

# **ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

## **Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas**

Optimización dinámica de la temperatura del proceso de fermentación  
para una cervecería artesanal en Guayaquil.

### **PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Químico**

Presentado por:

Israel Alfredo Cevallos Pino

Gabriela Belén Frías León

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2022

## DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico con todo mi amor y cariño. A Dios por regalarme salud y darme a las personas más importantes de mi vida, mis padres, mis hermanos y sobrinos. Quienes estuvieron siempre para apoyarme para seguir adelante y poder finalizar mi carrera.

Gabriela Frías

Dedico esto a todas las personas que me apoyaron en los buenos y malos momentos. Y a aquellos que ya no están entre nosotros y fueron una gran guía para mí.

Israel Cevallos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mis más sinceros agradecimientos a Dios, mis padres, mi Marita, toda mi familia, Abby y amigos que han estado siempre para apoyarme y ser mi guía para culminar una meta importante en mi vida. A mis estimados profesores y tutores Danny de Cecchis y Wilfredo Angulo que han sido el soporte para lograr nuestra meta y continuar seguir adelante.

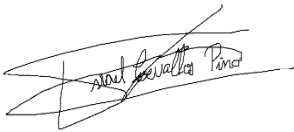
Gabriela Frías.

Agradezco de todo corazón a mis mejores amigas, Fabyola y Loren, por estar conmigo en las buenas y en las malas y demostrarme que la familia no es solo de sangre. A mis mejores amigos, a mi familia y profesores por apoyarme en todo momento. Sobre todo, a mis hámsteres Nesquik, Milky, Phoskito y Milo, sin los cuales mi salud mental y emocional no habría dado más de si en los peores momentos. A mi hermana y su esposa por darme una mano cuando más lo necesitaba.

Israel Cevallos.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Israel Cevallos y Gabriela Frías* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



---

Israel Cevallos Pino



---

Gabriela Frías León

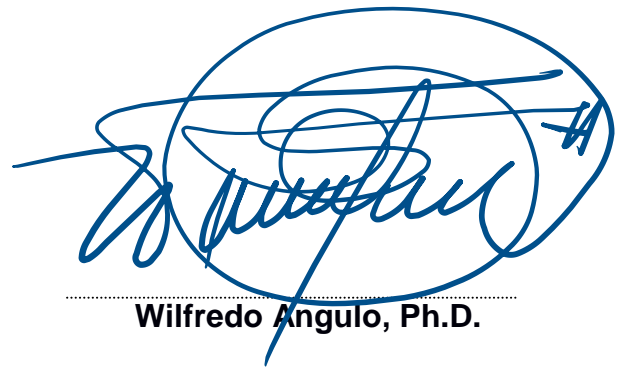
## EVALUADORES

.....  
**Suanny Mosquera, Ph. D(c).**

PROFESOR DE LA MATERIA

.....  
**Dany De Cecchis, Ph.D.**

PROFESOR TUTOR



.....  
**Wilfredo Angulo, Ph.D.**

PROFESOR CO-TUTOR

## RESUMEN

El proceso de fermentación es muy importante a nivel industrial para la elaboración de cerveza, yogur y otros compuestos, por ello es necesario llevar a cabo métodos que redunden en la mejora del producto final. Uno de estos es la optimización por medio del control de temperatura de la fermentación para la elaboración de cerveza mediante uso de herramientas computacionales. A través de este proceso se busca maximizar la concentración del alcohol que caracteriza a las bebidas alcohólicas y reducir los off-flavours que resultan perjudiciales y de mal gusto para el consumidor. Con esto se pretende mejorar la producción y calidad de la cerveza artesanal, los cuales fomenten la competitividad entre estas empresas, obteniendo mayor prestigio y por consiguiente incrementar sus ganancias. El proyecto fue realizado mediante el desarrollo de un algoritmo en Python que permitió simular y optimizar respecto a un caso base. Además, se realizó un experimento a escala de laboratorio para la apreciación del efecto de cambio de temperatura y levadura en el mosto. Con el algoritmo se logró obtener una concentración de etanol mayor a la que se esperaba. Por otro lado, la parte experimental hizo posible la obtención de los parámetros requeridos para dicha simulación. Los resultados de la simulación y optimización evidencian un aumento en la concentración de etanol con los cambios aplicados al proceso, mientras que resultados positivos de la experimentación en laboratorio en torno al sabor y off flavours resaltan la necesidad investigar condiciones de mejora del proceso de fermentación.

**Palabras Clave:** Fermentación, Control de Temperatura, Python, Parámetros.

## **ABSTRACT**

*The fermentation process is very important for industrial production of beer, yogurt, and other compounds; therefore, it is necessary to carry out methods for the improvement of the final product. One of these, it is the optimization controlling the fermentation temperature when brewing beer, using computational tools. The aim is maximizing the alcohol concentration and reduce off-flavours that are harmful and produce bad tasting. This is intended to improve the production and quality of craft beers, which promote competitiveness between these companies, obtaining greater prestige and therefore increasing their profits. The project was carried out through the development of a Python algorithm that allowed simulating and optimizing with respect to a base case. In addition, an experiment was carried out in laboratory scale to assess the effect of temperature change and yeast in the wort. Using the algorithm, it was possible to obtain a higher concentration of ethanol than expected. On the other hand, the experimental part made it possible to obtain the parameters required for afore mentioned simulation. The results of the simulation and optimization show an increase in the concentration of ethanol with the changes applied to the process, while the positive results of the laboratory experimentation on flavor and off-flavours highlight the need to investigate conditions to improve the fermentation process.*

**Keywords:** *Fermentation, Temperature Control, Python, Parameters*

# ÍNDICE GENERAL

EVALUADORES.....	5
RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción .....	1
1.1 Descripción del problema .....	1
1.2 Justificación del problema .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General.....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Cerveza en Ecuador .....	4
1.4.2 Compuestos deseados .....	4
1.4.3 Off-flavors .....	5
1.4.4 Control de temperatura en bioprocesos.....	5
1.4.5 Optimización dinámica.....	6
1.4.6 Métodos de optimización dinámica.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
2. Metodología .....	8
2.1 Revisión del modelo dinámico de fermentación de cerveza.....	8
2.2 Preparación de equipos y área para el proceso experimental.....	11
2.3 Análisis y selección de las librerías de Python para la optimización .....	13



2.4 Estimación de parámetros, simulación y optimización del proceso de fermentación.....	14
CAPÍTULO 3.....	15
3. Resultados de la EXPERIMENTACIÓN .....	15
4. Resultados de la simulación y optimización .....	17
CAPÍTULO 4.....	22
5. Conclusiones Y Recomendaciones .....	22
Conclusiones.....	22
Recomendaciones.....	24
BIBLIOGRAFÍA.....	25
APÉNDICES.....	27

## SIMBOLOGÍA

$X_{\text{latente}}$	Concentración de levadura latente
$X_{\text{activa}}$	Concentración de levadura activa
$X_{\text{muerta}}$	Concentración de levadura muerta
$X_{\text{suspendida}}$	Concentración de levadura suspendida o total
$C_s$	Concentración del sustrato
$C_{\text{etanol}}$	Concentración de etanol
$C_{\text{DY}}$	Concentración de diacetilo
$C_{\text{EA}}$	Concentración de acetato de etilo
$\mu_L$	Velocidad específica de activación celular
$\mu_{\text{DT}}$	Velocidad específica de muerte celular
$\mu_{\text{So}}$	Velocidad máxima de consumo de azúcar
$\mu_{\text{eo}}$	Velocidad máxima de producción de etanol
$\mu_{\text{DY}}$	Velocidad de producción de diacetilo
$\mu_{\text{AB}}$	Velocidad de consumo de diacetilo
$k_s$	Constante de afinidad del azúcar
$k_e$	Constante de afinidad del etanol
$t_{\text{lat}}$	Tiempo de latencia

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Sistema de fermentación sin termostato en cuarto acondicionado a temperatura constante.....	12
Figura 2.2 Sistema de fermentación en nevera sin termostato (izquierda) y con termostato (derecha) a temperatura variable. ....	13
Figura 2.3 Temperatura constante (izquierda) y variable (derecha) respectivamente del proceso de fermentación vs el tiempo (proceso experimental).....	13
Figura 3.1 Temperatura de fermentación vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.....	17
Figura 3.2 Concentración de etanol vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05. ....	18
Figura 3.3 Concentración de acetato de etilo vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.....	18
Figura 3.4 Concentración de diacetilo vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05. ....	19
Figura 3.5 Temperatura de fermentación vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05.....	20
Figura 3.6 Concentración de etanol vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05. ....	20
Figura 3.7 Concentración de acetato vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05. ....	20
Figura 3.8 Concentración de diacetilo vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05. ....	21
Figura A.1 Hoja de evaluación de cerveza obtenida a partir de levadura S-05 a temperatura constante.....	28
Figura B.1 Hoja de evaluación de cerveza obtenida a partir de levadura S-05 a temperatura variable.....	29

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Datos experimentales de Mosto ubicado en cuarto a Temperatura constante con levadura S05.....	15
Tabla 3.2 Datos experimentales de Mosto ubicado en nevera con termostato a temperatura variable con levadura S05.....	15
Tabla 3.3 Datos experimentales de Mosto ubicado en nevera con termostato a temperatura variable con levadura S04.....	16
Tabla C.1 Materiales, instrumentos y equipos empleados en la experimentación .....	30

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente proyecto busca encontrar una solución al problema que se plantea en el proceso de fermentación de cerveza de manera artesanal por pequeñas industrias ecuatorianas. La alternativa propuesta envuelve el control de temperatura del reactor convencional de fermentación de cerveza. En este capítulo se define claramente el problema de optimización y la importancia de su desarrollo. Se describen los objetivos del proyecto, el marco teórico referencial como bases para la ejecución del proyecto y la metodología utilizada para su resolución.

### 1.1 Descripción del problema

La cerveza es una de las bebidas más consumidas actualmente dentro del Ecuador (ELUNIVERSO, 2004). El sabor y el olor de ésta se encuentran sujetos al tipo de malta y lúpulo utilizado, al proceso de fermentación, y de su posterior almacenamiento una vez producido. El proceso de fermentación para la elaboración de cerveza es una etapa clave pues de ello depende la calidad de esta, dado que en la fermentación se generan los compuestos que dan las características esenciales de la cerveza. Para conseguir una buena fermentación, cuyo producto es una bebida alcohólica de alta calidad es necesario contar con parámetros apropiados tales como la temperatura, proporción de levadura, contenido de oxígeno, entre otros. Debido a la formación de otros compuestos, producto de la fermentación, tales como los ésteres se obtiene una diversidad de sabores en cervezas alcohólicas y no alcohólicas dependiendo de la gravedad original, temperatura, entre otros (Methner et al., 2022). Dada la importancia de obtener un producto de alta calidad se han desarrollado modelos que permitan describir el comportamiento del proceso de fermentación por lo que es necesario optimizar los parámetros que se requieran (Ptws et al., 2022). También, el aplicar cambios a la materia prima empleada en la fermentación ha reflejado el incremento de la concentración de terpenos los cuales también brindan el aroma a la cerveza. (Shopska et al., 2022)

Existe el riesgo de elaborar cerveza de baja calidad debido a compuestos no deseados, producto de procesos incompletos durante la fermentación. Esto se debe a que pueden existir fluctuaciones en la temperatura del proceso, provocando la resaca o mal sabor al consumidor. Siendo un producto de alto consumo y por el que existe gran

competitividad entre empresas, puede considerarse al control de la temperatura como uno de los factores más importantes en el proceso de fabricación.

Día a día la exigencia de los consumidores aumenta, por lo que para pequeñas empresas que elaboran su propia cerveza en base a recetas establecidas sin equipo industrial, o que no cuentan con un entorno favorable, se vuelve complicado. Pues para ofrecer un producto de alto nivel es necesario un mayor control de las variables del proceso, como la temperatura o el pH de la mezcla que se encuentra dentro del reactor en el que se lleva a cabo la fermentación. Siendo de gran importancia la implementación de soluciones. Obteniéndose mejores resultados que podrían revolucionar el proceso de elaboración de cerveza para empresas artesanales, pues se obtiene un producto con mayor calidad y sabor consistente.

## **1.2 Justificación del problema**

La cerveza ha sido elaborada desde hace miles de años en casi todo el mundo, siendo esta una de las bebidas alcohólicas con mayor valor lucrativo debido a su gran consumo, existiendo a su vez una inmensa diversidad de cervezas (Gisbert Verdú, 2016). Sin embargo, su elaboración exige distintos procesos como la fermentación pues juega un papel clave para la determinación del estándar de calidad y sabor que esta ofrece. Durante dicho proceso se producen diferentes compuestos como el diacetilo, donde un aumento de la cantidad de éste involucra una contaminación de compuestos no deseados, el cual puede incrementarse o disminuir dependiendo de la temperatura que se use para el bioproceso (Fernández, 2018).

Dado que la temperatura juega un papel importante se plantea obtener como producto final de este proyecto integrador, un prototipo computacional en Python. En este tipo de industrias artesanales existe muy poco uso de programas para la mejora de proceso de fermentación. Por lo que herramientas computacionales como Python podrían optimizar el proceso de fermentación mediante el control de la variable temperatura. Su implementación podría favorecer a pequeños productores que no pueden adquirir equipos complejos y costosos. Es importante entonces, poder implementar estas herramientas digitales para promover la seguridad en la salud alimentaria, garantizando un producto de alta calidad que a su vez refleje el bienestar de quienes lo consuman y lo comercialicen.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Determinar la temperatura que optimice el rendimiento en el proceso de fermentación en una cervecería artesanal de Guayaquil mediante técnicas de control óptimo.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Describir el comportamiento del proceso de fermentación empleando un modelo matemático base.
2. Realizar pruebas en laboratorio del proceso de fermentación a diferentes condiciones para la obtención de datos experimentales.
3. Seleccionar un método de optimización dinámica que mejor se adapte al modelo matemático mediante revisión bibliográfica.
4. Simular el control óptimo del proceso de fermentación para la obtención del perfil de temperatura que maximice el rendimiento del etanol en la cerveza.

## **1.4 Marco teórico**

La fermentación es un bioproceso empleado para la obtención de diferentes productos, comúnmente destinados a las industrias farmacéutica y alimenticia tales como la producción de antibióticos o la elaboración de cerveza respectivamente. En el segundo caso para la obtención de cerveza es requerido el uso de microorganismos, tales como la levadura, que reaccionan con la materia orgánica de frutas o cereales mediante su interacción a lo largo del tiempo. La reacción entre los microorganismos y el sustrato (azúcares) se da al consumirlo, generando etanol como producto principal de la reacción y otros derivados como los ésteres, aldehídos, di cetonas, entre otros.

Durante el proceso de fermentación se llevan a cabo reacciones químicas entre los microorganismos presentes en la levadura y los azúcares de la materia orgánica de manera similar a la obtención de nutrientes por parte de los seres vivos. Existen reacciones químicas que se dan lugar al mismo tiempo que sucede la producción del etanol, generando subproductos. Estos compuestos secundarios inciden directamente en las características de la cerveza, ya sea mejorando o empeorándola.

#### **1.4.1 Cerveza en Ecuador**

Desde hace miles de años alrededor de 10000 A.C., la cerveza ha sido y es en la actualidad uno de los productos de mayor consumo, la misma que ha sido elaborada a partir de cebada, trigo, arroz, etc. Sin embargo, en Sudamérica se utilizaba maíz reemplazando a la cebada para su producción (SECA, 2016).

La elaboración de cerveza comenzó en el siglo XVI comenzó en Quito, Ecuador, ya que se instaló una de las primeras cervecerías por parte de la orden de los Franciscanos, donde su consumo era exclusivamente para los frailes. En la actualidad existe en el mercado una diversidad de marcas, sabores de cervezas ofreciendo distinta calidad y a precios competitivos (Vásquez et al., 2016).

La cerveza es toda bebida elaborada a partir de malta, lúpulo, agua y levaduras, que pasa por el proceso de fermentación, donde se pueden agregar distintos cereales no malteados como la cebada, arroz, trigo, etc. La producción de cerveza lleva consigo un esquema de pasos que permitirán un buen desarrollo si existe a su vez un control de las variables que afecten al proceso en general. La fermentación es un paso clave para la determinación de la calidad final de la cerveza pues de esta depende su sabor y la producción de sabores no deseados conocidos como los *off-flavors* (Suárez, 2013).

#### **1.4.2 Compuestos deseados**

Como se mencionaba anteriormente, el etanol o alcohol etílico es el producto principal de la fermentación y caracteriza a las bebidas alcohólicas. Se produce con la conversión del piruvato en condiciones anaeróbicas dando lugar al etanol mencionado y dióxido de carbono.

Al producirse una reacción de esterificación durante la fermentación a partir del acetil coenzima A o caproil coenzima A con otros alcoholes de cadenas largas son generados los ésteres. Estos compuestos están presentes en muchos productos de consumo humano, que por lo general son agradables al olfato y característicos de cada tipo de éster. En la cerveza pueden encontrarse varios de estos compuestos, siendo algunos de los más importantes el acetato de etilo, el caproato de etilo y el acetato de isoamilo, los cuales dan un olor afrutado al producto final (Warnasooriya, 2011).



### **1.4.3 Off-flavors**

Los *off-flavors* son compuestos que generan sabores y efectos desagradables para el consumo humano y se producen durante la fermentación a causa de las reacciones secundarias de la producción del etanol.

Pese a que el alcohol etílico es el compuesto que caracteriza a las bebidas alcohólicas, otros alcoholes son considerados como no deseados dentro de la cerveza, conocidos como alcoholes de fusel y el metanol. Los alcoholes de fusel generan en la cerveza un sabor similar a solvente plástico, además de ocasionar en el consumidor un malestar conocido como resaca mientras que el metanol genera ceguera en el consumidor. Los alcoholes de fusel pudieran resultar útiles para la cerveza mediante la reacción de esterificación de éstos con otros productos que se puedan generar en el proceso, produciendo ésteres de olores agradables en el producto final.

Otros de los compuestos no deseados son las di cetonas vecinas, como la 2,3-pentanonona y el diacetilo (2,3-butanodiona), los mismos que generan sabores como el caramelo y mantequilla, no muy apreciado por los bebedores de cerveza.

Por último, se debe mencionar el acetaldehído, este compuesto se produce como paso previo a la formación de etanol, el cual no es del gusto del consumidor cervecero debido al olor y sabor similares al de la manzana verde. Este compuesto puede continuar con su reacción para convertirse finalmente en etanol, o retornar como acetil coenzima A. La aparición de estos compuestos no deseados es inevitable, pero se pueden reducir disminuyendo la concentración de estos y aumentando la concentración de aquellos compuestos que brinda un buen sabor en la cerveza producida (Warnasooriya, 2011).

### **1.4.4 Control de temperatura en bioprocesos**

Este proceso se ve influenciado por ciertas variables de acuerdo con las ecuaciones de la cinética que describen la reacción química, pudiendo acelerar o ralentizar el suceso al modificar dichas variables de acuerdo con las necesidades. No obstante, acelerar el proceso no siempre es una opción factible para la empresa ya que puede verse comprometida la calidad del producto final. También puede existir la proliferación organismos tales como bacterias (contaminantes) o la generación de productos no deseados en mayores cantidades en la cerveza (*off-flavors*).

La temperatura es una variable importante en los bioprocesos, más que la presión, el pH, entre otras. Pues de esta depende la existencia de ciertas bacterias durante el

proceso, ya que puede verse afectada al incrementar o reducir significativamente dicha variable. La cantidad de bacterias repercute en la velocidad de fermentación, lo que incrementa los costos de producción en caso de reducir dicha población. También al tener un control de la temperatura, es posible mantener estable la concentración de compuestos deseados y de los no deseados. El control de temperatura se vuelve entonces una opción muy importante al momento de mejorar los bioprocesos tales como la elaboración de cerveza (Banga et al., 2005).

#### **1.4.5 Optimización dinámica**

Los procesos industriales requieren ya sea una reducción de costos o bien un aumento de beneficios en base a la producción. Lograr esto mediante ensayo y error no es lo adecuado, por lo que conocimientos y aplicaciones relacionados con la optimización dinámica en dichos procesos es bien vista por parte de este tipo de industrias. Su importancia principalmente es poder reducir el número de repeticiones por parte de la empresa para alcanzar las condiciones de operación óptimas, tal que permitan maximizar o minimizar una característica del producto o proceso. Esto se logra mediante la interacción de las ecuaciones que definen el proceso y las restricciones a las que está sujeto (Srinivasan et al., 2003).

Según (Beal et al., 2018) “la optimización dinámica es un subconjunto único de algoritmos de optimización que pertenecen a sistemas con ecuaciones diferenciales basadas en el tiempo”. Es decir, la interacción correcta entre las ecuaciones que describen un proceso a lo largo del tiempo puede generar un método que garantice que el proceso en cuestión opere de forma óptima, y sea más eficiente (reduciendo el uso de recursos) o más productiva (incrementando los beneficios).

Un problema de optimización dinámica en biorreactores Batch no es tarea fácil de resolver. Principalmente porque hay que tener en consideración que la variable de control puede presentarse de forma lineal en sistemas de ecuaciones diferenciales y, que los bioprocesos están regidos por dinámicas no lineales.

Por consiguiente, la selección de un modelo de optimización y método de resolución apropiados puede resultar tanto en la combinación de dichos métodos como su aplicación por individual, según sea el caso (Banga et al., 2005). Pese a lo mencionado anteriormente, la optimización dinámica puede no ser del agrado de industrias y muchas personas que dirigen estos procesos. Sin embargo, los resultados de encontrar una solución óptima que mejore la calidad de un producto consumido a

nivel nacional y mundial pueden permitir que las investigaciones continúen. Inclusive, pueden servir de base para el control de bioprocesos utilizando el modelo en un controlador de tipo PID en una cervecería pequeña o gran escala (Bosse & Griewank, 2014).

#### **1.4.6 Métodos de optimización dinámica**

El método del gradiente de primer orden es muy utilizado para alcanzar la solución de problemas de optimización, el cual permite implementar un algoritmo de forma rápida, obteniendo una aproximación cercana a la solución óptima. Es un método que fusiona tanto métodos directos e indirectos (Ben-Asher, 2015). La misma que parte desde una solución que puede ser factible, donde a medida que se va iterando, las demás también lo son. Pero solo aquellas que cumpla con todas las restricciones que se tenga, será la solución factible al problema de optimización. Para su aplicación se debe asumir una condición inicial factible pero que no es la óptima, luego se asume una nueva condición cercana a la inicial logrando encontrarse un nuevo punto de operación (Martinez Puerto, 2005).

Python es un lenguaje de programación de alto nivel que contiene gran cantidad de funcionalidades a través de sus librerías. Dichas funcionalidades abarcan desde cálculos matemáticos sencillos hasta representación gráfica o resolución de ecuaciones diferenciales. Algunas de estas librerías que se utilizarán son Pyomo y Gekko. Pyomo es una librería diseñada para la optimización dinámica, que admite la formulación y logra el análisis de modelos matemáticos, también explica fenómenos que suelen aparecer en un sistema, permite realizar predicciones que pueden ocurrir en el mismo como también evalúa los factores que son clave y que pueden influir en el sistema (Hart et al., 2011). Por otro lado, Gekko es un paquete para la optimización de sistema de ecuaciones algebraicas diferenciales como enteras mixtas también en Python, orientada a objetos para lograr su ejecución (L. Beal & Hedengren, 2020).

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En este capítulo se realiza en primer lugar el planteamiento del modelo dinámico que describe el comportamiento del proceso de fermentación en la elaboración de cerveza. En segundo lugar, se lleva a cabo la preparación de equipos y áreas para el desarrollo del proceso experimental y mediciones del producto. En tercer lugar, se realiza la selección del método de optimización que mejor se adapte al modelo propuesto, la estimación de parámetros cinéticos y la codificación del método de optimización en Python. Por último, se ejecutan los códigos de ajuste de parámetros, simulación y optimización del proceso de fermentación para mostrar de manera gráfica los resultados obtenidos.

Dado que la investigación se encuentra enfocada principalmente al modelado y simulación de un proceso de fermentación; se ha incluye una experimentación a escala de laboratorio para contrastar los resultados de la simulación con los experimentales.

Con el fin de ofrecer mayor evidencia de los beneficios asociados, al aplicar un algoritmo que permita obtener un mayor rendimiento de la cantidad de etanol en la cerveza, debido al perfil de temperatura optimizado.

### 2.1 Revisión del modelo dinámico de fermentación de cerveza.

El proceso de fermentación de cerveza ha sido descrito por diferentes investigadores, buscando una forma de tener conocimiento de cómo evolucionan las variables de importancia, y otros factores durante dicho proceso. Esto ha dado lugar a diversos modelos que permiten representar la dinámica de procesos que ocurren dentro del reactor. Para este punto, se utilizó el modelo detallado en Fiallos Montero & Tutasí Guerrero (2022), donde se tienen las ecuaciones diferenciales y relaciones adecuadas para el desarrollo del algoritmo.

Este modelo incluye las ecuaciones de estado, parámetros y constantes conformadas por las diferentes variables que se detallaran a continuación.

La concentración de levadura latente,  $X_{latente}$ , viene modelada por la siguiente ecuación, para todo tiempo  $t$ , como

$$\frac{dX_{latente}}{dt} = -\mu_L * X_{latente}, \quad (2.1)$$

donde  $\mu_L$  representa la velocidad específica de activación de la levadura en estado latente. Para la levadura activa,  $X_{activa}$ , se tienen dos ecuaciones dependiendo de si es antes o después del tiempo de latencia

$$\frac{dX_{activa}}{dt} = \mu_L * X_{latente}, \quad t < t_{latente}, \quad (2.2)$$

$$\frac{dX_{activa}}{dt} = \mu_x * X_{activa} - \mu_{DT} * X_{activa} + \mu_L * X_{latente}, \quad t \geq t_{latente}, \quad (2.3)$$

tal que  $\mu_x$ ,  $\mu_{DT}$  son las tasas de crecimiento de levadura y la velocidad específica de muerte celular, respectivamente. Igualmente, para la concentración de levadura muerta, se tiene las siguientes ecuaciones

$$\frac{dX_{muerta}}{dt} = -\mu_{SD} * X_{muerta}, \quad t < t_{latente}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dX_{muerta}}{dt} = -\mu_{SD} * X_{muerta} + \mu_{DT} * X_{activa}, \quad t \geq t_{latente}, \quad (2.5)$$

donde  $\mu_{SD}$  es la velocidad específica de asentamiento celular y  $X_{muerta}$  es la concentración de levadura muerta. Para la determinación de la levadura suspendida se utilizan dos ecuaciones diferenciales

$$\frac{dX_{suspendida}}{dt} = \mu_{SD} * X_{muerta}, \quad t < t_{latente}, \quad (2.6)$$

$$\frac{dX_{suspendida}}{dt} = \mu_x * X_{activa} - \mu_{SD} * X_{muerta}, \quad t \geq t_{latente}, \quad (2.7)$$

La evolución del sustrato,  $C_s$ , se determina mediante la ecuación presentada a continuación,

$$\frac{dC_s}{dt} = -\mu_s * X_{activa}, \quad (2.8)$$

siendo  $\mu_s$  es la tasa de consumo de sustrato y  $X_{activa}$  la concentración de levadura activa. Así mismo la concentración de etanol se modela mediante la ecuación

$$\frac{dC_{etanol}}{dt} = f * \mu_{etanol} * X_{activa}, \quad (2.9)$$

donde  $f$ ,  $\mu_{etanol}$  y  $X_{activa}$  corresponden al factor inhibidor de fermentación de la levadura, tasa de producción de etanol y la concentración de levadura activa, respectivamente.

Los compuestos no deseados se determinan mediante con las siguientes ecuaciones diferenciales. La concentración de acetato de etilo,  $C_{EA}$ , se modela como

$$\frac{dC_{EA}}{dt} = Y_{EA} * \mu_x * X_{activa}, \quad (2.10)$$

tal que,  $Y_{EA}$  es el factor estequiométrico de la producción de acetato de etilo. Para obtener la concentración de diacetilo,  $C_{DY}$ , se utiliza la ecuación

$$\frac{dC_{DY}}{dt} = \mu_{DY} * C_S * X_{activa} - \mu_{AB} * C_{DY} * C_{EA}, \quad (2.11)$$

con  $\mu_{DY}$ ,  $C_S$ ,  $\mu_{AB}$ , la velocidad de producción de diacetilo, concentración de glucosa, velocidad de consumo de diacetilo, respectivamente.

Para determinar las ecuaciones del modelo mencionadas anteriormente, es necesario definir parámetros, los cuales son presentados a continuación.

- Velocidad específica de crecimiento celular

$$\mu_x = \frac{\mu_{x0} * C_S}{0.5 * C_{S0} + C_e}. \quad (2.12)$$

- Velocidad específica de asentamiento celular

$$\mu_{SD} = \frac{\mu_{SD0} * 0.5 * C_{S0}}{0.5 * C_{S0} + C_e}. \quad (2.13)$$

- Velocidad de consumo de azúcar

$$\mu_S = \frac{\mu_{S0} * C_S}{k_S + C_S}. \quad (2.14)$$

- Factor de inhibición

$$f = 1 - \frac{C_e}{0.5 * C_{S0}}. \quad (2.15)$$

- Tasa específica de crecimiento de etanol

$$\mu_e = \frac{\mu_{e0} * C_S}{k_e * C_S}. \quad (2.16)$$

Siendo  $C_S$  la concentración de glucosa,  $C_{S0}$  es la concentración de azúcar con respecto al tiempo y  $C_e$  representa la concentración de etanol. Además,  $\mu_{x0}$  es la velocidad máxima de crecimiento celular,  $\mu_{S0}$  es la velocidad máxima de consumo de azúcar,  $\mu_{SD0}$  se refiere a la velocidad máxima de asentamiento de muerte celular, y finalmente  $\mu_{e0}$  corresponde a la velocidad máxima de producción de etanol. Las constantes  $k_S$  y  $k_e$  corresponden a las constantes de afinidad del azúcar y del etanol, respectivamente.

## **2.2 Preparación de equipos y área para el proceso experimental**

El diseño experimental del proceso de fermentación de cerveza se desarrolló en laboratorio de Operaciones Unitarias de la Facultad de Ciencias Naturales y Matemáticas siguiendo las condiciones respectivas.

El proceso de fermentación se dio lugar en tres sistemas diferentes, uno a temperatura constante y dos a temperatura variable. Para representar al reactor tipo Batch, se requirió tres contenedores que actúen como reactores (con sus respectivas conexiones). Donde se colocó 15 L del mosto a fermentar en cada uno de ellos, el cual fue proporcionado por la cervecería artesanal para la investigación. Para la medición de temperatura, se utilizó dos diferentes dispositivos que se detallaran a continuación.

El primer sistema fue ubicado en un cuarto acondicionado a una temperatura constante de 19 °C, utilizando un termómetro de glicerina. Donde se mantuvo el tanque con levadura S-05 durante 11 días.

En cambio, para los dos sistemas de temperatura variable se usó un termostato, el mismo que permitió la variación de temperatura dentro de la nevera, siguiendo un perfil de temperatura variable por 16 días. Además, se colocó distintas levaduras, las cuales se encargaron de la fermentación del mosto. Estas fueron dos, pertenecientes a la clase S-05 y S-04 de la empresa Fermentis (Francia).

El entorno en el cual se ubicó cada tanque fue adecuado para garantizar el correcto enfriamiento o calentamiento durante el tiempo de fermentación, según fuera el caso.

El fermentado de los tres tanques se ocupó para el análisis de la gravedad específica. De ellos se tomaron muestras con la ayuda de tres vasos de precipitado de 250 mL, para colocarlo en una probeta de 250 mL (cantidad suficiente para que el hidrómetro flote). Donde se sumergió un hidrómetro (rango 1.000-1.500) que permitió la lectura de la densidad de cada uno de los ensayos. Además, se realizó una segunda lectura de la densidad, esto fue a temperatura ambiente para lo cual se utilizó un termómetro de -10°C a 150°C, que permita verificar la temperatura de ese momento.

Las extracciones del fermento fueron una vez al día durante todo el proceso mencionado para cada ensayo. Dichas mediciones de la gravedad específica, al momento de sacarlo del tanque y posteriormente al alcanzar la temperatura ambiente como se mencionó anteriormente.

Además, se hizo un registro de los datos obtenidos para luego emplear la aplicación Birrapps. Esta es utilizada por productores artesanales de forma gratuita, para

la corrección de la densidad (gravedad específica) del mosto a diferentes temperaturas. Con los dos datos obtenidos de cada día y el uso de la aplicación mencionada se corrigieron los valores de la gravedad específica con los que se determinó un promedio diario que represente la propiedad mencionada. Además, se tuvieron que tomar las siguientes decisiones respecto a las mediciones:

- El mosto de la levadura S-04 no se midió los días iniciales.
- El mosto de la levadura S-05 a temperatura constante tuvo menor tiempo de fermentación.
- Las mediciones fueron hechas únicamente en días laborales.
- Los datos que fueron considerados como aberrantes no se tomaron en cuenta.

La gravedad específica obtenida diariamente se convirtió a concentración de etanol debido a que se requiere para la simulación, mediante las ecuaciones que relacionan estas dos propiedades consultadas en la literatura (Ribéreau Gayon, 2020)

Los datos obtenidos experimentalmente no fueron suficientes para realizar la estimación de los parámetros requeridos por el modelo matemático descrito anteriormente. Por lo cual se utilizó el modelo Gompertz de regresión no lineal, utilizando los datos experimentales para generar nuevos valores.

Los sistemas de fermentación que fueron armados son mostrados a continuación



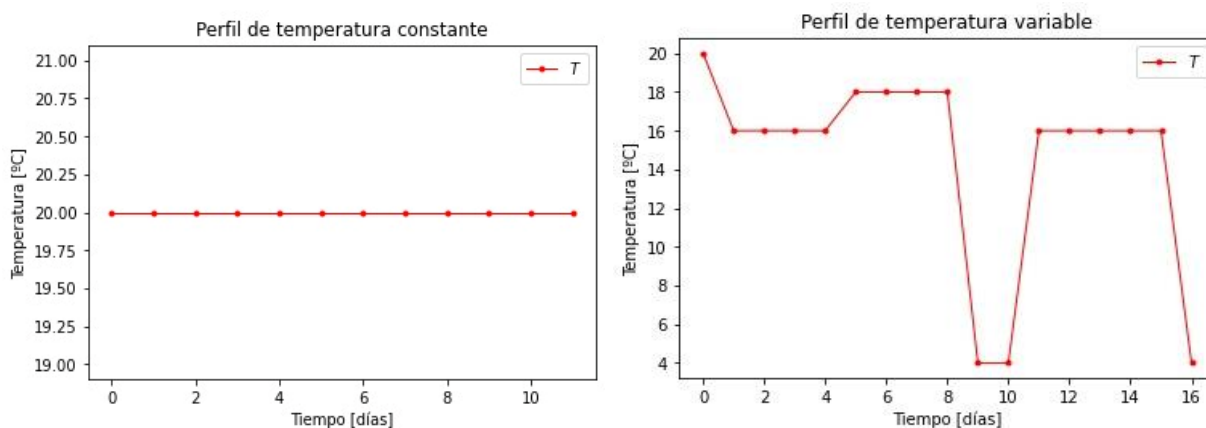
**Figura 2.1 Sistema de fermentación sin termostato en cuarto acondicionado a temperatura constante.**





**Figura 2.2 Sistema de fermentación en nevera sin termostato (izquierda) y con termostato (derecha) a temperatura variable.**

Los perfiles de temperatura empleados fueron:



**Figura 2.3 Temperatura constante (izquierda) y variable (derecha) respectivamente del proceso de fermentación vs el tiempo (proceso experimental).**

### 2.3 Análisis y selección de las librerías de Python para la optimización

La resolución del problema de optimización fue llevada a cabo en programas computacionales, por lo que se requirió de un análisis de las librerías principales contenidas en Python. Seleccionando dos diferentes librerías, Gekko y Pyomo, debido a que ambos son paquetes para la resolución de problemas de optimización. Estos se encuentran disponibles de manera gratuita tanto para Spyder como Jupyter Notebook.

Mediante la adaptación de las ecuaciones del modelo descritas en el apartado anterior (2.1), se obtuvo un código funcional en Python. Este código fue diseñado en Gekko debido a su codificación más sencilla y la gran cantidad de información asequible

respecto a la librería Pyomo, además, para ello se tomó en consideración las restricciones del modelo.

Gekko es una funcionalidad de Python que permite la optimización y control dinámico, el cual se encuentra orientado a objetos para lograr su fácil ejecución pues combina solucionadores a gran escala (L. D. R. Beal et al., 2018).

#### **2.4 Estimación de parámetros, simulación y optimización del proceso de fermentación**

Los resultados de la experimentación se emplearon en conjunto con los parámetros requeridos en el modelo matemático que describe el proceso de fermentación. Cabe recalcar que, por falta de datos para el modelo de regresión, el ensayo en el cual se utilizó levadura S-04 no fue considerado para la generación de nuevos datos.

El modelo matemático que explica el proceso fue adaptado en la librería Gekko en conjunto con otras librerías de Python tales como Pandas, Numpy y Matplotlib. Además, se definieron parámetros a partir de los datos experimentales, funciones y configuración requeridas para la simulación de las experimentaciones realizadas.

Para realizar la optimización, se establecieron variables y argumentos con la configuración respectiva de optimización, esto fue para cada ensayo dentro del modelo creado en Gekko. Mediante la definición de la función objetivo a maximizar o minimizar (según se ha formulado) y estableciendo restricciones de productos se completó el sistema, pasando a la etapa de generación de resultados.

A través de las representaciones de la librería Matplotlib se mostraron gráficamente los resultados obtenidos en la simulación y optimización del proceso de fermentación, además de los experimentales leídos a través de la librería Pandas.

# CAPÍTULO 3

En el presente capítulo se muestran los resultados que se generaron durante la investigación. Dichos resultados corresponden a las experimentaciones a escala de laboratorio y la simulación y optimización de éstas. Los resultados se muestran a continuación.

## 3. RESULTADOS DE LA EXPERIMENTACIÓN

El mosto fermentado en la experimentación presentó el comportamiento esperado en la variable “densidad”, disminuyendo a medida que pasaban los días, producto de la formación de alcohol y otros productos (deseados y no deseados). Este comportamiento se observó en los tres tanques con pequeñas diferencias a nivel de la variable mencionada, ocasionadas por el tipo de levadura utilizada y temperatura de fermentación diferente. Los resultados son mostrados a continuación en las siguientes tablas:

**Tabla 3.1 Datos experimentales de Mosto ubicado en cuarto a Temperatura constante con levadura S05**

Horas	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)	Grado de alcohol (%)	Conc. de etanol (g/l)
0	29,0	1,058	0,00	0,00
24	23,0	1,056	0,26	2,07
48	19,0	1,046	1,58	12,43
72	19,0	1,046	1,58	12,43
96	19,0	1,027	4,07	32,10
120	19,0	1,026	4,20	33,14
144	19,0	-	-	-
168	19,0	-	-	-
192	19,0	1,022	4,73	37,28
216	19,0	1,021	4,86	38,32
240	19,0	1,022	4,73	37,28
264	19,0	1,022	4,73	37,28

**Tabla 3.2 Datos experimentales de Mosto ubicado en nevera con termostato a temperatura variable con levadura S05**

Horas	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)	Grado de alcohol (%)	Conc. de etanol (g/l)
0	29,0	1,058	0,00	0,00

24	16,2	1,055	0,39	3,11
48	16,3	1,055	0,39	3,11
72	15,0	1,045	1,71	13,46
96	16,3	1,039	2,49	19,68
120	17,6	1,036	2,89	22,78
144	-	-	-	-
168	-	-	-	-
192	18,0	1,026	4,20	33,14
216	18,0	1,018	5,25	41,42
240	4,2	1,021	4,86	38,32
264	6,5	1,021	4,86	38,32
288	11,7	1,021	4,86	38,32
312	-	-	-	-
336	-	-	-	-
360	-	-	-	-
384	17,0	1,016	5,51	43,49

**Tabla 3.3 Datos experimentales de Mosto ubicado en nevera con termostato a temperatura variable con levadura S04**

Horas	Temperatura (°C)	Densidad (g/ml)	Grado de alcohol (%)	Conc. de etanol (g/l)
0	29,0	1,058	0,00	0,00
24	16,2	-	-	-
48	16,3	-	-	-
72	15,0	-	-	-
96	16,3	1,027	4,07	32,10
120	17,6	1,021	4,86	38,32
144	-	-	-	-
168	-	-	-	-
192	18,0	1,019	5,12	40,39
216	18,0	1,016	5,51	43,49
240	4,2	1,023	4,59	36,24
264	6,5	1,021	4,86	38,32
288	11,7	1,016	5,51	43,49
312	-	-	-	-
336	-	-	-	-
360	-	-	-	-
384	17,0	1,016	5,51	43,49

La evaluación por parte de un catador de las cervezas S-05 a temperatura constante y temperatura variable se encuentra en el apéndice A adjunto en este documento.

#### 4. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN

Al ejecutarse el código elaborado en Python empleando la librería Gekko se obtuvieron dos resultados para las variables requeridas. El primer conjunto de resultados corresponde al proceso de fermentación a temperatura constante. A continuación, se muestran las variables a analizar de este proceso:

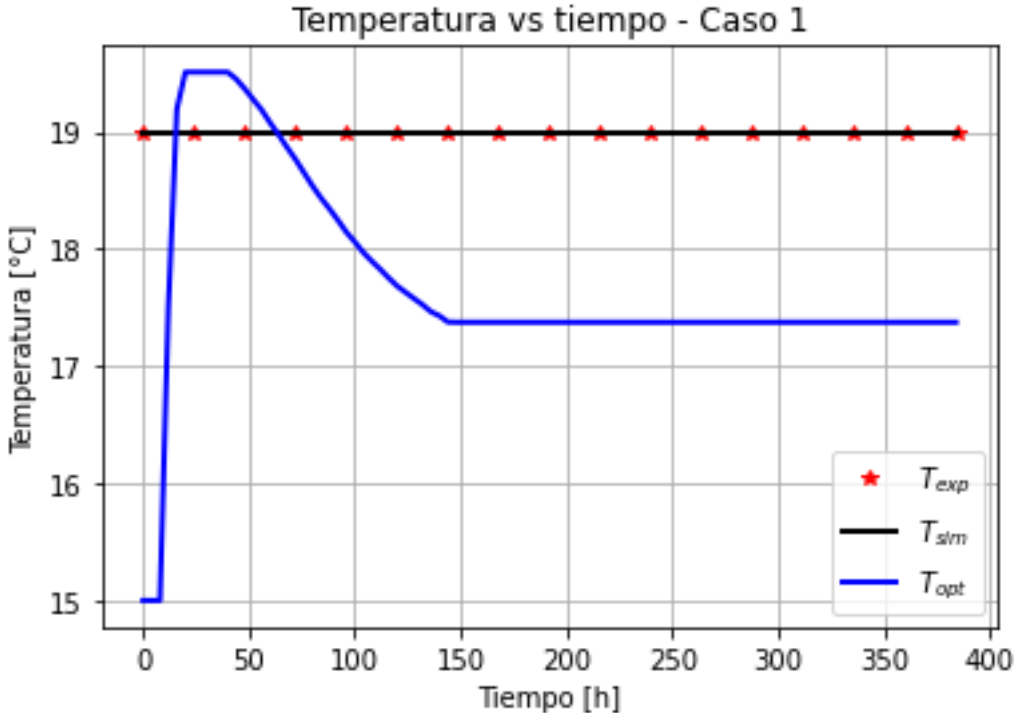


Figura 3.1 Temperatura de fermentación vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.

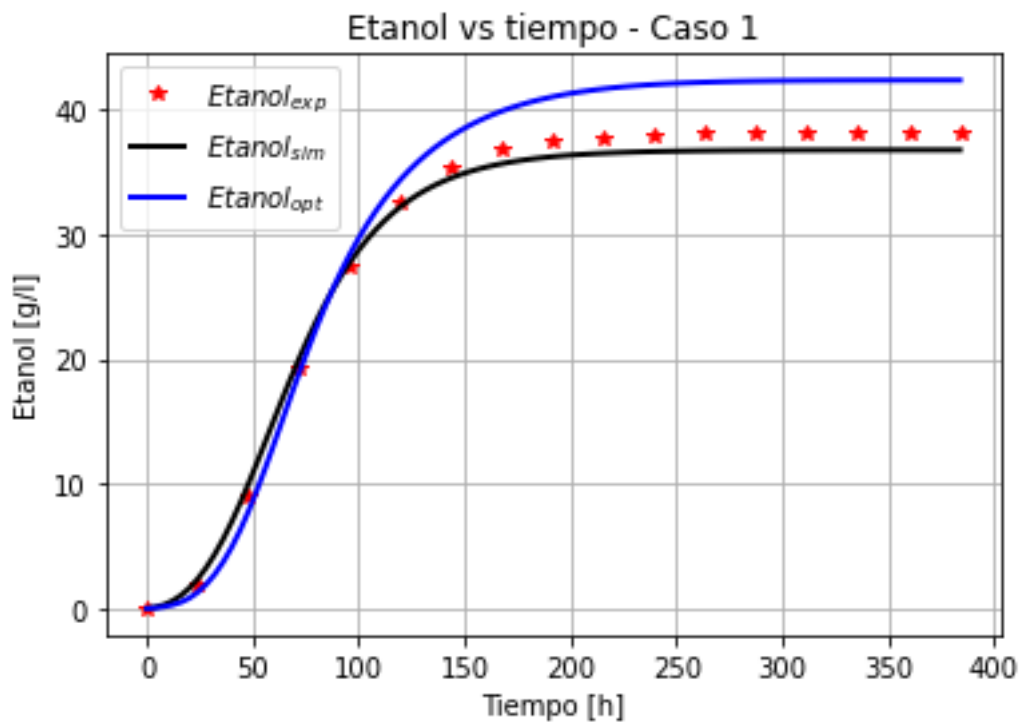


Figura 3.2 Concentración de etanol vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.

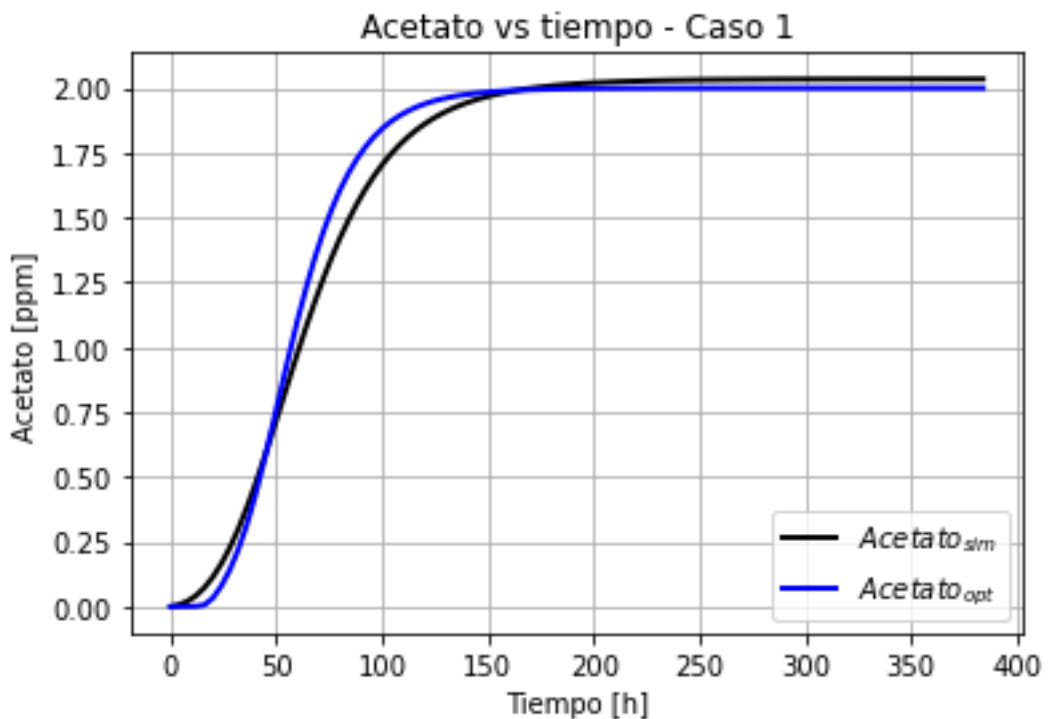


Figura 3.3 Concentración de acetato de etilo vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.

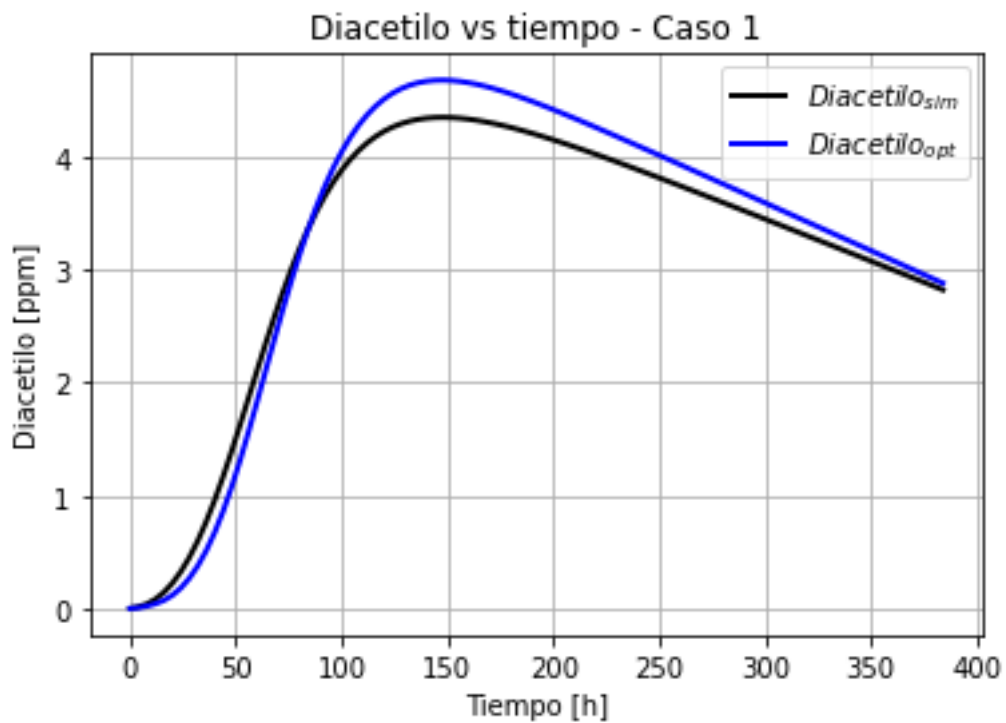


Figura 3.4 Concentración de diacetilo vs el tiempo a temperatura experimental constante y levadura S-05.

El segundo conjunto de resultados corresponde al proceso de fermentación en el que la temperatura siguió una trayectoria que variaba con el tiempo. Estos se muestran con las siguientes figuras:

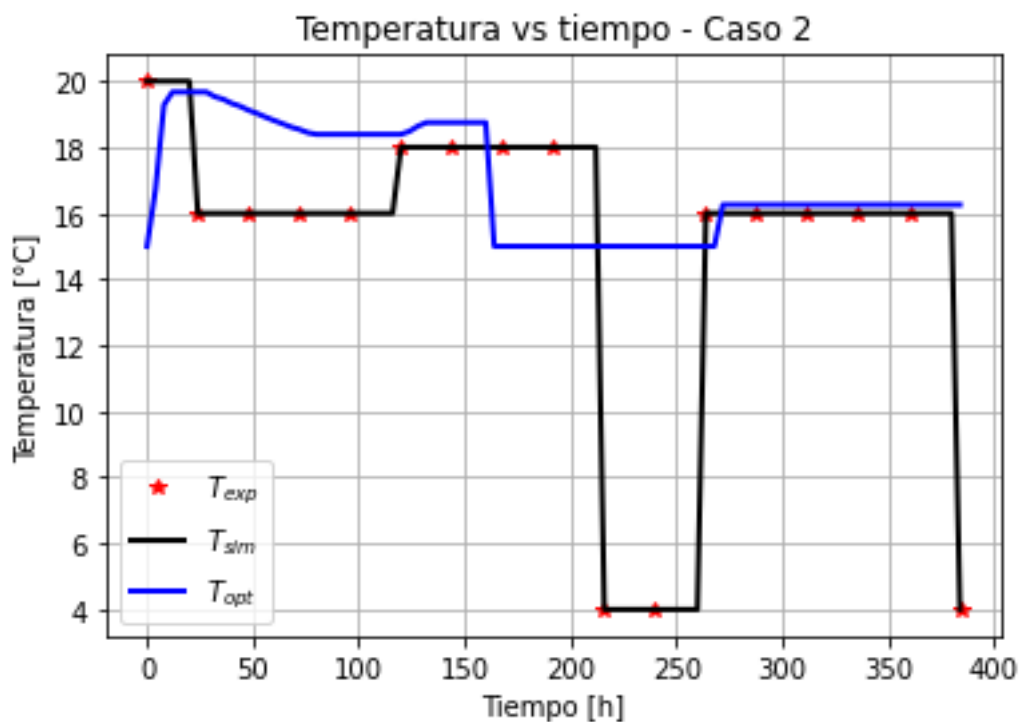


Figura 3.5 Temperatura de fermentación vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05.

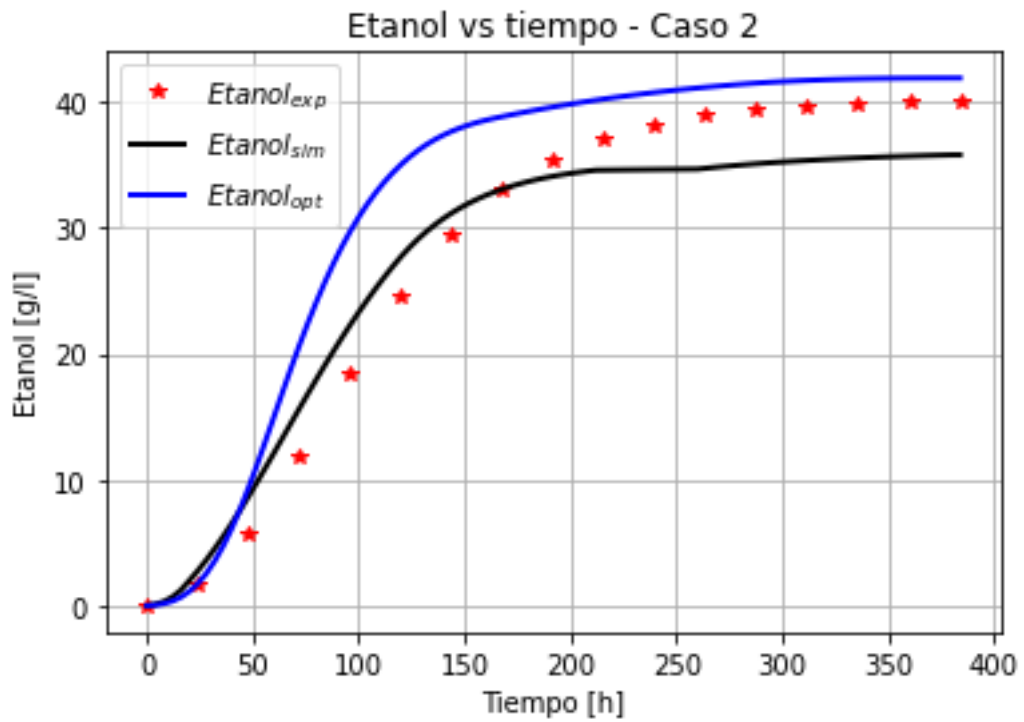


Figura 3.6 Concentración de etanol vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05.

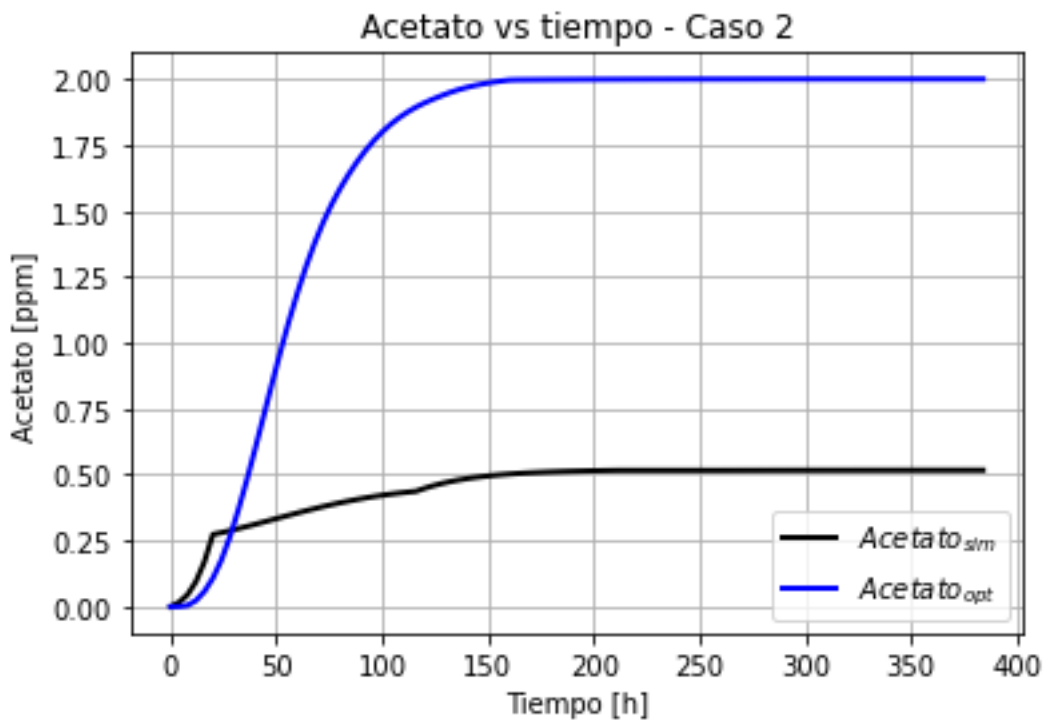
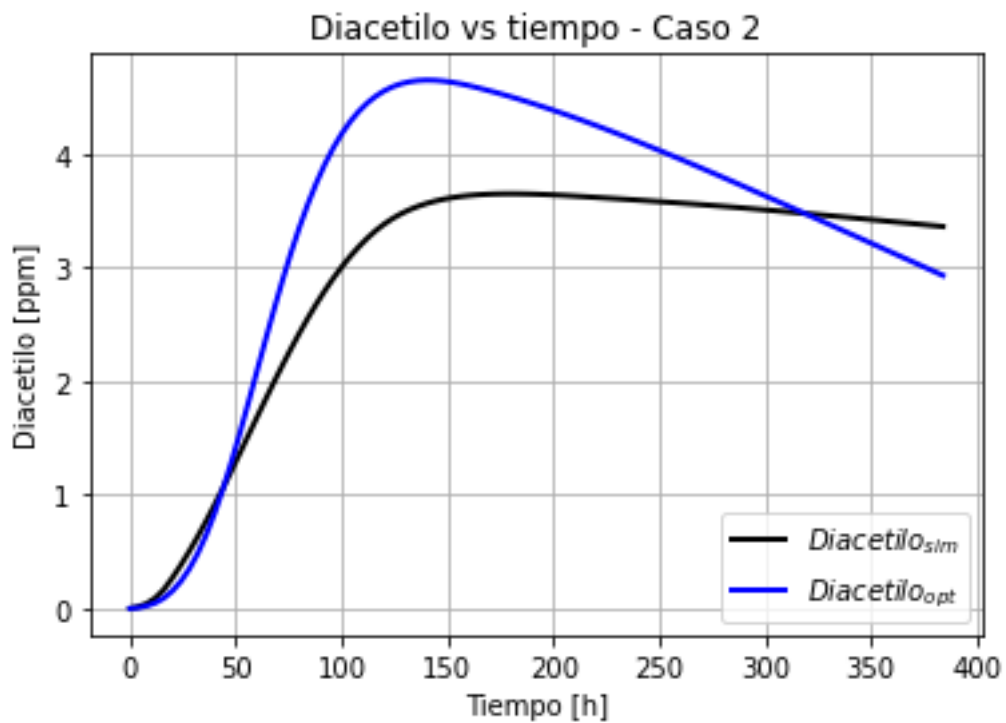


Figura 3.7 Concentración de acetato vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05.





**Figura 3.8 Concentración de diacetilo vs el tiempo a temperatura experimental variable y levadura S-05.**

De los cuales se puede evidenciar que en ambos casos existe una mejora en la concentración de etanol alcanzada durante las horas en que se produce la fermentación, aplicando restricciones en las concentraciones de acetato y diacetilo, variables que deben ser controladas para garantizar un buen producto.

# CAPÍTULO 4

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En esta sección se presentan las conclusiones y recomendaciones de este trabajo, las cuales fueron realizadas a partir de los resultados obtenidos en la experimentación, simulación y optimización del proceso de fermentación.

### Conclusiones

1. Se describió el comportamiento del proceso de fermentación por medio del modelo matemático referenciado. Las ecuaciones que conforman dicho modelo muestran que algunas variables de estado (como el acetato de etilo) no presentan un componente que disminuya su valor pasado cierto tiempo. Esto genera situaciones en las que se deben tomar decisiones sobre la restricción de ciertas variables, en caso de que su incremento a lo largo del tiempo genere problemas en el producto final. Además, el codificado de este modelo al lenguaje de programación y tiempos considerables para la optimización denotan la complejidad del modelo empleado.
2. Al realizarse experimentalmente un proceso de fermentación a escala de laboratorio, aplicando diferentes condiciones de temperatura y entorno se obtuvieron resultados favorables. Los mismos son mostrados en las tablas 3.1, 3.2 y 3.3, donde se detalla el valor de la gravedad específica y el porcentaje de alcohol presenta para cada ensayo; notándose que, en el experimento donde la temperatura de fermentación fue manipulada (variable) a lo largo del tiempo, el grado de alcohol fue ligeramente superior en las primeras 264 horas. Adicionalmente, se realizó un *dry-hopping* a los tanques con fermento que siguieron un perfil de temperatura variable. Esto se realizó de acuerdo con la receta usada como referencia, lo cual ayudó a mejorar los resultados de estos ambientes en las horas posteriores. La valoración realizada mediante la degustación del producto (adjunta en anexos) denota una mejora relacionada con las propiedades de la cerveza. Es por ello por lo que se denota la importancia de continuar investigando y experimentando con las variaciones del perfil de temperatura. Tomando en cuenta las restricciones de la levadura durante la

fermentación de cerveza para lograr obtener producto de mayor valor en el consumidor.

3. Se investigaron distintos métodos de optimización dinámica, ambos pertenecientes a las librerías en Python, sin embargo, el método de optimización dinámica escogido fue la librería Gekko. El otro método fue Pyomo, ya que también sirve para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales (método de gradiente de primer orden). La elección del método fue debido a que presenta menor dificultad de codificación, rapidez y facilidad para mostrar resultados debido a los solucionadores a gran escala que este contiene.
4. Al simular el control óptimo del proceso de fermentación se generaron datos de las concentraciones de etanol, diacetilo y acetato de etilo a lo largo del tiempo, además de conseguirse el perfil de temperatura que genera estos resultados. Aplicando las modificaciones respectivas en el modelo se cambió de simulación a optimización buscando incrementar al máximo el etanol durante el mismo intervalo de tiempo. Los resultados mostrados en las Figuras 3.1 a 3.8 denotan un aumento del etanol para una fermentación de 384 horas, siempre y cuando se varíe la temperatura del proceso. Al realizar un proceso de fermentación experimentalmente se deben tener en consideración factores importantes; como la incidencia de la temperatura en la supervivencia de la levadura al realizar variaciones. Pues el rango en que se puede manipular esta variable podría verse muy limitado pese a los resultados teóricos.
5. La temperatura determinada por medio de técnicas de control óptimo muestra resultados favorables en lo relacionado a la mejora de las variables objetivo a través del control del perfil de temperatura del proceso de fermentación. Pese a la complejidad del modelo matemático que describe dicho proceso y su transcripción al lenguaje de programación, la implementación en Python resulta muy beneficiosa. Puesto que la funcionalidad y accesibilidad que presentan podrían ahorrar recursos en investigación de mejora del proceso para la industria cervecera.

## Recomendaciones

1. Debido a complicaciones generadas al realizar la discretización del tiempo en Gekko, se recomienda probar nuevas funcionalidades de Python como Pyomo o utilizar otro lenguaje de programación. Tal que permita avanzar con la simulación de forma amena y sencilla.
2. Se debería obtener más información sobre el efecto de la temperatura para la supervivencia de la levadura a lo largo del tiempo, con el objetivo de realizar una optimización mucho más realista dado que la experimentación se encuentra limitada por factores que no son considerados teóricamente.
3. Con el fin de mejorar la confiabilidad de los datos obtenidos experimentalmente de la concentración de etanol (necesaria para el modelo) es aconsejable disponer de un instrumento de medición de gravedad específica con mayor precisión. Es decir que la escala de medición del instrumento sea lo suficientemente grande para observar con mejor exactitud la pequeña variación existente entre cada toma de datos. Así mismo se recomienda realizar mayor cantidad de mediciones para poder realizar una mejor estimación de parámetros.
4. Para futuras investigaciones se recomienda trabajar en un mismo lenguaje de programación detallando cada variable del proceso. De tal modo que facilite la comprensión del programa computacional y se pueda trabajar de forma ordenada y precisa para evitar errores al simular

# BIBLIOGRAFÍA



- Banga, J. R., Balsa-Canto, E., Moles, C. G., & Alonso, A. A. (2005). Dynamic optimization of bioprocesses: Efficient and robust numerical strategies. *Journal of Biotechnology*, 117(4), 407–419. <https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2005.02.013>
- Beal, L. D. R., Hill, D. C., Abraham Martin, R., & Hedengren, J. D. (2018). GEKKO optimization suite. *Processes*, 6(8). <https://doi.org/10.3390/pr6080106>
- Beal, L., & Hedengren, J. (2020). *GEKKO Documentation*.
- Ben-Asher, J. Z. (2015). Revisiting gradient methods in function space with application to rocket trajectories. *ICINCO 2015 - 12th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics, Proceedings*, 1, 270–274. <https://doi.org/10.5220/0005562702700274>
- Bosse, T., & Griewank, A. (2014). Optimal control of beer fermentation processes with Lipschitz-constraint on the control. *Journal of the Institute of Brewing*, 120(4), 444–458. <https://doi.org/10.1002/jib.150>
- ELUNIVERSO. (2004). *Bebidas de sabores se diversifican*. <https://www.eluniverso.com/2004/04/04/0001/9/B4FC9324076C4907B21204F14CEFFE03.html/>
- Fernández, A. (2018). *Estudio De La Estabilidad De Las Cervezas Artesanales De “Les Clandestines De Montferri”: Análisis Físicoquímico, Microbiológico Y Sensorial*. 1–56. [https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19093/8/TFM\\_Maria\\_Suarez\\_Diaz.pdf](https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19093/8/TFM_Maria_Suarez_Diaz.pdf)
- Fiallos Montero, L. A., & Tutasi Guerrero, J. A. (2022). *Aproximación numérica de un problema de control óptimo para el proceso de fermentación de cerveza en una industria ecuatoriana*. 1–8.
- Gisbert Verdú, M. (2016). Diseño del proceso industrial para la elaboración de cerveza. *Universidad Politécnica de Valencia. Campus de Alcoy*, 78. [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73275/Diseño\\_y\\_puesta\\_en\\_marcha\\_de\\_una\\_planta\\_elaboradora\\_de\\_cerveza.pdf?sequence=3](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/73275/Diseño_y_puesta_en_marcha_de_una_planta_elaboradora_de_cerveza.pdf?sequence=3)
- Hart, W. E., Watson, J. P., & Woodruff, D. L. (2011). Pyomo: Modeling and solving mathematical programs in Python. *Mathematical Programming Computation*, 3(3), 219–260. <https://doi.org/10.1007/s12532-011-0026-8>

- Martinez Puerto, D. A. (2005). *SOLUCIÓN AL DESPACHO ECONÓMICO DE SISTEMAS DE POTENCIA POR MEDIO DE REDES NEURONALES TIPO HOPFIELD*. 53(9), 1689–1699.
- Methner, Y., Dancker, P., Maier, R., Latorre, M., Hutzler, M., Zarnkow, M., Steinhaus, M., Libkind, D., Frank, S., & Jacob, F. (2022). *Influence of Varying Fermentation Parameters of the Yeast Strain Cyberlindnera saturnus on the Concentrations of Selected Flavor Components in Non-Alcoholic Beer Focusing on*. 1–24.
- Ptws, W., Beer, Q., Pater, A., & Satora, P. (2022). *The Impact of Dry Yeast Rehydrated in Different Plasma Treated*.
- Ribéreau Gayon, P. (2020). *Grado Brix Traité d'œnologie Tome 1* (Vol. 1). [https://laffort.com/wp-content/uploads/Protocols/ES\\_Table\\_Convertisseur.pdf](https://laffort.com/wp-content/uploads/Protocols/ES_Table_Convertisseur.pdf)
- SECA, E. (2016). *HISTORIA DE LA CERVEZA*. <https://secaecuador.es.tl/HISTORIA-DE-LA-CERVEZA.htm>
- Shopska, V., Denkova-kostova, R., & Kostov, G. (2022). *Modeling in Brewing — A Review*. 1–24.
- Srinivasan, B., Palanki, S., & Bonvin, D. (2003). Dynamic optimization of batch processes. *Computers & Chemical Engineering*, 27(1), 1–26. [https://doi.org/10.1016/s0098-1354\(02\)00116-3](https://doi.org/10.1016/s0098-1354(02)00116-3)
- Suárez, M. (2013). Cerveza: componentes y propiedades. *MBtA*, 99. [http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19093/8/TFM\\_Maria\\_Suarez\\_Diaz.pdf](http://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/10651/19093/8/TFM_Maria_Suarez_Diaz.pdf)
- Vásquez, M., Albertina, J., Maldonado, D. B., & Angelita, N. (2016). *Análisis de las dimensiones cualitativas que determinan la preferencia de marcas nacionales para el consumo de cerveza en la ciudad del Puyo. Año 2015*.
- Warnasooriya, D. M. R. (2011). *MODELING AND SIMULATION OF THE BEER FERMENTATION PROCESS AND TEMPERATURE* Department of Chemical and Process Engineering. November.

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

Figura A.1 Hoja de evaluación de cerveza obtenida a partir de levadura S-05 a temperatura constante.

## BEER SCORESHEET

AHA/BJCP Sanctioned Competition Program <http://www.homebrewersassociation.org>

<http://www.bjcp.org>

---

Judge Name (print) Kevin Gomez

Judge BJCP ID E3716

Judge Email \_\_\_\_\_

Use Avery label # 5160

Category # 11 Subcategory (a-f) B Entry # 4

Subcategory (spell out) American pale Ale

Special Ingredients: \_\_\_\_\_

Bottle Inspection:  Appropriate size, cap, fill level, label removal, etc.

Comments \_\_\_\_\_

---

**BJCP Rank or Status:**

Apprentice     Recognized     Certified

National     Master     Grand Master

Honorary Master     Honorary GM     Mead Judge

Provisional Judge     Rank Pending     Cider Judge

**Non-BJCP Qualifications:**

Professional Brewer     Beer Sommelier     GABF/WBC

Certified Cicerone     Adv. Cicerone     Master Cicerone

Sensory Training     Other \_\_\_\_\_

**Descriptor Definitions (Mark all that apply):**

Acetaldehyde – Green apple-like aroma and flavor.

Alcoholic – The aroma, flavor, and warming effect of ethanol and higher alcohols. Sometimes described as *hot*.

Astringent – Puckering, lingering harshness and/or dryness in the finish/aftertaste; harsh graininess; huskiness.

Diacetyl – Artificial butter, butterscotch, or toffee aroma and flavor. Sometimes perceived as a slickness on the tongue.

DMS (dimethyl sulfide) – At low levels a sweet, cooked or canned corn-like aroma and flavor.

Estery – Aroma and/or flavor of any ester (fruits, fruit flavorings, or roses).

Grassy – Aroma/flavor of fresh-cut grass or green leaves.

Light-Struck – Similar to the aroma of a skunk.

Metallic – Tinny, coinny, copper, iron, or blood-like flavor.

Musty – Stale, musty, or moldy aromas/flavors.

Oxidized – Any one or combination of stale, winy/vinous, cardboard, papery, or sherry-like aromas and flavors.

Phenolic – Spicy (clove, pepper), smoky, plastic, plastic adhesive strip, and/or medicinal (chlorophenolic).

Solvent – Aromas and flavors of higher alcohols (fusel alcohols). Similar to acetone or lacquer thinner aromas.

Sour/Acidic – Tartness in aroma and flavor. Can be sharp and clean (lactic acid), or vinegar-like (acetic acid).

Sulfur – The aroma of rotten eggs or burning matches.

Vegetal – Cooked, canned, or rotten vegetable aroma and flavor (cabbage, onion, celery, asparagus, etc.)

Yeasty – A bready, sulfury or yeast-like aroma or flavor.

**Aroma** (as appropriate for style) 6 /12  
Comment on malt, hops, esters, and other aromatics  
Deep aroma aliphatic, vanilla, toasty-malty biscuits

---

**Appearance** (as appropriate for style) 3 /3  
Comment on color, clarity, and head (retention, color, and texture)  
Color clear, eyes white, brown redhead, cream

---

**Flavor** (as appropriate for style) 10 /20  
Comment on malt, hops, fermentation characteristics, balance, finish/aftertaste, and other flavor characteristics  
toasty-malty malty biscuits, hop aroma, hop salt a hoppy, balanced, a little mouth, an off-flavor seems over it liquid, floral tea

---

**Mouthfeel** (as appropriate for style) 4 /5  
Comment on body, carbonation, warmth, creaminess, astringency, and other palate sensations  
Good body, carbonation medium-high, finishing alcohol, light mouth, crisp

---

**Overall Impression** 5 /10  
Comment on overall drinking pleasure associated with entry, give suggestions for improvement  
Good drink, can drink a liquid (medium) at all, good presentation, in my opinion falls a piece of off-flavor, from overall 1/2 of hops aroma, etc., aroma

---

**Total** 28 /50

---

**SCORING GUIDE**

**Outstanding** (45 - 50): World-class example of style.

**Excellent** (38 - 44): Exemplifies style well, requires minor fine-tuning.

**Very Good** (30 - 37): Generally within style parameters, some minor flaws.

**Good** (21 - 29): Misses the mark on style and/or minor flaws.

**Fair** (14 - 20): Off flavors/aromas or major style deficiencies. Unpleasant.

**Problematic** (00 - 13): Major off flavors and aromas dominate. Hard to drink.

<b>Classic Example</b> <input type="checkbox"/>	<b>Stylistic Accuracy</b> <input type="checkbox"/>	<b>Not to Style</b> <input type="checkbox"/>
<b>Flawless</b> <input type="checkbox"/>	<b>Technical Merit</b> <input type="checkbox"/>	<b>Significant Flaws</b> <input type="checkbox"/>
<b>Wonderful</b> <input type="checkbox"/>	<b>Intangibles</b> <input checked="" type="checkbox"/>	<b>Lifeless</b> <input type="checkbox"/>

BJCP Beer Scoresheet Copyright © 2017 Beer Judge Certification Program rev. 170612 Please send any comments to [Comp\\_Director@BJCP.org](mailto:Comp_Director@BJCP.org)



# APÉNDICE B

Figura B.1 Hoja de evaluación de cerveza obtenida a partir de levadura S-05 a temperatura variable.



## BEER SCORESHEET

http://www.bjcp.org

AHA/BJCP Sanctioned Competition Program

http://www.homebrewersassociation.org

Judge Name (print) Kevin Gomez Category # 18 Subcategory (a-f) B Entry # 5  
 Judge BJCP ID E3714 Subcategory (spell out) American Pale Ale  
 Judge Email \_\_\_\_\_ Special Ingredients: \_\_\_\_\_  
 Use Avery label # 5160

**BJCP Rank or Status:**

- Apprentice
- National
- Honorary Master
- Provisional Judge
- Recognized
- Master
- Honorary GM
- Rank Pending
- Certified
- Grand Master
- Mead Judge
- Cider Judge

**Non-BJCP Qualifications:**

- Professional Brewer
- Certified Cicerone
- Sensory Training
- Beer Sommelier
- Adv. Cicerone
- Other
- GABF/WBC
- Master Cicerone

**Descriptor Definitions (Mark all that apply):**

- Acetaldehyde – Green apple-like aroma and flavor.
- Alcoholic – The aroma, flavor, and warming effect of ethanol and higher alcohols. Sometimes described as *hot*.
- Astringent – Puckering, lingering harshness and/or dryness in the finish/aftertaste; harsh graininess; huskiness.
- Diacetyl – Artificial butter, butterscotch, or toffee aroma and flavor. Sometimes perceived as a slickness on the tongue.
- DMS (dimethyl sulfide) – At low levels a sweet, cooked or canned corn-like aroma and flavor.
- Estery – Aroma and/or flavor of any ester (fruits, fruit flavorings, or roses).
- Grassy – Aroma/flavor of fresh-cut grass or green leaves.
- Light-Struck – Similar to the aroma of a skunk.
- Metallic – Tinny, coin, copper, iron, or blood-like flavor.
- Musty – Stale, musty, or moldy aromas/flavors.
- Oxidized – Any one or combination of stale, winy/vinous, cardboard, papery, or sherry-like aromas and flavors.
- Phenolic – Spicy (clove, pepper), smoky, plastic, plastic adhesive strip, and/or medicinal (chlorophenolic).
- Solvent – Aromas and flavors of higher alcohols (fusel alcohols). Similar to acetone or lacquer thinner aromas.
- Sour/Acidic – Tartness in aroma and flavor. Can be sharp and clean (lactic acid), or vinegar-like (acetic acid).
- Sulfur – The aroma of rotten eggs or burning matches.
- Vegetal – Cooked, canned, or rotten vegetable aroma and flavor (cabbage, onion, celery, asparagus, etc.)
- Yeasty – A bready, sulfury or yeast-like aroma or flavor.

**Bottle Inspection:**  Appropriate size, cap, fill level, label removal, etc.  
 Comments \_\_\_\_\_

**Aroma** (as appropriate for style) 8 /12  
 Comment on malt, hops, esters, and other aromatics  
Media alta (total coverage) con aroma bicarbonato

**Appearance** (as appropriate for style) 2 /3  
 Comment on color, clarity, and head (retention, color, and texture)  
Color: claro, espuma blanca-beige extensa media

**Flavor** (as appropriate for style) 14 /20  
 Comment on malt, hops, fermentation characteristics, balance, finish/aftertaste, and other flavor characteristics  
aroma media, media subterránea final astringente, boca dulce y astringente, balance adecuado al tipo de cerveza, aroma bicarbonato

**Mouthfeel** (as appropriate for style) 3 /5  
 Comment on body, carbonation, warmth, creaminess, astringency, and other palate sensations  
Cuerpo medio-bajo, carbonatación media-baja, ligero, ligero, boca astringente

**Overall Impression** 6 /10  
 Comment on overall drinking pleasure associated with entry, give suggestions for improvement  
Cerveza clara, ligada en su sabor, adecuada al tipo de cerveza, aroma bicarbonato, balance adecuado al tipo de cerveza, aroma bicarbonato

**Total** 33 /50

SCORING GUIDE	<b>Outstanding</b> (45 - 50): World-class example of style.
	<b>Excellent</b> (38 - 44): Exemplifies style well, requires minor fine-tuning.
	<b>Very Good</b> (30 - 37): Generally within style parameters, some minor flaws.
	<b>Good</b> (21 - 29): Misses the mark on style and/or minor flaws.
	<b>Fair</b> (14 - 20): Off flavors/aromas or major style deficiencies. Unpleasant.
<b>Problematic</b> (00 - 13): Major off flavors and aromas dominate. Hard to drink.	

<b>Classic Example</b> <input type="checkbox"/>	<b>Stylistic Accuracy</b> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>Not to Style</b>
<b>Flawless</b> <input type="checkbox"/>	<b>Technical Merit</b> <input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>Significant Flaws</b>
<b>Wonderful</b> <input type="checkbox"/>	<b>Intangibles</b> <input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<b>Lifless</b>

## APÉNDICE C

**Tabla C.1 Materiales, instrumentos y equipos empleados en la experimentación**

Instrumento y Equipo	Uso	Cantidad	Valor	Total
Barril de 20 litros con tapa rosca y llave	Contener el mosto durante la fermentación	3	\$ 21,00	\$ 63,00
Sacabocado de 5/8 pulgadas	Perforar el barril para el termómetro de glicerina	1	\$ 12,00	\$ 12,00
Unión RH PP 1/2 pulgadas	Conectar adaptador con el termómetro de glicerina	1	\$ 0,58	\$ 0,58
Adaptador tanque PP RR 1/2 pulgadas	Conectar unión con el barril	1	\$ 2,52	\$ 2,52
Teflón	Adaptar correctamente las conexiones para evitar fugas	1	\$ 2,25	\$ 2,25
Saché de levadura S-04 Fermentis 11,5 g	Fermentar el mosto	1	\$ 7,24	\$ 7,24
Saché de levadura S-05 Fermentis 11,5 g	Fermentar el mosto	2	\$ 9,11	\$ 18,22
Vaso de precipitado 250 ml	Recipiente para mediciones del mosto	3	\$ 3,75	\$ 11,25
Probeta de 250 ml	Recipiente para la medición de gravedad específica	1	\$ 18,75	\$ 18,75
Termómetro de glicerina	Medir la temperatura del mosto	1	\$ 20,66	\$ 20,66
Controlador de temperatura Termostato ITC-308 (INKBIRD)	Medir y controlar la temperatura de la nevera	1	\$ 50,90	\$ 50,90
Termómetro de mercurio -10 a 110 °C	Medir la temperatura del mosto extraído	1	\$ 8,00	\$ 8,00
			<b>Costo total</b>	<b>\$ 215,37</b>