

A wide-angle photograph of a field of Sorghum bicolor plants. The plants are tall with long green leaves and distinct yellowish-orange tassels at the top. The field stretches to a distant horizon under a clear sky.

Proyecto Integrado

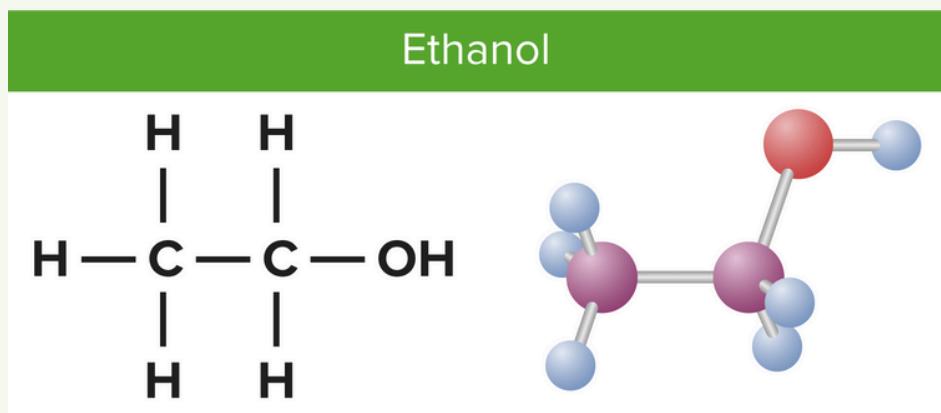
# Biorrefinería para la producción de etanol de primera generación a partir de sustratos ricos en azúcares, como el *Sorghum bicolor L. Moench*.

Presentado por:  
Sofía Betancur Álvarez  
Mariana Gutiérrez Tamayo

# ¿Qué es el Etanol?

- Compuesto químico de naturaleza orgánica.
- Perteneciente a la familia de los alcoholes.
- Caracterizado por su falta de olor, volatilidad y flamabilidad.

Fórmula Química →  $C_2H_6O$



Cuando se hace referencial al **bioetanol** se habla de un compuesto químicamente idéntico al etanol, pero diferenciado por su origen.

## APLICACIONES

### Bioetanol

- Biocombustibles
- Alta eficacia como aditivo para aumentar el octanaje.
- Generación de energía.
- Aplicaciones cosméticas.
- Materia prima química.



Uso de biocombustible E10 y transición hacia un biocombustible 100% sostenible en 2026.



# Generaciones en la obtención de bioetanol

Con base a las materias primas utilizadas para la alimentación, los métodos para la obtención de etanol se clasifican en cuatro categorías, conocidas como generaciones.

- 1 Materias primas azucaradas y amiláceas.
- 2 Residuos lignocelulósicos.
- 3 Microorganismos captadores de dióxido de carbono.
- 4 Microrganismos genéticamente modificados.



# Bioetanol de primera generación

El alcohol es obtenido a partir del proceso fermentativo de diversos materiales con alto contenido en azúcares fermentables o almidones hidrolizables.

➤ **Rendimiento, eficiencia y estandarización.**

➤ **Alta concentración de carbohidratos disponibles.**

➤ **Competencia con el sector alimentario.**

Las materias primas azucaradas son más viables que las amiláceas, debido a que no necesitan pretratamientos.

**Polímeros complejos y de gran tamaño**



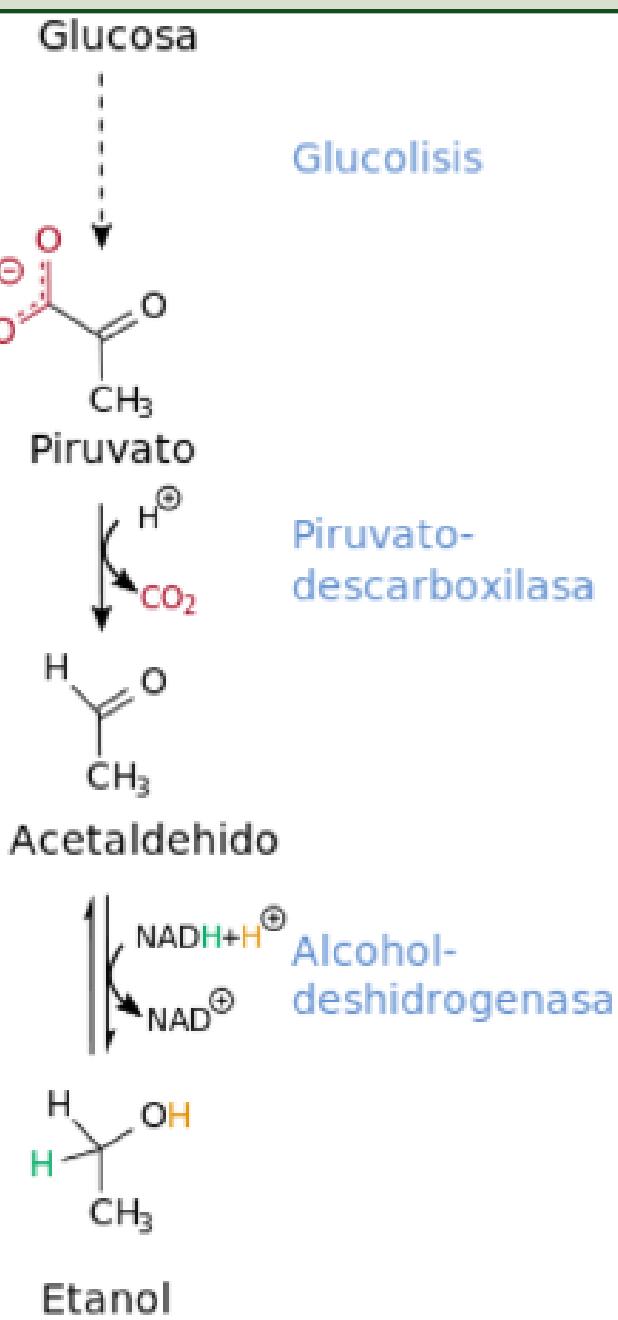
**Descomposición en azúcares simples**



Se incluyen la caña de azúcar, la remolacha azucarera y el sorgo dulce, que almacenan su energía principalmente en forma de sacarosa, así como cereales y tubérculos ricos en almidón, como el maíz, el trigo, la yuca o la papa dulce.



# Etapa crítica: fermentación



En esta etapa se da la conversión de los carbohidratos a etanol

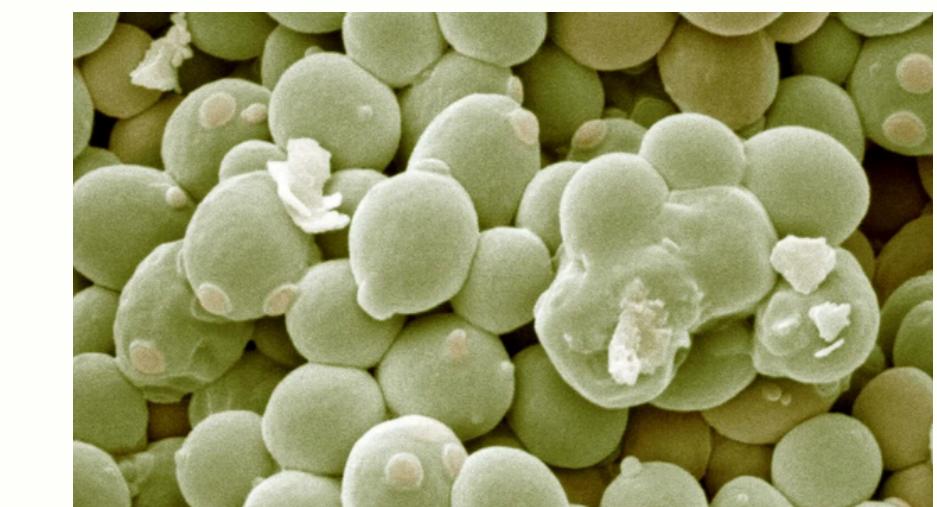


Las levaduras son los microorganismos empleados para esta ruta, debido a su alta capacidad para convertir azúcares fermentables en etanol.

Parámetros óptimos encontrados:

- Temperatura: (30-35) °C
- pH: 4.5 - 5.5
- Concentraciones iniciales de azúcar: 150 - 200 g/L
- Tiempo de Fermentación: (24-48) h
- Agitación: 100-120 rpm

Ruta de fermentación alcohólica anaeróbica



**Saccharomyces cerevisiae**

# Proceso de interés

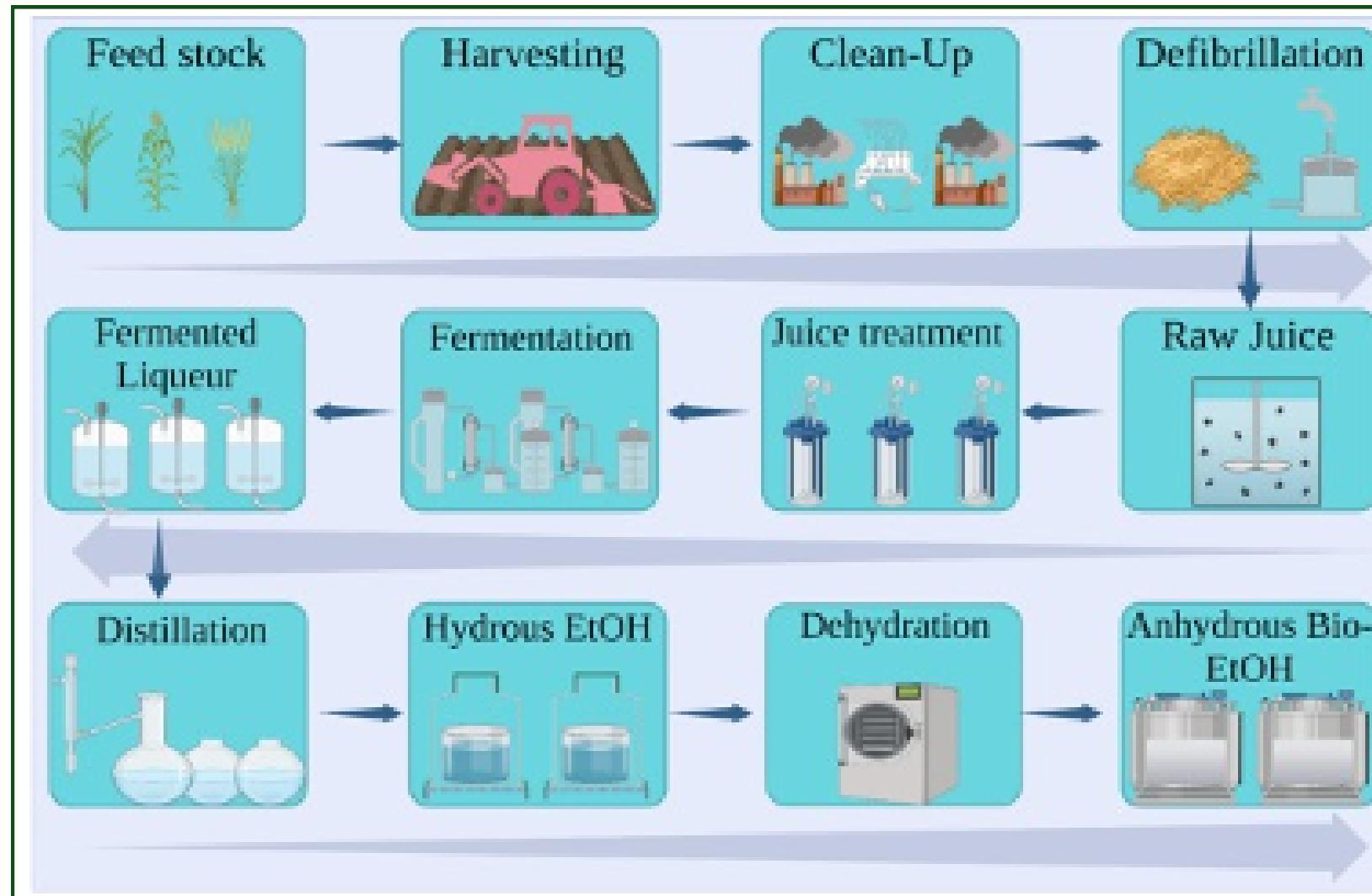
Obtención de bioetanol de primera generación a partir del jugo extraído de los tallos de sorgo dulce, utilizando la levadura *Saccharomyces cerevisiae* como microorganismo fermentador.



Los altos contenidos de azúcares fermentables presentes en el jugo del sorgo, permiten una conversión eficiente hacia etanol mediante procesos convencionales de fermentación alcohólica.

Si bien el objetivo principal se orienta hacia la **producción de etanol a partir de jugos azucarados**, es importante resaltar que los **residuos fibrosos del sorgo**, como los **tallos, bagazo** y otros **materiales lignocelulósicos** poseen un alto potencial para su aprovechamiento en **tecnologías de segunda generación**, donde podrían emplearse como materia prima para la obtención de **bioetanol lignocelulósico**.

## Etapas claves en la obtención de bioetanol de primera generación a partir de materias primas azucaradas.



Etapas claves en la obtención de bioetanol de primera generación a partir de materias primas azucaradas.  
Tomado de:  
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.119037>.

**Diagrama PFD general para el proceso de producción de bioetanol de primera generación a partir de jugo de sorgo dulce**  
PFD - Process flow diagram

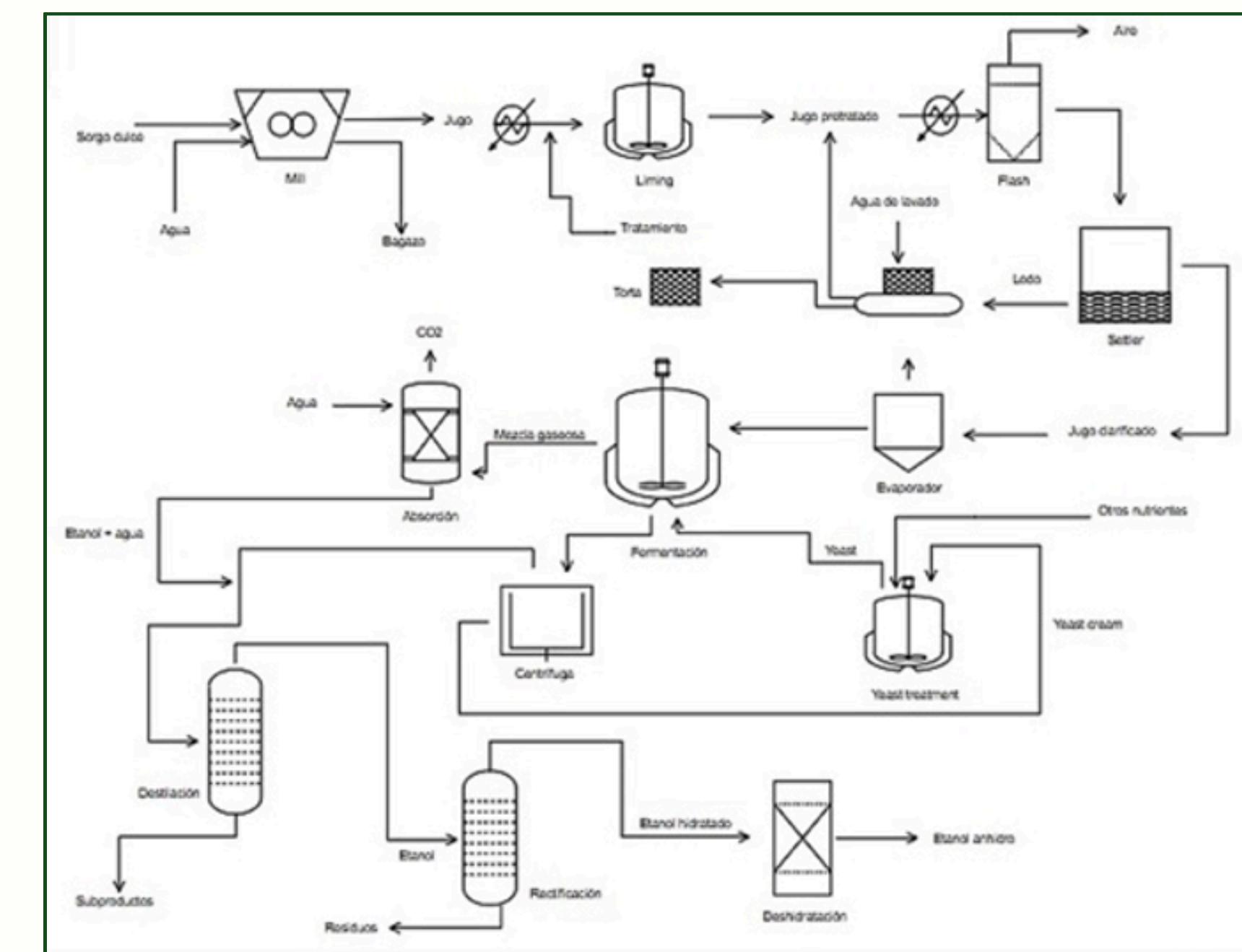


Diagrama 1. Diagrama PFD general para el proceso de producción de bioetanol de primera generación a partir de jugo de sorgo dulce. Elaborado por: Sofía Betancur Álvarez.

# BALANCES DE MASA

$$(Masa)_{\text{entrada}} - (Masa)_{\text{salida}} + (Masa)_{\text{generada}} - (Masa)_{\text{consumida}} = (Masa)_{\text{acumulada}} \quad (1)$$

Balance de masa para el proceso como caja negra.

$$\text{Masa total de entrada} = \text{Masa total de salida} \quad (2)$$

Balance de masa simplificado.

$$M_{IN,\text{sustrato}} + M_{IN,\text{yeast}} + M_{IN,\text{fuente nitrógeno}} = M_{\text{producto}} + M_{\text{biomasa}} + M_{CO_2} + M_{\text{others}} \quad (3)$$

Balance de entradas y salidas del proceso.

Donde:

- $M_{IN,\text{sustrato}}$  = masa total del sustrato alimentado (en este caso, sorgo dulce) teniendo en cuenta la masa de agua presente en el jugo de alimentación = [kg].
- $M_{IN,\text{yeast}}$  = masa total del inóculo inicial de levadura (en este caso *S. cerevisiae*) = [kg]
- $M_{IN,\text{fuente nitrógeno}}$  = fuente de nitrógeno requerida por la levadura, generalmente amoniaco o urea = [kg]
- $M_{\text{producto}}$  = masa de etanol obtenido = [kg].
- $M_{\text{biomasa}}$  = aumento en la biomasa de levadura, incluyendo la fuente de nitrógeno [kg].
- $M_{CO_2}$  = masa de dióxido de carbono producto de la fermentación = [kg]
- $M_{\text{others}}$  = masa de subproductos + sustrato residual.

(8) Rendimiento de la biomasa respecto al sustrato.

(9) Rendimiento del producto respecto al sustrato.

Teórico (0.511) vs Calculado (0.5103) vs (42-48)%

Reacción estequiométrica teórica para la obtención de etanol a partir de sustratos azucarados.

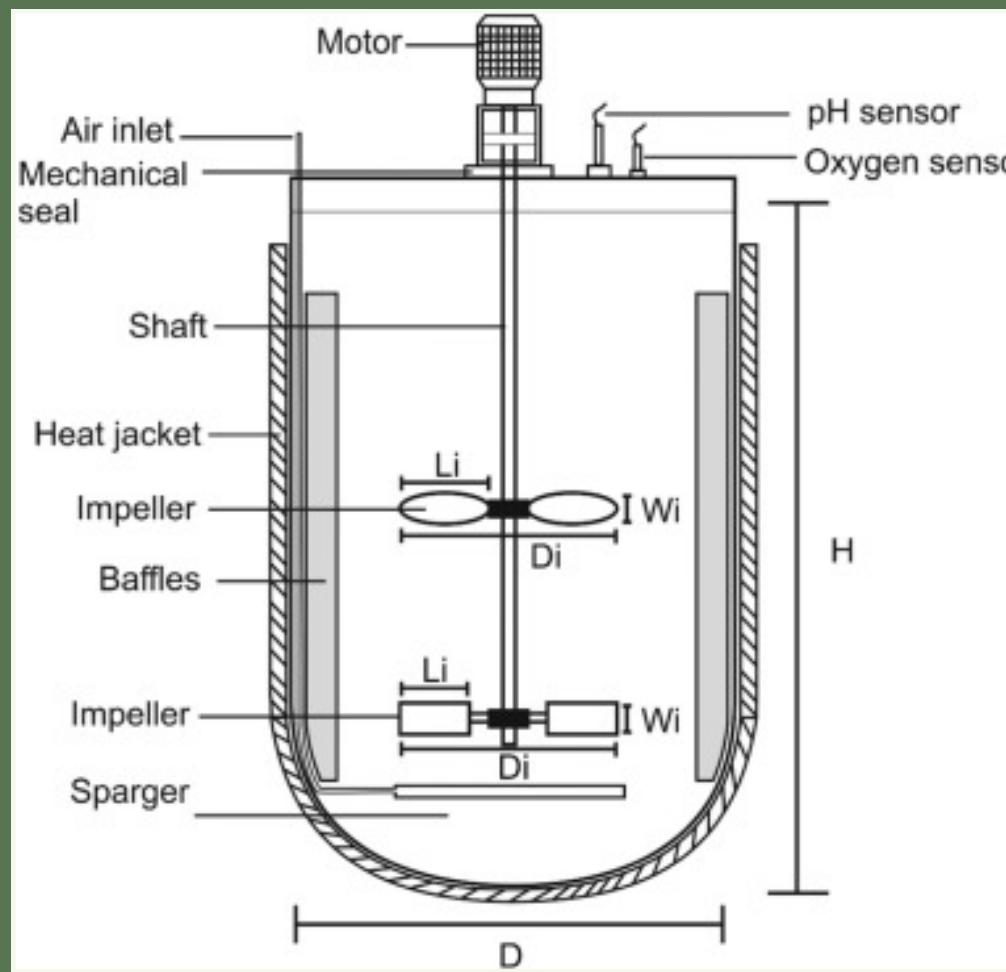


$$Y_{xs} = \frac{\text{gramos de células producidas}}{\text{gramos de sustrato consumido}} \quad (8)$$

$$Y_{ps} = \frac{\text{gramos de producto formado}}{\text{gramos de sustrato consumido}} \quad (9)$$

$$\approx 0.5103 \frac{\text{g etanol}}{\text{g glucosa}} \quad (10)$$

# Selección del biorreactor



El **reactor tanque agitado (STR)** en modo **fed-batch** es la mejor opción para producir etanol de primera generación a partir de sorgo dulce.

Se elige un **reactor de tanque agitado (STR)** para la fermentación con *Saccharomyces cerevisiae* usando sorgo dulce.

Este tipo de reactor ofrece:

- **Mezclado eficiente** → evita gradientes de concentración y temperatura.
- **Homogeneidad del medio** → asegura la acción uniforme de la levadura.
- **Diseño cerrado y esterilizable** → control preciso de pH, temperatura y agitación.
- **Modo Fed-Batch:** el fed-batch es el más prometedor para la producción de bioetanol con *S. cerevisiae*.

Aplicación en sorgo dulce:

- El **mosto de sorgo dulce** contiene altas concentraciones de azúcares y posibles inhibidores.
- El **modo fed-batch** permite mantener a la levadura en condiciones óptimas, evitando estrés y pérdida de rendimiento.
- **Resultado:** mayor eficiencia, control y estabilidad del proceso.

# Ecuaciones matemáticas del modelo

$$\mu = \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S} \quad (13)$$

$$q = \frac{q_{max} * S}{K_{SP} + S} \quad (14)$$

Cinética de crecimiento de Monod

$$\frac{dX}{dt} = \left[ \left( \frac{\mu_{max} * S}{K_s + S} - i * (S - \hat{S}) \right) \left( 1 - \frac{P}{P_{Xmax}} \right) \right] * (X) \quad (15)$$

$$\frac{dP}{dt} = \left[ \left( \frac{q_{max} * S}{K_{SP} + S} \right) \left( 1 - \frac{P}{P_{max}} \right) * (X) \right] \quad (16)$$

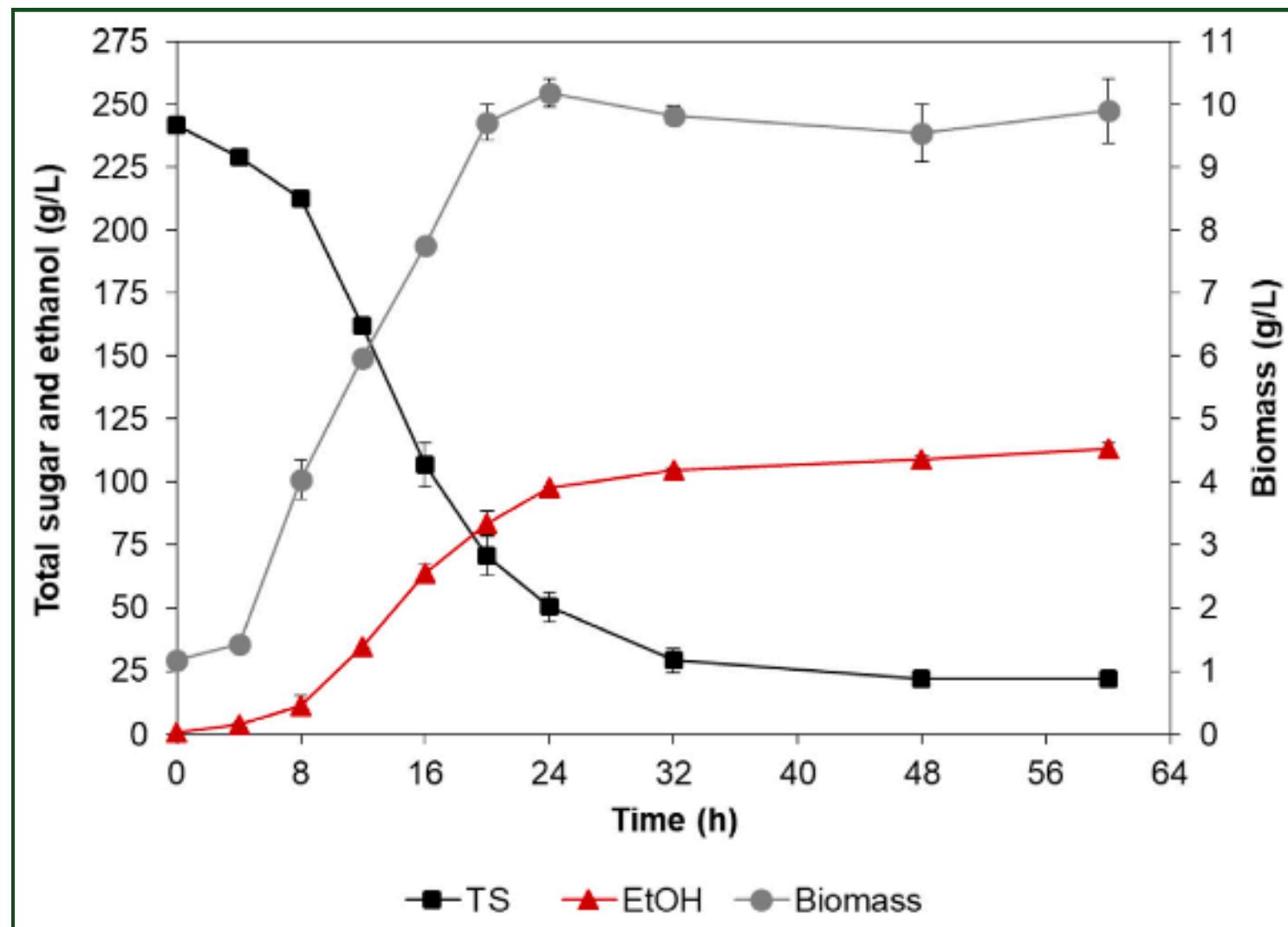
$$-\frac{dS}{dt} = \frac{1}{Y_X \frac{S}{S}} \left( \frac{dX}{dt} \right) + \frac{1}{Y_P \frac{S}{S}} \left( \frac{dP}{dt} \right) + mX \quad (17)$$

- **X** = Concentración de biomasa = [g/L]
- **P** = Concentración de producto = [g/L]
- **S** = Concentración de sustrato = [g/L]
- **$\mu$**  = Velocidad de crecimiento específica = [1/h]
- **$\mu_{max}$**  = Velocidad específica máxima = [1/h]
- **$K_s$**  = Constante de saturación de Monod = [g/L]
- **$q$**  = Tasa específica de formación de producto = [1/h]

- Las ecuaciones (15), (16) y (17) modelan el crecimiento microbiano, etanol y el consumo de sustrato respectivamente.
- **$\hat{S}$**  = Umbral de concentración de sustrato = [g/L]
- **$P_{Xmax}$**  = Concentración de producto que causa inhibición del crecimiento = [g/L]
- **$P_{max}$**  = Máxima concentración de producto = [g/L]
- **$Y_{X/S}$**  = Rendimiento de biomasa respecto al sustrato = [g/g]
- **$Y_{P/S}$**  = Rendimiento de producto respecto al sustrato = [g/g]
- **$m$**  = coeficiente de mantenimiento = [1/h]
- **$i$**  = Constante de inhibición = [L/(g\*h)]

# Validación con artículo científico

**Artículo seleccionado:** “Mathematical modeling of bioethanol production from sweet sorghum juice under high gravity fermentation: Applicability of Monod-based, logistic, modified Gompertz and Weibull models”



	Biomasa ( <i>S.cerevisiae</i> NP01)	Sustrato (sweet sorghum juice)	Producto
Tiempo (h)	Biomasa (g/L)	Total Sugar (g/L)	Etanol (g/L)
0	1,128205128	241,8589744	-0,706385118
3,992869875	1,383861237	228,5055304	0,749120161
7,98573975	4,03685269	213,0367019	10,66490699
11,86452763	5,984766214	163,0153343	33,9768728
15,9714795	7,791654098	107,355455	62,93237808
19,85026738	9,711362494	72,14177979	82,71995978
23,95721925	10,1644545	51,0331825	96,86651584
31,942959	9,829462041	30,67244847	104,0057818
47,9144385	9,554449472	22,38687783	109,1176471
59,89304813	9,926395173	21,81372549	112,7765209

**Tabla 1.** Data experimental extraída de la gráfica 1 para el artículo seleccionado, utilizando el software WebPlotDigitizer. Construido por: Sofía Betancur Álvarez.

# Construcción del modelo →

## Matlab

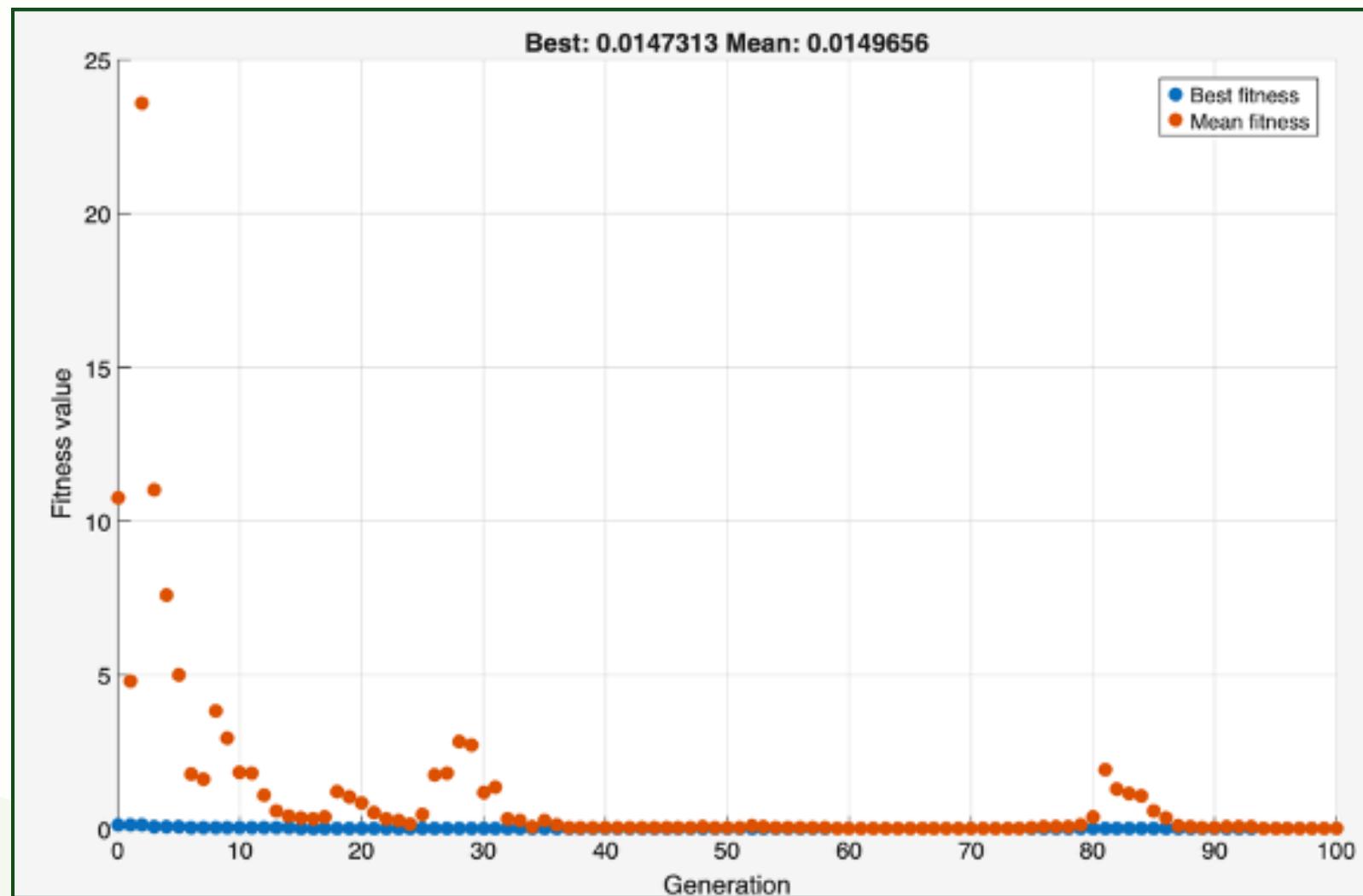
Parámetro	Condición / Valor	Descripción
Tipo de reactor	Matraz Erlenmeyer 500 mL	Operado en modo batch
Volumen de trabajo	350 mL	Medio de fermentación preparado con jugo concentrado de sorgo dulce
Concentración inicial de azúcares	240 g/L	Proveniente del jugo concentrado
Suplemento nutritivo	9 g/L de extracto de levadura	Fuente de nitrógeno y factores de crecimiento
pH inicial	4.54	Sin ajustes adicionales durante la fermentación
Concentración celular inicial	$5 \times 10^7$ cel/mL	Inóculo de <i>Saccharomyces cerevisiae</i>
Temperatura de fermentación	30 °C	Condición óptima para la levadura
Agitación	100 rpm	Asegura homogeneidad del medio
Duración del proceso	60 horas	Tiempo total de fermentación
Condiciones del sistema	Matraces cerrados con trampa de aire	Permite liberación de CO <sub>2</sub> y evita contaminación
Esterilización previa	110 °C	Para garantizar asepsia del medio
Producción máxima de etanol	113.3 g/L	Rendimiento alto bajo las condiciones establecidas
Consumo de azúcares	90.9 %	Alta conversión de sustrato
Eficiencia de fermentación	94.4 %	Cercana al valor teórico máximo
Inhibición observada	A concentraciones >65 g/L de azúcar	Disminuye la tasa específica de crecimiento

Tabla 2. Condiciones de operación utilizadas en el artículo seleccionado para validación. Construido por: Sofía Betancur Álvarez.

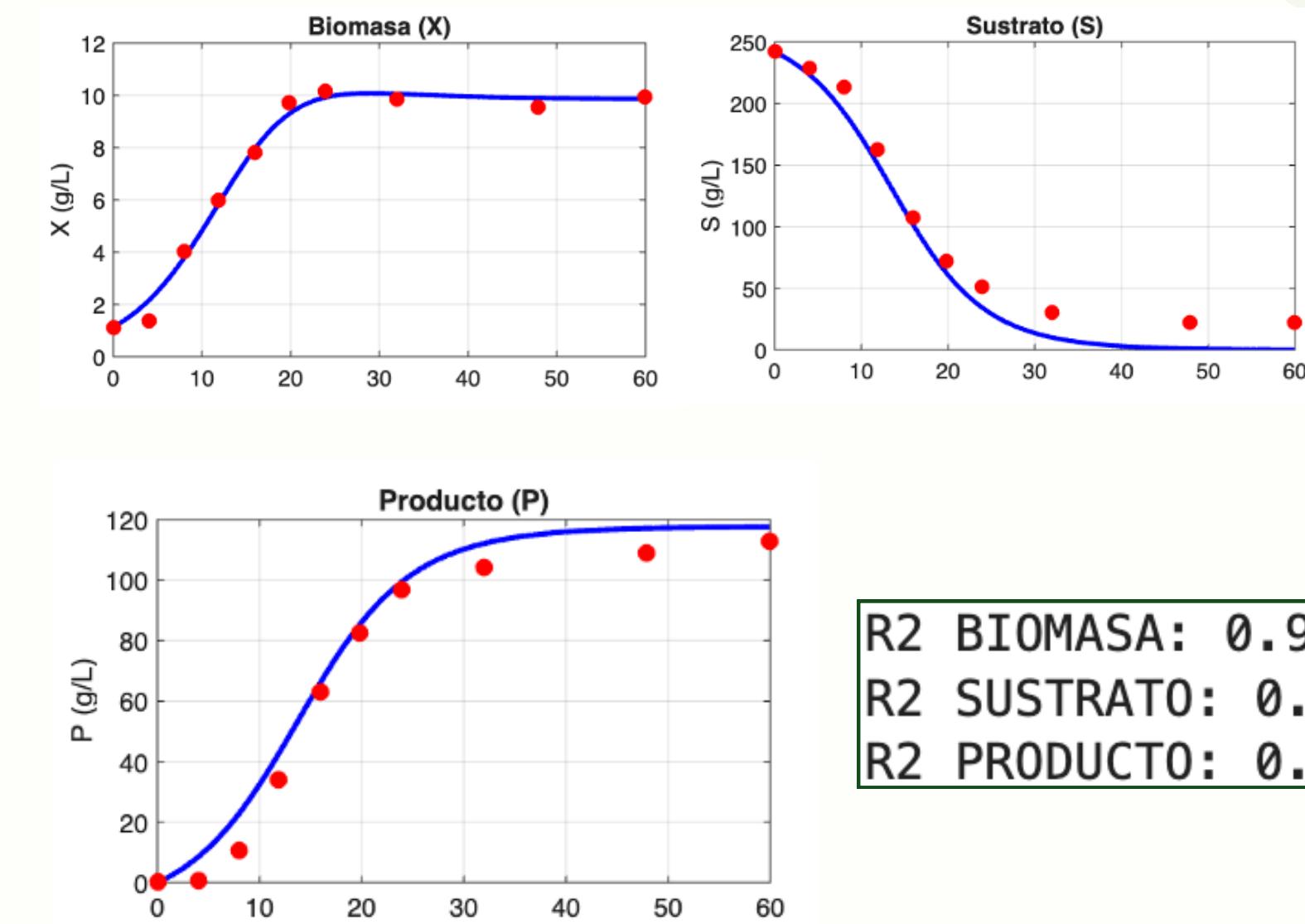
Parámetro	Valor
$\mu_{max}$	0,3
$K_s$	21
$i$	0,00005
$\widehat{S}$	65
$P_{Xmax}$	86,9
$q_{max}$	4,8
$K_{SP}$	240
$P_{max}$	116,8
$Y_{X/S}$	0,44
$Y_{P/S}$	0,53
$m$	0

Tabla 3. Valores de parámetros encontrados en el artículo seleccionado.  
Construido por: Mariana Gutiérrez Tamayo.

# Construcción del modelo → Matlab



**Gráfica 2.** Evolución del mejor y promedio fitness durante la optimización mediante algoritmo genético. Generado tras correr los scripts de Matlab para la sección de optimización.



R2 BIOMASA: 0.9905  
R2 SUSTRATO: 0.9671  
R2 PRODUCTO: 0.9763

**Gráfica 3.** Comparación modelo óptimo (línea azul) vs datos experimentales (puntos rojos) para: (a) Biomasa (X), Sustrato (S), Producto (P). Generado tras correr los scripts de Matlab para la sección de optimización.

# Variables del sistema de control

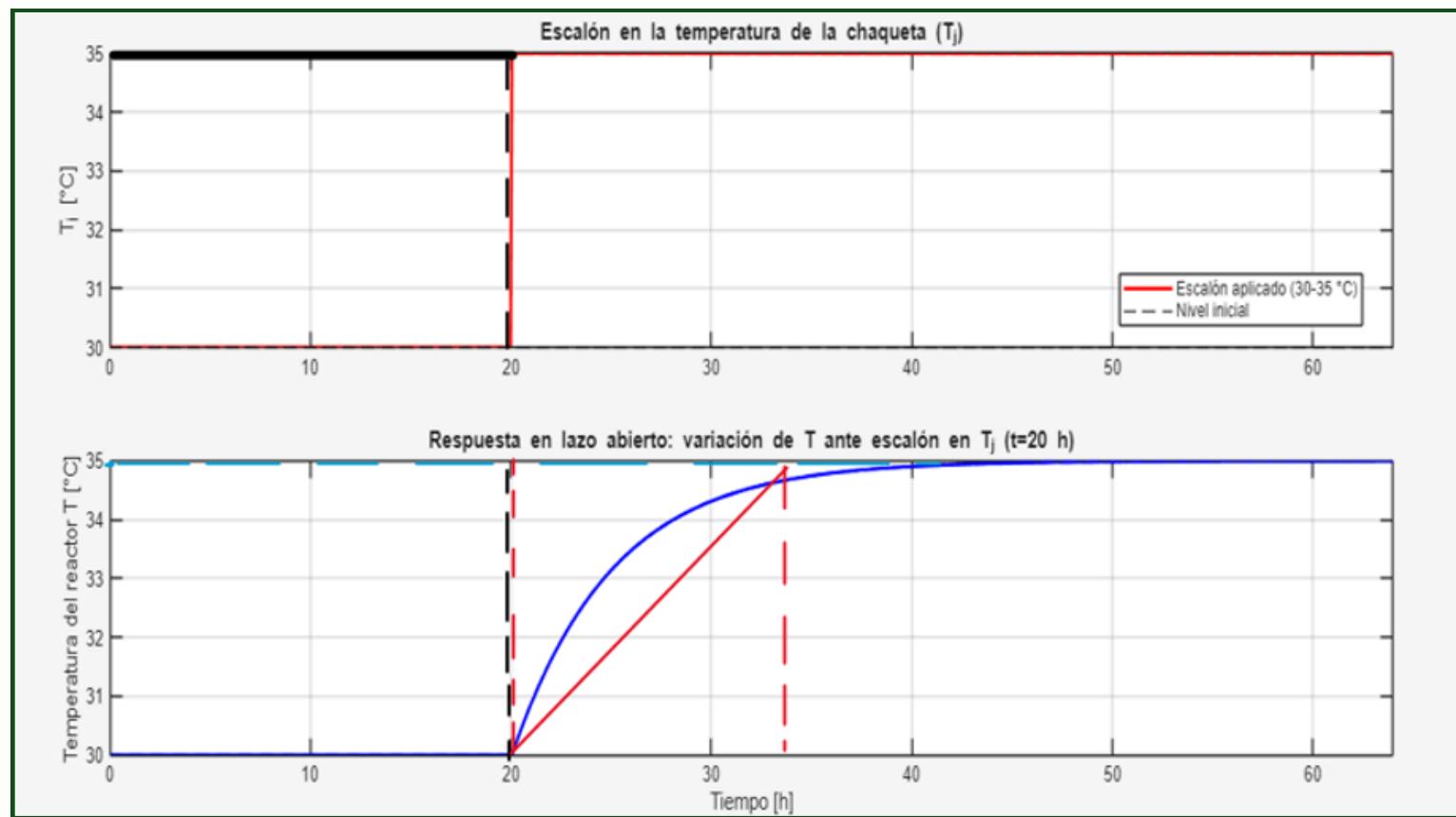
Tipo de variable	Variable	Descripción
Variable controlada (CV)	T	Temperatura interna del biorreactor
Variable manipulada (MV)	Tj	Temperatura del fluido en la chaqueta
Variable de entrada (u)	Tj	Señal aplicada por el controlador
Variables de salida (y)	X, P, S	Biomasa, producto (etanol) y sustrato
Perturbaciones (DV)	Qgen, Tamb, caudal de refrigerante	Calor metabólico, temperatura ambiente, variaciones del flujo térmico

# Propuesta estrategia de control

**Objetivo:** Controlar la temperatura interna del biorreactor para mantener condiciones óptimas de crecimiento y producción de etanol.

## Modelo base:

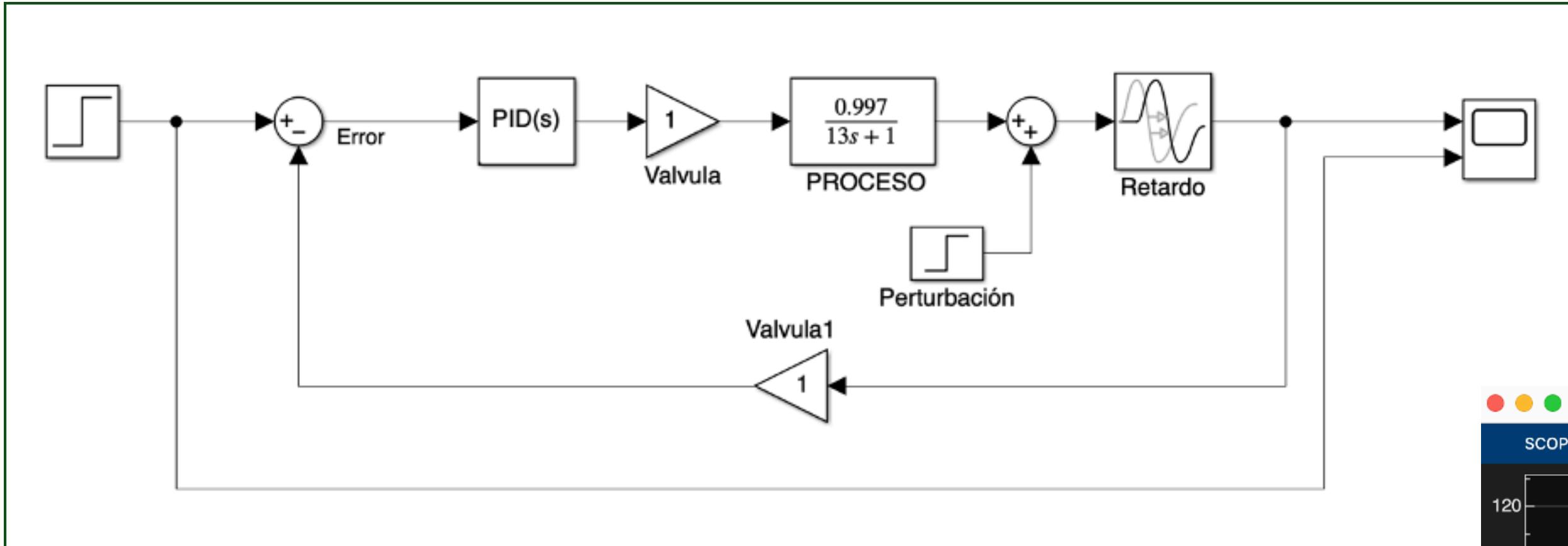
- Sistema de ecuaciones diferenciales para X (biomasa), S (sustrato), P (producto) y T (temperatura).
- Se añade el factor térmico  $f(T)$  (función gaussiana) para modelar el efecto de la temperatura sobre  $\mu$  y  $q$ .
- Se incorpora el balance de energía y la transferencia de calor en chaqueta.
- Se linealiza el modelo para análisis y simulación en MATLAB (espacio de estados).



$$G(s) = \frac{K e^{-t_d s}}{\tau s + 1}$$
$$G(s) = \frac{0.997}{13s + 1} e^{-1.5 s}$$
$$Kc = \left(\frac{1.2}{K}\right) * \left(\frac{\tau}{t_d}\right) = 10.431, \quad T_i = 2 * t_d = 3, \quad T_d = 0.5 * t_d = 0.75$$

**Gráfica 4 y 5.** Gráfica del escalón en la temperatura y gráfica de la respuesta en lazo abierto con los parámetros establecidos. Elaborado por: Sofía Betancur Álvarez.

# Propuesta estrategia de control



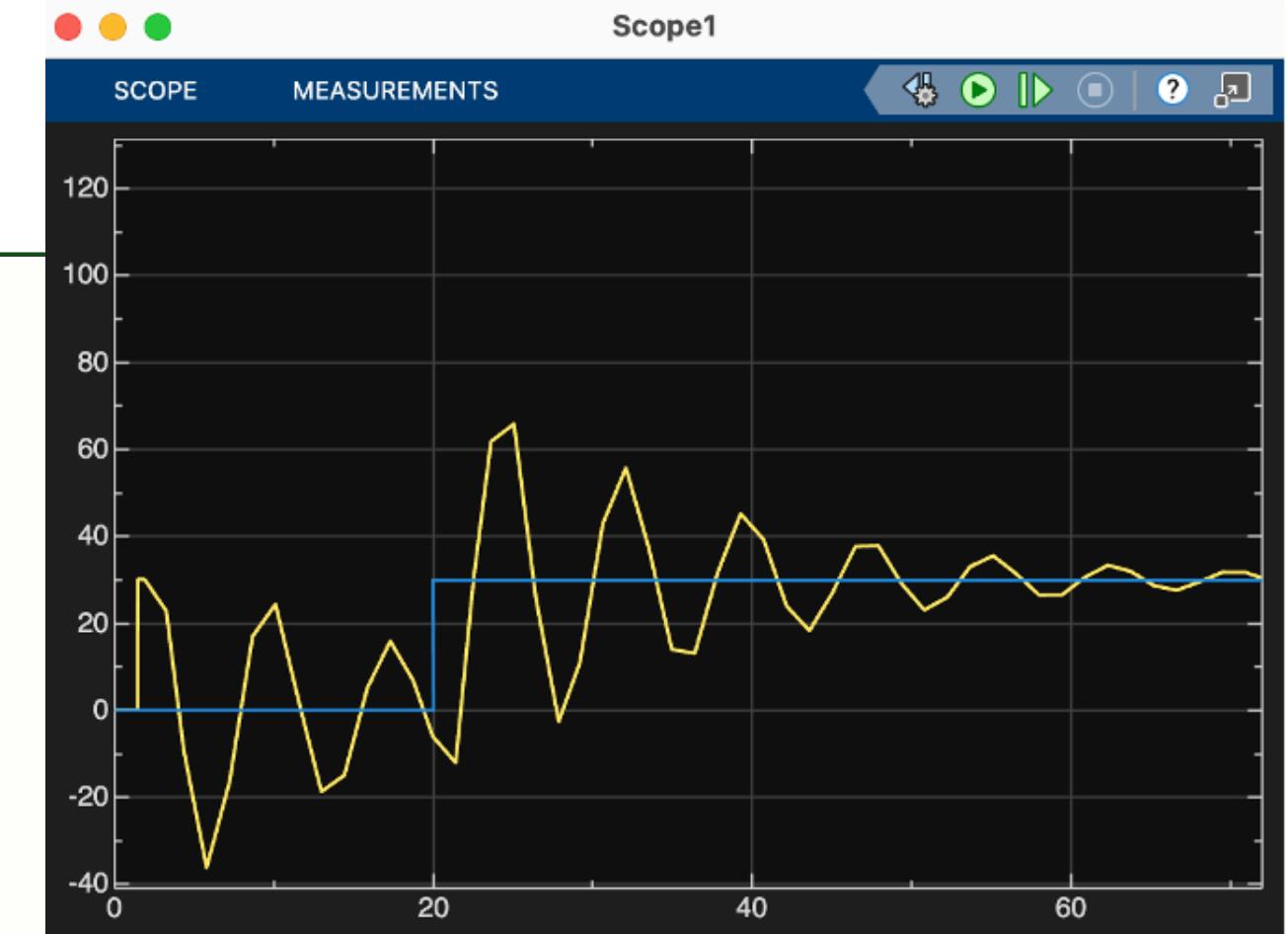
Gráfica del diagrama de control realizado en Simulink (Matlab). Elaborado por: Mariana Gutiérrez Tamayo.

**Modelo dinámico linealizado → respuesta de primer orden con retardo.**

**Parámetros del sistema:**

$$K = 0.997, \tau = 13 \text{ h}, t_d = 1.5 \text{ h}$$

**Gráfica 6.** Gráfica de la respuesta de la variable controlada tras la perturbación con los parámetros obtenidos por el método de Ziegel-Nichols. Elaborado por: Mariana Gutiérrez Tamayo.



# Instrumentación propuesta

Dispositivo	Ubicación	Tipo
<b>Sensor de temperatura del medio (T)</b>	Dentro del biorreactor	RTD o Termopar
<b>Sensor de temperatura de la chaqueta (Tj)</b>	Circuito del fluido de refrigeración	RTD / Termopar
<b>Actuador</b>	Fluido luido de la chaqueta	Válvula de control neumática modulante
<b>Controlador</b>	PLC / sistema PID o ANN	Implementa acción de control
<b>Elemento final de control</b>	Chaqueta	Regula la energía térmica del sistema

# Estrategias de control propuestas

Estrategia	Descripción resumida	Ventajas	Limitaciones
<b>Control Feedback (PID)</b>	Mide la temperatura del reactor ( $T$ ) y ajusta $T_j$ a través del PID.	Simple, económico, fácil de implementar.	Responde después del error (retardo, sobreimpulso).
<b>Control en cascada (PID-PID)</b>	Lazo maestro controla $T$ (reactor), lazo esclavo regula $T_j$ (chaqueta).	Mayor precisión, rápida respuesta, menos sobreimpulso.	Más instrumentación y sintonización compleja.
<b>Control avanzado con redes neuronales (ANN)</b>	Control predictivo basado en aprendizaje del comportamiento térmico y cinético.	Se adapta a no linealidades y cambios del proceso.	Requiere datos de entrenamiento y mayor complejidad.

## CONCLUSIONES

- El control de temperatura es clave para estabilidad y productividad del proceso.
- El PID en cascada ofrece el mejor equilibrio entre desempeño y complejidad.
- Las redes neuronales representan una alternativa avanzada adaptable a cambios en la cinética y composición del sustrato.
- La estrategia propuesta garantiza condiciones seguras y óptimas para la fermentación de etanol con *S. cerevisiae*.





**TURNO DE...**

**PREGUNTAS (fáciles)**  
**COMENTARIOS (bonitos)**  
**CRÍTICAS (constructivas)**  
**APORTACIONES (monetarias)**

# REFERENCIAS

- Andlar, M., Rezić, T., Marđetko, N., Kracher, D., Ludwig, R., & Šantek, B. (2018). Lignocellulose degradation: An overview of fungi and fungal enzymes involved in lignocellulose degradation. In *Engineering in Life Sciences* (Vol. 18, Issue 11, pp. 768–778). Wiley-VCH Verlag. <https://doi.org/10.1002/elsc.201800039>
- ÇAYLAK Fazilet VARDAR SUKAN, B. (1998). Article 6 1-1-1998 Part of the Chemistry Commons Recommended Citation Recommended Citation ÇAYLAK. In *Turkish Journal of Chemistry* (Vol. 22, Issue 4). <https://journals.tubitak.gov.tr/chem:https://journals.tubitak.gov.tr/chem/vol22/iss4/6>
- Edeh, I. (2021). Bioethanol Production: An Overview. In *Bioethanol Technologies*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.94895>
- Mohd Azhar, S. H., Abdulla, R., Jambo, S. A., Marbawi, H., Gansau, J. A., Mohd Faik, A. A., & Rodrigues, K. F. (2017a). Yeasts in sustainable bioethanol production: A review. In *Biochemistry and Biophysics Reports* (Vol. 10, pp. 52–61). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2017.03.003>
- Plesu Popescu, A. E., Pellin, J. L., Bonet, J., & Llorens, J. (2021). Bioethanol dehydration and mixing by heterogeneous azeotropic distillation. *Journal of Cleaner Production*, 320. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128810>
- Sriputorn, B., Laopaiboon, P., Phukoetphim, N., Uppatcha, N., Phuphalai, W., & Laopaiboon, L. (2021). Very high gravity ethanol fermentation from sweet sorghum stem juice using a stirred tank bioreactor coupled with a column bioreactor. *Journal of Biotechnology*, 332, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2021.03.012>
- Vacharanukrauh, T., Soottitantawat, A., Thongchul, N., Kiatkittipong, W., Weeranoppanant, N., & Assabumrungrat, S. (2025). A Review on Comprehensive Strategies for Decarbonizing Bioethanol Production Process. *Green Energy and Resources*, 100153. <https://doi.org/10.1016/j.gerr.2025.100153>
- Vohra, M., Manwar, J., Manmode, R., Padgilwar, S., & Patil, S. (2014). Bioethanol production: Feedstock and current technologies. In *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 2, Issue 1, pp. 573–584). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2013.10.013>