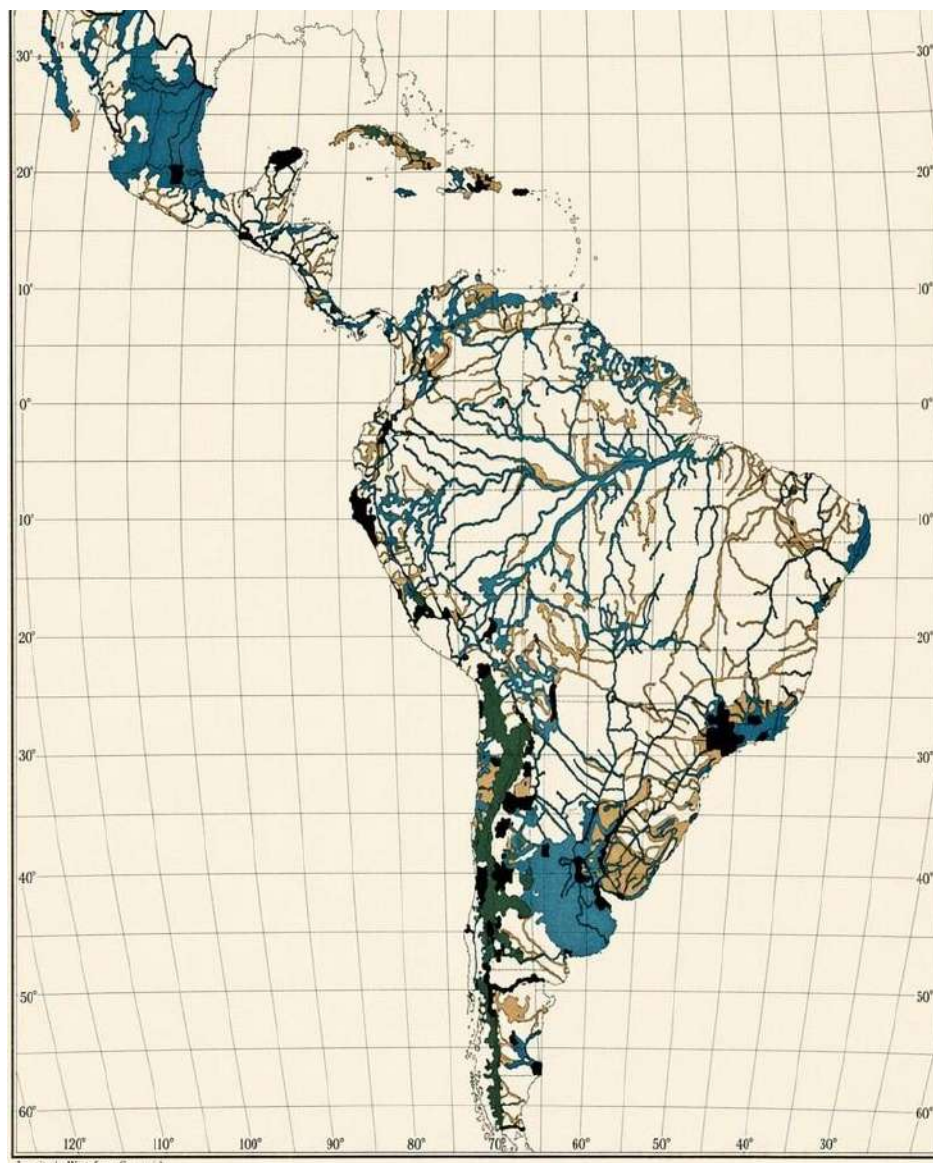


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Gemelo digital y control predictivo para la optimización térmica del proceso de fermentación y maduración cervecera como aproximación hacia la Industria 4.0

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21422182>

Abad Luis Aguilar Mamani *

RESUMEN

La fermentación y maduración cervecera en tanques cilíndricos constituye una etapa decisiva para la estabilidad del proceso y la calidad final del producto. En esta fase, la temperatura influye directamente en la actividad de la levadura, el consumo de extracto fermentable, la formación de alcohol, la generación de dióxido de carbono y la evolución fisicoquímica de la cerveza. En plantas con procesos semiautomatizados, el control térmico suele depender de estrategias convencionales, lo que limita la posibilidad de simular, anticipar y optimizar el comportamiento del sistema. Este artículo propone una metodología para desarrollar una etapa inicial de gemelo digital del proceso de fermentación y maduración cervecera tipo pilsener/lager en tanque cilíndrico, integrada con control predictivo basado en modelo. El trabajo se apoya en modelado dinámico, simulación computacional, definición de una trayectoria térmica referencial de 15 días y comparación entre control PID y MPC mediante indicadores cuantitativos. Los resultados muestran que el MPC redujo el error cuadrático medio entre 84,10 % y 87,90 %, el error absoluto integral entre 69,96 % y 76,75 %, y la desviación estándar del error entre 60,52 % y 65,63 % respecto al PID. Asimismo, redujo el tiempo acumulado fuera de banda, aunque incrementó el esfuerzo de control entre 130,77 % y 135,38 %. El desarrollo corresponde a una aproximación computacional previa, sin conexión en tiempo real con planta, orientada a una futura integración industrial bajo el enfoque de Industria 4.0.

PALABRAS CLAVE: Gemelo digital, Fermentación cervecera, Control predictivo, Industria 4.0.

*Profesor de la Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-0995-6957>. E-mail: aaguilar@umsa.edu.bo

Digital Twin and Model Predictive Control for Thermal Optimization of Beer Fermentation and Maturation as an Approach Toward Industry 4.0

ABSTRACT

Beer fermentation and maturation in cylindroconical tanks is a decisive stage for process stability and final product quality. During this phase, temperature directly affects yeast activity, fermentable extract consumption, alcohol formation, carbon dioxide generation, and the physicochemical evolution of beer. In semi-automated plants, thermal control often relies on conventional strategies, which limits the ability to simulate, anticipate, and optimize system behavior. This paper proposes a methodology for developing an initial stage of a digital twin for the pilsener/lager beer fermentation and maturation process in a cylindroconical tank, integrated with model predictive control. The study is based on dynamic modeling, computational simulation, the definition of a 15-day reference thermal trajectory, and the comparison between PID and MPC control using quantitative indicators. The results show that MPC reduced the mean squared error by 84.10 % to 87.90 %, the integral absolute error by 69.96 % to 76.75 %, and the standard deviation of the error by 60.52 % to 65.63 % compared with PID. It also reduced the accumulated time outside the tolerance band, although it increased control effort by 130.77 % to 135.38 %. The development corresponds to a computational approach prior to future industrial implementation, without real-time connection to the plant, and oriented toward integration under the Industry 4.0 framework.

KEYWORDS: Digital twin, Beer fermentation, Model predictive control, Industry 4.0.

Introducción

La fermentación y maduración cervecera constituyen etapas críticas para la estabilidad del proceso y la calidad final del producto. En ellas se desarrollan transformaciones asociadas al consumo de extracto fermentable, la actividad metabólica de la levadura, la formación de etanol, la generación de dióxido de carbono, la evolución del pH y la estabilización progresiva de la cerveza. Cuando estas operaciones se realizan en tanques cilíndricos —TCC—, el control de la temperatura adquiere especial relevancia, ya que una misma unidad puede integrar la fermentación activa, el enfriamiento posterior y la maduración en frío. Por ello, la temperatura incide directamente en la velocidad de

fermentación, la formación de compuestos secundarios, la estabilidad del producto y la repetibilidad entre lotes (Briggs et al., 2004; Bamforth, 2016).

En plantas cerveceras con niveles intermedios de automatización, el control térmico suele apoyarse en chaquetas de glicol, válvulas de enfriamiento, sensores de temperatura, controladores locales, PLC o sistemas de supervisión. En la práctica, muchas operaciones continúan dependiendo de controladores PID, consignas por etapas o intervención operativa. Aunque el PID es ampliamente utilizado por su simplicidad y robustez, puede presentar limitaciones cuando el proceso tiene comportamiento no lineal, retardos, restricciones físicas, perturbaciones térmicas o necesidad de seguir trayectorias variables de temperatura (Åström y Hägglund, 2006; Seborg et al., 2017).

Frente a estas limitaciones, el control predictivo basado en modelo —Model Predictive Control, MPC— ofrece una alternativa adecuada para procesos donde la variable controlada debe anticiparse a cambios futuros. A diferencia de un controlador convencional, el MPC utiliza un modelo matemático del proceso para predecir su comportamiento dentro de un horizonte de predicción y calcular acciones de control orientadas a un objetivo de desempeño. Esta característica resulta pertinente en la fermentación y maduración cervecera tipo pilsener/lager, donde la temperatura sigue un perfil tecnológico por etapas y no una referencia constante (Camacho y Bordons, 2007; Qin y Badgwell, 2003).

De forma complementaria, los gemelos digitales se han consolidado como herramientas para representar, simular y analizar procesos industriales antes de intervenir físicamente la planta. Sin embargo, el término debe emplearse con precisión. Kritzinger et al. (2018) distinguen entre modelo digital, sombra digital y gemelo digital según el nivel de integración de datos entre el sistema físico y su representación virtual. En este artículo, el desarrollo se plantea como una etapa inicial de gemelo digital: una aproximación computacional basada en modelado dinámico, simulación y evaluación de estrategias de control, sin conexión en tiempo real con planta.

Bajo este enfoque, el propósito del artículo es proponer y evaluar, mediante simulación computacional, una metodología de gemelo digital integrada con control predictivo basado en modelo para la optimización térmica del proceso de fermentación y maduración cervecera tipo pilsener/lager en TCC. La propuesta compara el desempeño del

MPC frente a un controlador PID convencional bajo condiciones equivalentes de simulación, como paso previo a una futura integración industrial alineada con la Industria 4.0.

1 Revisión de literatura

1.1 Fermentación y maduración cervecera en TCC

La fermentación cervecera constituye una de las etapas más relevantes en la producción de cerveza, debido a que en ella las levaduras transforman los azúcares fermentables del mosto en etanol, dióxido de carbono y compuestos secundarios que influyen en el perfil sensorial del producto final. Esta operación no debe interpretarse únicamente como una conversión bioquímica aislada, sino como un proceso dinámico en el que interactúan variables microbiológicas, fisicoquímicas, térmicas y operativas (Briggs et al., 2004; Bamforth, 2016).

En la producción industrial moderna, la fermentación y la maduración pueden desarrollarse en tanques cilíndricos. Estos equipos permiten integrar, en una misma unidad, la fermentación activa, el enfriamiento posterior, la separación de levadura y la maduración en frío. Por ello, el control térmico no se limita al periodo de fermentación principal, sino que debe abarcar el perfil completo del proceso desarrollado en el TCC.

En cervezas tipo pilsener/lager, el proceso se caracteriza por temperaturas relativamente bajas en comparación con otros estilos de fermentación. La primera etapa favorece una fermentación controlada, mientras que la maduración en frío contribuye a la estabilización del producto. En este tipo de operación, el seguimiento de una trayectoria térmica resulta determinante, ya que la referencia de temperatura puede cambiar por etapas: fermentación fría, incremento controlado de temperatura, enfriamiento hacia maduración y mantenimiento a baja temperatura.

1.2 Importancia del control de temperatura

La temperatura es una variable decisiva durante la fermentación y maduración cervecera. Su efecto se manifiesta en la actividad metabólica de la levadura, la velocidad de consumo de sustrato, la formación de etanol, la producción de dióxido de carbono, la evolución del pH y la generación de compuestos secundarios vinculados al aroma y sabor de la cerveza.

Un control térmico deficiente puede producir desviaciones en la cinética de fermentación, variabilidad entre lotes, cambios en el perfil sensorial y dificultades para sostener condiciones estables durante la maduración. Por esta razón, la temperatura se adopta en este trabajo como la variable controlada principal de la propuesta metodológica.

Desde el punto de vista industrial, la temperatura del TCC puede regularse mediante chaquetas de enfriamiento, circulación de glicol, válvulas modulantes, válvulas ON/OFF, controladores locales, PLC o sistemas de supervisión. Sin embargo, cuando la operación es semiautomatizada, la anticipación de desviaciones térmicas puede ser limitada, especialmente si el proceso no cuenta con un modelo dinámico que permita proyectar escenarios futuros.

1.3 Modelado dinámico del proceso cervecero

El modelado dinámico permite representar matemáticamente la evolución temporal de las variables relevantes de un proceso. En fermentación cervecera, las variables principales consideradas pueden expresarse como:

$X(t)$: biomasa o concentración de levadura

$S(t)$: sustrato o extracto fermentable

$P(t)$: producto asociado al etanol

$T(t)$: temperatura del fermentador

El modelo dinámico básico se fundamenta en balances de masa y energía. Los balances de masa describen el crecimiento de biomasa, el consumo de sustrato y la formación de producto. El balance de energía, por su parte, permite representar la variación de temperatura a partir de la generación de calor asociada a la actividad metabólica y de la remoción de calor producida por el sistema de enfriamiento.

Una forma simplificada de representar el crecimiento microbiano es la cinética de Monod, que relaciona la tasa específica de crecimiento con la concentración de sustrato disponible (Monod, 1949; Doran, 2013). Esta formulación es útil para construir una primera aproximación del proceso, aunque no incorpora todos los fenómenos presentes en una fermentación real, como inhibición por etanol, variaciones de pH, presión, limitación de nutrientes, estrés osmótico o cambios metabólicos de la levadura.

En estudios recientes sobre fermentación cervecera, el modelado dinámico se ha empleado para analizar el crecimiento, el desempeño y el control del proceso, lo que respalda su utilidad como herramienta de simulación y evaluación de estrategias de control (Yerolla et al., 2023).

1.4 Control PID en procesos industriales

El controlador proporcional-integral-derivativo, conocido como PID, es una de las estrategias de control más difundidas en la industria debido a su simplicidad, robustez y facilidad de implementación. Su acción combina tres componentes: el término proporcional, que responde al error actual; el término integral, que corrige el error acumulado; y el término derivativo, que anticipa la tendencia del error (Åström y Hägglund, 2006; Seborg et al., 2017).

La forma general del controlador PID puede expresarse como:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Donde $u(t)$ representa la acción de control, $e(t)$ el error entre la referencia y la variable medida, K_p la ganancia proporcional, K_i la ganancia integral y K_d la ganancia derivativa.

En el proceso de fermentación y maduración cervecera, un PID puede utilizarse para regular la temperatura del TCC mediante la acción sobre el sistema de enfriamiento. No obstante, su desempeño puede verse limitado cuando el proceso requiere seguimiento de trayectorias térmicas variables, manejo de restricciones, anticipación de perturbaciones o suavidad en la acción de control.

Por ello, en este artículo el PID se considera como estrategia convencional de referencia, frente a la cual se evalúa el desempeño de una estrategia predictiva.

1.5 Control predictivo basado en modelo

El control predictivo basado en modelo, o MPC, es una estrategia avanzada que emplea un modelo matemático del proceso para predecir el comportamiento futuro de la variable controlada y calcular acciones óptimas de control. A diferencia del PID, el MPC no se limita a reaccionar ante el error actual, sino que anticipa la evolución del sistema dentro de un horizonte de predicción (Camacho y Bordons, 2007; Qin y Badgwell, 2003).

La estructura básica de un MPC incluye un modelo de predicción, un horizonte de predicción, un horizonte de control, una función objetivo, restricciones sobre variables y acciones de control, y una estrategia de horizonte móvil. La función objetivo puede formularse penalizando la desviación de la temperatura respecto a la referencia y los cambios bruscos en la acción de enfriamiento:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} q_T (T_{k+i} - T_{ref,k+i})^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} r_u (\Delta u_{k+i})^2$$

Donde N_p representa el horizonte de predicción, N_c el horizonte de control, T_{k+i} la temperatura predicha, $T_{ref,k+i}$ la referencia térmica futura, Δu_{k+i} la variación de la acción de control, y q_T y r_u las ponderaciones de desempeño.

En el proceso cervecero, esta formulación resulta pertinente porque el perfil térmico no necesariamente permanece constante. En una fermentación y maduración tipo pilsener/lager, la referencia puede desplazarse desde una temperatura inicial de fermentación hacia una temperatura baja de maduración. Esta característica hace del MPC una alternativa adecuada para evaluar el seguimiento de trayectorias térmicas por etapas.

1.6 Gemelos digitales

Un gemelo digital es una representación virtual de un sistema físico que puede utilizarse para monitorear, simular, analizar, predecir y optimizar su comportamiento. En procesos industriales, este enfoque permite estudiar escenarios antes de intervenir físicamente el proceso real, lo que reduce riesgos y mejora la toma de decisiones (Kritzinger et al., 2018; Tao et al., 2018).

Sin embargo, el concepto debe emplearse con precisión. Cuando existe solo un modelo computacional sin intercambio automático de datos con la planta, puede hablarse de modelo digital. Cuando el sistema virtual recibe datos del proceso físico, pero no retroalimenta necesariamente al proceso, se aproxima al concepto de sombra digital. En cambio, cuando existe integración dinámica entre el sistema físico y su representación virtual, se habla de gemelo digital en un sentido más completo.

En este artículo, el desarrollo se plantea como una etapa inicial de gemelo digital orientada a la simulación, predicción y evaluación de estrategias de control. Dado que todavía no se dispone de datos reales de planta para establecer una conexión en tiempo

real, el enfoque se presenta como una aproximación computacional previa a una futura implementación industrial.

1.7 Industria 4.0 y digitalización cervecera

La Industria 4.0 se asocia con la integración de tecnologías digitales, automatización avanzada, análisis de datos, sistemas ciberfísicos, conectividad industrial, inteligencia artificial, simulación y toma de decisiones basada en información. En la industria cervecera, estas tecnologías pueden contribuir a mejorar la trazabilidad, la estabilidad operativa, la repetibilidad de lotes, el control de calidad y la eficiencia del proceso.

El desarrollo de un gemelo digital para fermentación y maduración cervecera se alinea con esta tendencia, ya que permite construir una representación virtual del proceso, simular perfiles térmicos, evaluar perturbaciones y comparar estrategias de control antes de intervenir físicamente la planta. Sin embargo, la transición hacia Industria 4.0 debe entenderse como un proceso gradual, no como la incorporación inmediata de tecnología avanzada sin validación previa. Esta transición requiere modelado, simulación, recopilación de datos reales, calibración, validación, monitoreo, recomendación operativa y eventual control supervisado.

1.8 Integración entre gemelo digital y MPC

La integración entre gemelo digital y MPC constituye el eje técnico del artículo. El gemelo digital proporciona el entorno de simulación y predicción, mientras que el MPC utiliza el modelo dinámico para calcular acciones de control orientadas al seguimiento de la trayectoria térmica.

La arquitectura conceptual puede representarse de la siguiente manera:

Proceso en TCC → *sensores/datos* → *modelo dinámico* → *simulación/predicción*
→ *MPC* → *acción de enfriamiento*

En la etapa actual, esta arquitectura se desarrolla de forma computacional. En una fase posterior, podría conectarse con datos reales de temperatura, grados Plato, pH, presión de CO₂, setpoint, acción de enfriamiento y registros históricos del TCC. La integración propuesta permite evaluar, antes de una intervención industrial, si una estrategia MPC puede mejorar el seguimiento térmico frente a una estrategia PID. Además, aporta una base

metodológica para avanzar hacia sistemas más inteligentes, conectados y alineados con la lógica de Industria 4.0.

1.9 Brecha de investigación

La literatura aborda de manera separada el modelado de fermentación cervecera, el control PID, el control predictivo, los gemelos digitales y la digitalización industrial. Sin embargo, existe una oportunidad de investigación aplicada en la integración de estos elementos para el análisis térmico del proceso de fermentación y maduración cervecera en TCC.

La brecha que orienta este trabajo puede sintetizarse así: aunque existen fundamentos sobre fermentación cervecera, modelado dinámico, control predictivo y gemelos digitales, todavía se requiere una metodología integrada que permita desarrollar, simular y evaluar una etapa inicial de gemelo digital con MPC para el control térmico del proceso de fermentación y maduración cervecera, como paso previo a una futura implementación industrial bajo el enfoque de Industria 4.0.

2 Materiales y métodos

2.1 Enfoque de la investigación

El artículo se desarrolla bajo un enfoque de investigación aplicada, cuantitativa y tecnológica, orientado al modelado, simulación y análisis del control térmico del proceso de fermentación y maduración cervecera. Se considera aplicada porque aborda un problema específico de control de temperatura en un proceso industrial; cuantitativa, porque utiliza variables medibles e indicadores numéricos de desempeño; y tecnológica, porque propone una arquitectura computacional basada en una etapa inicial de gemelo digital y control predictivo.

El desarrollo metodológico se organiza de acuerdo con la siguiente secuencia:

Modelado→Simulación→Control→Comparación→Validación

Esta ruta permite construir progresivamente el sistema propuesto. Primero se representa matemáticamente el proceso; luego se implementa el modelo en un entorno computacional; posteriormente se incorporan estrategias de control; y, finalmente, se

compara el desempeño de un controlador PID convencional frente a un controlador predictivo basado en modelo.

La validación considerada en esta etapa es computacional. En consecuencia, el artículo no presenta una implementación física directa en planta ni una validación industrial con lotes reales. Su alcance corresponde a una aproximación metodológica previa, útil como base para una futura integración con datos reales de proceso (Sargent, 2013).

2.2 Objeto de estudio y unidad de análisis

El objeto de estudio corresponde al proceso térmico de fermentación y maduración cervecera desarrollado en tanque cilindrocónico. El análisis se concentra en la relación entre la actividad fermentativa, el consumo de extracto fermentable, la generación de calor, la acción de enfriamiento y el seguimiento de una trayectoria térmica de referencia.

La unidad de análisis se define como un TCC representado mediante un modelo dinámico simplificado de operación por lotes. Para efectos de simulación, el sistema se describe a través de variables de estado que permiten representar la evolución de la biomasa, el sustrato, el producto y la temperatura.

Las variables principales del modelo son:

$X(t)$: concentración de biomasa o levadura

$S(t)$: concentración de sustrato o extracto fermentable

$P(t)$: concentración de producto asociado al etanol

$T(t)$: temperatura del fermentador

La variable controlada principal es la temperatura $T(t)$ mientras que la variable manipulada corresponde a la acción de enfriamiento $u(t)$. En el modelo, esta acción se representa de forma normalizada entre 0 y 1, donde 0 indica ausencia de enfriamiento y 1 representa la máxima acción de enfriamiento considerada en la simulación.

2.3 Modelo dinámico simplificado

El modelo dinámico se fundamenta en balances simplificados de masa y energía. Su formulación permite representar la evolución de biomasa, sustrato, producto y temperatura durante el proceso de fermentación y maduración.

El crecimiento microbiano se representa mediante una cinética tipo Monod:

$$\mu = \mu_{max} \frac{S_f}{K_s + S_f}$$

Donde:

$$S_f = \max(S - S_{res}, 0)$$

En esta formulación, S_f representa el sustrato fermentable disponible y S_{res} el extracto residual aproximado. Esta modificación evita que el modelo consuma completamente el sustrato, lo que resulta más coherente con un proceso cervecero real, en el cual permanece un extracto residual al final de la fermentación.

El balance de biomasa se expresa como:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

El balance de sustrato se representa como:

$$\frac{dS}{dt} = -\frac{1}{Y_{x/s}} \mu X$$

El balance de producto se formula como:

$$\frac{dP}{dt} = Y_{p/s} \left(-\frac{dS}{dt} \right)$$

Finalmente, el balance térmico simplificado se expresa como:

$$\frac{dT}{dt} = Q_{gen} - Q_{cool} + Q_{env} + d(t)$$

Donde Q_{gen} representa la generación térmica asociada a la actividad fermentativa, Q_{cool} la remoción de calor producida por la acción de enfriamiento, Q_{env} el intercambio térmico con el ambiente y $d(t)$ una perturbación térmica simulada.

El propósito del modelo no es reproducir con exactitud todos los fenómenos fisicoquímicos del proceso real. Su finalidad es ofrecer una base computacional para analizar el comportamiento térmico, construir una arquitectura inicial de gemelo digital y evaluar estrategias de control bajo condiciones reproducibles.

2.4 Perfil térmico referencial de fermentación y maduración

Debido a que en esta etapa no se dispone de datos históricos reales de planta, se adopta un perfil térmico teórico de referencia para un proceso tipo pilsener/lager

desarrollado en TCC. Este perfil se utiliza como escenario tecnológico de simulación y deberá ser contrastado posteriormente con información real de planta.

El proceso total considerado es de 15 días, compuesto por 5 días de fermentación, 10 días de maduración y un horizonte total de simulación de 360 horas.

Tabla 1 Perfil térmico referencial de fermentación y maduración

Etapas	Tiempo	Temperatura de referencia
Inicio / inoculación	0 h	10 °C
Fermentación inicial	0–24 h	10 °C a 12 °C
Fermentación principal	24–72 h	12 °C
Descanso / final de fermentación	72–96 h	12 °C a 14 °C
Fin de fermentación	96–120 h	14 °C
Enfriamiento a maduración	120–144 h	14 °C a -1.5 °C
Maduración fría	144–360 h	-1.5 °C

La función de referencia puede expresarse como:

$$T_{ref}(t) = \begin{cases} 10 + \frac{2}{24}t, & 0 \leq t \leq 24 \\ 12, & 24 < t \leq 72 \\ 12 + \frac{2}{24}(t - 72), & 72 < t \leq 96 \\ 14, & 96 < t \leq 120 \\ 14 + \frac{-15.5}{24}(t - 120), & 120 < t \leq 144 \\ -1.5, & 144 < t \leq 360 \end{cases}$$

Este perfil representa una curva teórica de fermentación y maduración. La temperatura final de -1,5 °C se adopta como valor de referencia tecnológica para la maduración fría, aunque deberá validarse posteriormente con el perfil utilizado en planta.

2.5 Parámetros principales de simulación

Tabla 2 *Parámetros principales utilizados en la simulación computacional*

Parámetro	Valor	Unidad	Descripción
Tiempo total de simulación	360	h	Proceso total de 15 días
Fermentación	120	h	Duración referencial de fermentación
Maduración	240	h	Duración referencial de maduración
T_0	10	°C	Temperatura inicial
$S_{0\text{base}}$	140	g/L	Sustrato inicial aproximado
S_{res}	28	g/L	Extracto residual aproximado
u	0–1	adimensional	Acción de enfriamiento normalizada
Banda de tolerancia	$\pm 0,10$	°C	Banda para evaluar tiempo fuera de banda

2.6 Arquitectura del gemelo digital propuesto

La arquitectura conceptual del gemelo digital se estructura en cinco niveles: proceso físico, instrumentación y adquisición de datos, modelo dinámico, motor de simulación y predicción, y módulo de control y optimización.

El flujo conceptual puede representarse de la siguiente manera:

TCC físico → sensores/datos → modelo dinámico → simulación/predicción → MPC → acción de enfriamiento

En la etapa actual, el sistema se desarrolla como una plataforma de simulación computacional. Para evolucionar hacia un gemelo digital conectado a planta se requerirán datos reales, entre ellos temperatura histórica del fermentador, perfil de referencia térmica, condiciones iniciales del mosto, grados Plato, volumen del TCC, sistema de enfriamiento, señal de control aplicada, frecuencia de muestreo y restricciones operativas.

2.7 Estrategias de control evaluadas

La metodología compara dos estrategias de control: un controlador PID convencional y un controlador predictivo basado en modelo.

2.7.1 Control PID

El controlador PID se emplea como estrategia convencional de referencia. Su función es calcular la acción de enfriamiento a partir del error entre la temperatura simulada y la referencia térmica.

El error térmico se define como:

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

La expresión general del controlador es:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

En la implementación complementaria en Simulink, el controlador se utilizó en configuración PI, entendida como un caso particular del PID con acción derivativa nula. Esta decisión se adoptó para evitar inestabilidades numéricas asociadas al filtro derivativo en un proceso térmico lento.

2.7.2 Control predictivo basado en modelo

El MPC utiliza el modelo dinámico para predecir el comportamiento futuro de la temperatura y calcular acciones de enfriamiento que minimicen una función objetivo.

La función objetivo propuesta es:

$$J = \sum_{i=1}^{N_p} q_T (T_{k+i} - T_{ref,k+i})^2 + \sum_{i=0}^{N_c-1} r_u (\Delta u_{k+i})^2$$

Donde N_p es el horizonte de predicción, N_c el horizonte de control, q_T la ponderación del error térmico, r_u la ponderación del esfuerzo de control y Δu la variación de la acción de enfriamiento.

El MPC permite incorporar restricciones sobre la temperatura, la acción de enfriamiento y los cambios bruscos de control. Esta característica resulta pertinente para el proceso cervecero, debido a que el perfil térmico cambia por etapas y el sistema de enfriamiento posee límites físicos de operación.

2.8 Escenarios de simulación

La simulación principal considera un perfil térmico teórico de 15 días para un proceso de fermentación y maduración tipo pilsener/lager en tanque cilíndrico. Este escenario

permite evaluar el seguimiento de una trayectoria térmica variable, lo cual representa de forma más adecuada el comportamiento tecnológico de un proceso cervecero en TCC que una referencia constante.

Tabla 3 Escenarios de simulación considerados

Escenario	Condición	Sustrato inicial	Perturbación
E1	Base sin perturbación	140 g/L	No
E2	Perturbación térmica moderada	140 g/L	Sí
E3	Perturbación térmica fuerte	140 g/L	Sí
E4	Sustrato inicial bajo	120 g/L	Sí
E5	Sustrato inicial alto	160 g/L	Sí

En esta simulación, el desempeño de los controladores se evalúa respecto a una referencia variable $T_{ref}(t)$, no respecto a una referencia fija. Esta decisión permite analizar la capacidad de cada estrategia para seguir un perfil térmico tecnológico y mantener la temperatura dentro de condiciones deseadas durante la fermentación y maduración.

2.9 Indicadores de desempeño

Para comparar el desempeño térmico de los controladores PID y MPC se utilizan los siguientes indicadores.

El error térmico se define como:

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

El error cuadrático medio se calcula como:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (T_k - T_{ref,k})^2$$

El error absoluto integral se calcula como:

$$IAE = \int_0^{t_f} |T(t) - T_{ref}(t)| dt$$

La desviación estándar del error térmico se calcula como:

$$StdError = std(T - T_{ref})$$

El esfuerzo de control se calcula como:

$$E_u = \sum_{k=1}^n (\Delta u_k)^2$$

El tiempo acumulado fuera de banda se calcula como:

$$T_{fb} = \sum I(|e_k| > banda) \Delta t$$

Dado que el proceso utiliza una referencia térmica variable, la desviación estándar de la temperatura absoluta no constituye el indicador más representativo del desempeño del controlador. Por ello, se prioriza la desviación estándar del error térmico, ya que mide la variabilidad respecto a la trayectoria deseada y no la variabilidad propia del perfil de proceso.

2.10 Consideraciones de confidencialidad y validación futura

El presente artículo no utiliza datos internos, recetas, costos, volúmenes productivos ni parámetros confidenciales de planta. El perfil térmico empleado corresponde a una referencia tecnológica teórica y no debe interpretarse como dato oficial de una empresa específica.

Para una futura validación industrial, se requerirán datos reales de temperatura histórica del TCC, setpoint térmico por lote, grados Plato iniciales y finales, pH, presión de CO₂, señal de enfriamiento, frecuencia de muestreo, volumen del tanque, tipo de sistema de enfriamiento y restricciones operativas.

Hasta contar con dichos datos, los resultados deben interpretarse como resultados de simulación computacional, válidos para el análisis metodológico propuesto, pero no como evidencia de desempeño industrial real. En consecuencia, el sistema desarrollado corresponde a una etapa de modelado y simulación dentro de la ruta hacia un gemelo digital conectado. La evolución hacia una sombra digital o un gemelo digital industrial requerirá incorporar datos históricos o en línea del proceso real.

2.11 Implementación computacional

La simulación computacional fue implementada en MATLAB mediante un script multiescenario que permitió evaluar el desempeño de los controladores PID y MPC bajo cinco condiciones de simulación. De manera complementaria, se desarrolló una

implementación en Simulink para verificar la consistencia del modelo PID/PI y la exportación de señales al espacio de trabajo de MATLAB.

Por razones de extensión, los códigos completos, el modelo Simulink y las parametrizaciones utilizadas se encuentran disponibles como material complementario en un repositorio externo.

3 Resultados

3.1 Resultados de simulación del perfil fermentación–maduración

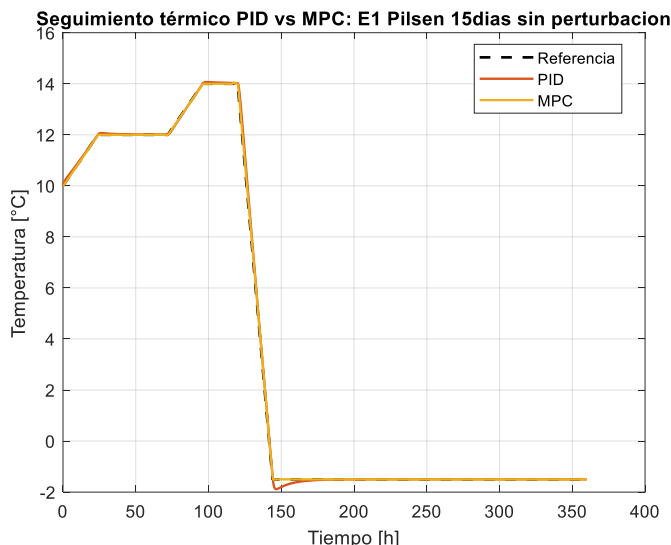
La simulación principal consideró un proceso total de 15 días en tanque cilíndrico, compuesto por una etapa de fermentación de 5 días y una etapa de maduración de 10 días. La trayectoria térmica de referencia se definió por etapas: inicio a 10 °C, incremento progresivo a 12 °C, posterior incremento a 14 °C, enfriamiento hacia maduración y mantenimiento final a aproximadamente -1,5 °C.

Se evaluaron cinco escenarios de simulación: condición base sin perturbación, perturbación térmica moderada, perturbación térmica fuerte, sustrato inicial bajo y sustrato inicial alto. En cada caso se comparó el desempeño de un controlador PID frente a una estrategia de control predictivo basado en modelo. Los indicadores considerados fueron error cuadrático medio, error absoluto integral, desviación estándar del error, error máximo absoluto, esfuerzo de control y tiempo acumulado fuera de banda.

En todos los escenarios simulados, el controlador MPC presentó mejor desempeño térmico que el controlador PID. La reducción del error cuadrático medio se ubicó entre 84,10 % y 87,90 %, mientras que la reducción del error absoluto integral estuvo entre 69,96 % y 76,75 %. Asimismo, la desviación estándar del error térmico disminuyó entre 60,52 % y 65,63 %, y el error máximo absoluto se redujo entre 67,38 % y 69,57 %. Estos resultados indican que el MPC logró un seguimiento más preciso de la trayectoria térmica de fermentación y maduración.

La Figura 1 muestra el seguimiento térmico del controlador PID y del controlador MPC respecto al perfil de referencia para el escenario base sin perturbación.

Figura 1. Seguimiento térmico PID y MPC respecto al perfil de referencia.



3.2 Comparación de desempeño entre PID y MPC

Tabla 4 Desempeño relativo del controlador MPC respecto al PID

Escenario	Mejor a MSE (%)	Mejor a IAE (%)	Mejora StdError (%)	Mejora ErrorMax (%)	Incremento Eu (%)
E1 Base sin perturbación	84.10	69.96	60.52	68.66	131.77
E2 Perturbación moderada	85.42	73.79	62.22	68.59	132.15
E3 Perturbación fuerte	87.90	76.75	65.63	68.51	130.77
E4 Sustrato bajo	84.79	73.16	61.42	67.38	135.38
E5 Sustrato alto	86.33	74.53	63.43	69.57	131.31

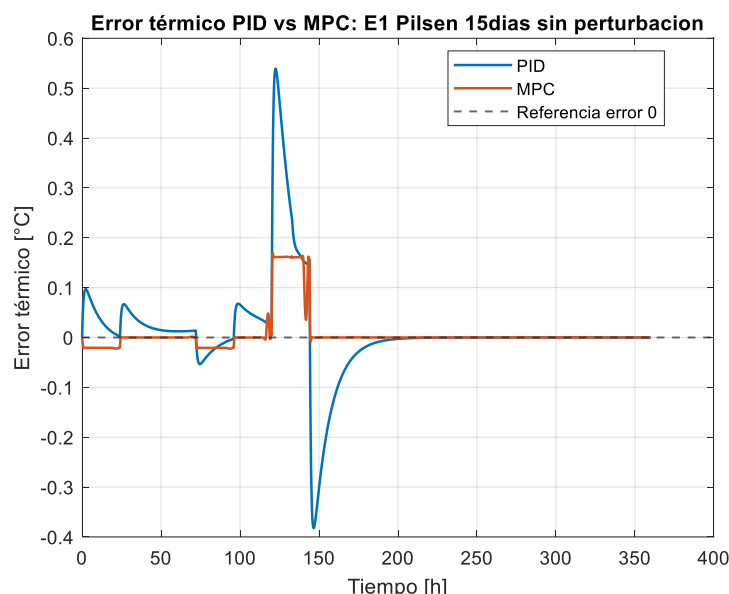
La Tabla 4 muestra una mejora consistente del MPC frente al PID en todos los indicadores de error. La mayor reducción del MSE se obtuvo en el escenario de perturbación térmica fuerte, con 87,90 %, mientras que la menor reducción se presentó en el escenario base sin perturbación, con 84,10 %. Este comportamiento sugiere que el controlador predictivo mantiene un desempeño favorable tanto en condiciones nominales como ante perturbaciones y variaciones en la concentración inicial de sustrato.

El IAE también presentó reducciones importantes. Este indicador mide el error acumulado durante todo el horizonte de simulación; por tanto, su disminución evidencia que

el MPC no solo reduce errores puntuales, sino que mejora el seguimiento térmico durante el ciclo completo de fermentación y maduración.

La Figura 2 presenta el error térmico de los controladores PID y MPC respecto a la referencia variable para el escenario base. En ella se observa que el MPC reduce los picos de error durante los cambios de etapa del perfil térmico.

Figura 2. Error térmico PID versus MPC para el escenario base.



3.3 Tiempo acumulado fuera de banda

Además de los indicadores tradicionales de error, se calculó el tiempo acumulado fuera de una banda de tolerancia de $\pm 0,10$ °C respecto a la referencia térmica. Este indicador permite cuantificar durante cuántas horas el sistema permanece fuera de la zona deseada de operación.

Tabla 5 *Tiempo acumulado fuera de banda de $\pm 0,10$ °C*

Escenario	PID [h]	MPC [h]	Reducción [h]
E1 Base sin perturbación	41.25	22.00	19.25
E2 Perturbación moderada	57.75	22.00	35.75
E3 Perturbación fuerte	66.50	22.00	44.50
E4 Sustrato bajo	57.25	22.00	35.25
E5 Sustrato alto	58.00	22.00	36.00

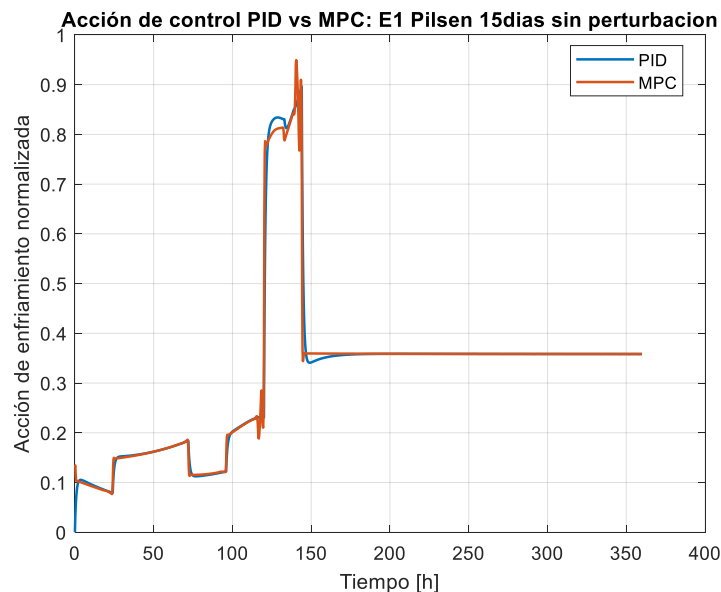
Los resultados muestran que el MPC redujo de manera significativa el tiempo acumulado fuera de banda. En el escenario base, el PID permaneció 41,25 h fuera de la banda de tolerancia, mientras que el MPC permaneció 22,00 h. En los escenarios con perturbación o variación de sustrato, el PID permaneció fuera de banda entre 57,25 h y 66,50 h, mientras que el MPC mantuvo un valor constante de 22,00 h. Este comportamiento confirma que el controlador predictivo mejora la capacidad de mantener la temperatura próxima a la trayectoria deseada.

3.4 Esfuerzo de control y variables simuladas

Aunque el MPC presentó mejor desempeño térmico, también mostró un incremento del esfuerzo de control entre 130,77 % y 135,38 % respecto al PID. Este resultado indica que la mejora en el seguimiento de temperatura se obtiene mediante una acción de enfriamiento más activa.

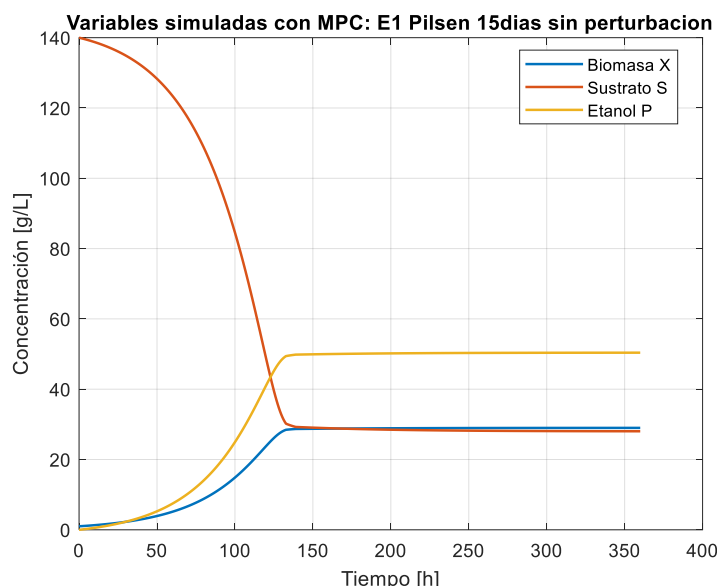
La Figura 3 muestra la acción de control PID y MPC para el escenario base. En ella se observa que el MPC presenta una acción de enfriamiento más intensa durante los cambios de etapa, especialmente en la transición desde 14 °C hacia la temperatura de maduración.

Figura 3. Acción de control PID versus MPC para el escenario base.



La Figura 4 muestra la evolución simulada de biomasa, sustrato y etanol con MPC para el escenario base. Esta figura permite verificar que el modelo reproduce tendencias coherentes con un proceso fermentativo: crecimiento de biomasa, consumo de sustrato y formación de producto.

Figura 4. Evolución simulada de biomasa, sustrato y etanol con MPC para el escenario base.



3.5 Verificación complementaria en Simulink

De manera complementaria, se implementó el modelo PID en Simulink para verificar la consistencia computacional del modelo y la correcta exportación de señales hacia MATLAB para el cálculo de indicadores. La simulación en Simulink consideró el mismo perfil térmico de 15 días y permitió comparar la temperatura simulada con la referencia variable.

Los indicadores obtenidos en Simulink para el escenario base fueron: MSE de 0,010340, IAE de 15,821424, desviación estándar del error de 0,100959, error máximo absoluto de 0,533247 °C y tiempo acumulado fuera de banda de 41,50 h. Estos valores son coherentes con los obtenidos en MATLAB para el escenario base con PID, lo que respalda la consistencia de la implementación computacional.

La implementación en Simulink permitió verificar visualmente tres comportamientos principales. Primero, la temperatura simulada sigue adecuadamente la trayectoria térmica

de referencia. Segundo, los mayores errores se presentan durante los cambios de etapa, especialmente en la transición hacia maduración. Tercero, la acción de enfriamiento aumenta de forma significativa durante el descenso desde 14 °C hasta aproximadamente -1,5 °C. Estos comportamientos se observan en las Figuras 5, 6 y 7.

Figura 5. Seguimiento térmico del controlador PID en Simulink para el perfil de fermentación y maduración de 15 días.

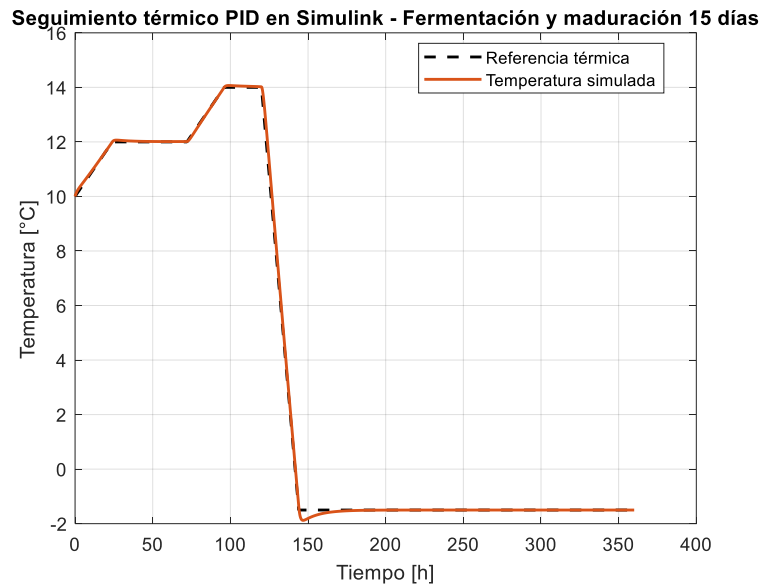


Figura 6. Error térmico del controlador PID respecto a la referencia variable en Simulink.

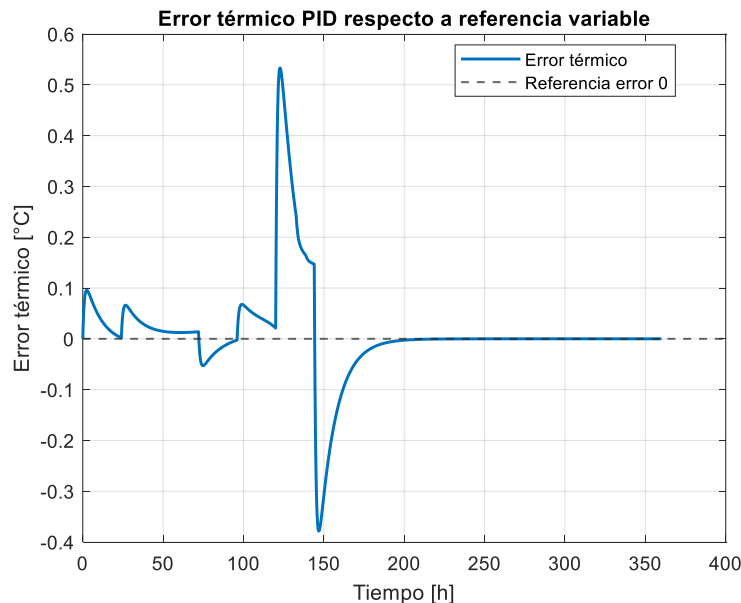
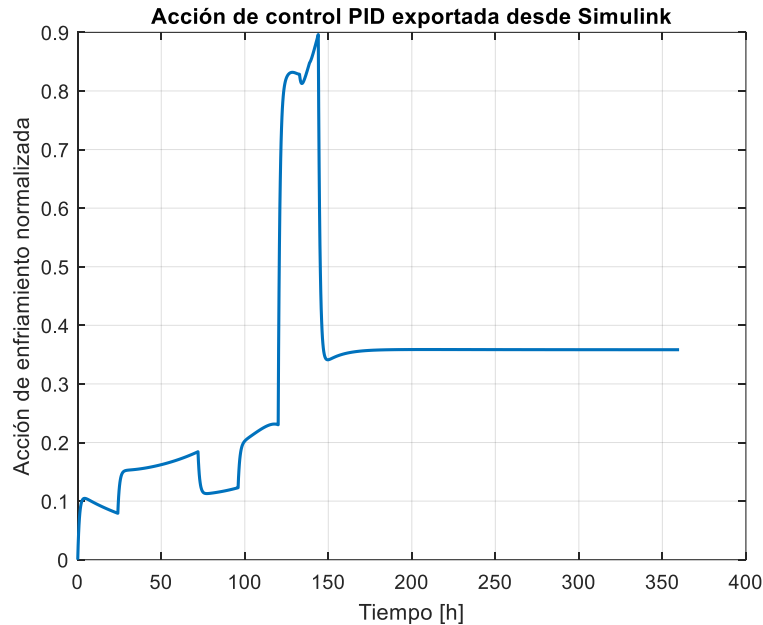


Figura 7. Acción de enfriamiento normalizada del controlador PID exportada desde Simulink.



4 Discusión

4.1 Interpretación técnica de los resultados

Los resultados obtenidos corresponden a una etapa de modelo digital y simulación de escenarios. Por tanto, el aporte principal del artículo no consiste en presentar una implementación industrial final, sino en proponer una ruta técnica para avanzar progresivamente desde el modelado computacional hacia una futura sombra digital, un gemelo digital conectado y, posteriormente, un esquema de control supervisado o automático basado en MPC.

El comportamiento observado es coherente con el principio de funcionamiento del control predictivo basado en modelo. El MPC utiliza una representación dinámica del proceso para anticipar la evolución futura de la temperatura y calcular una acción de control orientada a reducir el error respecto a la trayectoria térmica. Esta capacidad resulta especialmente útil en procesos donde la referencia no es constante, sino que cambia por etapas, como ocurre en la fermentación y maduración cervecera.

El PID, por su parte, mostró un comportamiento estable y técnicamente aceptable; sin embargo, presentó mayores valores de error acumulado, mayor desviación estándar del

error y mayor tiempo fuera de banda. Esta diferencia se explica por la propia naturaleza del controlador: su acción se basa principalmente en el error presente y pasado, sin una capacidad explícita para anticipar cambios futuros de referencia.

En el caso analizado, la referencia térmica varía a lo largo del proceso. Por ello, la desviación estándar de la temperatura absoluta no constituye el indicador más adecuado para evaluar el desempeño del controlador. En su lugar, se priorizó la desviación estándar del error térmico, ya que este indicador mide la variabilidad respecto a la trayectoria deseada y no la variabilidad natural del perfil térmico de fermentación y maduración.

4.2 Interpretación del esfuerzo de control

El incremento del esfuerzo de control observado en el MPC indica que la mejora en el seguimiento térmico se obtiene mediante una acción de enfriamiento más activa. Desde una perspectiva industrial, este resultado debe analizarse con cuidado, ya que una mayor actividad de control podría traducirse en mayor frecuencia de actuación de válvulas, mayor demanda del sistema de refrigeración o incremento del consumo energético.

Por esta razón, una futura implementación industrial del MPC deberá considerar restricciones físicas del sistema, capacidad real de enfriamiento, límites de operación de válvulas, disponibilidad de glicol, consumo energético y criterios de mantenimiento. En consecuencia, los resultados no deben interpretarse como una superioridad absoluta del MPC en todos los aspectos, sino como una mejora clara en el seguimiento térmico acompañada de una mayor exigencia sobre el sistema de control.

4.3 Limitaciones del estudio

Los resultados deben interpretarse dentro del alcance de una simulación computacional. El perfil térmico utilizado corresponde a una referencia tecnológica teórica para un proceso tipo pilsener/lager, pero todavía no constituye un perfil validado con datos históricos de una planta específica.

Asimismo, el modelo dinámico utilizado simplifica el proceso real. Aunque considera biomasa, sustrato, producto y temperatura, no incorpora de forma explícita otros fenómenos relevantes, como evolución del pH, presión de CO₂, inhibición por etanol, variaciones de composición del mosto, transferencia térmica detallada, geometría real del tanque, dinámica de válvulas o comportamiento real del sistema de glicol.

Por tanto, los resultados no deben leerse como una validación industrial directa, sino como evidencia computacional preliminar del potencial de una etapa inicial de gemelo digital y del control predictivo para mejorar el seguimiento térmico en el proceso de fermentación y maduración cervecera.

4.4 Implicaciones para la transición hacia Industria 4.0

Desde la perspectiva de los gemelos digitales, la simulación realizada muestra el potencial de una representación computacional del proceso para analizar escenarios, comparar estrategias de control y evaluar respuestas antes de intervenir físicamente una planta. Esto constituye un paso previo hacia la digitalización industrial, ya que permite pasar de una lógica puramente operativa a una lógica apoyada en modelado, simulación, predicción y toma de decisiones asistida.

La propuesta desarrollada representa una etapa inicial dentro de una ruta de transición hacia Industria 4.0. En primer lugar, se construye un modelo digital del proceso; en segundo lugar, se simulan escenarios de operación; en tercer lugar, se comparan estrategias de control; y, en una etapa posterior, el modelo podría calibrarse con datos reales de planta.

La evolución futura del sistema puede plantearse en cinco niveles:

1. **Modelo digital:** representación matemática y computacional del proceso.
2. **Simulación de escenarios:** análisis de perturbaciones, cambios de referencia y condiciones iniciales.
3. **Sombra digital:** incorporación de datos históricos o en línea provenientes del proceso real.
4. **Gemelo digital conectado:** integración entre el proceso físico y el modelo virtual.
5. **Control supervisado o automático:** uso del MPC como sistema de recomendación o como controlador avanzado.

Esta secuencia permite una implementación progresiva, reduce riesgos técnicos y evita intervenir directamente el proceso industrial sin una validación previa suficiente.

Conclusiones

La metodología desarrollada permitió construir una primera aproximación de gemelo digital para el proceso de fermentación y maduración cervecera tipo pilsener/lager en tanque cilíndrico, integrada con una estrategia de control predictivo basado en modelo. A partir de un modelo dinámico simplificado, una trayectoria térmica referencial de 15 días y escenarios equivalentes de simulación, fue posible comparar el comportamiento de un controlador PID convencional frente a un controlador MPC.

Los resultados evidencian que el MPC logró un seguimiento térmico más preciso que el PID en todos los escenarios evaluados. La reducción del error cuadrático medio se ubicó entre 84,10 % y 87,90 %, la del error absoluto integral entre 69,96 % y 76,75 %, y la de la desviación estándar del error térmico entre 60,52 % y 65,63 %. También se observó una disminución del error máximo absoluto y del tiempo acumulado fuera de la banda de tolerancia de $\pm 0,10$ °C, lo que confirma la capacidad del controlador predictivo para acompañar una referencia térmica variable durante la fermentación y maduración.

Esta mejora se explica por la propia lógica del MPC, que utiliza el modelo del proceso para anticipar la evolución futura de la temperatura y ajustar la acción de enfriamiento antes de que las desviaciones se amplifiquen. Esta característica resulta especialmente relevante en procesos cerveceros donde la consigna térmica cambia por etapas, desde la fermentación inicial hasta la maduración fría. En este tipo de operación, la capacidad de anticipación representa una ventaja frente al control PID, cuya acción depende principalmente del error presente y acumulado.

Sin embargo, el mejor seguimiento térmico del MPC estuvo acompañado por un incremento del esfuerzo de control entre 130,77 % y 135,38 % respecto al PID. Este aspecto es importante porque, en una planta real, una acción de enfriamiento más activa podría implicar mayor demanda del sistema de refrigeración, mayor frecuencia de actuación de válvulas, mayor consumo energético o mayor exigencia sobre los equipos. Por ello, la conveniencia industrial del MPC no debe evaluarse únicamente por la reducción del error, sino también por su impacto operativo y energético.

La verificación complementaria en Simulink permitió contrastar la coherencia computacional del modelo PID/PI respecto al escenario base. Los indicadores obtenidos

fueron consistentes con los resultados generados en MATLAB, lo que respalda la confiabilidad del entorno de simulación utilizado para comparar las estrategias de control.

El alcance del estudio debe entenderse como una etapa computacional previa. El modelo no constituye todavía una validación industrial definitiva ni un gemelo digital conectado en tiempo real con planta. Además, simplifica fenómenos propios de la fermentación real, como la evolución detallada del pH, la presión de CO₂, la dinámica de válvulas, la transferencia térmica por zonas, la geometría específica del tanque, el comportamiento del sistema de glicol y la variabilidad entre lotes.

A partir de estos resultados, la siguiente etapa debería orientarse a calibrar y validar el modelo con datos reales de planta: temperatura histórica del TCC, setpoint térmico por lote, grados Plato, pH, presión de CO₂, acción de enfriamiento, frecuencia de muestreo, volumen de trabajo y restricciones operativas del sistema de refrigeración. Con esa información, la propuesta podría evolucionar desde un modelo digital de simulación hacia una sombra digital alimentada por datos reales y, posteriormente, hacia un gemelo digital conectado con capacidad de recomendación o control supervisado.

En conjunto, la investigación muestra que la integración entre modelado dinámico, gemelo digital inicial y control predictivo basado en modelo es una ruta metodológica viable para estudiar y optimizar el control térmico de la fermentación y maduración cervecera. Su aporte principal no radica en reemplazar de forma inmediata el control convencional, sino en ofrecer una base computacional reproducible para comparar estrategias, evaluar escenarios y preparar una futura implementación industrial alineada con la Industria 4.0.

Disponibilidad de código y material complementario

Los códigos MATLAB utilizados para la simulación multiescenario PID/MPC, el script de cálculo de indicadores, el modelo Simulink y las parametrizaciones empleadas se encuentran disponibles como material complementario en Zenodo: <https://doi.org/10.5281/zenodo.20388856>. El material incluye el archivo principal de simulación, el archivo de procesamiento de señales exportadas desde Simulink, las condiciones iniciales, los parámetros cinéticos y térmicos, la configuración de escenarios, las tablas de resultados y las figuras generadas.

Referencias

- Aguilar Mamani, A. L. (2026). *Material complementario: Gemelo digital y control predictivo para la optimización térmica del proceso de fermentación y maduración cervecera* [Software y material complementario]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.20388856>
- Åström, K. J., y Hägglund, T. (2006). *Advanced PID control*. ISA—The Instrumentation, Systems, and Automation Society.
- Bamforth, C. W. (Ed.). (2016). *Brewing materials and processes: A practical approach to beer excellence*. Academic Press.
- Briggs, D. E., Boulton, C. A., Brookes, P. A., y Stevens, R. (2004). *Brewing: Science and practice*. Woodhead Publishing.
- Camacho, E. F., y Bordons, C. (2007). *Model predictive control* (2.a ed.). Springer.
- Doran, P. M. (2013). *Bioprocess engineering principles* (2.a ed.). Academic Press.
- Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G., Henjes, J., y Sihn, W. (2018). Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2018.08.474>
- Monod, J. (1949). The growth of bacterial cultures. *Annual Review of Microbiology*, 3, 371–394. <https://doi.org/10.1146/annurev.mi.03.100149.002103>
- Qin, S. J., y Badgwell, T. A. (2003). A survey of industrial model predictive control technology. *Control Engineering Practice*, 11(7), 733–764. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(02\)00186-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(02)00186-7)
- Sargent, R. G. (2013). Verification and validation of simulation models. *Journal of Simulation*, 7(1), 12–24.
- Seborg, D. E., Edgar, T. F., Mellichamp, D. A., y Doyle, F. J., III. (2017). *Process dynamics and control* (4.a ed.). Wiley.
- Tao, F., Cheng, J., Qi, Q., Zhang, M., Zhang, H., y Sui, F. (2018). Digital twin-driven product design, manufacturing and service with big data. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 94, 3563–3576. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0233-1>
- Yerolla, R., Nekkanti, S. H., Pullanikkattil, S., y Besta, C. S. (2023). Modeling and control of beer fermentation for optimal flavor and performance. *Chemical Engineering & Technology*, 46(8), 1554–1565. <https://doi.org/10.1002/ceat.202200376>

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

