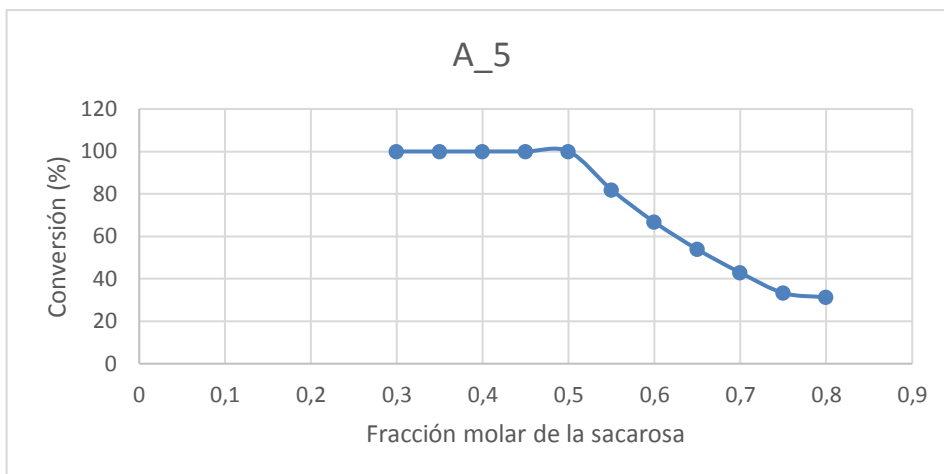


**Ilustración 42-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_4 (0.32 Kg)

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.3.5. Resultado del análisis de variación de la concentración A\_5

En la Ilustración 25-4 se observa los resultados de la prueba A\_5, en donde se empleó una carga de biocatalizador de 0.41 Kg; en la ilustración se puede ver que la conversión de la sacarosa es de 100 % hasta una fracción molar de 0.5, esto se debe a la naturaleza de la reacción, ya que sus reactivos están en una proporción de 1:1 para que la eficiencia de reacción sea de un 100%, es por esta razón que a partir de una fracción molar del sustrato de 0.55 la conversión disminuye progresivamente.

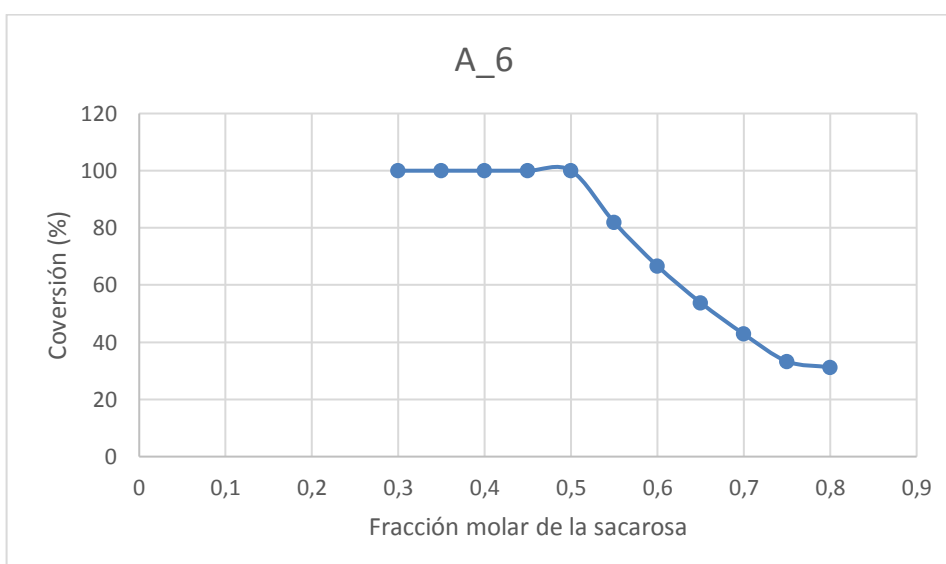


**Ilustración 43-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_5 (0.41 Kg)

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

#### 4.4.3.6. Resultado del análisis de variación de la concentración A\_6

En la Ilustración 26-4, se muestran los resultados de la prueba A\_6, que se realizó con una carga del biocatalizador de 0.5 Kg, en la ilustración se puede dilucidar que tiene similitud con la prueba A\_5, esto se debe a que la cantidad de biocatalizador ya no es factor determinante para el rendimiento de la reacción y es la fracción molar con la que se realiza la reacción por lo que una proporción de 1:1 en los reactivos es determinante, por lo que el punto de inflexión para que la reacción tenga una eficiencia del 100% es de 0.5 en la fracción molar del sustrato; la conversión del sustrato a bajas fracciones molares se da por el efecto de reactivo limitante, donde toda la sacarosa se convierte en productos pero una gran cantidad de agua queda en estado inerte.

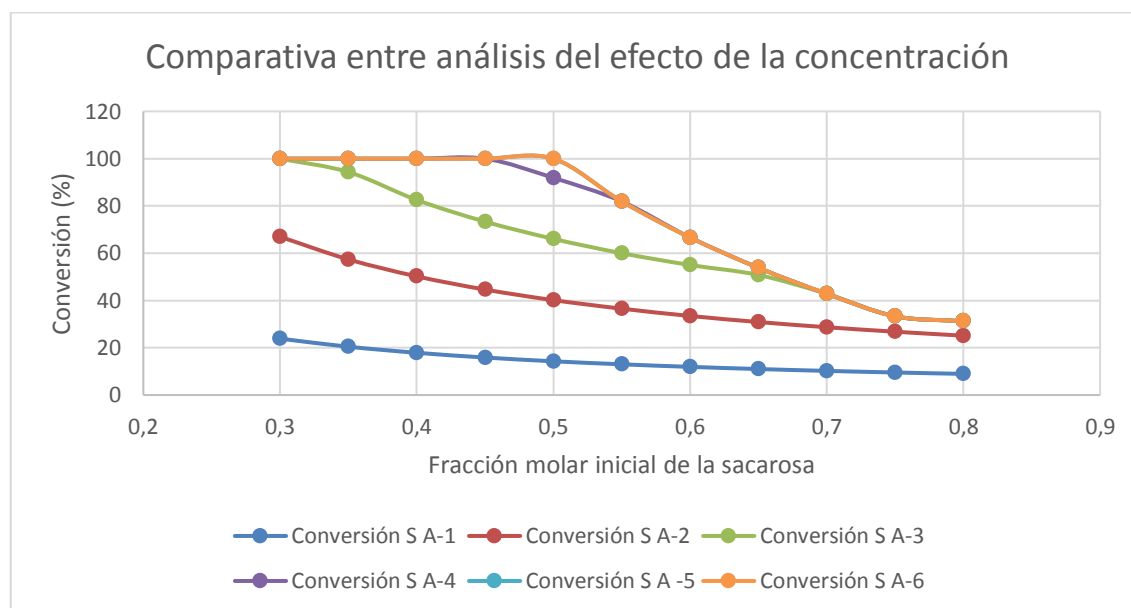


**Ilustración 44-4:** Resultados del análisis del efecto de la concentración A\_6 (0.5 Kg)

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

#### 4.4.3.7. Comparativa de resultados del análisis de variación de la concentración

Al comparar los resultados de las pruebas en la Ilustración 27-4 se puede evidenciar como el efecto de la concentración del sustrato indicado en fracción molar indica que una fracción molar muy baja o alta afecta significativamente la eficiencia y se ven afectadas por el proceso ya que si bien en las pruebas A\_4, A\_5, A\_6 las bajas concentraciones muestran un conversión del 100 % la conversión del agua es baja, lo que produce un concentración de fructosa y sacarosa baja de hasta un 60% lo que no es un resultado favorable ya existe un desperdicio significativo de recursos, en contraparte una fracción molar del 0.5 al 0.55 en el sustrato (sacarosa) muestran altas conversión en los dos reactivos, alcanzando una conversión del 100 % a fructosa y glucosa. En la interpretación gráfica de la ilustración se puede dilucidar como el efecto de carga del biocatalizador afecta en la conversión de la sacarosa y la cantidad para que esta supongo un beneficio a nivel industrial.

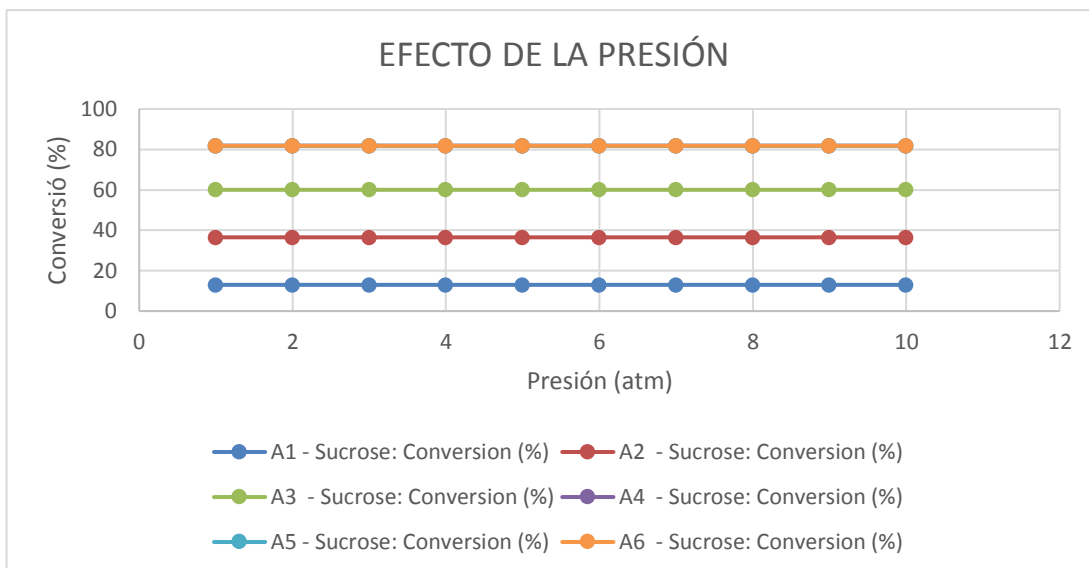


**Ilustración 45-4:** Comparativa entre resultados del efecto de la concentración

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

#### 4.4.4. Efecto de la presión

En la Ilustración 28-4 se aprecia la comparativa de los resultados de las pruebas en relación con el efecto de la presión en el proceso de producción de azúcar invertido, mostrando que la variación de la presión no presenta cambios significativos en los resultados, siendo únicamente la carga de biocatalizador la que afecta el rendimiento del proceso.



**Ilustración 46-4:** Comparativa entre resultados del efecto de la presión

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

#### 4.5. Resultados del análisis estadístico en Statgraphics Centurión 19

Para que el presente Trabajo de Titulación demuestre una confiabilidad de estudio, se realiza un estudio estadístico de comparación de datos de los resultados obtenidos en la simulación con los resultados del artículo científico base, para ello se compara la conversión de sacarosa en un tiempo determinado, empleado las mismas condiciones de reacción, donde se emplea los datos obtenidos en la Sección 4.4.1. El análisis se realizó en el programa Statgrafics Centurion XVII.I, empleando la herramienta “comparación de muestras”

**Tabla 18-4:** Pruebas de Múltiple Rangos

Muestra	Casos	Media	Grupos Homogéneos
A_1	25	9,0862	X
A_2	25	19,1917	X
A_3	25	34,1525	X
A_5	25	48,8595	X
A_4	25	54,8293	X
A_6	25	55,2843	X
Artículo	25	55,3648	X

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.

En la Tabla 4-4 aplica un procedimiento de comparación múltiple para determinar cuáles medias son significativamente diferentes de otras. La mitad inferior de la tabla de la salida indica las

diferencias estimadas entre cada par de medias. El asterisco que se encuentra al lado de los 14 pares indica que estos pares muestran diferencias estadísticamente significativas con un nivel del 95,0% de confianza. En la parte superior de la página, se han identificado 3 grupos homogéneos según la alineación de las X's en columnas. No existen diferencias estadísticamente significativas entre aquellos niveles que compartan una misma columna de X's. El método empleado actualmente para discriminar entre las medias es el procedimiento de diferencia mínima significativa (LSD) de Fisher. Con este método hay un riesgo del 5,0% al decir que cada par de medias es significativamente diferente, cuando la diferencia real es igual a 0.

**Tabla 19-4:** Características Estadísticas entre las muestras

<i>Contraste</i>	<i>Sig.</i>	<i>Diferencia</i>	<i>+/- Límites</i>
Articulo - A_1	*	46,2786	10,9708
Articulo - A_2	*	36,1731	10,9708
Articulo - A_3	*	21,2123	10,9708
Articulo - A_4		0,535504	10,9708
Articulo - A_5		6,50528	10,9708
Articulo - A_6		0,08052	10,9708
A_1 - A_2		-10,1055	10,9708
A_1 - A_3	*	-25,0663	10,9708
A_1 - A_4	*	-45,7431	10,9708
A_1 - A_5	*	-39,7733	10,9708
A_1 - A_6	*	-46,1981	10,9708
A_2 - A_3	*	-14,9608	10,9708
A_2 - A_4	*	-35,6376	10,9708
A_2 - A_5	*	-29,6678	10,9708
A_2 - A_6	*	-36,0926	10,9708
A_3 - A_4	*	-20,6768	10,9708
A_3 - A_5	*	-14,707	10,9708
A_3 - A_6	*	-21,1318	10,9708
A_4 - A_5		5,96978	10,9708
A_4 - A_6		-0,454984	10,9708
A_5 - A_6		-6,42476	10,9708

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023.

**Nota:** Los (\*) indican diferencias significativas.

- **Verificación de Varianza**

Los estadísticos mostrados en esta tabla evalúan la hipótesis nula de que las desviaciones estándar dentro de cada una de las 7 columnas son iguales. De particular interés es el valor-P. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, existe una diferencia estadísticamente significativa entre las desviaciones estándar, con un nivel del 95,0% de confianza. Esto invalida uno de los supuestos importantes subyacentes en el análisis de varianza e invalidará la mayoría de las pruebas estadísticas comunes.

La tabla también muestra una comparación de las desviaciones típicas para cada par de muestras. P-valores por debajo de 0.05, de los cuales hay 11, indican una diferencia estadísticamente significativa entre las dos sigmas al 5% de nivel de significación.

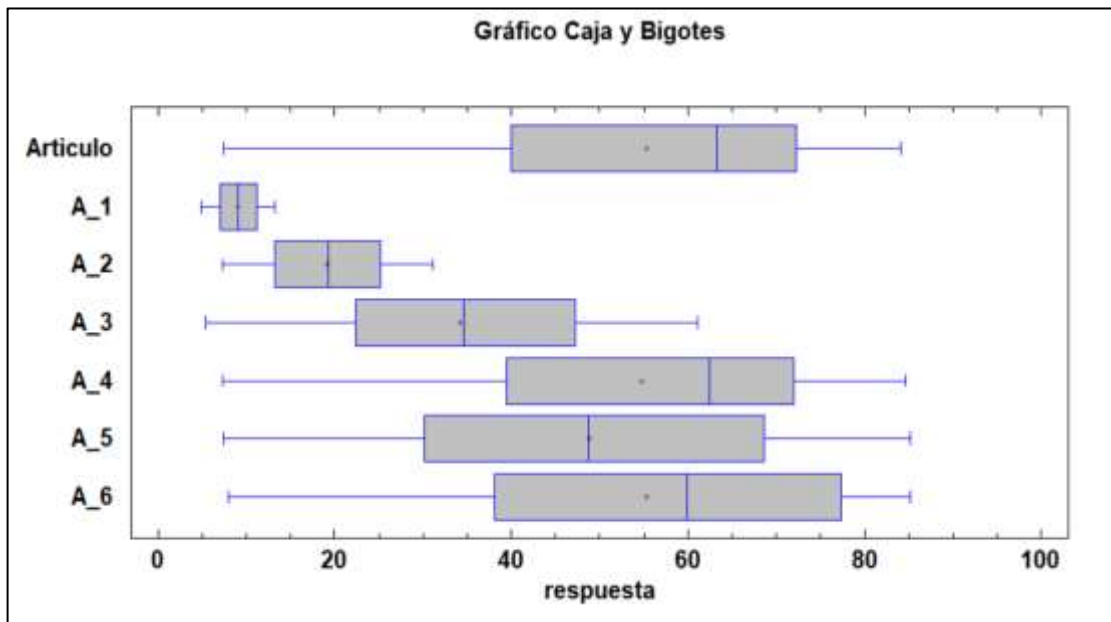
Por la información dada por la tabla se puede establecer que entre los datos mostrados por el artículo y la prueba A\_4 y A\_5 son significativamente iguales, por lo que al cumplir con las mismas condiciones y parámetros de estudios indican una alta confiabilidad en el estudio realizado en el presente Trabajo de Titulación.

**Tabla 20-4:** Verificación de Varianza

	<i>Prueba</i>	<i>Valor-P</i>			
Levene's	10,1483	1,43973E-9			
<i>Comparación</i>	<i>Sigma1</i>	<i>Sigma2</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Valor</i>	
Artículo / A_1	24,0327	2,53483	89,8893	0,0000	
Artículo / A_2	24,0327	7,27693	10,9071	0,0000	
Artículo / A_3	24,0327	16,7884	2,04921	0,0852	
Artículo / A_4	24,0327	24,1167	0,993043	0,9865	
Artículo / A_5	24,0327	23,9604	1,00604	0,9883	
Artículo / A_6	24,0327	25,0525	0,920244	0,8403	
A_1 / A_2	2,53483	7,27693	0,121339	0,0000	
A_1 / A_3	2,53483	16,7884	0,022797	0,0000	
A_1 / A_4	2,53483	24,1167	0,0110474	0,0000	
A_1 / A_5	2,53483	23,9604	0,011192	0,0000	
A_1 / A_6	2,53483	25,0525	0,0102375	0,0000	
A_2 / A_3	7,27693	16,7884	0,187879	0,0001	
A_2 / A_4	7,27693	24,1167	0,0910459	0,0000	
A_2 / A_5	7,27693	23,9604	0,0922379	0,0000	
A_2 / A_6	7,27693	25,0525	0,0843713	0,0000	
A_3 / A_4	16,7884	24,1167	0,484599	0,0823	

A_3 / A_5	16,7884	23,9604	0,490944	0,0878
A_3 / A_6	16,7884	25,0525	0,449073	0,0554
A_4 / A_5	24,1167	23,9604	1,01309	0,9748
A_4 / A_6	24,1167	25,0525	0,92669	0,8536
A_5 / A_6	23,9604	25,0525	0,914715	0,8289

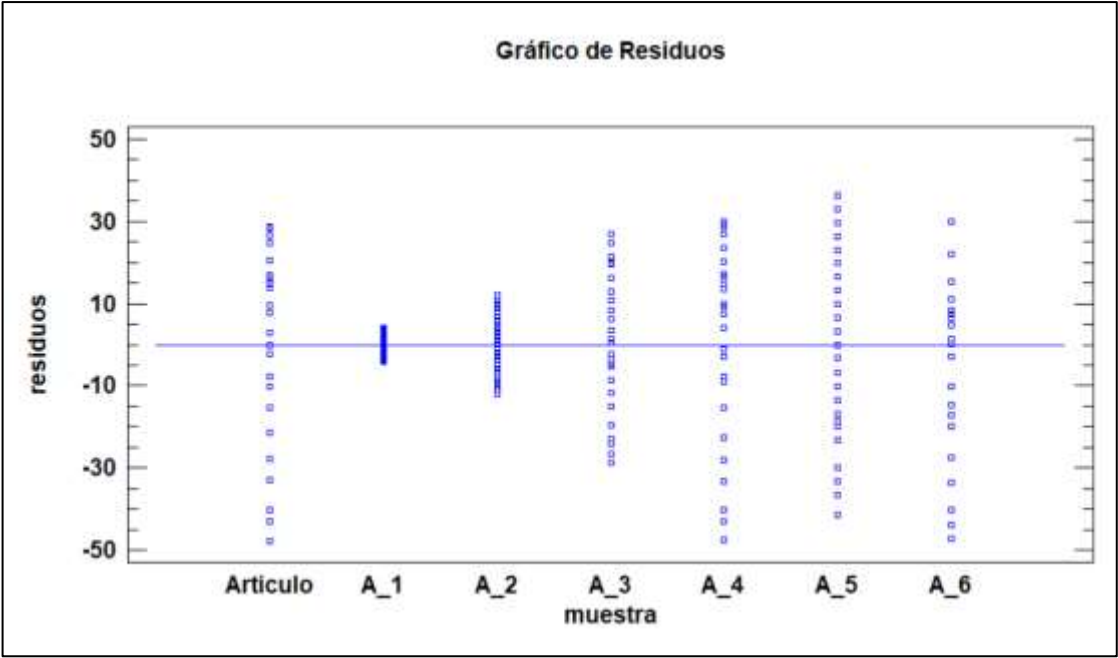
Realizado por: Córdova, Dennis, 2023.



**Ilustración 47-4:** Gráfica comparativa de Cajas y Bigotes

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023





**Ilustración 48-4:** Gráfica de Residuos

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

## CONCLUSIONES

- Se simuló la reacción de hidrólisis de la sacarosa en el software de simulación multiplataforma DWSIM para la producción de azúcar invertido, empleando las condiciones cinéticas específicas de la reacción, siendo ésta catalizada por la enzima invertasa que a su vez se encuentra inmovilizada en un biorreactor CSTR o tanque agitado.
- Se diseñó las condiciones operativas del biorreactor con un volumen de control de 500 L, para ello se definió las condiciones iniciales con la que se da la reacción, como la concentración inicial del flujo molar de entrada siendo una concentración de 1.75 M, y la constante cinética y conversión que se obtuvieron por bibliografía, que son  $2.438 \cdot 10^{-3} \text{ min}^{-1}$  y 83 % respectivamente; a través de la ecuación de diseño del biorreactor tanque agitado se definió el flujo molar de entrada dando como resultado 43.69 mol/min, tras iniciar la simulación se obtuvo una conversión máxima de 85.17 %, que al ser un valor próximo al obtenido por Martínez et al., (2017, pp. 39-42) se empleó como referencia para validar los resultados.
- Se determinó a través del análisis de sensibilidad las condiciones operativas óptimas para la producción de azúcar invertido, donde se definió las variables dependientes e independientes, siendo la conversión de la sacarosa la variable dependiente que nos proporciona la información acerca de la eficiencia de la reacción y del proceso; las variables independientes se definieron como la concentración inicial del sustrato (sacarosa), temperatura de operación, y carga de biocatalizador que son las variables que influyen directamente en el proceso. Para la variable de la concentración los rangos de fracción molar intermedios son aceptables para obtener una alta conversión de la sacarosa, pues si las cantidades con las que ingresa en el reactor son muy altas o bajas se produce el efecto de reactivo limitante donde un reactivo se consume totalmente y otro excede en composición por lo que una concentración 600 g/L o una fracción molar de 0.6 a 0.55 en la sacarosa es recomendable para obtener altas cantidades de productos. En el caso de la temperatura se pudo evidenciar en la Ilustración 20-4 que la cantidad de carga de biocatalizador afecta en la estabilidad térmica de la enzima, por lo que a menor cantidad de biocatalizador es más sensible a las temperaturas disminuyendo su rango de efectividad, siendo 343 K (70 °C) una temperatura óptima de operación, Y por último no se evidenció un cambio de efectividad en la variación de la presión del proceso tal como se muestra en la Ilustración 28-4.
- Posterior al diseño del reactor y análisis de sensibilidad se pudo establecer las condiciones operativas óptimas del reactor como es el caso del flujo molar de cada corriente de entrada de la sacarosa y agua, dando como resultado respectivamente, la carga óptima del biocatalizador corresponde a 0.32 Kg a una temperatura de 343 K (70 °C), con una fracción molar de la

sacarosa de 0.55 a una presión de 1 atm , dado que a esas condiciones reportaron altas conversiones de la sacarosa; cabe recalcar que la fracción molar de 0.55 se debe a que una fracción de 0.5 produce una conversión del 100% pero el producto sería muy espeso y difícil de extraer por lo que se encuentre en una baja dilución de agua facilita el tratamiento del producto.

- Se validó los resultados obtenidos de la simulación ya que se evidenció que la carga de biocatalizador actúa directamente en el tiempo y eficiencia de la reacción, siendo la prueba A\_4 con una carga de 0.32 Kg la que tendría más similitud con los resultados reportados por Martínez et al., (2017, pp. 39-42) dando un error de 1.368 %.

## RECOMENDACIONES

- Para el diseño industrial de la producción de azúcar invertido se recomienda preestablecer la producción anual a través de un análisis de coste anual, con ello se puede deducir el volumen de control del reactor y el tiempo de operación, así como, la disposición de recursos materiales y energéticos.
- Las reacciones de hidrolisis enzimáticas dependen de sus cinéticas, pues cada una de las enzimas tienen propiedades térmicas y catalíticas diferentes, por lo que se recomienda caracterizar los parámetros cinéticos para una correcta simulación y predicción de datos; tomando en cuenta que la naturaleza de la reacción es sensible a la temperatura se puede deducir si ecuación cinética a partir de la ecuación de Arrhenius donde se toma en cuenta el efecto de la temperatura.

## BIBLIOGRAFÍA

**123RF.** *Invertasa* [blog]. 2018. [Consulta: 27 septiembre 2022]. Disponible [https://es.123rf.com/photo\\_14286028\\_invertasa-un-enzima-que-cataliza-la-hidr%C3%B3lisis-de-desglose-tabla-sacarosa-estructura-molecular-az%C3%BAca.html](https://es.123rf.com/photo_14286028_invertasa-un-enzima-que-cataliza-la-hidr%C3%B3lisis-de-desglose-tabla-sacarosa-estructura-molecular-az%C3%BAca.html)

**ALONSO, J.** “Edulcorantes naturales”. *La Granja* [en línea], 2010, (Ecuador) 12(2), pp. 3-12. [Consulta: 4 febrero 2023]. 1390-3799. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=476047396002>

**ÁLVAREZ, M.; & GARCÍA, R.** Estudio de la simulación de procesos de producción en ingenios azucareros. térmico (Tesis) (Ingeniería). [en línea]. Universidad Técnica del Norte, Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas, Ingeniería en Sistemas Computacionales, Ecuador. 2013. pp. 24-45 [Consulta: 19 junio 2022]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/1092>

**AMAYA-DELGADO, L.; et al.** “Hydrolysis of sucrose by invertase immobilized on nylon-6 microbeads”. *Food Chemistry*. [en línea], 2006, (México) 99(2), pp. 3-11. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 299–304. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.FOODCHEM.2005.07.048>

**ASOCIACIÓN ECUATORIANA DE TÉCNICOS AZUCAREROS.** *Los primeros 20 años del centro de investigación de la caña de azúcar del Ecuador*. [blog]. 2018. [Consulta: 16 agosto 2022]. Disponible en: <http://www.aeta.org.ec/noticias.html#:~:text=LLa%20industria%20azucarera%20del,8.7%25%20del%20PIB%20agr%C3%ADcola%20nacional.>

**BALI, N.; et al.** “Three-dimensional reconstruction of bioactive membranes and pore-scale simulation of enzymatic reactions: The case of lactose hydrolysis”. *Journal of Membrane Science*. [en línea], 2017, (Grecia) 524(2), pp. 225–234. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 1873-3123 Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.MEMSCI.2016.11.013>

**BASSO, A.; & SERBAN, S.** “Industrial applications of immobilized enzymes—A review”. *Molecular Catalysis*. [en línea], 2019, (Reino Unido) 479(1), pp. 19-46. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 2468-8231. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.MCAT.2019.110607>

**CAROCHO, M.; et al.** “Sweeteners as food additives in the XXI century: A review of what is known, and what is to come”. *Food and Chemical Toxicology*. [en línea], 2017, (Portugal) 107(1), pp. 302–317. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 1873-6351. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2017.06.046>

**CASTAÑEDA., M.** (2016). Obtención, caracterización y aplicación de un biocatalizador para la reducción del contenido de fenilalanina en hidrolizados proteicos (Tesis) (Doctorado). [en línea]. Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ingeniería, Doctorado en Ingeniería, Argentina. 2013. pp. 12-78 [Consulta: 19 junio 2022]. Disponible en: [http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52475/Documento\\_completo\\_\\_.pdf?sequence=4&isAllowed=y](http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/52475/Documento_completo__.pdf?sequence=4&isAllowed=y)

**CHIRINOSA, R.; et al.** “Hidrólisis química y enzimática de extracto de yacón (*Smallanthus sonchifolius*) para la producción de fructosa”. *Revista de La Sociedad Química Del Perú*, [en línea], 2017, (Perú) 82(2), pp. 200–212. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 1810-364X. Disponible en: [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1810-634X2017000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1810-634X2017000200006&lng=es&nrm=iso&tlng=es)

**DE OLIVEIRA, R.; et al.** “Kinetic/thermodynamic study of immobilized  $\beta$ -fructofuranosidase from *Aspergillus tamarii* URM4634 in chitosan beads and application on invert sugar production in packed bed reactor”. *Food Research International*, [en línea], 2020, (Brasil) 137(2), pp. 1-9. [Consulta: 16 agosto 2022]. ISSN 1873-7145. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.FOODRES.2020.109730>

**DIESTRA BALTA, J.; et al.** “Mathematical modeling of the effect of temperature on the activity and thermal stability of the inulinase of *Kluyveromyces marxianus* NRRL Y- 7571”. *Scientia Agropecuaria*, [en línea], 2015, (Perú) 6(4), pp. 303-312. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 2306-6741. Disponible en: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2015.04.07>

**DWSIM.** *DWSIM – El simulador de procesos químicos de código abierto* [blog]. 2022. [Consulta: 16 febrero 2022]. Disponible. <https://dwsim.org/>

**DEL POZO, H.** *Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación.* [blog]. 2016. [Consulta: 16 agosto 2022]. Disponible: <https://www.ambiente.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/05/Codigo-Organico-Economia-Social-de-los-Conosimientos.pdf>

**FLORES, J.; et al.** “Una interpretación aproximada del concepto de Hidrolisis en estructuras peptídicas en un curso de Bioquímica del IPC en el contexto de la teoría de los campos conceptuales de Vergnaud”. *Revista de Investigación*, [en línea], 2008, (Venezuela) (64), pp. 135-159. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 135-159. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=376140379006>

**GARCÍA-ALMEIDA, J. et al.** “Una visión global y actual de los edulcorantes. Aspectos de regulación”. *Nutrición Hospitalaria*, [en línea], 2013, (España) 28(4), pp. 17-31. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 0212-1611. Disponible en: [https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0212-16112013001000003](https://scielo.isciii.es/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0212-16112013001000003)

**GODOY, C.; et al.** “Hidrólisis enzimática discontinua y discontinua de bagazo de caña de azúcar pretratado - Ensayos y modelado”. *Fuel*, [en línea], 2019, (Brasil) 253(1), pp. 392–399. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1873-7153. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2019.05.038>

**GONZÁLEZ, A.; et al.** “Modelamiento y Simulación de una Serie de CSTR’S con Alimentación Distribuida para la Hidrólisis Enzimática de Bagazo de Caña”. *Revista ION*, [en línea], 2010, (Colombia) 23(1), pp. 22-56. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 0120-100X. Disponible en: <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaion/article/view/951>

**HERRERA, A.; & MEERS, R.** Diseño de las Etapas de Hidrólisis de Almidón y Fermentación para Producir Bioetanol Basado en la Respuesta Dinámica del Sistema (Proyecto de Grado) (Ingeniería). [en línea]. Universidad de Cartagena, Facultad de Ingeniería, Programa de Ingeniería Química, Colombia. 2013. pp. 123-138. [Consulta: 19 junio 2022]. Disponible en: <https://repositorio.unicartagena.edu.co/bitstream/handle/11227/67/DISE%20C3%91O%20DE%20LAS%20ETAPAS%20DE%20HIDR%20C3%93LISIS%20DE%20ALMID%20C3%93N%20Y%20FERMENTACI%20C3%93N%20PARA%20PRODUCIR%20BIOETANOL%20BASADO%20EN%20LA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

**HU, Y.; et al.** “Biocatalysts used for multi-step reactions in continuous flow”. *Chemical Engineering Journal*, [en línea], 2022, (China) 437(1), p. 1. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1873-3212. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.135400>

**JIMENEZ, D. et al.** “Modeling and kinetic parameter estimation of the enzymatic hydrolysis process of lignocellulosic materials for glucose production”. *Industrial and Engineering*

Chemistry Research, [en línea], 2020, (EE.UU.) 59(38), pp.151–167. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1226-086X. Disponible en: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.0c03047>

**KOTWAL, S.; & SHANKAR, V.** “Immobilized invertase”. *Biotechnology Advances*, [en línea], 2009, (India) 27(4), pp. 311-322. [Consulta: 20 noviembre 2022]. ISSN 1873-1899. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.BIOTECHADV.2009.01.009>

**KULSHRESTHA, S.; et al.** “Invertase and its applications – A brief review”. *Journal of Pharmacy Research*, [en línea], 2013, (India) 7(9), pp. 792-797. [Consulta: 18 febrero 2023]. ISSN 0974-6943. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JOPR.2013.07.014>

**KUMAR, S.; et al.** “Invertase embedded-PVC tubing as a flow-through reactor aimed at conversion of sucrose into inverted sugar”. *Enzyme and Microbial Technology*. [en línea], 2008, (India) 43(7), pp. 792-794. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1879-0909. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.ENZMICTEC.2008.08.002>

**LINCOLN, L.; & MORE, S.** “Bacterial invertases: Occurrence, production, biochemical characterization, and significance of transfructosylation”. *Revista de Microbiología Básica*, [en línea], 2017, (India) 57(10), pp. 804. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1521-4028 . Disponible en: <https://doi.org/10.1002/JOBM.201700269>

**MAFRA, A.; et al.** (2018). “CLEA combinados de invertasa y proteína de soja para la conversión económicamente viable de sacarosa en un reactor de alimentación por lotes”. *Food and Bioproducts Processing*, [en línea], 2008, (Brasil) 110, pp. 145-157. [Consulta: 5 enero 2023]. ISSN 1744-3571. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.FBP.2018.05.006>

**MARTÍNEZ, D.; et al.** “Aumento de escala de las condiciones del lote para una hidrólisis de sacarosa eficiente catalizada por células de *Pichia pastoris* recombinantes inmovilizadas en un reactor de tanque agitador”. *Electronic Journal of Biotechnology*. [en línea], 2017, (Cuba) 25(7), pp. 39-42. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 0717-3458. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.EJBT.2016.11.003>

**MONTIEL, J.** Diseño y simulación del proceso de obtención de etanol a partir de bagazo de caña (Tesis) (Maestría). [en línea]. Universidad Autónoma Metropolitana, División de Ciencias Básicas e Ingeniería, Posgrado en Ingeniería de Procesos, México. 2017. pp. 87-96. [Consulta: 19 junio 2022]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/269023066.pdf>



**PADIERNA, D.; et al.** “Modeling Based Identifiability and Parametric Estimation of an Enzymatic Hydrolysis Process of Amylaceous Materials”. ACS Omega [en línea], 2022, (Colombia) 7(17), pp. 145–155. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 2470-1343. Disponible en: 7(17),. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.1C06193>

**PÉREZ, C. et al.** “Escalado de la reacción de biosíntesis de fructooligosacáridos, a partir de sacarosa, en biorreactores tipo tanque agitado”. Tecnología Química [en línea], 2011, (Cuba) 31(2), p. 21. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 0041-8420. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543773003>

**SANTOS, A.; et al.** “Modelling thermal stability and activity of free and immobilized enzymes as a novel tool for enzyme reactor design”. Bioresource Technology [en línea], 2007, (Brasil) 98(16), pp. 31–38. [Consulta: 18 enero 2023]. ISSN 0960-8524. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2006.10.035>

2

**SCHIWECK, H.; et al.** “Sugar”. Ullmann’s Encyclopedia of Industrial Chemistry [en línea], 2007, (Alemania) 4(1), pp. 4-33. [Consulta: 20 enero 2023]. ISBN 9783527306732. Disponible en: [https://doi.org/10.1002/14356007.A25\\_345.PUB2](https://doi.org/10.1002/14356007.A25_345.PUB2)

**SITARAMAN, H.; et al.** “Simulaciones acopladas de CFD y cinética química de hidrólisis enzimática de biomasa celulósica: desarrollo y validación de modelos matemáticos”. Chemical Engineering Science [en línea], 2019, (EE.UU.) 26(12), pp. 348–360. [Consulta: 17 enero 2023]. ISSN 873-4405. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.CES.2019.05.025>

**SOARES, A.; et al.** “Ultrasound assisted enzymatic hydrolysis of sucrose catalyzed by invertase: Investigation on substrate, enzyme and kinetics parameters”. LWT [en línea], 2019, (Brasil) 107(19), pp. 164–170. [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1096-1127. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.LWT.2019.02.083>

**TOMOTANI, E.; & VITOLO, M.** (2007). “Production of high-fructose syrup using immobilized invertase in a membrane reactor”. Journal of Food Engineering, [en línea], 2007, (Brasil) 80(2), pp. 662–667 [Consulta: 20 enero 2023]. ISSN 1873-5770. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2006.07.002>

**VARGAS, G.; & CUELLAR, J.** “Hidrólisis de sacarosa por invertasa de *Saccharomyces cerevisiae* inmovilizada sobre nanopartículas magnéticas de ferrita de cobalto”. Acta

Agronómica, [en línea], 2019, (Colombia) 68(2), pp. 115–125. [Consulta: 12 marzp 2023]. ISSN 2323-0118. Disponible en: <https://doi.org/10.15446/ACAG.V68N2.78340>

**ZAMORA, M.; et al.** “Evaluación del efecto de la temperatura, concentración y flujo volumétrico en la hidrólisis de sacarosa mediante una invertasa inmovilizada en un reactor esférico”. Ingeniería [en línea], 2011, (Costa Rica) 21(1), pp. 61–63 [Consulta: 12 marzo 2023]. ISSN 2215-2652. Disponible en: 21(1), 61–74. <https://doi.org/10.15517/RING.V21I1.601>



## ANEXOS

### ANEXO A: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE LA CANTIDAD DE BIOCATALIZADOR

		<b>XA artículo</b>	<b>A - 01</b>	<b>A - 02</b>	<b>A - 03</b>	<b>A - 04</b>	<b>A - 05</b>	<b>A - 06</b>
<b>N °</b>	<b>Tiempo (h)</b>	Conversión (%)	Conversión (%)	Conversión (%)	Conversión (%)	Conversión (%)	Conversión (%)	Conversión (%)
1	1	7,5	4,95	7,314	5,416	7,372	7,508	7,957
2	1,5	12,5	5,295	8,308	7,737	11,874	12,262	11,432
3	2	15	5,64	9,302	10,058	14,715	15,576	15,15
4	2,5	22,5	5,985	10,296	11,379	21,509	18,89	21,83
5	3	27,5	6,33	11,29	14,7	26,8874	28,974	27,81
6	3,5	34	6,675	12,284	19,021	32,151	25,518	35,43
7	4	40	7,02	13,278	22,342	39,4	30,147	38,11
8	4,5	45,3	7,5	14,272	25,498	46	32,146	40,71
9	5	47,7	7,71	15,266	28,947	47	35,46	45,26
10	5,5	53,1	8,055	16,26	29,305	51,8	38,774	52,41
11	6	55,1	8,4	17,254	30,741	53,7	42,088	55,32
12	6,5	58,3	8,61	18,248	31,947	59	45,6	56,79
13	7	63,2	9,09	19,242	34,645	62,4	48,716	59,89
14	7,5	64,8	9,435	20,236	35,589	64	52,03	61,94
15	8	65	9,78	21,23	37,724	64,7	55,344	62,83
16	8,5	69,1	10,03	22,224	40,231	68,3	58,658	63,72
17	9	70	10,47	23	42,552	69,5	61,972	66,41
18	9,5	71,5	10,815	23,478	44,873	71,4	65,286	70,69
19	10	72,3	11,16	25,206	47,194	72	68,654	77,39
20	10,5	75,8	11,505	26	50,515	74,9	71,914	85,17
21	11	80,2	11,85	27,194	53,836	78,3	75,228	85,17
22	11,5	82	12,195	28,188	54,157	81,6	78,542	85,17
23	12	83,8	12,54	29,182	55,478	83,5	81,856	85,17
24	12,5	83,9	12,885	30,07	58,799	84,6	85,172	85,17
25	13	84,02	13,23	31,17	61,128	84,124	85,173	85,178

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

**ANEXO B: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE  
CONCENTRACIÓN DEL SUSTRATO**

A-1					
Flujo molar =	43,69	Catalyst Amount	0,05		
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A-1
1	0,3	0,7	0,21845	0,509716667	23,86
2	0,35	0,65	0,25485833	0,473308333	20,44
3	0,4	0,6	0,29126667	0,4369	17,88
4	0,45	0,55	0,327675	0,400491667	15,87
5	0,5	0,5	0,36408333	0,364083333	14,28
6	0,55	0,45	0,40049167	0,327675	13,005
7	0,6	0,4	0,4369	0,291266667	11,9175
8	0,65	0,35	0,47330833	0,254858333	11
9	0,7	0,3	0,50971667	0,21845	10,22
10	0,75	0,25	0,546125	0,182041667	9,54
11	0,8	0,2	0,58253333	0,145633333	8,95

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

A-2					
Flujo molar	43,69		Catalyst Amount	0,14	
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A-2
1	0,3	0,7	0,21845	0,50971667	66,97
2	0,35	0,65	0,254858333	0,47330833	57,39
3	0,4	0,6	0,291266667	0,4369	50,21
4	0,45	0,55	0,327675	0,40049167	44,62
5	0,5	0,5	0,364083333	0,36408333	40,15
6	0,55	0,45	0,400491667	0,327675	36,54
7	0,6	0,4	0,4369	0,29126667	33,46
8	0,65	0,35	0,473308333	0,25485833	30,89
9	0,7	0,3	0,509716667	0,21845	28,69
10	0,75	0,25	0,546125	0,18204167	26,79
11	0,8	0,2	0,582533333	0,14563333	25,11

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

A-3					
Flujo molar =	43,69		Catalyst Amount =	0,23	
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A-3
1	0,3	0,7	0,21845	0,50971667	100
2	0,35	0,65	0,25485833	0,47330833	94,34
3	0,4	0,6	0,29126667	0,4369	82,54
4	0,45	0,55	0,327675	0,40049167	73,36
5	0,5	0,5	0,36408333	0,36408333	66,07
6	0,55	0,45	0,40049167	0,327675	60
7	0,6	0,4	0,4369	0,29126667	55,017
8	0,65	0,35	0,47330833	0,25485833	50,79
9	0,7	0,3	0,50971667	0,21845	42,85
10	0,75	0,25	0,546125	0,18204167	33,32
11	0,8	0,2	0,58253333	0,14563333	31,24

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

A-4					
Flujo molar =	43,69		Catalyst Amount =	0,32	
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A-4
1	0,3	0,7	0,21845	0,50971667	99,99
2	0,35	0,65	0,25485833	0,47330833	99,99
3	0,4	0,6	0,29126667	0,4369	100
4	0,45	0,55	0,327675	0,40049167	99,99
5	0,5	0,5	0,36408333	0,36408333	91,88
6	0,55	0,45	0,40049167	0,327675	81,9
7	0,6	0,4	0,4369	0,29126667	66,65
8	0,65	0,35	0,47330833	0,25485833	53,83
9	0,7	0,3	0,50971667	0,21845	42,85
10	0,75	0,25	0,546125	0,18204167	33,32
11	0,8	0,2	0,58253333	0,14563333	31,24

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

A-5					
Flujo molar =	43,69		Catalyst Amount =	0,41	
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A - 5
1	0,3	0,7	0,21845	0,50971667	99,99
2	0,35	0,65	0,25485833	0,47330833	99,99
3	0,4	0,6	0,29126667	0,4369	99,99
4	0,45	0,55	0,327675	0,40049167	100
5	0,5	0,5	0,36408333	0,36408333	99,99
6	0,55	0,45	0,40049167	0,327675	81,9
7	0,6	0,4	0,4369	0,29126667	66,65
8	0,65	0,35	0,47330833	0,25485833	53,83
9	0,7	0,3	0,50971667	0,21845	42,85
10	0,75	0,25	0,546125	0,18204167	33,32
11	0,8	0,2	0,58253333	0,14563333	31,24

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

A-6					
Flujo molar =	43,69		Catalyst Amount =	0,5	
Concentración					
N°	Fracción (s)	Fracción H2O	Fm Sacarosa	Fm Agua	Conversión S A - 6
1	0,3	0,7	0,21845	0,50971667	99,99
2	0,35	0,65	0,25485833	0,47330833	100
3	0,4	0,6	0,29126667	0,4369	99,99
4	0,45	0,55	0,327675	0,40049167	100
5	0,5	0,5	0,36408333	0,36408333	99,99
6	0,55	0,45	0,40049167	0,327675	81,9

7	0,6	0,4	0,4369	0,29126667	66,65
8	0,65	0,35	0,47330833	0,25485833	53,83
9	0,7	0,3	0,50971667	0,21845	42,85
10	0,75	0,25	0,546125	0,18204167	33,32
11	0,8	0,2	0,58253333	0,14563333	31,24

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

**ANEXO C: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA**

<b>A-1</b>		
Catalyst Amount =		0,05
<b>N°</b>	<b>Calentador Outlet Temperature (K)</b>	<b>Reactor CSTR 1 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	0,796927
2	282,449	0,931848
3	284,898	1,09334
4	287,347	1,2689
5	289,796	1,47541
6	292,245	1,70123
7	294,694	1,95621
8	297,143	2,24347
9	299,592	2,5737
10	302,041	2,93604
11	304,49	3,34157
12	306,939	3,80157
13	309,388	4,30661
14	311,837	4,86849
15	314,286	5,49248
16	316,735	6,18418
17	319,184	6,95641
18	321,633	7,80204
19	324,082	8,73464
20	326,531	9,76152

21	328,98	10,8904
22	331,429	12,1358
23	333,878	13,494
24	336,327	14,9804
25	338,776	16,6047
26	341,224	18,3775
27	343,673	20,3151
28	346,122	22,4179
29	348,571	24,7036
30	351,02	27,185
31	353,469	29,8803
32	355,918	32,7939
33	358,367	35,9496
34	360,816	39,3544
35	363,265	43,0324
36	365,714	46,9963
37	368,163	51,2639
38	370,612	55,8537
39	373,061	60,787
40	375,51	66,0825
41	377,959	71,76
42	380,408	77,8417
43	382,857	81,7978
44	385,306	81,7979
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	80,635
50	400	75,482

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023



<b>A-2</b>		
Catalyst Amount =		0,14
<b>N°</b>	<b>Calentador - Outlet Temperature (K)</b>	<b>Reactor CSTR 2 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	2,35737
2	282,449	2,74061
3	284,898	3,18446
4	287,347	3,68072
5	289,796	4,25027
6	292,245	4,88649
7	294,694	5,60424
8	297,143	6,41916
9	299,592	7,32687
10	302,041	8,34433
11	304,49	9,48926
12	306,939	10,7601
13	309,388	12,1826
14	311,837	13,7579
15	314,286	15,5068
16	316,735	17,451
17	319,184	19,5956
18	321,633	21,9698
19	324,082	24,5819
20	326,531	27,4627
21	328,98	30,6241
22	331,429	34,0984
23	333,878	37,9052
24	336,327	42,0705
25	338,776	46,6216
26	341,224	51,5876
27	343,673	57,0015
28	346,122	62,8924
29	348,571	69,2971

30	351,02	76,2499
31	353,469	81,7979
32	355,918	81,7979
33	358,367	81,7979
34	360,816	81,7979
35	363,265	81,7979
36	365,714	81,7979
37	368,163	81,7979
38	370,612	81,7978
39	373,061	81,7979
40	375,51	81,7979
41	377,959	81,7979
42	380,408	81,7979
43	382,857	81,7979
44	385,306	81,7979
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	79,4885
50	400	70,8168

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

<b>A-3</b>		
Catalyst Amount =		0,23
<b>N°</b>	<b>Calentador - Reactor CSTR Outlet Temperature (K)</b>	<b>3 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	3,9182
2	282,449	4,54977
3	284,898	5,27595
4	287,347	6,09293
5	289,796	7,02548
6	292,245	8,07213
7	294,694	9,25924

8	297,143	10,588
9	299,592	12,0804
10	302,041	13,7594
11	304,49	15,6304
12	306,939	17,7251
13	309,388	20,0525
14	311,837	22,6466
15	314,286	25,5255
16	316,735	28,7105
17	319,184	32,2388
18	321,633	36,135
19	324,082	40,4305
20	326,531	45,1588
21	328,98	50,3557
22	331,429	56,0617
23	333,878	62,3153
24	336,327	69,158
25	338,776	76,6361
26	341,224	81,7979
27	343,673	81,7979
28	346,122	81,7979
29	348,571	81,7979
30	351,02	81,7979
31	353,469	81,7979
32	355,918	81,7979
33	358,367	81,7979
34	360,816	81,7979
35	363,265	81,7979
36	365,714	81,7979
37	368,163	81,7979
38	370,612	81,7979
39	373,061	81,7979
40	375,51	81,7979
41	377,959	81,7979
42	380,408	81,7979

43	382,857	81,7978
44	385,306	81,7978
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	79,2434
50	400	70,0801

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

<b>A-4</b>		
Catalyst Amount =		0,32
<b>N°</b>	<b>Calentador - Outlet Temperature (K)</b>	<b>Reactor CSTR 4 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	5,47607
2	282,449	6,36277
3	284,898	7,36455
4	287,347	8,50887
5	289,796	9,79789
6	292,245	11,2614
7	294,694	12,9048
8	297,143	14,7604
9	299,592	16,8374
10	302,041	19,1711
11	304,49	21,7748
12	306,939	24,6868
13	309,388	27,9305
14	311,837	31,537
15	314,286	35,5399
16	316,735	39,9753
17	319,184	44,8815
18	321,633	50,2997
19	324,082	56,2786

20	326,531	62,8564
21	328,98	70,0895
22	331,429	78,0268
23	333,878	81,7979
24	336,327	81,7978
25	338,776	81,7979
26	341,224	81,7979
27	343,673	81,7979
28	346,122	81,7979
29	348,571	81,7979
30	351,02	81,7979
31	353,469	81,7979
32	355,918	81,7979
33	358,367	81,7979
34	360,816	81,7979
35	363,265	81,7979
36	365,714	81,7979
37	368,163	81,7979
38	370,612	81,7979
39	373,061	81,7978
40	375,51	81,7978
41	377,959	81,7979
42	380,408	81,7979
43	382,857	81,7979
44	385,306	81,7979
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	79,2116
50	400	69,9938

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

<b>A-5</b>		
Catalyst Amount =		0,41
<b>N°</b>	<b>Calentador - Outlet Temperature (K)</b>	<b>Reactor CSTR 5 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	7,03926
2	282,449	8,16747
3	284,898	9,45834
4	287,347	10,9167
5	289,796	12,5753
6	292,245	14,4428
7	294,694	16,5551
8	297,143	18,931
9	299,592	21,5928
10	302,041	24,5812
11	304,49	27,9226
12	306,939	31,6517
13	309,388	35,8058
14	311,837	40,4249
15	314,286	45,5521
16	316,735	51,2363
17	319,184	57,5231
18	321,633	64,4671
19	324,082	72,1251
20	326,531	80,5522
21	328,98	81,7979
22	331,429	81,7979
23	333,878	81,7979
24	336,327	81,7979
25	338,776	81,7979
26	341,224	81,7979
27	343,673	81,7979
28	346,122	81,7979

29	348,571	81,7979
30	351,02	81,7979
31	353,469	81,7979
32	355,918	81,7978
33	358,367	81,7979
34	360,816	81,7979
35	363,265	81,7979
36	365,714	81,7978
37	368,163	81,7978
38	370,612	81,7979
39	373,061	81,7979
40	375,51	81,7979
41	377,959	81,7979
42	380,408	81,7979
43	382,857	81,7979
44	385,306	81,7979
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	79,1993
50	400	69,9477

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

<b>A-6</b>		
Catalyst Amount =		0,5
<b>N°</b>	<b>Calentador - Outlet Temperature (K)</b>	<b>Reactor CSTR 6 - Sucrose: Conversion (%)</b>
1	280	8,59882
2	282,449	9,97531
3	284,898	11,5486
4	287,347	13,3339
5	289,796	15,3493
6	292,245	17,6332
7	294,694	20,2022
8	297,143	23,0987
9	299,592	26,3503
10	302,041	29,9933
11	304,49	34,0669
12	306,939	38,6134
13	309,388	43,6781
14	311,837	49,3132
15	314,286	55,5671
16	316,735	62,4981
17	319,184	70,1659
18	321,633	78,6334
19	324,082	81,7979
20	326,531	81,7978
21	328,98	81,7979
22	331,429	81,7979
23	333,878	81,7979
24	336,327	81,7979
25	338,776	81,7979
26	341,224	81,7979
27	343,673	81,7979
28	346,122	81,7979



29	348,571	81,7979
30	351,02	81,7978
31	353,469	81,7979
32	355,918	81,7979
33	358,367	81,7979
34	360,816	81,7978
35	363,265	81,7979
36	365,714	81,7979
37	368,163	81,7979
38	370,612	81,7979
39	373,061	81,7979
40	375,51	81,7979
41	377,959	81,7979
42	380,408	81,7979
43	382,857	81,7979
44	385,306	81,7979
45	387,755	81,7979
46	390,204	81,7979
47	392,653	81,7979
48	395,102	81,7979
49	397,551	79,1916
50	400	69,919

**Realizado por:** Córdova, Dennis, 2023

**ANEXO D: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DE LA PRESIÓN**

<b>A-1</b>		
Catalyst Amount =		0,05
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A1 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	12,9891
2	2	12,9891
3	3	12,9891
4	4	12,9891
5	5	12,9891
6	6	12,9891
7	7	12,9891
8	8	12,9891
9	9	12,9891
10	10	12,9891

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

<b>A-2</b>		
Catalyst Amount =		0,14
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A2 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	36,5001
2	2	36,5001
3	3	36,5001
4	4	36,5001
5	5	36,5001
6	6	36,5001
7	7	36,5001
8	8	36,5001
9	9	36,5001
10	10	36,5001

Realizado por: Córdova, Dennis, 2023

<b>A-3</b>		
Catalyst Amount =		0,23
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A3 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	60,01
2	2	60,01
3	3	60,01
4	4	60,01
5	5	60,01
6	6	60,01
7	7	60,01
8	8	60,01
9	9	60,01
10	10	60,01

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

<b>A-4</b>		
Catalyst Amount =		0,32
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A4 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	81,7979
2	2	81,7979
3	3	81,7979
4	4	81,7979
5	5	81,7979
6	6	81,7979
7	7	81,7979
8	8	81,7979
9	9	81,7979
10	10	81,7979

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

<b>A-5</b>		
Catalyst Amount =		0,41
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A5 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	81,7979
2	2	81,7979
3	3	81,7979
4	4	81,7979
5	5	81,7979
6	6	81,7979
7	7	81,7979
8	8	81,7979
9	9	81,7979
10	10	81,7979

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023

<b>A-6</b>		
Catalyst Amount =		0,5
N°	Bomba - Outlet Pressure (atm)	A6 - Sucrose: Conversion (%)
1	1	81,7979
2	2	81,7979
3	3	81,7979
4	4	81,7979
5	5	81,7979
6	6	81,7979
7	7	81,7979
8	8	81,7979
9	9	81,7979
10	10	81,7979

Realizado por: Córdoba, Dennis, 2023



esPOCH

Dirección de Bibliotecas y  
Recursos del Aprendizaje

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y  
DOCUMENTAL**

**REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA**

**Fecha de entrega:** 03 / 07 / 2023

<b>INFORMACIÓN DEL AUTOR/A (S)</b>
<b>Nombres – Apellidos:</b> Dennis Josué Córdova Velasco
<b>INFORMACIÓN INSTITUCIONAL</b>
<b>Facultad:</b> Ciencias
<b>Carrera:</b> Ingeniería Química
<b>Título a optar:</b> Ingeniero Químico
<b>f. Analista de Biblioteca responsable:</b> Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

0801-DBRA-UPT-2023