



Diseño y desarrollo de herramienta para la valorización del calor fatal industrial en la fabricación de cerveza artesanal

Trabajo Final de Ingeniería Industrial

Departamento de Ingeniería Industrial

FACULTAD DE INGENIERÍA UNMDP

Municoy, Julieta

Tartaglia, Franco

Noviembre 2018, Mar del Plata



RINFI se desarrolla en forma conjunta entre el INTEMA y la Biblioteca de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Mar del Plata.

Tiene como objetivo recopilar, organizar, gestionar, difundir y preservar documentos digitales en Ingeniería, Ciencia y Tecnología de Materiales y Ciencias Afines.

A través del Acceso Abierto, se pretende aumentar la visibilidad y el impacto de los resultados de la investigación, asumiendo las políticas y cumpliendo con los protocolos y estándares internacionales para la interoperabilidad entre repositorios



Esta obra está bajo una [Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

Diseño y desarrollo de herramienta para la valorización del calor fatal industrial en la fabricación de cerveza artesanal

Autores:

- Municoy, Julieta
- Tartaglia, Franco

Evaluadores:

- Ing. D'Onofrio, María Victoria
Departamento de Ingeniería Industrial,
Facultad de Ingeniería, UNMdP
- Ing. Musumeci, Edgardo A.
Departamento de Ingeniería Industrial,
Facultad de Ingeniería, UNMdP

Director:

- Ing. Carrizo, Guillermo
Departamento de Ingeniería Industrial,
Facultad de Ingeniería, UNMdP

Co-Directora:

- Ing. Ambrústolo
Departamento de Ingeniería Industrial,
Facultad de Ingeniería, UNMdP

AGRADECIMIENTOS

A los directores, quienes nos guiaron en la realización de este trabajo.

Al Ingeniero Mariano Fernández Ferreira, quién nos dedicó su tiempo para aclarar cuestiones vitales para la realización del trabajo. Junto a él comprendimos lo enriquecedor de trabajar con un equipo interdisciplinario, ya que sin su colaboración hubieran quedado inconclusas consideraciones necesarias para los cálculos del calor.

A los fabricantes de cerveza artesanal, principalmente a 'Bohr', 'Baum', 'Torito' por abrimos sus puertas, dedicarnos su tiempo y presentarnos las inquietudes propias sobre el proceso de producción de la cerveza artesanal.

A los proveedores de equipos, por su buena voluntad a la hora de presupuestarnos equipos según los distintos lotes de producción.

ÍNDICE

| | |
|---|------|
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| ÍNDICE DE CUADROS | vi |
| ÍNDICE DE FIGURAS | vi |
| TABLA DE SIGLAS | vii |
| GLOSARIO DE TÉRMINOS | viii |
| RESUMEN | x |
| PALABRAS CLAVE | x |
| 1. INTRODUCCIÓN | 11 |
| 2. MARCO TEÓRICO | 15 |
| 2.1 PRODUCTO | 15 |
| 2.1.1 La cerveza | 15 |
| 2.1.2 Pequeños productores de cerveza – micro-cervecerías | 16 |
| 2.2 CONCEPTOS ENERGÉTICOS | 16 |
| 2.3 CONCEPTOS FÍSICO QUÍMICOS | 17 |
| 2.3.1 Balance de Materia y Energía | 17 |
| 2.3.2 Actividad enzimática | 17 |
| 2.3.3 Mecánica de Fluidos | 17 |
| 2.3.4 Material de equipos | 18 |
| 2.4 CONCEPTOS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO | 19 |
| 2.4.1 Costos de producción | 19 |
| 2.4.2 Inversión | 21 |
| 2.4.3 Precio | 21 |
| 2.4.4 Rentabilidad | 22 |
| 2.4.5 Competitividad | 23 |
| 2.5 TEORÍA DE TOMA DE DECISIÓN | 23 |
| 2.6 HERRAMIENTAS | 25 |
| 2.6.1 Diagrama de flujo | 25 |
| 2.6.2 Matriz de decisión | 25 |
| 2.6.3 Simulación de procesos | 26 |
| 2.7 MATERIALES Y MÉTODOS | 26 |
| 2.7.1 Fuentes primarias: entrevistas y observación directa | 26 |
| 2.7.2 Fuentes secundarias: artículos, web, otros estudios similares | 27 |
| 2.7.3 Validación por simulación | 27 |
| 2.7.4 Herramienta Informática | 27 |
| 3. DESARROLLO | 29 |

| | |
|---|-----|
| 3.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE CERVEZA ARTESANAL | 29 |
| 3.2 MODELO DE PROCESO PARA EL ANÁLISIS DE ETAPAS | 39 |
| 3.3 CONSIDERACIONES DE CÁLCULO Y DISEÑO..... | 42 |
| 3.4 ENERGÍA EN EL PROCESO..... | 43 |
| 3.5 EVALUACIÓN DE FUENTES DE CALOR FATAL O RESIDUAL | 51 |
| 3.5.1 Revalorización del calor fatal..... | 51 |
| 3.6 EVALUACIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO CON POSIBILIDAD DE REDUCIR CONSUMO ENERGÉTICO..... | 55 |
| 3.6.1 Criterio 1: Porcentaje de energía en juego en el proceso sobre el total consumido | 55 |
| 3.6.2 Criterio 2: Valor económico del calor requerido | 56 |
| 3.6.3 Criterio 3: Viabilidad del reciclado de energía..... | 58 |
| 3.6.4 Criterio 4: Impacto positivo sobre otras consideraciones ambientales de la organización..... | 64 |
| 3.7 SELECCIÓN DE LA ETAPA A ANALIZAR..... | 67 |
| 3.8 DESARROLLO DE HERRAMIENTA INFORMÁTICA | 69 |
| 4. CONCLUSIÓN | 76 |
| 5. BIBLIOGRAFÍA | 78 |
| 6. ANEXO I: Análisis de transferencia de calor..... | 80 |
| 6.1 Calentamiento de Agua..... | 80 |
| 6.2 Maceración | 81 |
| 6.2.1 Etapa I..... | 81 |
| 6.2.2 Etapa II..... | 82 |
| 6.2.3 Etapa III..... | 83 |
| 6.3 Cocción..... | 83 |
| 6.4 Enfriamiento de mosto dulce previo a la fermentación | 85 |
| 6.4.1 Etapa I: enfriamiento con agua de red..... | 86 |
| 6.4.2 Etapa II: enfriamiento con glicol..... | 87 |
| 6.4.3 Aprovechamiento del agua de red de enfriamiento y del vapor de agua generado | 88 |
| 6.5 Fermentación..... | 89 |
| 7. ANEXO II: Cálculo de entalpía de la reacción de fermentación | 92 |
| 8. ANEXO III: Código principal de herramienta interactiva..... | 93 |
| 9. ANEXO IV: Habilitación de Macros en Microsoft Excel..... | 117 |

ÍNDICE DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Tabla 1: Consumo energético de los sectores industriales | 11 |
| Tabla 2: Demanda energética de los sectores críticos industriales..... | 11 |
| Tabla 3: Comparación de alternativas de sistemas de cocción..... | 36 |
| Tabla 4: Equipos seleccionados | 42 |
| Tabla 5: Mediciones de temperatura en planta..... | 45 |
| Tabla 6: Porcentaje del calor generado en el proceso sobre el consumo total | 56 |
| Tabla 7: Valorización económica de consumo energético | 58 |
| Tabla 8: Comparación de precios de energía para etapas | 59 |
| Tabla 9: Valoración del impacto ambiental producido por el proceso | 66 |
| Tabla 10: Matriz de decisión de esfuerzos de reducción | 68 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1: Modelo simplificado de toma de decisiones..... | 23 |
| Figura 2: Proceso de producción de cerveza artesanal | 30 |
| Figura 3: Operaciones para la elaboración de cerveza..... | 32 |
| Figura 4: Actividad enzimática de la mezcla en una hora | 33 |
| Figura 5: Temperaturas de la maceración en el tiempo | 34 |
| Figura 6: Curva de temperatura vs tiempo para cocción de mosto a presión atmosférica ... | 35 |
| Figura 7: Curva de temperatura vs tiempo para cocción de mosto a baja presión | 36 |
| Figura 8: Circuito típico de refrigeración para la fermentación | 38 |
| Figura 9: Modelo de proceso de fabricación cerveza artesanal | 41 |
| Figura 10: Recuperación y revalorización del vapor de cocción para agua de lavado | 54 |
| Figura 11: Recuperación y revalorización del vapor para precalentamiento de mosto..... | 55 |
| Figura 12: Soluciones tecnológicas de valorización de calor | 60 |
| Figura 13: Formulario 1: Presentación de herramienta al usuario..... | 71 |
| Figura 14: Formulario 2: Modelo de producción | 72 |
| Figura 15: Formulario 2: Cartel de advertencia ante error en la carga de datos | 74 |
| Figura 16: Formulario 2: Cartel de advertencia ante error en la carga de datos | 75 |
| Figura 17: Formulario 3: Muestra de resultados según datos ingresados..... | 76 |
| Figura 18: Pestaña Opciones de Microsoft Excel | 117 |
| Figura 19: Pestaña Centro de Confianza de Microsoft Excel | 118 |
| Figura 20: Pestaña Configuración de Macros de Microsoft Excel | 118 |

TABLA DE SIGLAS

- TEP = Toneladas Equivalentes de Petróleo
- IRAM = Instituto Argentino de Normalización y Certificación
- AISI = American Iron and Steel Institute (Instituto americano del hierro y el acero)
- TRMA = Tasa de Rentabilidad Mínima Aceptable
- TRC = Tasa de Rentabilidad Calculada
- VBA = Visual Basic
- DDL = Dynamic Link Library (Biblioteca de enlace dinámico)
- IDE = Integrated Development Environment (Entorno de Desarrollo Integrado)
- DBR = Drum-Buffer-Rope (Modelo: Tambor-Amortiguador-Cuerda)
- ENARGAS = Ente Nacional Regulador del Gas
- EDEA = Empresa Distribuidora de Energía Atlántica S.A

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- Adjuntos (cerveceros): sustituyen parcialmente a la malta o al extracto de malta y otorgan propiedades organolépticas al producto.
- Calor: energía generada por el movimiento molecular en la materia, la cual se transfiere al existir diferencia de temperaturas. Para medir el calor de un cuerpo o sustancia en un cuerpo se utiliza una magnitud física denominada temperatura.
- Calor específico: determina la cantidad necesaria que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia, o sistema termodinámico, para elevar la temperatura en una unidad.
- Calor latente: energía térmica aplicada o extraída a una sustancia que produce un cambio de la fase de la misma y no produce aumento de la temperatura.
- Calor sensible: energía térmica que produce un cambio en la temperatura de una sustancia.
- Caudal: magnitud que expresa la cantidad de volumen o masa, dependiendo si se trata de caudal volumétrico o caudal másico respectivamente, que fluye por una superficie plana imaginaria perpendicular al eje de la conducción en un determinado tiempo.
- Consumo energético: gasto total de energía para un proceso determinado. El consumo está integrado por el consumo de energía eléctrica, de gas, de gasoil y/o biomasa, y el consumo de productos derivados del petróleo.
- Diagrama de Mollier: carta semilogarítmica de presión y entalpía.
- Energía: capacidad para realizar un trabajo. En cuestiones económicas, una fuente de energía es un recurso natural, así como la tecnología asociada para explotarla y hacer un uso industrial y económico del mismo. La energía en sí misma no es considerada un bien para el consumo final sino un bien intermedio para satisfacer necesidades en la producción de bienes y servicios.
- Entalpía: cantidad de energía contenida en una sustancia y representa una medida termodinámica, la cual viene figurada con la letra H. La variación de esta medida muestra la cantidad de energía atraída o cedida por un sistema termodinámico.
- Lúpulo: conos de inflorescencia del *Humulus lupulus* aptos para consumo humano.
- Malta de cebada: grano de cebada sometido a germinación parcial y posterior deshidratación y/o tostado en condiciones tecnológicas adecuadas.
- Materia: cualquier realidad espacial y perceptible por los sentidos de las que están hechas las cosas que nos rodean y que, con la energía, constituye el mundo físico. Algunas de las propiedades generales que presenta la materia son: masa (cantidad de materia que tiene un cuerpo); volumen (espacio que ocupa la materia); peso (resultado de la fuerza gravitacional que ejerce la Tierra); inercia (mientras no exista una fuerza

que modifique el estado de la materia, esta seguirá en reposo o en movimiento); punto de ebullición (temperatura a la cual la materia cambia del estado líquido al estado gaseoso); punto de fusión (temperatura a la cual un sólido pasa a líquido a presión).

- Pérdida de carga: aquella energía que el fluido pierde, y no puede ser recuperada, por el rozamiento con las paredes de las conducciones. Dicha energía proviene de la presión, velocidad y altura a la que el fluido circula.
- Presión: mide la proyección de la fuerza en dirección perpendicular en un punto por unidad de superficie, y sirve para caracterizar cómo se aplica una determinada fuerza resultante sobre una pequeña superficie que pasa por ese punto.
- Política energética sostenible: características del desarrollo que asegura las necesidades del presente sin comprometer las necesidades de futuras generaciones.
- Rendimiento energético: relación entre la energía que se suministra al sistema y la energía útil que se obtiene realmente.
- Sistema: conjunto de objetos o entidades ordenadas, entre cuyas partes existe una interacción de tipo causal o algún tipo de conexión. Todos los sistemas se caracterizan por tener una ubicación en el espacio-tiempo, es decir, ocurre en un lugar específico en un momento dado; tener un estado físico definido que puede variar; y poder asociarse a la magnitud física energía. Los sistemas pueden ser permeables o no a la transferencia de energía y de materia. Un *sistema abierto* es aquel que permite la transferencia de materia y energía con su entorno.
- Termodinámica: rama de la física encargada del estudio de la interacción entre el calor y otras manifestaciones de la energía.
- Transferencia de calor: ocurre desde una región de temperatura alta a una región de temperatura baja (de un cuerpo caliente a un cuerpo frío) y nunca en dirección opuesta. Cuando un cuerpo está en equilibrio térmico, es decir a la misma temperatura con sus alrededores, no habrá transferencia de calor entre el cuerpo y sus alrededores. La transferencia de calor ocurre por tres mecanismos: *conducción*, la energía es transmitida por contacto directo entre las moléculas de un cuerpo simple o entre las moléculas de dos o más cuerpos; *convección*, el calor se desplaza de un lugar a otro por medio de corrientes establecidas mediante un medio que fluye; *radiación*, ocurre sin intervención de partículas materiales que transportan el calor, ya que tienen lugar mediante ondas electromagnéticas. En el estudio de los mecanismos de transferencia se define el número de Biot. Dicho número adimensional relaciona la transferencia de calor por conducción dentro de un cuerpo y la transferencia de calor por convección en la superficie de dicho cuerpo, determinando cuando es despreciable la conducción frente a las pérdidas convectivas.

RESUMEN

La creciente competencia en el sector de la cerveza artesanal de la región, hace necesario el estudio de los procesos de producción a los fines de evaluar la posibilidad de reducir los costos y mejorar la productividad; dando como resultado productos de calidad a un precio de venta menor o igual que el de la competencia y, así, poder sostener su competitividad sin perder posicionamiento. El trabajo hace foco en los costos energéticos de producción abordando de esta manera una las temáticas de mayor interés y preponderancia de la actualidad y futuro. Para ello se analiza, mediante un modelo, las distintas etapas para la producción de cerveza artesanal y se estudian los enlaces admisibles de valorización. A través de balances energéticos y criterios técnico-económicos se opta por etapas que se usarán como modelo para el desarrollo de una herramienta informática que permite simular cambios en los costos y el ahorro energético por la implementación de nuevos sistemas y estrategias, como resultado de cambios en los niveles de producción. Además, ayuda en la justificación de compra de nuevos equipos, ampliaciones o modificaciones en planta. Se obtiene como resultado de esta aplicación que podrán ser optimizadas dos etapas, calentamiento de agua y cocción. Si bien la herramienta informática se generó para la valorización del calor residual en las etapas mencionadas del proceso productivo de la cerveza artesanal, la misma puede ser generalizada a otros procesos y sectores productivos, ayudando a la toma de decisiones respecto a la implementación de mejoras en la eficiencia energética de las plantas industriales.

PALABRAS CLAVE

Producción de cerveza artesanal, ahorro energético, herramienta informática interactiva.

1. INTRODUCCIÓN

“Vivimos tiempos de cambio. El desarrollo industrial que hasta ahora ha vivido en la premisa de un mundo de recursos ilimitados tiene que asumir, como el resto de la sociedad, que el consumo energético es uno de los mayores retos a los que se enfrenta. La sostenibilidad ha dejado de ser un reclamo de algunos, para convertirse en clave estratégica de la industria del futuro” (Demag Cranes, 2017).

Aunque la industria se muestra progresivamente más eficiente en los últimos años, hay muchas oportunidades de mejora en el diseño y operación de los procesos de plantas industriales para obtener los mismos niveles de producción con menor consumo energético. De no estudiarse dichas oportunidades, y mientras el desarrollo industrial continúe, seguirá aumentando el consumo energético, el cual representa actualmente alrededor de la tercera parte del total de la energía consumida mundialmente (Tanides, 2013).

La energía es un costo directo de producción cuya magnitud significa hasta un treinta por ciento del presupuesto de la empresa (Schneider Electric, 2016). Si además consideramos el mercado actual, con competencia cada vez más activa, es necesario disponer de precios bajos. Es por ello que un factor de competitividad para las empresas es mantener bajos los costos energéticos, sobre todo en el contexto actual de continuos aumentos en el precio de la energía.

En la Tabla 1 se puede observar la evolución del consumo de los recursos energéticos de los distintos sectores industriales para los cuales la utilización de la energía resulta crítica, por lo que el costo directo debido a su utilización en la producción es alto en relación al resto de los sectores. El consumo de la energía se representa en toneladas equivalentes de petróleo.

| | Consumo de Energía Miles de TEP | | | |
|---|------------------------------------|-------|-------|--------|
| | 1998 | 1999 | 2000 | 2015 |
| Alimentos y Bebidas | 2,719 | 2,428 | 2,379 | 1,64 |
| Productos de Tabaco | 24 | 26 | 31 | 41,52 |
| Productos Textiles | 381 | 361 | 335 | 196,20 |
| Confección de Prendas de Vestir; Terminación y teñido de Pieles | 30 | 28 | 26 | 10,51 |
| Curtido y Terminación de Cueros | 91 | 109 | 119 | 161,26 |
| Productos de Madera y Corcho | 202 | 265 | 268 | 210,39 |
| Papel y Productos de Papel | 445 | 565 | 527 | 439,97 |
| Edición e Impresión | 45 | 47 | 46 | 39,50 |
| Producto de la Refinación del Petróleo | 1,263 | 1,091 | 1,175 | 1,01 |
| Químicos | 1,159 | 935 | 899 | 441,33 |
| Caucho y Plástico | 259 | 272 | 292 | 235,58 |
| Productos Minerales no Metálicos | 1,468 | 1,235 | 1,019 | 0,90 |
| Metales Comunes | 2,205 | 1,672 | 1,799 | 1,36 |
| Metal, excepto maquinaria y equipo | 159 | 163 | 147 | 112,79 |
| Maquinaria y Equipo NCP | 146 | 122 | 112 | 91,38 |
| Maquinaria de Oficina, Contabilidad e Informática | 1 | 0 | 1 | 0,48 |
| Maquinaria y Aparatos eléctricos NCP | 59 | 60 | 66 | 44,49 |
| Equipos y Aparatos de Radio, Televisión y Comunicaciones | 9 | 6 | 6 | 5,05 |
| Instrumentos Médicos y de Precisión | 8 | 6 | 13 | 6,49 |
| Vehículos Automotores, Remolques y Semiremolques | 211 | 165 | 155 | 127,70 |
| Equipo de Transporte NCP | 15 | 15 | 13 | 10,34 |
| Muebles y Colchones | 87 | 101 | 84 | 65,41 |

Tabla 1: Consumo energético de los sectores industriales. Fuente: Estudio sobre los Consumos Energéticos del Sector Industrial; Fundación Bariloche, 2004.

Seleccionando los sectores más críticos, y considerando los recursos más utilizados se determina la demanda energética que se presenta en la Tabla 2.

| Sector Seleccionado | Demanda eléctrica (MW) | Demanda Total Nacional (MW) | % Respecto al total nacional | Consumo de Gas Natural (Millones de m ³ de 9300kcal) | Demanda Total Nacional (Millones de m ³ de 9300kcal) | % Respecto al total nacional |
|------------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------------|---|---|------------------------------|
| Alimentos y bebidas | 798 | 18000 | 4,4 | 899 | 10710 | 8,4 |
| Celulosa y papel | 318 | | 1,8 | 404 | | 3,8 |
| Metales Comunes | 1213 | | 6,7 | 561 | | 5,2 |
| Minerales no metálicos | 298 | | 1,7 | 210 | | 2,0 |
| Química | 597 | | 3,3 | 536 | | 5,0 |
| Cuero y textil | 278 | | 1,5 | 104 | | 1,0 |
| Total | 3502 | | 19,5 | 2714 | | 25,3 |

Tabla 2: Demanda energética de los sectores críticos industriales. Fuente: Escenario energético 2013-2030 con políticas de eficiencia; Fundación Vida Silvestre Argentina, 2012.

Los pequeños productores de cerveza artesanal forman parte del sector "Alimentos y Bebidas" que se presentan en la Tabla 2, más específicamente en la sección "Elaboración de cerveza, bebidas malteadas y de malta" según la clasificación realizada por el Indec (Clasificadores de actividad, Censo Nacional Económico, 2004/05).

En Mar del Plata existen cincuenta y ocho microcervecerías artesanales que generan doscientos cuarenta empleos directos y más de dos mil doscientos indirectos. Además, durante el año 2017, se registraron incrementos interanuales de hasta un 50% en la capacidad de producción y se proyectan expansiones de entre un 40% y 50% para los siguientes años (Cámara de cervecerías artesanales para diario La Capital, 2017).

Acorde a lo citado en el párrafo anterior, la emergente industria cervecera en nuestra ciudad muestra un crecimiento en el sector con la continua adhesión de nuevos productores y comerciantes a la matriz industrial, por lo que es objeto del presente trabajo.

Para facilitar el ingreso de los productores de la región al mercado o mejorar su posición competitiva, es necesario definir estrategias para la reducción de los costos directos industriales, como por ejemplo el ahorro energético, debido a la mejora en la eficiencia de los procesos. La eficiencia energética de los procesos puede ser mejorada con la implementación de tecnología que permita reutilizar o dar valor al calor residual generado en los procesos industriales.

El calor residual, o calor fatal industrial, es una expresión empleada para designar al calor producido y no utilizado que se genera en los distintos procesos industriales. Ejemplos de fuentes de calor residual en la fabricación de cerveza artesanal son los gases calientes de combustión generados por unidades de operación, tales como calderas, o la transferencia de calor a partir de las superficies de equipos a alta temperatura. Algunos métodos de valorización en este caso son el calentamiento de agua de cocción con fluido precalentado durante la etapa de enfriamiento o condensadores instalados en chimeneas de las calderas de cocción para aprovechar la entalpía del vapor de agua generado.

El objetivo de este trabajo final es facilitar la toma de decisiones sobre el rendimiento energético, ayudando a la selección de vías de valorización para el calor residual. Tales acciones pueden proporcionar beneficios a los productores, nuevos o ya establecidos en el mercado, maximizando el uso de sus fuentes de energía y los activos relacionados con la energía, lo que reduce el consumo de los recursos y consecuentemente los costos.

Para lograr dicho objetivo se analiza el proceso productivo de la cerveza artesanal, profundizando en las cuatro etapas de mayor interés termodinámico: maceración, cocción, enfriamiento y fermentación; para seleccionar la que mayor impacto tenga en el consumo de energía con el fin de disminuir el costo que ésta genera.

Continuando con la estructura del trabajo se analizan y seleccionan las fuentes de calor residual con las cuales se analizará la factibilidad de disminuir el costo energético del proceso seleccionado en la primera parte del trabajo. Una vez seleccionada dicha fuente, se estudian las vías de valorización existentes y la maduración de estas tecnologías para poder establecer enlaces admisibles entre la fuente y la etapa en la que se desea reducir el costo energético.

El trabajo concluye con la creación de una herramienta informática programada en Visual Basic que, en conjunto con una base de datos formada a partir de las variables productivas claves, estudiadas durante el proceso y los enlaces admisibles establecidos, cuantifica económica y energéticamente los posibles cambios a realizar en el proceso.

La herramienta brinda la posibilidad de ser modificada, con conocimientos de procesos y programación, para adaptarse a otras etapas, o procesos industriales distintos.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 PRODUCTO

2.1.1 La cerveza

La cerveza es una bebida alcohólica no destilada que se obtiene de la fermentación de un mosto elaborado a partir de malta de cebada, con o sin la adición de otros cereales no malteados (adjuntos). La mezcla de estos cereales con agua se transforma en azúcares mediante la digestión enzimática (levaduras). Posteriormente se agrega a la mezcla el lúpulo y/o sus derivados y finalmente es sometida a un proceso de cocción (Código Alimentario Argentino, 2001).

Para la elaboración de la cerveza industrial o artesanal se requieren de los siguientes componentes: agua, malta de cebada, lúpulo, levadura y adjuntos. Los cuatro primeros elementos son la base de la cerveza mientras que los adjuntos se añaden por razones económicas, de sabor o dependiendo la receta del Maestro Cervecerero.

Aunque en el mercado pueden ser encontradas una gran variedad de cervezas, la mayoría de ellas pertenecen a uno de los grupos básicos: "ale", de fermentación alta o "lager", de fermentación baja. La diferencia fundamental entre ambos tipos radica en la levadura usada y las temperaturas a la que la fermentación del mosto es realizada.

Cerveza de fermentación baja: Lager

Es un tipo de cerveza de baja fermentación, guardada a una temperatura cercana a los cero grados durante dos meses. Una vez envasada, debe consumirse lo antes posible.

La levadura trabaja a baja temperatura en la parte baja del tanque, a la que luego se deja madurar en frío. Existen distintos estilos de lager como pilsen, märzen y bock. La diferencia radica en la densidad del mosto, la mezcla de la malta empleada, el lúpulo utilizado y la forma específica de su elaboración.

Cerveza de fermentación alta: Ale

Son cervezas de fermentación alta en caliente (de 15 a 25 °C), que proporciona al producto aromas afrutados y gran variedad de tonos y sabores.

En las versiones originales de las cervezas, las Ales fermentan a temperaturas más altas que las Lagers, y utilizan un fermento que trabaja en la zona superior del mosto.

2.1.2 Pequeños productores de cerveza – micro-cervecerías

De acuerdo con lo establecido por el gremio de fabricantes de cerveza artesanal, una micro cervecería es una fábrica de cerveza donde se hace una producción limitada de cerveza, considerando una producción mucho más pequeña comparada con las grandes industrias. Dichos pequeños productores son independientes ya que no pertenecen ni son controlados por grandes fabricantes y su producción anual es menor a 18.000 hectolitros (Gremio de Elaboradores de Cerveza Artesanal y Natural, 2013).

Las micro cervecerías, por el hecho de fabricar artesanalmente, deben ser especialmente cuidadosas con la consistencia del producto para que no haya diferencias perceptibles entre lotes, ni deben permitirse errores en el proceso de fabricación que pueda resultar en defectos de la cerveza, ya que hacen a la calidad del producto.

Es habitual la utilización de ingredientes locales con la intención de dar más autenticidad al producto y generar recetas marcadas por el territorio donde se producen. Otras características propias de las micro cervecerías son la apuesta que hacen por la innovación y variación en las recetas, la interpretación de estilos clásicos y la creación de nuevos estilos.

2.2 CONCEPTOS ENERGÉTICOS

La energía es un factor determinante para el desarrollo un país, sin energía no podría crecer la industria y el comercio, tampoco sería posible el desarrollo social, superar la pobreza y mejorar la salud. El aumento de la población mundial lleva ligado un aumento del consumo y esto agotará los recursos energéticos afectando también a nuestro clima. Si no se logra el cambio, no se logrará vivir cómodamente. Sin proteger al planeta no se podría sobrevivir. ¿De dónde se obtendrá la energía necesaria? (Talla C., Elisa D., 2015).

Se entiende por eficiencia energética aquel conjunto de actividades encaminadas a reducir el consumo de energía, mejorando la utilización de la misma, con el fin de proteger el medio ambiente, reforzar la seguridad de abastecimiento y crear una política energética sostenible. En la industria se logra tal eficiencia optimizando los procesos industriales, aprovechando mejor el reciclaje de materiales, materias primas y energía, implementando nuevas tecnologías, reciclando los residuos industriales y productos derivados. Los avances tecnológicos implican mejorar la eficiencia ya que suponen maneras de mejorar rendimientos con el fin de reducir costos de producción (IRAM, s.f.).

El ahorro energético es la reducción del consumo de energía, sin alterar la eficiencia energética. Un ejemplo de ahorro energético en el sector industrial es la utilización de variadores de velocidad en los procesos productivos; cuando un equipo es accionado

mediante un variador de velocidad, utiliza menos energía eléctrica que si el equipo fuera activado a una velocidad constante (Soto Cruz, 1996).

2.3 CONCEPTOS FÍSICO QUÍMICOS

2.3.1 Balance de Materia y Energía

Los balances de materia y energía permiten evaluar las transferencias de materia y/o energía que ocurren entre las etapas del proceso de producción.

Un balance de materia define la cantidad de materia que está en juego en los procesos y se basa en la ley de conservación de la materia. Esta ley establece que la materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma. Aplicado a un sistema cerrado, se explica que la masa permanece constante. Un balance donde ocurre una reacción química, y en estado transitorio, sigue el modelo de la ecuación 1 (Soto Cruz, 1996).

$$\{\text{Masa acumulada}\} = \{\text{Entrada}\} + \{\text{Generación}\} - \{\text{Salida}\} - \{\text{Reacción}\} \quad (1)$$

El principio que rige los balances de energía es la ley de conservación de la energía que establece que la energía no puede crearse ni destruirse. El modelo de balance energético en estado transitorio es el presentado en la ecuación 2.

$$\{\text{Energía acumulada}\} = \{\text{Entrada}\} - \{\text{Salida}\} \quad (2)$$

2.3.2 Actividad enzimática

Durante la fabricación de cerveza artesanal es importante lograr la mayor cantidad de extracto posible por motivos económicos. La cantidad principal de extracto se obtiene durante la maceración y pasará a formar parte de la solución del mosto que se convertirá en cerveza. Por eso, el propósito de la maceración es la degradación completa del almidón mediante la actividad de las enzimas, para la obtención de azúcares y dextrinas solubles.

La actividad de las enzimas depende en primer lugar de la temperatura. La actividad aumenta con el aumento de la temperatura y alcanza un valor óptimo específico para cada enzima, a cierta temperatura. A mayores temperaturas tiene lugar una inactivación, en rápido aumento, debido a un desdoblamiento de la estructura tridimensional de la enzima (desnaturalización). La inactivación y eliminación de la actividad enzimática es tanto mayor, cuanto más hacia arriba es excedida la temperatura óptima. Las enzimas trabajan también a menor temperatura, pero notablemente más lento (Sancho, 2015).

2.3.3 Mecánica de Fluidos

Para lograr que los productos intermedios en el proceso de producción de la cerveza circulen y sean transportados desde el punto inicial, a menor presión, hasta el depósito final,

a mayor presión, es necesario brindarles la suficiente energía para vencer la altura de dicho depósito y las pérdidas de carga que el fluido sufrirá en el recorrido. Para tal fin se utilizan las bombas hidráulicas.

Las bombas hidráulicas son turbo-máquinas rotantes generadoras, que transforman la energía con la que son accionadas, generalmente mecánica, en presión para el fluido incompresible que mueve (Dixon, 2010). La potencia que debe suministrarse a la bomba sigue la ecuación 3.

$$P = \rho g Q H \quad (3)$$

Dónde:

- ρ es la densidad del fluido a transportar
- g es la gravedad
- Q representa el caudal de fluido que debe ser transportado
- H la altura del depósito final, incluida las pérdidas de carga, en metros.

2.3.4 Material de equipos

El acero inoxidable está presente en la industria de los alimentos ya que los beneficios que éste brinda en todo el proceso son muy importantes para la producción de comestibles. La adición de níquel al acero inoxidable ofrece valiosas ventajas de fabricación, ya que mejora las propiedades del tratamiento térmico, aumentando la tenacidad sin disminuir la ductilidad. Tal es el caso de los austeníticos que constituyen la familia con el mayor número de aleaciones disponibles, integrada por las series 200 y la 300 de la AISI (American Iron Steel Institute).

La serie de aleaciones AISI son muy utilizadas por presentar características tales como elevada resistencia a la corrosión, superficie totalmente compactada, elevada resistencia a choques y tensiones mecánicas, elevada resistencia a variaciones térmicas, ausencia de recubrimientos de fácil deterioro, no aporta partículas por desprendimiento, óptima capacidad de limpieza y, en consecuencia, elevado grado de eliminación de bacterias (Pérez Patiño, 1996).

Es por estas características que los equipos para la producción de cerveza artesanal se conforman de este material.

2.4 CONCEPTOS PARA EL ANÁLISIS ECONÓMICO

2.4.1 Costos de producción

En el presente trabajo, se analiza la factibilidad de reducir el costo total de producción, y mejorar conjuntamente la eficiencia energética de las fábricas productoras de cerveza artesanal. Por lo tanto, es propicio entender el desglose de los costos que hacen al costo total.

Los costos de producción son los gastos involucrados en mantener un proyecto en operación. Estos costos, en un determinado período de tiempo, pueden dividirse en variables o fijos:

- Costos variables totales: son proporcionales a los niveles de producción. Es decir, si aumentan las cantidades producidas también aumentarán estos costos. Se distinguen entre ellos el costo de materia prima, costo de envase, costo de mano de obra directa, costo de supervisión, costo de mantenimiento, costo de servicios (energía eléctrica, vapor y agua), costo de suministros, costo de regalías y patentes, costos de laboratorio.
- Costos fijos totales: son independientes de la producción. Comprenden los costos de inversión, los costos de venta y distribución, los costos de administración y los costos de investigación y desarrollo.

Una forma de medir el costo total de producción es en unidad monetaria por unidad de tiempo y se obtiene de sumar los costos variables totales y los costos fijos totales, según la ecuación 4.

$$\text{Costo total de producción} = \text{Costo variable total} + \text{Costo fijo total} \quad (4)$$

Si se divide el costo total de producción por las unidades producidas en un determinado período de tiempo, se obtiene el costo unitario de producción. La ecuación 5 modela la relación.

$$\frac{\text{Costo Total de producción}}{\text{Cantidades Producidas}} = \frac{\text{Costos variables totales}}{\text{Cantidades Producidas}} + \frac{\text{Costos fijos totales}}{\text{Cantidades Producidas}} \quad (5)$$

Al observar los costos unitarios puede observarse que los costos variables unitarios son constantes con la producción y los costos fijos unitarios disminuyen con el aumento del nivel de producción.

La estimación de costos operativos permite, juntamente con otras variables económicas, determinar la rentabilidad de un proyecto a través del beneficio que se obtiene por unidad invertida.

Es importante profundizar en dos de los costos debido a que, serán objeto de análisis en el desarrollo del trabajo. Dichos costos son el componente variable de servicio y los componentes fijo de depreciación y seguro.

El costo de servicio contempla los servicios que se requieren para realizar la producción del bien. Entre los servicios, en general, se incluyen energía eléctrica, gas natural, agua, vapor, aire comprimido, entre otros. Debe relevarse el proceso a fin de determinar qué servicios requiere la producción que se lleva a cabo. Para la estimación del costo de cada servicio requerido para la producción es necesario determinar el consumo y el precio. Generalmente, el consumo tiene dos contribuciones, el consumo específico y el consumo pico. Los consumos específicos se utilizan como cifras promedio en la estimación y representan el consumo promedio del servicio considerado, cuando se trabaja a capacidad determinada. Los consumos pico son aquéllos que podrían producirse cuando se da la circunstancia de que toda la planta o equipos trabajan a capacidad plena o cuando es necesario poner en marcha equipos especiales de consumos mayores que los valores promedio.

El primero de los costos de componente fijo es el costo de depreciación, para entender dicho costo se introduce brevemente el concepto.

Depreciación significa una disminución en valor. La mayoría de los bienes van perdiendo valor a medida que transcurre su vida útil. Los bienes de producción comprados recientemente tienen la ventaja de contar con las últimas mejoras y operan con menos posibilidades de roturas o necesidad de reparaciones. Esta pérdida en valor se reconoce en prácticas de contabilidad como un gasto de operación. En lugar de cargar el precio de compra completo de un nuevo bien como un gasto de una sola vez, la forma de operar es distribuir su costo de compra durante la vida del bien en los registros contables.

Todos los métodos para calcular la depreciación se basan estrictamente sobre el tiempo. O sea, un bien usado todos los días tiene la misma carga de depreciación que uno usado una sola vez por año. Cada método (línea recta, suma de dígitos anuales, porcentaje fijo, doble porcentaje fijo y fondo de amortización) posee características únicas que lo hacen atractivo de acuerdo a las diferentes filosofías de administración. La depreciación por línea recta, método utilizado en el desarrollo del presente trabajo, es la más simple en la aplicación y el método más ampliamente usado, ya que es el método legal reconocido en Argentina para el pago de impuestos o para el descuento de impuestos al calcular el beneficio. La depreciación anual por este método es constante.

El segundo de los componentes fijos es el costo por seguro. Dicho costo depende del tipo de proceso e incluyen seguros sobre la propiedad (incendio, robo parcial o total),

para el personal y para las mercaderías (pérdidas parciales, totales), jornales caídos, entre otros. Normalmente el monto anual de este rubro se puede estimar entre el 0,5 al 1% de la Inversión fija.

En el caso de estudio, se generaría una reducción en el costo variable, ya que se ve afectado el costo de servicios, y un aumento en el costo fijo, ya que se incurre en una inversión adicional en caso de ser factible técnicamente la vía de valorización de calor propuesta.

2.4.2 Inversión

La inversión total es la cantidad de dinero necesaria para concretar un proyecto, para el cual debe estar definida la capacidad y la localización. La inversión se compone de dos términos principales: la inversión fija total y la inversión en capital de trabajo. Los componentes directos de la inversión fija hacen referencia a los estudios previos, equipos e instalaciones, cañerías y montaje, instrumentos de medición y control, edificio de fabricación, instalaciones para producir servicios, terreno y mejoras, y la puesta en marcha. Los componentes indirectos de la inversión fija son la ingeniería y supervisión, construcción, honorarios del contratista y contingencias. La inversión en capital de trabajo refiere a las disponibilidades de capital necesarias para que una vez que la planta esté en régimen de operación, pueda hacerlo de acuerdo a lo previsto en los estudios técnico-económicos.

2.4.3 Precio

La reducción del costo de producción da al fabricante de cerveza artesanal la posibilidad de plantear distintas estrategias de posicionamiento en el mercado en relación al precio del producto. Por este motivo, consideramos oportuno entender que implica el precio de un producto.

El precio es el dinero que paga un comprador por un producto o servicio particular. El precio queda determinado por la interacción entre los factores de la demanda, costos y competencia además de los aspectos estratégicos de la compañía.

El precio junto a otros factores puede determinar la cuota de mercado que una empresa posee, por lo que debe ser capaz de:

1. Cubrir los costos que conlleva la realización de la actividad económica.
2. Ser aceptado por los clientes y reflejar el rendimiento esperado del bien o servicio que se presenta.
3. Ser coherente con los planes estratégicos de la organización.
4. Generar los fondos para que la organización invierta, se desarrolle y pueda llevar adelante sus planes.

2.4.4 Rentabilidad

Según Gitman (1997) la rentabilidad es la relación entre ingresos y costos generados por el uso de los activos de la empresa en actividades productivas. De acuerdo a Sánchez (2002), la importancia de conocer la rentabilidad de una empresa viene dada porque, aun partiendo de la multiplicidad de objetivos a que se enfrentan las organizaciones, la discusión tiende a ser la solvencia como variable fundamental de toda decisión de realizar una actividad económica.

Conceptualmente la rentabilidad es una medida de la ganancia obtenida por una actividad en relación con la inversión de capital necesaria para que esa actividad se realice.

Por otra parte, el estudio de la rentabilidad de una empresa puede ser realizado en dos niveles:

- Rentabilidad del activo: esta es una medida del rendimiento del activo total de la empresa independientemente de la financiación del mismo, esto permite la comparación de la rentabilidad entre empresas o proyectos sin que la diferencia de su estructura financiera afecte el resultado.
- Rentabilidad financiera: en este caso se considera que la inversión de capital está financiada por recursos propios y ajenos, es decir que se toma en cuenta la estructura financiera de la empresa. Por este motivo, la rentabilidad financiera es una medida referida al rendimiento de los fondos propios de la empresa

Cuando una persona o grupo de personas invierten en un proyecto lo hacen con la expectativa de lograr un rendimiento aceptable y para esto se utilizan métodos basados en tasas de retorno, en su mayoría, dónde la rentabilidad esperada será favorable si es superior a la tasa de rentabilidad mínima aceptable (TRMA) definida por la empresa.

Luego, sabiendo que la tasa de rentabilidad calculada (TRC) es una medida que permite conocer la rentabilidad anual por cada peso invertido, la decisión de invertir o no en el proyecto se toma en base a:

- Si la $TRC > TRMA$ entonces se acepta el proyecto
- Si la $TRC = TRMA$ es indiferente
- Si la $TRC < TRMA$ entonces se rechaza el proyecto

Para la construcción de la TRC se utilizan flujos de caja, los cuales surgen de la diferencia aritmética entre fuentes y usos de fondos. Si se define al beneficio como en la Ecuación 6, entonces puede entenderse cómo la disminución de los costos propuesta en este trabajo genera un impacto directo en el beneficio y esto una mejora en la TRC.

$$\text{Beneficio} = \text{Ingresos por ventas} - \text{Costos} \quad (6)$$

Las fuentes y usos se presentan en un cuadro que presente la integración de los datos que forman parte de la evaluación de la rentabilidad. los cuales son directamente proporcionales al beneficio.

2.4.5 Competitividad

Como explican Álvarez P. y Larrea (2017) la competitividad empresarial es la capacidad que tiene una empresa, y las estrategias que utiliza, para proporcionar productos y servicios con mayor eficacia y eficiencia frente a sus competidores. Algunos índices o medidas que definen la competitividad son las gestiones que aceleran la eficacia de los procesos industriales y comerciales, la rentabilidad de la empresa, y la cuota de mercado regional o mundial.

Existen variedad de estrategias para aumentar la competitividad de la empresa. Las más conocidas, por las ventajas que presentan a la hora de posicionar a un negocio frente a la competencia, son la diferenciación y el liderazgo en costos.

El liderazgo en costos es una estrategia que se basa en producir con el menor costo posible, obteniendo productos a precios unitarios bajos. A menor precio de venta, la empresa conduce al aumento de la cuota de mercado por lograr la mayor ventaja competitiva. Sabiendo que los ingresos por venta se definen como la cantidad de productos vendidos, en un período de tiempo, multiplicado por el precio de venta, el liderazgo en costos produce un aumento de las cantidades vendidas por mayor cuota de mercado y una disminución en el término de costos debido, en este caso, a los esfuerzos para mejorar la eficiencia energética. Ambas acciones generan un aumento en el beneficio y por ende en la rentabilidad de la empresa.

En cuanto a la diferenciación, la ventaja competitiva reside en ofrecer un producto o servicio que hace a la empresa única en su sector, lo cual es valorado por los compradores. En este caso, el precio no es el factor principal de la decisión de consumo y entra en juego las notas distintivas de las cervezas (diferenciación por el sabor), la imagen de la marca, las tecnologías de fabricación, el servicio al cliente y la cadena de distribución.

2.5 TEORÍA DE TOMA DE DECISIÓN

La aplicación de una herramienta informática facilita la toma de decisiones que afectan a la eficiencia energética de las fábricas de cerveza artesanal. Por ello, es oportuno explicar la importancia estratégica de la toma de decisiones y las consideraciones que se tuvieron al momento de desarrollar la herramienta.

Las decisiones estratégicas se definen como una elección importante, en términos de las acciones adoptadas, los recursos comprometidos o los precedentes establecidos. Constituyen un proceso de elección que involucra la asignación de los recursos necesarios para alcanzar o mantener una ventaja competitiva. En este sentido, la toma de decisiones estratégicas es una tarea esencial para la alta dirección, ya que permite a las organizaciones alinear sus recursos y capacidades con las amenazas y las oportunidades que existen en el mercado (Hitt y Collins, 2007).

Según Céspedes (2008) la teoría de la decisión tiene como finalidad analizar una situación determinada de modo que su resultado sea la acción más racional.

En la Figura 1 se esquematiza, de una forma simplificada, el método estandarizado para la toma de decisiones.

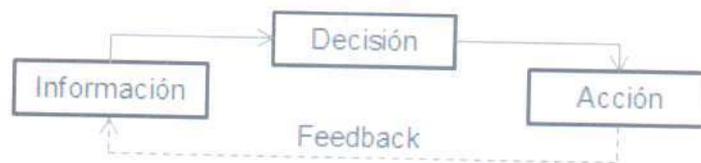


Figura 1. Modelo simplificado de toma de decisiones. Fuente: Meguzzato y Renau, 2009.

Para que la decisión sea lo más racional posible es necesario tener el menor grado de incertidumbre, o riesgo, posible. Por este motivo, como se observa en la Figura 1, el *feedback*¹ de las acciones realizadas cierran un lazo de control donde la información, base de la construcción de escenarios y el modelo, es modificada reduciendo incertidumbre y ajustándose a la realidad. Si los modelos se corresponden en mayor grado con la realidad y los escenarios tienen mayor probabilidad de ocurrencia, entonces los resultados serán más parecidos a lo esperado. Entonces podemos numerar la secuencia para que esto resulte:

1. Recopilación información.
2. Análisis de dicha información.
3. Selección de la información en que se va a fundamentar la decisión.
4. Comprensión de la situación.
5. Decisión del curso de acción.
6. Ejecución del curso de acción o la decisión a tomar bajo lineamiento del entendimiento de la situación.

¹ Se utiliza dicha palabra del inglés para denominar a la realimentación en lazos de control.

2.6 HERRAMIENTAS

Existen diferentes herramientas para el estudio de procesos y para la ayuda a la toma de decisiones. Se presentan el diagrama de flujo y la matriz de decisión.

En lo que respecta a la construcción de la herramienta informática se presenta una introducción teórica a visual basic y macros.

2.6.1 Diagrama de flujo

Un diagrama de flujo es una representación gráfica que desglosa un proceso en las distintas actividades que lo componen tanto en empresas industriales o de servicios y en sus departamentos, secciones u áreas de su estructura organizativa. Son de gran importancia ya que ayudan a establecer una representación gráfica de un procedimiento o parte de este. Además, ayudan al diseñador en la definición, formulación, análisis y solución del problema permitiendo la conceptualización y entendimiento de las etapas.

Se utilizan distintas formas de interpretación, a través de, por ejemplo, dibujos, símbolos de ingeniería o figuras geométricas, que transmiten una indicación de lo que se quiere representar. Entre las más utilizadas se destacan el óvalo como inicio o fin del diagrama, rectángulo como realización de una actividad, el rombo como análisis de la situación y toma de decisión, el triángulo como actividad de control y la flecha como indicación del flujo de proceso (Chase, 2009).

2.6.2 Matriz de decisión

La matriz de decisión es un cuadro de doble entrada donde se ordenan los resultados que pueden surgir de la implementación de una decisión. Se puede utilizar para análisis de datos y de alternativas de solución, pero su fin principal es la planificación, permitiendo seleccionar características, determinar objetivos y ponderar alternativas.

Se debe tener una idea clara de la decisión que busca tomarse, con el fin de no perder el objetivo y ser claro al momento de plantear la matriz. Las matrices de decisión constan de alternativas o cursos de acción (deben ser posibles, controlables, estar orientadas a cumplir por lo menos uno de los objetivos, y mutuamente excluyentes), estados naturales o futuros posibles, los cuales son afectados por el grado de propensión a suceder por medio de la probabilidad (la suma de las probabilidades debe sumar 1), y los resultados, que surgen de la intersección de haber seleccionado un respectivo curso de acción y haber sucedido el respectivo estado natural (Chase, 2009).

En el caso de estudio, se plantean las diferentes alternativas (etapas del proceso) y los diferentes criterios para evaluar ponderadamente cual es la etapa indicada para centrar los esfuerzos en reducir el costo energético.

2.6.3 Simulación de procesos

La simulación se puede entender como la técnica de reproducir una serie de condiciones sobre un modelo y observar su evolución.

Entre las principales ventajas de la simulación podemos mencionar el estudio del efecto de cambios internos y externos del sistema, además de lograr un mejor entendimiento de lo que sucede. El modelo se puede usar con tanta frecuencia como se desee y puede ser utilizado para experimentar nuevas situaciones o complejas interacciones que ocurren al interior de un sistema dado; es menos costoso correr el modelo que realizar la representación en el mundo real.

Entre las desventajas, se destacan el requerimiento de un equipo computacional y recursos humanos costosos y capacitados, además de una gran cantidad de tiempo para desarrollar y perfeccionar un modelo de simulación.

La información detallada del sistema que se está simulando conduce a un mejor entendimiento del mismo y proporciona sugerencias para mejorarlo, a su vez, puede emplearse para verificar soluciones analíticas.

Mediante la simulación se puede estudiar los efectos de determinados cambios informativos, de organización, y ambientales, en la operación de un sistema, al hacer alteraciones en su modelo y observar los efectos de estos en el comportamiento del sistema. La observación detallada del sistema que se está simulando, conduce a un mejor entendimiento del mismo y proporciona sugerencias para mejorarlo, que de otra manera no podrían obtenerse. En definitiva, la simulación puede servir como prueba de pre servicio para ensayar nuevas políticas y reglas de decisión en la operación de un sistema (San Isidro, 1998).

La herramienta informática permite definir los efectos de cambio de las alternativas propuestas en cada proceso, siendo previamente estudiada cada etapa para evaluar la factibilidad tanto técnica como económica de aplicación de las alternativas. Por tanto, el usuario de la herramienta puede simular para diferentes volúmenes de producción, las alternativas de valorización de calor fatal que se adaptan al proceso.

2.7 MATERIALES Y MÉTODOS

2.7.1 Fuentes primarias: entrevistas y observación directa

Las fuentes primarias son aquellas que contienen información original no abreviada ni traducida, llamadas también fuentes de información de primera mano. Proveen un testimonio o evidencia directa sobre el tema de investigación. Son escritas durante el tiempo que se está estudiando o por la persona directamente involucrada en el evento. Ofrecen un

punto de vista desde adentro del evento en particular o periodo de tiempo que se está estudiando (Bounocore, 1980).

Se utilizaron dos fuentes primarias: entrevistas y observación directa.

- Entrevista: Diálogo entablado entre dos o más personas: el entrevistador interroga y el entrevistado contesta. No es casual, sino es un diálogo interesado con un acuerdo previo e intereses y expectativas por ambas partes (Morga Rodríguez, 2012).
- Observación directa: Es un método de recolección de datos que consiste en observar al objeto de estudio dentro de una situación particular. Esto se hace sin intervenir ni alterar el ambiente en el que el objeto se desenvuelve. De lo contrario, los datos obtenidos no serían válidos (Holmes, 2013).

Como fuentes de datos primarios se utilizaron los datos históricos del proceso de producción de la cerveza en un período determinado, provistos por las empresas, la observación directa del proceso en tiempo real en fábrica y entrevistas de tipo abiertas en profundidad, comenzando con preguntas previamente estipuladas. Las mismas fueron realizadas a los supervisores de producción de las diferentes empresas.

2.7.2 Fuentes secundarias: artículos, web, otros estudios similares

Las fuentes secundarias interpretan y analizan fuentes primarias. Son textos basados en fuentes primarias, e implican generalización, análisis, síntesis, interpretación o evaluación.

Se hizo uso de distintos artículos, estudios de tesis y documentos web relacionados con el tópico de estudio. En adición a las fuentes primarias de datos se agregó información relevante extraída de otras tesis que abordan temas similares, fuentes bibliográficas que incumben a los temas tocados y otros estudios de interés para el presente trabajo.

2.7.3 Validación por simulación

La validación del modelo de simulación es imprescindible debido a que es necesario conocer hasta qué punto el modelo representa bien la realidad y, si no es así, conocer en qué procesos falla y sus posibles causas, pues no se debería comenzar una previsión futura antes de ser validado el modelo. El proceso de validación de un modelo siempre está sujeto a un caso dado; por lo tanto, es necesario establecer para qué condiciones es válido (San Isidro, 1998).

2.7.4 Herramienta Informática

Las herramientas informáticas son programas, aplicaciones o simplemente instrucciones usadas para efectuar otras tareas de modo más sencillo. En un sentido amplio

del término, podemos decir que una herramienta es cualquier programa o instrucción que facilita una tarea (Zapata J, 2012).

Es muy importante usar las herramientas adecuadas para cada tarea. En ese aspecto, cada herramienta se crea y diseña para una o varias funciones determinadas y, por tanto, podemos hablar de muy diversos tipos de herramientas informáticas según el campo al que se dediquen. La herramienta propuesta se diseña para presentar diferentes alternativas de decisión al usuario, realizando el análisis técnico-económico de viabilidad de vías de valorización del calor fatal generado en el proceso de producción de la cerveza artesanal, a partir de datos ingresados por el usuario y en interacción a información pertinente plasmada en una base de datos.

Para el desarrollo de la herramienta se trabajó con programación en Visual Basic en Microsoft Excel. Visual Basic está diseñado para crear de manera productiva aplicaciones con seguridad de tipos orientadas a objetos. Visual Basic (VBA) es un lenguaje de programación dirigido por eventos que permiten generar códigos que requieren una o más librerías de enlace dinámico para que funcione conocidas comúnmente como *DLL*². Estas bibliotecas DLL proveen las funciones básicas implementadas en el lenguaje, conteniendo rutinas en código ejecutable.

Dentro del mismo Entorno de desarrollo integrado (IDE) de Visual Basic se puede ejecutar el programa que esté desarrollándose, es decir en modo intérprete. Desde ese entorno también se puede generar el archivo en código ejecutable. Ese programa así generado en disco puede luego ser ejecutado sin requerir del ambiente de programación, aunque sí será necesario que las librerías DLL requeridas por la aplicación desarrollada se encuentren también instaladas en el sistema para posibilitar su ejecución.

Visual Basic provee soporte para empaquetado y distribución; es decir, permite generar un módulo instalador que contiene al programa ejecutable y las bibliotecas DLL necesarias para su ejecución. Con ese módulo la aplicación desarrollada se distribuye y puede ser instalada en cualquier equipo que tenga un sistema operativo compatible (Microsoft Corporation, 1998).

² Dynamic-Link Library: Biblioteca de enlace dinámico. Se refiere a los archivos con código ejecutable.

3. DESARROLLO

Se realiza el estudio del calor necesario en cada etapa del proceso de producción de la cerveza artesanal y el calor fatal que se genera en cada etapa. Una vez establecidos, se evalúan vías de valorización de dicho calor y la viabilidad técnico-económica de su implementación, analizando la disminución del costo total del proceso. Posteriormente, se desarrolla la herramienta informática que facilita la toma de decisiones para la selección de las vías de valorización, cuantificando económica y energéticamente las propuestas de cambio.

Se entiende exclusivamente por cerveza artesanal a la bebida resultante de fermentar, mediante levadura cervecera, el mosto de cebada malteada o de extracto de malta, sometido previamente a un proceso de cocción y adición de lúpulo. Una parte de la cebada malteada o de extracto de malta podrá ser reemplazada por adjuntos cerveceros (Código Alimentario Argentino, 2017).

3.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE CERVEZA ARTESANAL

El proceso de fabricación de la cerveza artesanal se presenta en la Figura 2. Las operaciones pueden agruparse en cuatro etapas principales.

1. Recepción y almacenamiento de materia prima.
2. Elaboración del mosto: molienda, maceración, filtración, cocción y enfriamiento.
3. Fermentación y maduración.
4. Clarificación, estabilización y envasado.

De estas etapas, la elaboración del mosto y la fermentación son las que presentan mayor interés al desarrollo del presente trabajo debido a sus características termodinámicas, por lo que son las etapas que se describen con mayor detalle.

Las cervezas tipo "lager" son objeto de estudio en este trabajo, por lo que los análisis se desarrollan en base a las especificaciones de diseño propias de este tipo de cerveza.

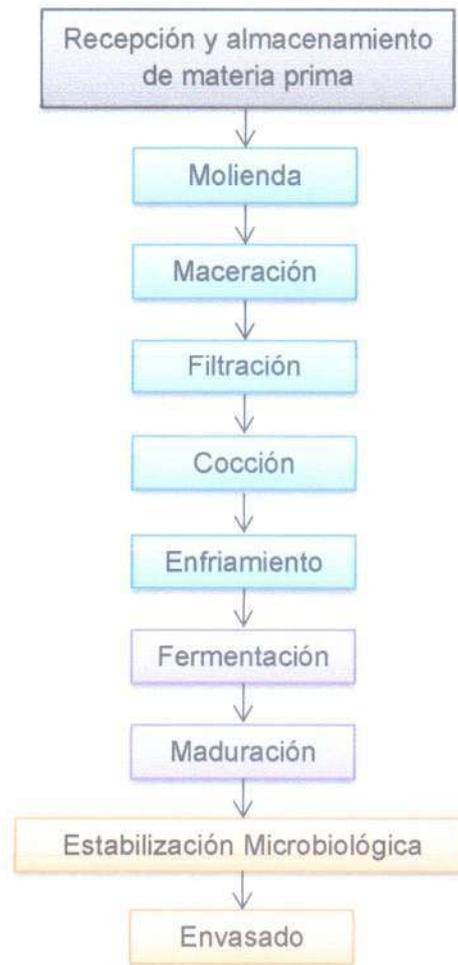


Figura 2. Proceso de producción de cerveza artesanal. Fuente: Instituto tecnológico agroalimentario Español, 2012.

3.1.1 Recepción y almacenamiento de materia prima

Para la fabricación de cerveza es necesario disponer de cinco materias primas (Instituto tecnológico agroalimentario Español, 2012).

- Agua: se utiliza agua de red pre-almacenada en un tanque de agua de gran capacidad.
- Malta: se obtiene a partir de granos de cebada. Se almacenan en forma de grano seco, en bolsones de 25 kg. Debe ser guardada en un lugar fresco, seco y lejos de la luz solar.
- Levaduras: se utilizan cepas de levadura del tipo *Saccharomyces cerevisiae* (Sancho, 2015). Las levaduras lager deben guardarse en un espacio refrigerado ya que son sensibles al calor y a la humedad.
- Lúpulo: se utilizan las inflorescencias femeninas de la planta, que proporcionan amargor y componentes aromáticos. El lúpulo es sensible a la humedad, la luz, el

oxígeno y la degradación por calor, por lo que se recomienda guardar en bolsas de aluminio selladas en un espacio refrigerado.

- Adjuntos: son diferentes granos que se añaden a la malta para aumentar el contenido de azúcares fermentables, dependiendo de las características del tipo de cerveza.

3.1.2 Elaboración del mosto

El mosto de malta es el líquido obtenido mediante el tratamiento de la malta con agua potable con el fin de extraer sus principios solubles. Para poder obtener este líquido son necesarias las etapas de molienda de la malta, maceración, filtración, lavado, cocción y enfriamiento. En la Figura 3 se presenta un diagrama de la secuencia de operaciones.

3.1.2.1 Molienda

La molienda es la primera de las operaciones y tiene por objeto triturar la malta obteniendo harina de malta, logrando un tamaño de partícula tal que permita una maceración adecuada en la etapa posterior. Es necesario que la cascarilla de la malta permanezca tan entera como sea posible, ya que si se disgrega no forma un filtro suficientemente eficaz y permeable en la fase de filtrado.

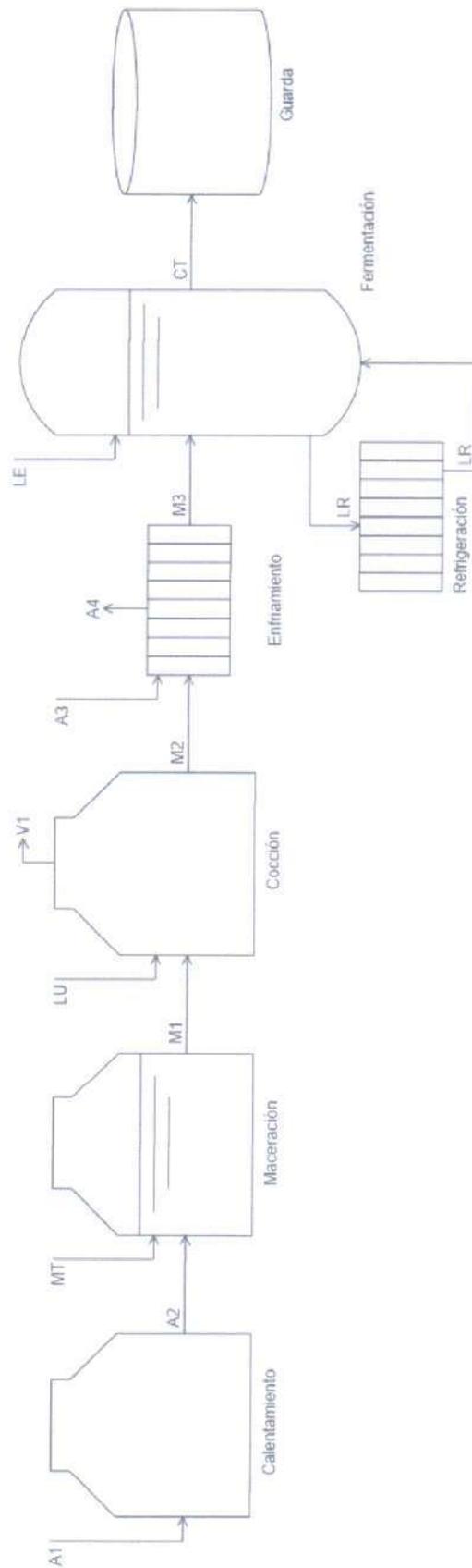


Figura 3: Operaciones para la elaboración de cerveza. Fuente: Elaboración propia según relevamiento de información en planta de proceso.

Dónde:

- A1: Agua potable de red
- A2: Agua potable de red caliente
- A3: Agua potable de red
- A4: Agua potable de red caliente
- V1: Vapor de agua
- MT: Malta triturada (molida)
- M1: Primer mosto
- M2: Segundo mosto
- M3: Tercer mosto
- LU: Lúpulo
- LE: Levadura
- LR: Líquido refrigerante
- CT: Cerveza terminada

3.1.2.2 Maceración

La harina de malta se mezcla con agua y se vierte en cubas, donde se produce la maceración. Durante la maceración la mezcla es llevada a la temperatura a la cual las enzimas presentes en la malta, alfa y beta amilasa, se activan y transforman el almidón en azúcares fermentables, y las proteínas en péptidos y aminoácidos que constituirán la fuente nitrogenada necesaria para la fermentación.

En la Figura 4 se presentan las curvas de actividad enzimática vs temperatura de activación luego de una hora de maceración. Este proceso puede durar entre 100 y 110 minutos, dependiendo de la densidad que se quiere lograr en la cerveza.

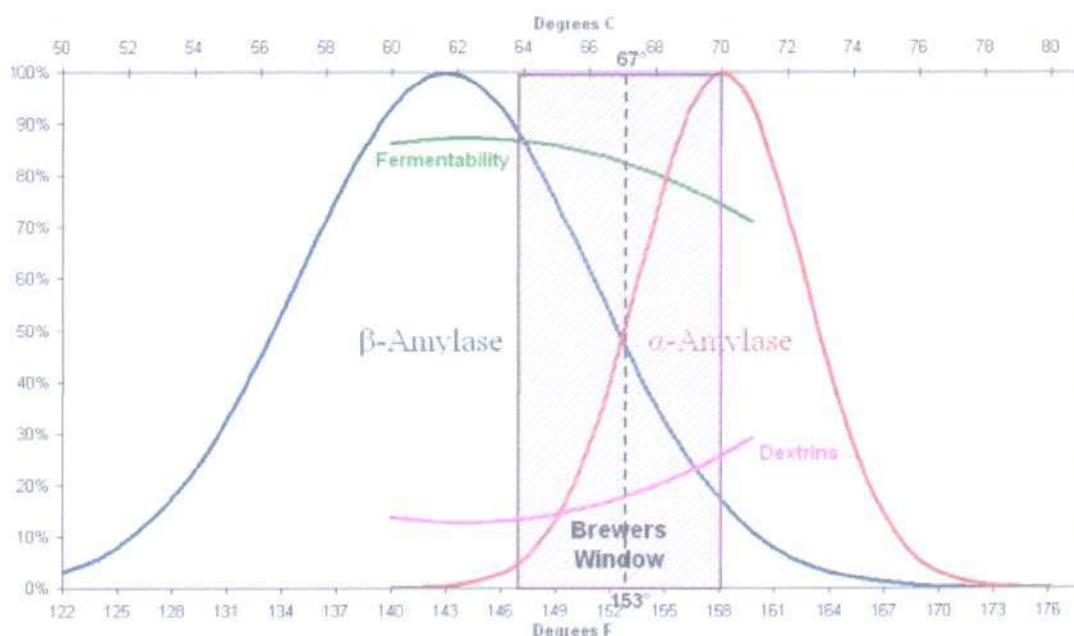


Figura 4: Actividad enzimática de la mezcla en una hora. Fuente: Sancho, S., Rubén, 2015

La lectura del gráfico permite determinar, estadísticamente, que la activación de la mayoría de las enzimas de ambas proteínas sucede en un rango de 64 a 70°C (rectángulo sombreado en el gráfico).

Hay múltiples escalas diferentes de temperaturas según estilos de cerveza, pero es importante remarcar que no se debe macerar más de 120 minutos ni aumentar la temperatura en las diferentes etapas a más de 1°C por minuto. Asimismo, debe considerarse que generalmente la cuba de maceración cuenta con un agitador, el cual debe girar constantemente, pero sin llegar a generar un remolino. Teniendo en cuenta que en este trabajo final se pretende proponer modificaciones en las instalaciones para la producción de una cerveza de baja fermentación o lager, se realizarán las etapas de

macerado de acuerdo a los saltos de temperatura que se presentan en la Figura 5.

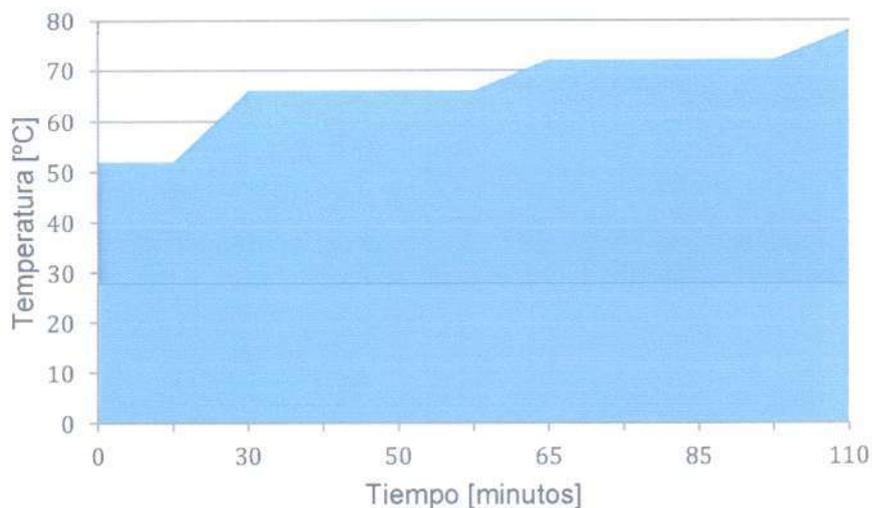


Figura 5: Temperaturas de la maceración en el tiempo. Fuente: Sancho, S., Rubén, 2015

De la figura 5, donde se presentan las temperaturas de maceración en función del tiempo, se pueden distinguir tres etapas. En la primera etapa, para metabolizar las proteínas, la temperatura de maceración es entre 50 y 55°C y el tiempo de proceso entre 10 y 20 minutos. En la segunda etapa se somete la mezcla a una temperatura entre 66 y 68°C durante 30 minutos y se busca lograr una cerveza más dulce o con más cuerpo. Para garantizar la activación de la mayoría de las enzimas, se realiza el proceso con agua a temperatura alrededor de los 67°C. Debido a los intercambios de calor, entre agua y materia prima a temperatura ambiente, la mezcla se estabiliza en 65°C aproximadamente (F.J. Rodríguez y A. Shaw, 1993). En la tercera etapa la mezcla se macera a una temperatura de 72°C durante 30 minutos y al finalizar se aumenta hasta 78°C para que la densidad del mosto sea menor y facilitar la filtración. El producto de esta etapa es el mosto dulce, denominado de esta forma por contener azúcares fermentables.

3.1.2.3 Filtración

Una vez vaciada la cuba de maceración, sobre el fondo del equipo y entre las cascarillas propias de la malta queda un concentrado de mosto dulce. Se vierte agua de lavado dentro de la cuba para recolectar el remanente de mosto dulce concentrado. Esto también permite diluir la concentración del mosto y obtener la composición requerida para el producto final. La proporción entre agua de lavado y mosto generado inicialmente en el macerador es del 60% (Villegas, M., 2013).

3.1.2.4 Cocción

Al inicio de esta etapa, al mosto dulce que se encuentra dispuesto en el hervidor, también denominado cuba de cocción, se le agrega lúpulo. La mezcla es expuesta a una fuente de calor hasta que se alcanza una ebullición constante. Aproximadamente transcurre una hora desde que se inicia la cocción hasta que se alcanza el punto de ebullición.

Una vez que se alcanza la temperatura de 100°C en la cuba de cocción, se mantiene entre 60 y 90 minutos, dependiendo del tipo de cerveza que se quiere lograr. Con ello, se trata de extraer las sustancias amargas del lúpulo que le dan el sabor clásico a la cerveza.

La cocción se puede realizar de dos formas, a presión atmosférica o a baja presión. En la cocción a presión atmosférica, el mosto es hervido en las cubas con el lúpulo, entre una y dos horas, con una tasa de evaporación del 5-8%/hora. En la Figura 6 se presenta el perfil térmico para la cocción a presión atmosférica.

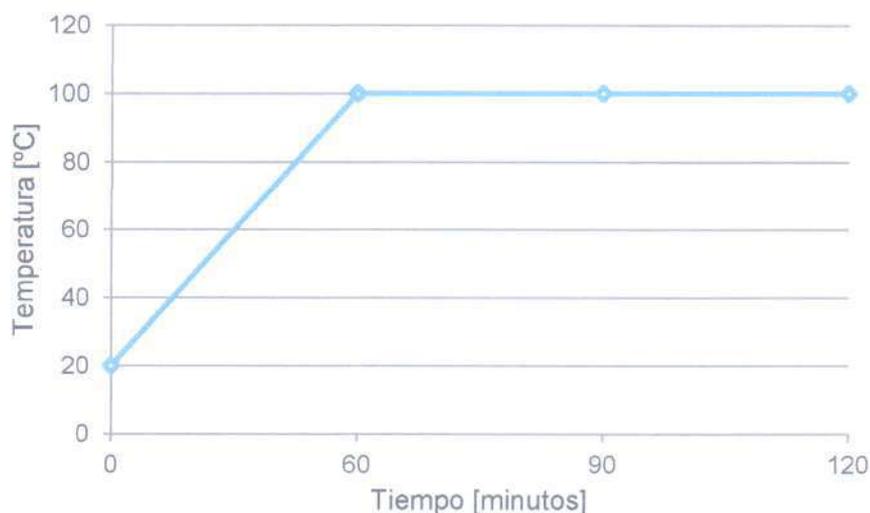


Figura 6: Curva de temperatura vs tiempo para cocción de mosto a presión atmosférica. Fuente: Sancho, S., Rubén, 2015

En los sistemas de cocción a baja presión (0,48 atm), el mosto se calienta a presión atmosférica hasta el punto de ebullición; posteriormente se presuriza la instalación aumentando la temperatura del mosto a un rango de temperatura entre los 105°C y 112°C durante 10 a 15 minutos y, por último, se despresuriza el sistema reduciéndose la temperatura del mosto. En la Figura 7 se presenta el perfil térmico para la cocción a baja presión.

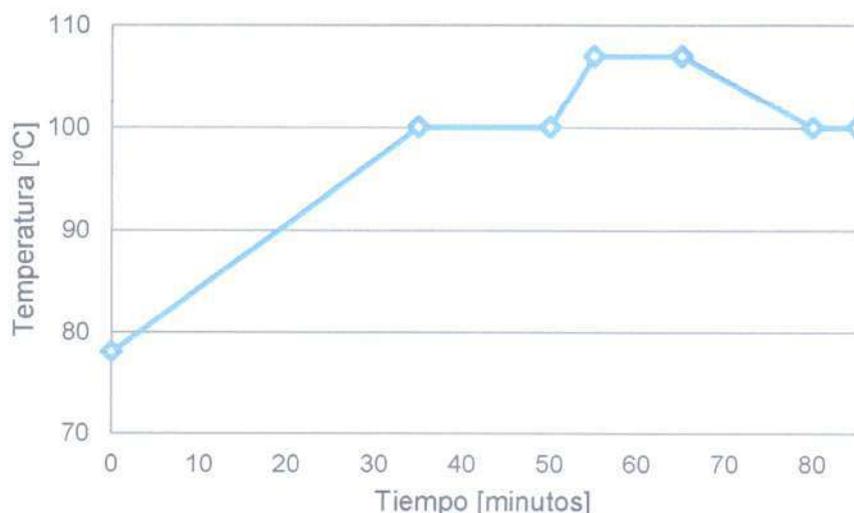


Figura 7: Curva de temperatura vs tiempo para cocción de mosto a baja presión. Fuente: Sancho, S., Rubén, 2015

En la tabla 3 se resume la comparación entre ambos sistemas.

| | | Cocción | |
|---|--------------------------|------------------------------|----------------|
| | | A presión atmosférica | A baja presión |
| Consumo aproximado de vapor [kcal/kg mosto] | | 85,2 | 52,6 |
| Consumo eléctrico | | - | 80 kWh/cocción |
| Presión en caldera [atm] | | 1 | 0,48 |
| Temperatura máxima [°C] | | 100 | 106 |
| Duración aproximada de la cocción [minutos] | | 90 – 100 | < 90 |
| Emisión de vahos a la atmósfera | | 8% del mosto | 8% del mosto |
| Recuperación de energía | | - | Hasta el 95 % |
| Calidad del mosto | | Buena | Buena |
| Cotos de mantenimiento | | 1% del costo de la inversión | |
| Candidatas a Mejor Técnica Disponible (MTD) | Instalaciones existentes | Sí | Sí |
| | Instalaciones nuevas | No | Sí |

Tabla 3: Comparación de alternativas de sistemas de cocción. Fuente: Instituto tecnológico agroalimentario Español, 2012.

En el proceso que conlleva la elaboración del mosto, la energía es mayoritariamente consumida durante esta etapa. La fuente de calor utilizada, generalmente, es un mechero de llama dirigida con un rendimiento, según fabricante, del 80% (Sancho, 2015).

3.1.2.5 Enfriamiento del mosto

El mosto debe alcanzar en 45 minutos la temperatura de fermentación, que es 20°C para cervezas tipo ales y de 12 a 16°C para cervezas tipo lagers.

Considerando que se parte de la temperatura de ebullición y no se dispone un tiempo ilimitado para realizar el enfriamiento, ya que se podrían ver alteradas las propiedades organolépticas del producto, se recurre al uso de intercambiadores de calor para acelerar el proceso y proceder a la fermentación.

3.1.3.1 Fermentación

El mosto, una vez enfriado, es introducido en cubas donde se le añaden las levaduras que crecen hasta agotar el oxígeno y fermentar los azúcares transformándolos en alcohol y anhídrido carbónico, lo cual es una reacción exotérmica.

Las levaduras sólo sobreviven a temperaturas bajas. Por este motivo, la temperatura inicial del mosto, previo a la adición, debe ser de 16°C y debe ser mantenida en este valor mediante equipos de refrigeración.

Para la refrigeración se utilizan serpentines tubulares en el interior del fermentador o camisas huecas en torno a las paredes por las que circula un fluido refrigerante. La Figura 8 muestra un sistema típico de refrigeración directa para mantener la temperatura en las condiciones de fermentación deseadas.

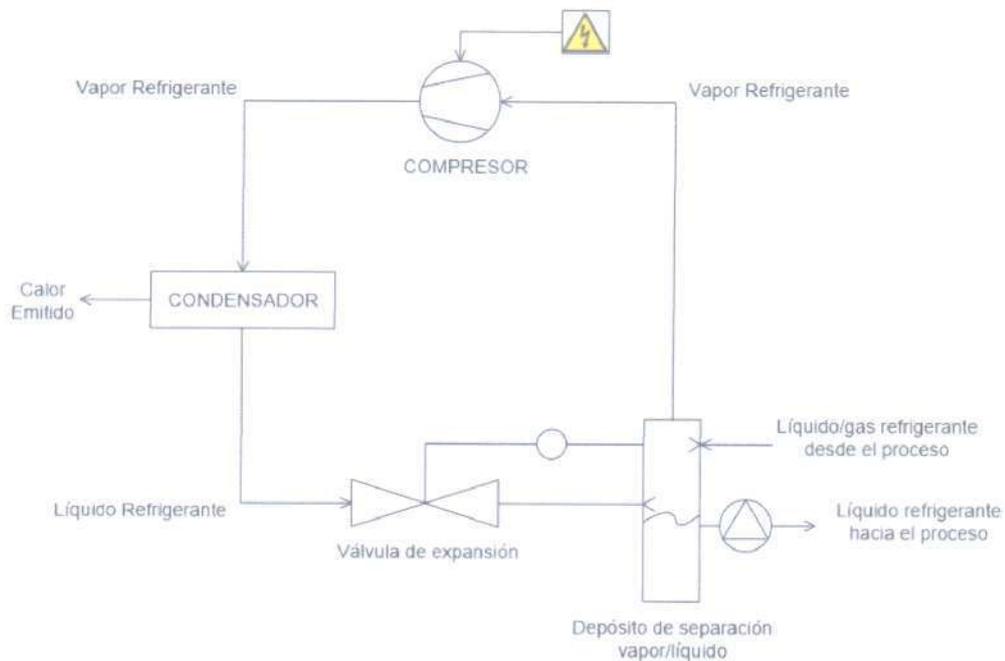


Figura 8: Circuito típico de refrigeración para la fermentación. Fuente: Sancho S., Rubén, 2015.

3.1.3.2 Guarda o maceración

En los depósitos de guarda, la cerveza es mantenida a una temperatura de 0°C durante cierto tiempo, que puede variar de uno a seis meses dependiendo del tipo de cerveza, para lograr la maduración.

En estos depósitos tiene lugar la fermentación secundaria con la levadura arrastrada, período en la que la cerveza adquiere el sabor y aromas típicos, decantando todavía más y precipitando sustancias que, de otro modo, enturbiarían la cerveza cuando fuera servida al consumidor.

3.1.4.1 Estabilización microbiológica

Es necesario estabilizar microbiológicamente la cerveza para asegurar que mantenga sus propiedades biológicas y organolépticas por un periodo de tiempo suficientemente largo hasta y durante el consumo. La estabilización se realiza mediante pasteurización, aunque existen tecnologías de membrana que permite realizar una operación sin necesidad de aplicación de calor. Dicho proceso puede ser realizado antes o después del envasado, dependiendo del tipo de envase que se vaya a utilizar.

El caso de estabilización previa a envasado es la situación de los barriles que no pueden pasteurizarse llenos. Se utiliza intercambiadores de calor de placas. Por otro lado, botellas o latas se introducen en una pasteurizadora que se someten a ducha o baños de aguas a distintas temperaturas, inicialmente con una temperatura de función creciente, y luego de alcanzada la temperatura de pasteurización se aplica una función decreciente para enfriar las botellas.

3.1.4.2 Envasado

Se utilizan envases de tipo retornable y no retornable. Las líneas de envasado son distintas y depende del formato de envasado, cuyas variantes son latas, botellas o barriles.

En el caso de las botellas retornables las líneas constan de despaletizadoras, desempacadora, lavadora de botellas, inspector electrónico, llenadora, taponadora, pasteurizador, etiquetadora y empaquetadora. Por otro lado, las no retornables agregan a la línea una desempacadora de vidriera y una enjuagadora de botellas.

Antes del envasado en latas, la cerveza se pasteuriza y se enfría a 0°C. La admisión de latas vacías se hace por una cadena al carrusel de la llenadora y el llenado comienza automáticamente una vez que se iguala la presión entre la lata y el anillo de cierre. El llenado se realiza sin turbulencias hasta la altura prefijada.

La línea de llenado de barriles consta de una apretadora de espadín, un lavador exterior, un pasteurizador, una lavadora-llenadora, una pesadora, una volteadora, una

etiquetadora, un inspector de bocas y una paletizadora. El llenado se realiza sin formación de espuma.

3.2 MODELO DE PROCESO PARA EL ANÁLISIS DE ETAPAS

El modelo que se utiliza para la evaluación del proceso queda formado por las siguientes etapas y corrientes para la producción de 830 litros de cerveza tipo "lager", según indica la Figura 3 (Morales, 2013).

Para la obtención de la cantidad de la cerveza tipo lager, de densidad de 1,0099 kg/l, se requieren: 150 kg de malta, 627 l de agua potable de red para el macerado, 0,5 kg de lúpulo y 5 kg de levadura tipo Lager.

Utilizando el proceso planteado por Sancho (2015) y proponiendo como enfriamiento la utilización de dos intercambiadores de calor, se opta por la implementación de un modelo según la Figura 9. Dicho modelo representa el diseño del proceso que se utilizará para analizar y evaluar los procesos de elaboración y fermentación del mosto.

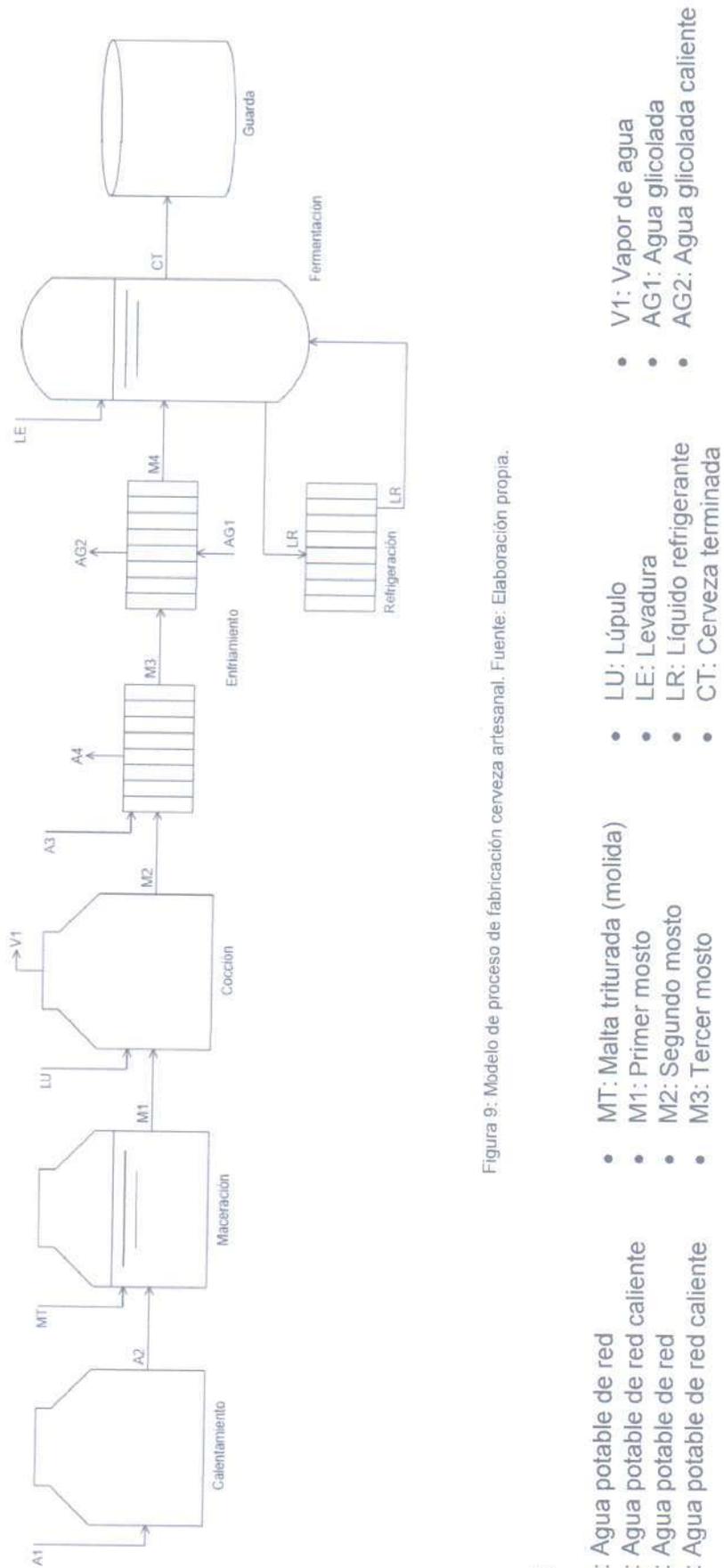


Figura 9: Modelo de proceso de fabricación cerveza artesanal. Fuente: Elaboración propia.

Los equipos considerados para la producción se presentan en la tabla 4. Dichos equipos fueron seleccionados para el modelo según las capacidades necesarias y en base a los catálogos de proveedores que tienen distribución en la zona. Mediante visitas a plantas se corroboró que los equipos utilizados por productores marplatenses son de dimensiones similares.

| Etapa | Nombre del equipo | Capacidad | Dimensiones | Material |
|-----------------------|--|--------------|----------------------------------|---------------------------|
| Calentamiento de agua | Depósito generador de agua caliente. | 690 l brutos | z= 180 cm d=70 cm e= 1 cm | acero inoxidable AISI 316 |
| Maceración | Cuba de mezclado/filtrado | 690 l brutos | z= 180 cm d=70 cm e= 1 cm | acero inoxidable AISI 304 |
| Cocción | Cuba de cocción a fuego directo | 950 l brutos | z= 150 cm d= 90 cm e= 2 cm | acero inoxidable AISI 304 |
| Enfriamiento | Intercambiador de calor de 4 placas. | 1800 l/h | 4 placas de 0,4 m ² | acero inoxidable AISI 316 |
| | Intercambiador de calor de 2 placas. | 1300 l/h | 2 placas de 0,4 m ² | acero inoxidable AISI 316 |
| Fermentación | Tanques de fermentación cilíndricos con camisa interior. | 850 l brutos | z= 140 cm d= 90 cm e= 2 cm | acero inoxidable AISI 316 |

Tabla 4: Equipos seleccionados. Fuente: Elaboración propia en base a cotizaciones de proveedores con distribución local, 2018.

Dónde 'z' es la altura del equipo, 'd' es el diámetro del equipo y 'e' es el espesor del equipo.

El modelo de fabricación implementado tiene un tiempo de total de producción 28 h, para generar un lote de cerveza, de las cuales 24 h corresponden al proceso de fermentación y 5 h corresponden a la transformación activa del producto intermedio, durante las cuales se llevan adelante las etapas de precalentamiento, maceración y cocción. Para determinar la capacidad de producción se evalúa el proceso utilizando el modelo *DBR (Drum-Buffer-Rope)*³.

³ DBR es el acrónimo del modelo Drum-Buffer- Rope, traducido al español como Tambor-Amortiguador-Cuerda

De la aplicación del modelo *DBR* se encuentra que el tambor, cuyo tiempo de proceso establece el ritmo de producción, es la cocción con un requerimiento de 110 minutos. Si bien es la fermentación la etapa que insume mayor tiempo, dicho subproceso funciona como un almacenamiento ubicado al final de la cadena productiva y no representa transformación activa del subproducto, sino que las levaduras actúan de forma pasiva en el tiempo. Por dicho motivo se considera a la fermentación una etapa de almacenamiento, por lo que la restricción es la capacidad del almacén y no el tiempo de proceso. Sabiendo que el fermentador presupuestado tiene capacidad suficiente para albergar el total de cerveza producida, no se considera a esta etapa como el tambor.

La capacidad de producción de la planta se calcula teniendo en cuenta el resultado del modelo *DBR* y la cantidad de producto final que se desea obtener. Entonces, si se deben fabricar 830 l de cerveza y se puede producir cada 110 minutos, del cociente de ambos valores, se obtiene una capacidad de 452 l/h. Definida la capacidad de producción, se establece la necesidad de hacer dos lotes de producción para poder generar el volumen final de producto. Se considera realizar transformación activa 4 días a la semana, 12 meses al año, dando un total de 192 días de producción activa.

3.3 CONSIDERACIONES DE CÁLCULO Y DISEÑO

Para llevar adelante la etapa de cálculo se consultó al Ingeniero Químico Mariano Fernández Ferreyra, quien contribuyó al análisis del caso y a establecer las siguientes consideraciones para la realización de los cálculos.

- Recipientes cilíndricos semi-infinitos. Se consideran pérdidas de calor únicamente en la dirección radial.
- Para la cocción del mosto y el lúpulo se utiliza el sistema a presión atmosférica, por ser la utilizada en las fábricas visitadas.
- Convección natural y no forzada en la transmisión de calor entre recipientes y el aire circundante.
- El perfil de temperatura en el agua del depósito de agua caliente, cuba de mezclado y cuba de cocción, es homogéneo y uniforme.
- Ambiente controlado. La temperatura del aire se mantiene invariable. El agua que ingresa para el calentamiento se encuentra a 20°C. Las fábricas visitadas controlan las variables ambientales con inyección de aire en el sector de cocción y la utilización de techo de poliuretano expandido.
- Durante la fermentación, la reacción es del 100% de la levadura presente.
- Efecto conductivo en la pared del tanque despreciable respecto a la pérdida por convección con el aire (Número de Biot bajo). No se considera caída de temperatura

en el espesor del tanque. La temperatura de la pared externa es la temperatura del fluido.

- El coeficiente de convección del aire sobre el tanque se obtiene de bibliografía y es $0,025 \text{ kW/m}^2 \cdot \text{K}$
- Variación de la densidad del agua despreciable con la temperatura. Se adopta el valor 989 kg/m^3 .
- Variación de Calor específico (C_p) del agua despreciable con la temperatura. Se adopta el valor $4,214 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$
- Factor de aprovechamiento igual a $0,80$. Este factor de seguridad contempla todas las pérdidas de calor asociadas a la propia generación de la llama a partir del combustible.
- La variación de la temperatura con el tiempo se conoce empíricamente. Para un tanque de estas dimensiones y con este tipo de calentamiento se propone una relación lineal de temperatura con el tiempo, subiendo la temperatura 1°C cada 60 segundos de calentamiento.

A partir de dichas consideraciones, se plantearon y resolvieron los balances de energía de cada etapa, los cuales fueron verificados por el Ingeniero Químico. Además, Fernández Ferreyra realizó un aporte significativo en el dimensionamiento de los intercambiadores necesarios en la etapa de enfriamiento y revalorización de calor.

3.4 ENERGÍA EN EL PROCESO

Para determinar la energía en juego en el sistema estudiado se utiliza un cuadro de aspectos técnicos conformado por mediciones en una planta real. A partir de dichas mediciones se calcula la energía necesaria en cada etapa del proceso. Las plantas visitadas en la zona de Mar del Plata conforman parte del sector micro cervecero y poseen una capacidad instalada de producción por lotes de 150 a 500 l .

La recolección de datos es importante cuando se necesita verificar o registrar consumos de combustible, flujos de aire para combustión, temperaturas de entrada de gas, temperatura de entrada de mezclas, temperaturas de entrada del aire, temperaturas de salida de chimeneas, gasto en volumen de gases, de por lo menos un período que sea representativo de las condiciones en las que trabaja el equipo (Urbina, 2009).

Para la creación del cuadro de aspectos técnicos se utilizó como base la herramienta introducida por Arturo Urbina (2009) en sus tesis de maestría "Recuperación de calor residual de baja temperatura en un proceso industrial". Dicha herramienta fue adaptada al modelo propuesto, resultando en los siguientes puntos de medición.

1. Temperatura de la corriente de agua que ingresa al calentador durante la etapa de calentamiento del agua de alimentación.
2. Temperatura de la corriente de agua que sale del calentador.
3. Temperatura de la corriente de mosto dulce que sale del macerador.
4. Temperatura de la corriente de vapor de agua que sale de la cuba de cocción.
5. Temperatura de la corriente de mosto dulce que ingresa al enfriamiento.
6. Temperatura del mosto dulce que ingresa al fermentador.
7. Temperatura del mosto dulce a madurar.

El objetivo de tomar mediciones en distintas plantas es observar y garantizar si los valores del parámetro temperatura, con la tecnología disponible en la región, son cercanos entre ellos y al de la bibliografía utilizada. Dos de las tres plantas visitadas cuentan con sistemas de control electrónicos por lo que los valores se tomaron directamente de los visores de dichos sistemas, en el tercer caso los valores fueron solicitados al supervisor de la cocción.

En la Tabla 5 se presentan los valores medidos en planta y el valor de bibliografía.

| Punto | Planta 1 | Planta 2 | Planta 3 | Valor bibliográfico |
|-------|----------|----------|----------|---------------------|
| 1 | 17,4°C | 18,2°C | 21°C | 20°C |
| 2 | 49° | 49,1° | 50°C | 50°C |
| 3 | 80,8°C | 80,4°C | 77°C | 78°C |
| 4 | 100°C | 100°C | 100°C | 100°C |
| 5 | 100°C | 100°C | 100°C | 100°C |
| 6 | 14,6°C | 15°C | 16,8°C | 16°C |
| 7 | 1,2°C | 0,5°C | 1,5°C | 1°C |

Tabla 5: Mediciones de temperatura en planta. Fuente: Sancho, 2015.

Se decide utilizar el valor presente en la bibliografía consultada para el cálculo energético, Sancho (2015), ya que la diferencia entre estos y el promedio de los valores obtenidos de las plantas es despreciable a los fines prácticos. Por lo tanto, se puede asumir que la bibliografía puede utilizarse para representar la realidad en la producción local.

Como base para los cálculos para determinar la transferencia de calor, se utiliza la ecuación 7.

$$Q = C_p \times m \times \Delta T \quad \text{ó} \quad Q = C_p \times V \times \delta \times \Delta T \quad (7)$$

Dónde: ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_f) y la temperatura inicial del intercambio (T_i); C_p es el calor específico a presión constante; V es el volumen que ocupa la masa de agua, dependiendo la capacidad del macerador; y δ es la densidad.

Se presenta el análisis de requerimiento energético para cada etapa del proceso. Los balances de energía y cambios en la formulación básica, para cada una de las etapas, se encuentran desarrolladas en el Anexo I.

3.4.1 Calentamiento de agua

En esta etapa debe calcularse el calor requerido para calentar el agua de red desde la temperatura promedio a la que se encuentra (20°C) hasta la temperatura requerida para la etapa de maceración (50°C). Deben tenerse en cuenta las pérdidas convectivas de calor por contacto con el aire ambiente. El volumen a precalentar de agua según el modelo planteado es de 627 l. Se presenta el balance energético en la ecuación 9.

$$\{\text{Energía acumulada}\} = \{\text{Entrada}\} - \{\text{Salida}\} \quad (8)$$

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{\text{Calentamiento}} \cdot f_{\text{aprovechamiento}} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_{\infty}) \cdot dT \quad (9)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_f) y la temperatura inicial del intercambio (T_0); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{\text{aprovechamiento}}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Luego se calcula según la ecuación 9, siguiendo el balance energético de la ecuación 8, que para llevar 627 l de agua desde 20°C a 50°C es necesario entregar 101331 kJ.

3.4.2 Maceración

3.4.2.1 Etapa I

En la primera etapa de la maceración, se mantiene la temperatura del fluido constante a 50°C durante 20 minutos. Luego se eleva la temperatura hasta 67°C , en un lapso de tiempo de 16 minutos (a razón de 1°C cada 60 segundos). Por este motivo, la

pérdida de calor por convección con el aire se calcula en dos términos, uno con temperatura constante a 50°C y otro con temperatura variable con el tiempo desde 50°C a 67°C.

Como la reacción con la malta recién comienza en esta etapa, se consideran la densidad y el calor específico del fluido iguales a los del agua.

En el balance presentado en la ecuación 10, el término de la izquierda de la igualdad representa el calor absorbido por la masa de agua-mosto. Dicho calor es la diferencia entre el calor entregado, primer término del lado derecho de la ecuación, y la sumatoria de las pérdidas por convección, siendo estas, el segundo y tercer término del lado derecho.

La primera de las pérdidas convectivas corresponde al calentamiento a temperatura constante y la segunda al calentamiento hasta los 67°C, donde la temperatura tiene una variación en el tiempo según la función presentada en las consideraciones.

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{\text{Maceración-EtI}} \cdot f_{\text{aprovechamiento}} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (50^\circ\text{C} - T_\infty) \cdot 1200\text{s} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_\infty) \cdot dT \quad (10)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_f), y la temperatura inicial del intercambio (T_0); T_∞ es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{\text{aprovechamiento}}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

El balance tiene como resultado un calor de maceración equivalente a 64840 kJ. En el Anexo I se encuentran los valores que toma cada variable del balance.

3.4.2.2 Etapa II

En esta etapa se mantiene el mosto durante 30 minutos a 67°C y luego se realiza un calentamiento hasta 72°C en un lapso de tiempo de 5 minutos (a razón de 1°C cada 60 segundos). En la ecuación 11 se presenta el balance de energía para esta segunda etapa.

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{\text{Maceración-EtII}} \cdot f_{\text{aprovechamiento}} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (67^\circ\text{C} - T_\infty) \cdot 1800\text{s} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_\infty) \cdot dT \quad (11)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que

se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_o); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Análogamente a la etapa anterior la primera de las pérdidas convectivas, segundo término del lado derecho, corresponde al calentamiento a temperatura constante y la segunda al calentamiento hasta los 72°C, donde la temperatura tiene una variación en el tiempo según la función presentada en las consideraciones.

El término de la izquierda de la igualdad representa el calor absorbido por la masa de agua-mosto y, en este caso, considerando las pérdidas por convección, es de 28633 kJ. Al igual que en la primera etapa, en el Anexo 1 se encuentran los valores que toma cada variable del balance.

3.4.2.3 Etapa III

Durante la última etapa de la maceración, se mantiene el mosto durante 30 minutos a 72°C y luego se realiza un calentamiento hasta 78°C en un lapso de tiempo de 6 minutos (a razón de 1°C/60 s). El balance de energía resulta semejante a las dos etapas anteriores y se muestra en la ecuación 12.

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_o}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{Maceración-EtIII} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (72^{\circ}C - T_{\infty}) \cdot 1800s - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_{\infty}) \cdot dt \quad (12)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_o); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Las pérdidas convectivas, segundo término del lado derecho de la ecuación, corresponden al calentamiento a temperatura constante y el tercer término, al calentamiento hasta los 78°C, donde la temperatura tiene una variación en el tiempo según la función presentada en las consideraciones.

En este caso el calor acumulado representado en el lado izquierdo de la igualdad, una vez sumadas las pérdidas, es de 33626 kJ.

De la sumatoria de las energías parciales requeridas en las tres etapas de la maceración se obtiene entonces que el calor requerido es 127099 kJ.

3.4.3 Cocción

El mosto que finaliza el proceso de maceración a 78°C se calienta hasta 100°C en un lapso de tiempo de 20 minutos (a razón de 1,1 °C por cada 60 s). Debe considerarse además el agua de lavado, que debe calentarse previamente hasta 78°C para no alterar la composición de la mezcla y luego combinarse con el fluido que sale del macerador para formar el mosto que ingresa a la etapa de cocción. Una vez que se alcanza la temperatura de ebullición, se mantiene el mosto a 100°C durante 90 minutos hasta que finaliza la cocción.

Durante la cocción ocurre una pérdida de vapor de agua, que según el trabajo de investigación publicado por el Instituto tecnológico agroalimentario de España bajo el nombre "Mejores Técnicas en el sector cervecero" puede alcanzar, en el límite, un 8% del volumen del mosto que ingresa a la cuba de cocción. Dicho valor se tuvo en consideración para los cálculos.

Una vez resuelto el balance de energía, en la ecuación 13, se determina que el calor necesario para llevar adelante esta etapa es de 383018 kJ.

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{Cocción} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_{\infty}) \cdot dt - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (100^{\circ}C - T_{\infty}) \cdot 5400s - 0,08 \cdot \rho \cdot V \cdot \lambda \quad (13)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_f) y la temperatura inicial del intercambio (T_0); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; λ el calor latente de vaporización; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

En el lado derecho de la ecuación se representa la energía acumulada en la masa de mosto. Del lado izquierdo encontramos, en el primer término la energía entregada por la fuente de calor, desde dónde se calculará el calor requerido; en el segundo y tercer término las pérdidas convectivas, durante el calentamiento y a temperatura constante, respectivamente. El último de los términos no presente en las otras etapas, corresponde al calor de vaporización necesario para la evaporación de la masa de vapor de agua igual al 8% del volumen de mosto.

En el Anexo I se encuentran los valores que toma cada variable del balance.

3.4.4 Enfriamiento

El mosto dulce finaliza la etapa de cocción a 100°C y el enfriamiento se realiza en un lapso de tiempo de 45 minutos. El enfriamiento se realiza en dos etapas. Inicialmente se enfría el mosto mediante la utilización de un intercambiador de calor considerando fluido de enfriamiento al agua de red, hasta alcanzarse una temperatura de 30°C. Luego, el fluido alcanza una temperatura de 16°C con la utilización de otro intercambiador de calor, pero utilizando glicol como refrigerante.

Para calcular el consumo energético de esta etapa, el cual figura en la tabla 6, se consideró la potencia de las bombas necesarias para circular el agua de red y agua glicolada en los intercambiadores. Dicho consumo energético se presenta en la ecuación 14, dónde la potencia de las bombas se obtuvo de un proveedor al cual que se le solicitó un presupuesto para los caudales calculados.

$$Q_{\text{enfriamiento}} = \frac{\text{Pot. bombas} \times \text{Factores de conversión unidades energía}}{\text{Factores de conversión unidades de tiempo}} \quad (14)$$

Dónde: Q es el calor requerido en la etapa; $Pot. bombas$ es la potencia de las bombas indicada por el proveedor.

El tiempo de funcionamiento de cada bomba se determinó en base a los intercambiadores asociados a cada una.

Dado que el intercambiador asociado a la primera bomba, y que correspondiente al enfriamiento con agua de red, posee el doble de placas que el intercambiador de glicol, se estima que la duración del enfriamiento es dos veces mayor a la duración del enfriamiento con glicol debido a que el recorrido es mayor.

En el Anexo I se detalla el cálculo de intercambiadores, al igual que la relación entre tiempo de residencia, número de placas, caudales y conductividad.

Teniendo en cuenta que las bombas funcionan durante 45 minutos, 30 minutos la bomba de agua de red y 15 minutos la bomba de agua glicolada, y la potencia de las bombas es de 1 HP el consumo energético es de 2055 kJ/lote.

3.4.5 Fermentación

Durante esta etapa los 830 l de mosto dulce generados ingresan al tanque de fermentación a 16°C. Al agregarse la levadura comienza el proceso de respiración y fermentación del mosto, desprendiéndose calor por las reacciones que ocurren y

elevándose la temperatura del mosto de 16°C hasta la temperatura primaria de fermentación (20°C) en aproximadamente 12 h.

Una vez alcanzada la temperatura primaria de fermentación (20°C), el mosto se fermenta durante 4 días. En este proceso de fermentación también se genera calor que, de no ser removido, elevaría la temperatura del mosto a temperaturas no deseadas para la ejecución de esta etapa. Así, debe diseñarse un sistema de intercambio de calor tal que se remueva todo el calor generado por las reacciones de fermentación, manteniéndose así la temperatura del mosto en 20°C.

La reacción de fermentación, fórmula 15, es exotérmica. A partir de la ley de Hess, desarrollada en el Anexo 2, se puede obtener el calor de formación por mol de glucosa que reacciona. Dicho valor de energía es de 79 kJ por mol de glucosa.



Luego para conocer el calor liberado durante la reacción de fermentación se utiliza la ecuación 16 presentada por Scheer en su curso *Thermal Process Engineering for Brewers*.⁴

$$Q_{\text{generado}} = \rho_{\text{mosto}} \cdot V \cdot \frac{\Delta E}{100} \cdot \Delta H_r \quad (16)$$

Dónde: Q es el calor requerido en la etapa; $Pot. bombas$ es la potencia de las bombas indicada por el proveedor; V es el volumen, ΔE es la variación de la energía interna del sistema y ΔH_r es la variación de entalpía

De la ecuación 16 se determina que el calor que es necesario remover para que la temperatura del mosto se mantenga constante e igual a 20°C durante los 4 días de fermentación, es 32352 kJ.

Al finalizar esta etapa debe enfriarse la cerveza hasta 1°C en un lapso de un día, para así entrar en la etapa de maduración. El calor que necesita ser removido se calcula mediante la formulación básica de la ecuación 17 y tiene un valor de 66596 kJ.

$$Q_{\text{enfriamiento}} = \rho_{\text{mosto}} \cdot V \cdot C_{p\text{mosto}} \cdot (T_{\text{fermentación}} - T_{\text{maduración}}) \quad (17)$$

Dónde: Q es el calor requerido en la etapa; ρ es la densidad del mosto; V es el volumen que ocupa el mosto; C_p es el calor específico a presión constante; $T_{\text{fermentación}}$ es la temperatura de fermentación y $T_{\text{maduración}}$ es la temperatura de maduración o guarda.

⁴ Ingeniería de termo procesos para cerveceros.

3.5 EVALUACIÓN DE FUENTES DE CALOR FATAL O RESIDUAL

Luego de analizar los requerimientos de temperatura en los procesos, es decir, si se necesita aumentar o disminuir la temperatura, se definen las etapas de enfriamiento y la fermentación como los únicos procesos que requieren de la disminución de temperatura y por ende la extracción de energía.

Además, analizando las corrientes en el diagrama de flujo, pueden distinguirse corrientes de vapor de agua salientes al proceso cuyo calor puede utilizarse para suministrar energía a otras etapas.

3.5.1 Revalorización del calor fatal

El calor fatal, o residual, es un resultado ineludible de la operación de los equipos que producen trabajo y de otros procesos que utilizan energía. En vez de ser desaprovechado liberándose al medio ambiente, este calor, a veces, puede ser utilizado total o parcialmente por algún otro proceso. Esto último es llamado revalorización.

Se exponen formas posibles, dentro de la gestión de agua caliente, para recuperar o revalorizar el calor residual originado en la elaboración de cerveza artesanal.

Se escoge la gestión de agua caliente debido a que el agua forma parte de todas las etapas del proceso, ya sea como solvente en las mezclas o líquido refrigerante. Además de ser indispensable para el proceso, el agua es un recurso necesario de todas las instalaciones industriales.

3.5.1.1 Gestión del agua caliente

Sistemas de valorización de agua caliente pueden diseñarse de tal forma que se produzca el mayor aprovechamiento posible del agua caliente, minimizando así el desperdicio de energía transferida. Se mencionan la estrategia de reutilizar el agua de enfriamiento; la estrategia de reutilizar el calor de fermentación y la estrategia de recuperación de los vapores de la cocción.

3.5.1.1.1 Reutilizar el agua del enfriamiento de mosto

El agua de red que enfría el mosto dulce de 100°C hasta 30°C puede ser utilizada como agua de lavado para ser agregada al fluido que sale de la maceración y así formar el mosto que va a pasar por la etapa de cocción. El agua de red que sale del intercambiador de placas sale a 68°C y el caudal es 1634 l/h.

Como agua de lavado, en el modelo planteado, se requieren 376 litros de agua de red. Puede utilizarse entonces el agua de red a 68°C que sale de intercambiador, calentándose estos 376 litros hasta 78°C para pasar luego a la etapa de cocción. Quedan

entonces 441 litros de agua a 68°C que salen del intercambiador libres para utilización en otra etapa del proceso.

El ahorro energético de esta estrategia de revalorización es la suma de la energía necesaria para lograr el precalentamiento del agua ($\Delta T=50^{\circ}\text{C}$), más la energía necesaria para alcanzar un $\Delta T= 15^{\circ}\text{C}$ durante la primera etapa de maceración, resultando un total de 155665 kJ.

Es oportuno aclarar que se considera una exhaustiva limpieza y mantenimiento de los equipos que permiten el intercambio de calor, y que la factibilidad económica se presupuestó con equipos aptos para el contacto con alimentos. Así mismo, se propone un control periódico del agua para constatar la continuidad de potabilidad del agua de servicio que se incorpora como agua de proceso. En la fábricas visitadas se utiliza agua de red para el agua de lavado y se dio a entender que esto no altera las propiedades organolépticas del producto final.

3.5.1.1.2 Reutilización del calor de la fermentación

A pesar de que la fermentación requiere de la extracción de calor para mantener la temperatura óptima para la formación de alcoholes, no se considera en la evaluación de estrategias de revalorización de calor residual en la gestión de agua caliente debido a que el sistema de recolección utiliza fluidos con agregados químicos como son el glicol.

3.5.1.1.3 Recuperación de los vapores de cocción

En la etapa de cocción se generan 71,2 kg de vapor de agua. Según la ecuación 18, donde se relaciona la masa evaporada con el calor de vaporización, la energía contenida en dicha masa es 160716 kJ.

$$\Delta H \text{ vaporización} = m \times \lambda \quad (18)$$

Dónde: ΔH es la variación de entalpía, m es la masa evaporada, y λ es el calor latente de vaporización

De las dos estrategias presentadas, donde se encontró la oportunidad de utilizar el calor residual, la cantidad disponible de dicha energía es 332982 kJ (172266 kJ del agua de enfriamiento a 68°C + 160716 kJ del calor de condensación). Luego podemos definir las siguientes acciones individuales.

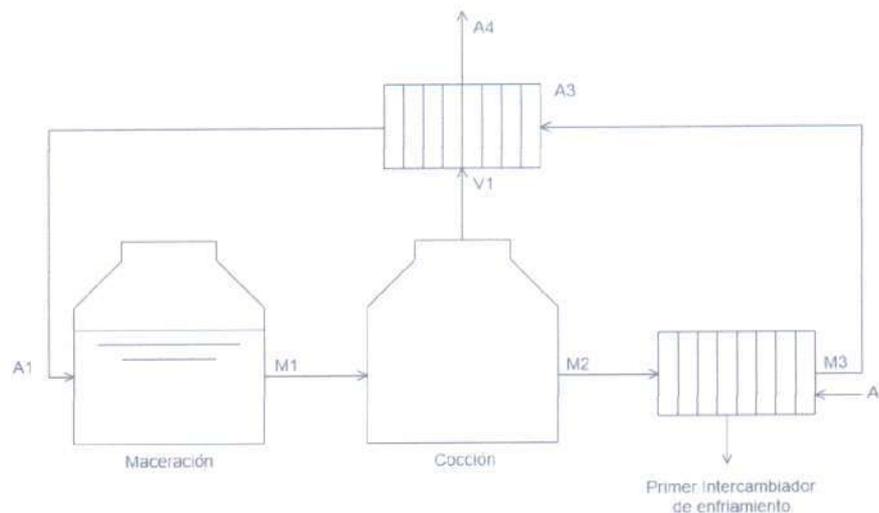
1. Si se utiliza la condensación del vapor de agua para calentar el mosto de 78°C a 100°C se consumen 83894 kJ del vapor de condensación y ahorran 115841 kJ. Teniendo impacto en la etapa de cocción.

2. Si se utiliza la condensación del vapor de agua para calentar el agua de enfriamiento hasta 78°C para el agua de lavado se consumen 15670 kJ y ahorran 124280 kJ. Teniendo impacto en la etapa de calentamiento.
3. Si se utiliza la condensación del vapor de agua para calentar el agua de red desde 20° a 50°C se consumen 76272 kJ del calor de condensación y ahorran 101331 kJ. Teniendo impacto en la etapa de calentamiento.

Y sus combinaciones:

- 1+2+3 quedan remanentes 157146 kJ para otros procesos y se ahorra 341452 kJ.
- 1+2 quedan remanentes 233418 kJ para otros procesos y se ahorra 240121 kJ.
- 1+3 quedan remanentes 172816 kJ para otros procesos y se ahorra 217172 kJ.
- 2+3 queda remanente 241040 kJ para otros procesos y se ahorra 225611 kJ.

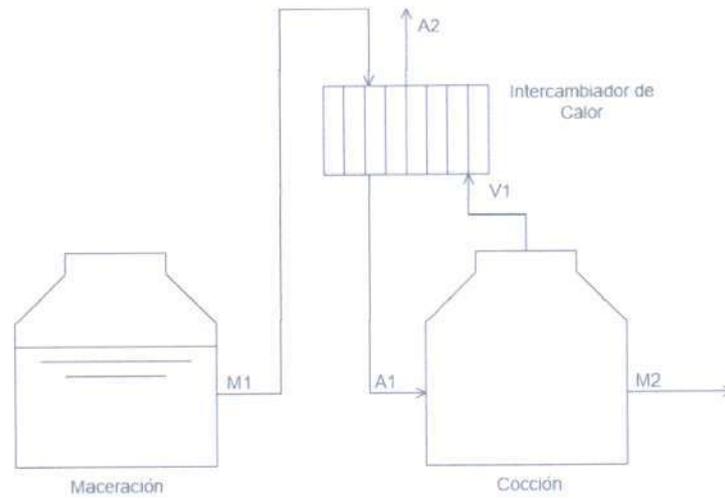
En las figuras 10 y 11 se ilustran los sistemas mencionados para la valorización del vapor de agua, producto de la evaporación parcial de una masa de agua durante la cocción.



A1: Agua potable de red caliente a 78°C para lavado; M1: Primer mosto; V1: Vapor de agua a 100°C; M2: Segundo mosto; A2: Agua potable de red 20°C; M3: Tercer mosto; A3: Agua potable de red caliente a 68°C; A4: Vapor condensado con sólidos orgánicos volátiles.

Figura 10: Recuperación y revalorización del vapor de cocción para agua de lavado. Fuente: Elaboración propia

Diseño y desarrollo de herramienta para la valorización del calor fatal industrial en la fabricación de cerveza artesanal.



A1: Corriente de mosto a 100°C; M1: Corriente de mosto a 78°C; V1: Vapor de agua a 100°C; M2: Segundo mosto; A2: Vapor condensado con sólidos orgánicos volátiles.

Figura 11: Recuperación y revalorización del vapor para precalentamiento de mosto. Fuente: Elaboración propia.

3.6 EVALUACIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO CON POSIBILIDAD DE REDUCIR CONSUMO ENERGÉTICO

Se hace una primera selección de las etapas a evaluar, distinguiendo las que necesitan de intercambios de calor para su funcionamiento. Fueron analizadas las etapas de calentamiento de agua, maceración, cocción y lavado, enfriamiento y fermentación.

Para continuar con la evaluación de las etapas se utiliza una matriz de decisión con los siguientes criterios:

1. Porcentaje del calor total requerido en el proceso sobre el total consumido.
2. Valor económico del calor requerido.
3. Viabilidad técnico-económica del reciclado de energía.
4. Impacto positivo sobre otros aspectos ambientales de la organización. Algunos de los aspectos pueden ser la disminución en el consumo de recursos naturales, la disminución en las emisiones y la menor temperatura de los efluentes.

3.6.1 Criterio 1: Porcentaje de energía en juego en el proceso sobre el total consumido

Los resultados de los cálculos realizados en el apartado 'Energía del Proceso' se resumen en la tabla 6. A partir de la suma de los resultados parciales fue calculada la energía total necesaria para la fabricación de 830 l de cerveza artesanal durante estas etapas. Es preciso aclarar que en la etapa de enfriamiento se indica el requerimiento de energía eléctrica para el correcto funcionamiento de las bombas

| | <i>Energía requerida</i> [kJ] | $\frac{E.requerido}{E.total} \times 100$ [%] |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| Calentamiento de agua | 101331 | 8 |
| Maceración | 127099 | 11 |
| Cocción y filtrado | 383018 | 33 |
| Enfriamiento | 4022 | 0 |
| Fermentación | 532224 | 48 |
| Total | 1147694 | 100 |

Tabla 6: Porcentaje del calor generado en el proceso sobre el consumo total. Fuente: Elaboración propia.

El criterio valora las etapas con una escala del cero al cinco, siendo cero las etapas con menor consumo energético y cinco las etapas que presentan mayores consumos. Los valores se asignan utilizando la siguiente escala en base al consumo relativo.

- Consumo de 0 a 9 % → Valoración 0.
- Consumo de 10 a 19 % → Valoración 1.
- Consumo de 20 a 29 % → Valoración 2.
- Consumo de 30 a 39% → Valoración 3.
- Consumo de 40 a 49% → Valoración 4.
- Consumo Mayor a 50% → Valoración 5.

Con base en principios de la estadística inferencial, inicialmente se determina el tope de la valoración como el 50% ya que la etapa de mayor consumo representa aproximadamente la mitad del total de calor requerido. Luego, para representar las variaciones menores al 50% de consumo, se decide utilizar una escala con variación de 10% unidades porcentuales entre percentiles, para que pequeñas variaciones puedan ser apreciadas y el tamaño de los percentiles sean iguales (Vargas Sabadías, 1995).

3.6.2 Criterio 2: Valor económico del calor requerido

Este criterio valora económicamente los resultados del primer criterio según la cantidad de hidrocarburo o energía eléctrica que es requerida para el proceso. Si la fuente de calor no es aplicada directamente en la etapa, se considera el punto anterior más cercano donde haya aplicación directa de energía.

Para el caso del gas natural se utiliza la tarifa estipulada para la distribuidora Camuzzi Gas Pampeana según el anexo I de la resolución ENARGAS N° I-4358/17 y la tabla tarifaria estipulada por EDEA para el caso de los procesos que requieren de energía eléctrica (enfriamiento y fermentación).

Aprovechando la similitud entre las empresas visitadas y el modelo propuesto, en cuanto a sistemas de producción, niveles y su programación, es que se utiliza la categoría de dichas empresas para los servicios eléctricos, gas y agua siendo T1GA, SGP-1 y D los valores respectivos a las categorizaciones.

Todas las tarifas se componen de una parte fija y una variable, según se presenta en la tabla 7. Las diferencias entre sistemas se aprecian en las componentes variables.

Se conocen los requerimientos energéticos de cada etapa, a partir de los cálculos del primer criterio, y que los equipos utilizados en el modelo utilizan gas natural como combustible.

Sabiendo que el poder calorífico inferior de dicho hidrocarburo es 37392 kJ/m^3 se puede calcular cuánto gas es necesario para realizar el aporte de energía requerido en las distintas etapas. El consumo diario de gas, equivalente a producir 830 l, se calcula según la ecuación 19.

$$\text{Consumo diario de gas} = \frac{\sum \text{requerimientos energéticos}}{PC} \quad (19)$$

Dónde: $\sum \text{requerimientos energéticos}$ es la suma resultante de los requerimientos energéticos de la etapa 1, 2 y 3, y PC es el poder calorífico del gas.

Es conveniente resaltar que para los cálculos de demanda mensual se consideró transformación activa 4 días a la semana, 4 semanas al mes y 24 h de fermentación por cada 830 l. Siendo entonces la demanda mensual, para las tres primeras etapas, el valor del consumo de la columna 2 de la tabla 7, multiplicado por 16 producciones mensuales.

En el caso del enfriamiento, la demanda mensual de energía eléctrica es 0,558 kWh, corresponde a lo consumido por la bomba cada 830 l, multiplicado por 16 producciones mensuales. Para calcular el consumo mensual variable de la fermentación se consideran los 18 kWh consumidos por la bomba de refrigeración, por cada producción de 830 l y se multiplica por las 16 producciones mensuales.

| Etapa | Consumo de gas [m ³] / electricidad [kWh] en 830 litros | Precio Mensual | Costo energético cada 830 litros |
|------------------|---|---|--------------------------------------|
| Calentamiento | 2,71 | 330\$ + 3,51\$/m ³ × 43,36 m ³ | <i>Precio mensual/16</i> = \$30 |
| Maceración | 3,4 | 330\$ + 3,51\$/m ³ × 54,4 m ³ | <i>Precio mensual/16</i> = \$32,5 |
| Cocción y lavado | 10 | 330\$ + 3,51\$/m ³ × 163 m ³ | <i>Precio mensual/16</i> = \$56 |
| Enfriamiento | 0,558 | 1353\$ + 2,58\$/kWh × 8,94 kWh | <i>Precio mensual/16</i> = \$86 |
| Fermentación | 73,92 | 1353\$ + 2,58\$/kWh × 286 kWh | <i>Precio mensual/16</i> = \$130 |

Tabla 7: Valorización económica de consumo energético. Fuente: Cuadros tarifarios EDEA y CAMUZZI, 2018.

En la cuarta columna de la tabla 7, se calcula el costo energético que insume cada etapa absorbiendo la componente fija no dependiente de los niveles de producción.

Luego se determina que cada 830 l de cerveza fabricado existe un componente de costo energético igual a \$334.

En la tabla 8 se comparan los precios para poder valorar, de manera relativa, las etapas con la siguiente escala.

- Proporción de 0 a 7 % → valoración 0
- Proporción de 8 a 15 % → valoración 1

- Proporción de 16 a 23 % → Valoración 2
- Proporción de 24 a 31 % → Valoración 3
- Proporción de 32 a 39% → Valoración 4
- Proporción > a 40 % → Valoración 5

| Etapa | Precio [\$] | $\frac{\text{Precio}}{\text{Precio Total}} \times 100$ [%] | Valor Asignado |
|------------------|-------------|--|----------------|
| Calentamiento | 30 | 9 | 1 |
| Maceración | 32 | 10 | 1 |
| Cocción y lavado | 56 | 17 | 2 |
| Enfriamiento | 86 | 26 | 3 |
| Fermentación | 130 | 38 | 4 |
| TOTAL | 334 | 100 | |

Tabla 8: Comparación de precios de energía para etapas. Fuente: Elaboración propia.

Análogamente a la escala anterior, en base a los principios de la estadística inferencial, inicialmente se determina el tope de la valoración como el 40% ya que la etapa de mayor precio representa aproximadamente dicho porcentaje del costo energético por etapa. Luego, para representar las variaciones menores al 40% se decide utilizar una escala con variación de 7% unidades porcentuales entre percentiles, para que el tamaño de los percentiles sean iguales (Vargas Sabadías, 1995).

3.6.3 Criterio 3: Viabilidad del reciclado de energía

Este criterio cuantifica la viabilidad técnico-económica de utilizar la energía residual de cada una de las etapas en otra. Es decir que compara el costo del equipamiento técnico necesario para la reutilización del calor con el costo de la energía que se ahorraría de ser implementado.

Las soluciones técnicas a evaluar son la adquisición de bombas centrífugas e intercambiadores de calor. Dichos equipos se utilizan para transportar los fluidos que deben circular hacia los intercambiadores para poder transferir la energía que se desea valorizar.

En la figura 12 se presentan las posibles soluciones tecnológicas de valorización del calor. No están nombradas exhaustivamente todas las tecnologías existentes, sino que se muestran los principales métodos utilizados en la industria. Esto permite una visión de las posibilidades de revalorización del calor fatal, y los equipos sobre los que se analizará la viabilidad de implementación.

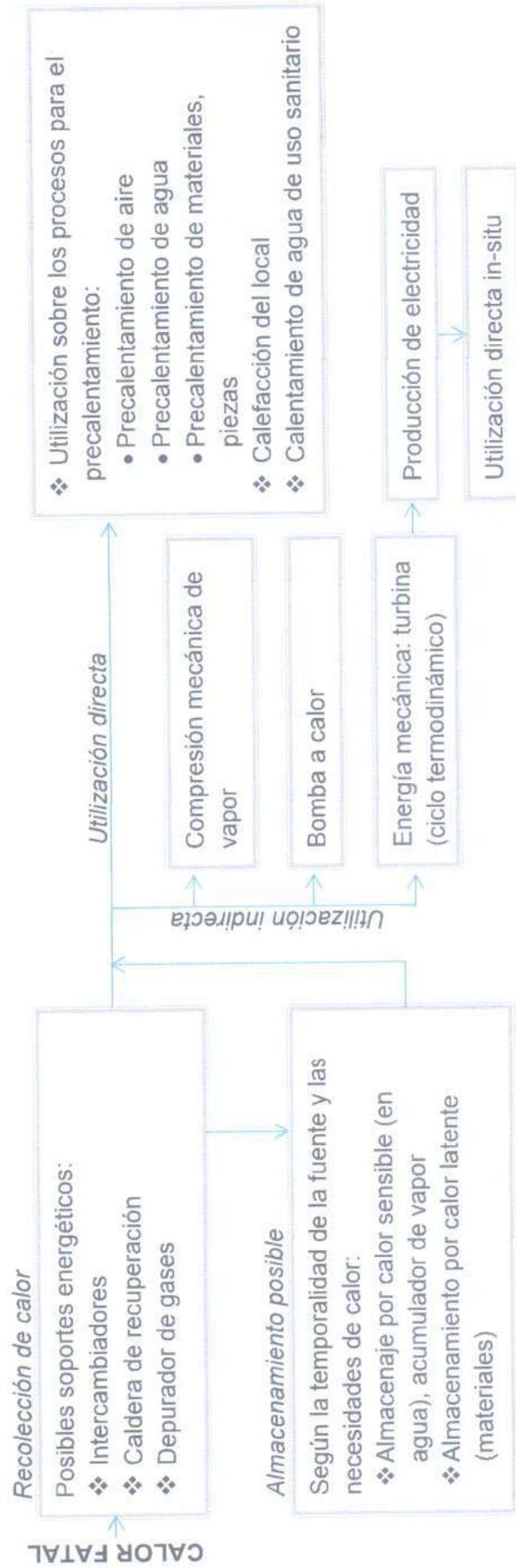


Figura 12: Soluciones tecnológicas de valorización de calor. Fuente: Elaboración propia.

En el mercado existen múltiples tipos de intercambiadores de calor, pero dentro de la industria alimenticia se destacan los intercambiadores de placas. En este tipo de intercambiadores las corrientes de fluidos están separadas por placas, que son láminas delgadas, rectangulares con diseño corrugado para aumentar la resistencia mecánica y el área superficial efectiva de cada una (coeficientes de transferencia a bajas velocidades y con moderadas caídas de presión). Este tipo de intercambiadores son los más adecuados para trabajar con fluidos de alta viscosidad y tienen como ventaja adicional, el ser fácilmente desmontables para labores de mantenimiento, por lo que también son utilizados cuando se requieren condiciones sanitarias extremas. La temperatura de operación de diseño es hasta los 250°C y 3Mpa. Asimismo, es importante destacar la versatilidad de este equipo, ya que pueden agregarse o a extraerse placas para modificar el área de intercambio fácilmente.

Por los motivos antes presentados, se determinó que son los intercambiadores de calor que mejor aplican al proceso en estudio. Considerando que esta tecnología representa viabilidad técnica, a continuación, se realiza el estudio de viabilidad económica considerando únicamente la utilización de estos intercambiadores, y la bomba que el caudal a movilizar requiera; 1635 l/h para el agua de red y 1300 l/h en el caso de la corriente de glicol.

En el análisis económico se analiza el costo unitario (por litro) del producto a fabricar, considerando como únicos componentes fijos la depreciación de los equipos a adquirir y el valor de los seguros, mientras que como costo variable se considera el costo energético de cada etapa en la que es viable una estrategia de reutilización. Dado que los costos variables, en nuestro caso los de servicios, disminuirían por la reutilización de energía, el análisis se centra sobre los costos fijos ya que, en la composición del costo unitario, aumentan al adquirir los nuevos equipos.

Entonces lo que se utiliza para determinar la factibilidad económica de la compra es la comparación de la componente fija del costo unitario del producto, cerveza artesanal, con el beneficio, en términos de ahorro económico, de la implantación del sistema de reutilización.

Para calcular la depreciación, por fines impositivos, se usa el método permitido por la ley, que, en Argentina, es el método de la línea recta según la ecuación 20. A dichos efectos se considera una vida útil de 8 años para las bombas y 12 años para los intercambiadores, siendo, según los proveedores, valores promedio considerando los líquidos a transportar y suponiendo buena calidad del programa de mantenimiento a ser aplicado. Además, se consideran 384 lotes anuales de 452 l, lo que se traduce en una vida útil de 3072 lotes por bomba y 4608 lotes por intercambiador.

$$\text{Costo de depreciación anual} = \frac{1}{n} \times (I_f - L) \quad (20)$$

Donde n representa la vida útil del equipo; I_f la inversión en equipamiento y L el valor residual del equipo.

El proveedor de las bombas cotizadas, BZB, presentó un presupuesto de US\$ 600 para la bomba que cumple con las especificaciones técnicas requeridas. De igual manera ALFA LAVAL, proveedor de intercambiadores de calor, indicó un valor de US\$ 1100 para el intercambiador que cumple las especificaciones técnicas requeridas.

Asumiendo el caso más pesimista, donde el valor residual del equipo es nulo, queda determinado el costo de depreciación anual por lote según la ecuación 20, en US\$ 0,2 por lote para la bomba y US\$ 0,23 por lote para el intercambiador. Dichos valores son para lotes de 452 l, si se considera alcanzar el total de producción diario, la depreciación es el doble.

En cuanto a la variación del costo de seguro que representan los equipos introducidos, se consultó una aseguradora y debido al bajo riesgo de rotura, por considerarse equipos estándares y vitales de producción, los equipos y su incidencia relativa en el total de los activos no modifica la categoría de riesgo por lo que el valor que debe pagar la empresa es el mismo y no introducen costos adicionales.

Para convertir los costos de energía a dólares se utiliza un cambio de 25:1.

En este criterio las etapas serán puntuadas con un valor de -2, 0 o 1 dependiendo si resultan viables o no. La falta de viabilidad técnica, que demuestra la inexistencia de tecnología para llevar adelante la estrategia o alteraciones en el proceso que afecten al producto final, se valora con -2. La factibilidad económica negativa, que implica una viabilidad técnica pero no económica, se valora con 0. La viabilidad técnico-económica que resulte positiva obtendrá un valor igual a 1.

3.6.3.1 Calentamiento de agua

Para la implementación de una solución de ahorro energético en esta etapa son necesarias dos bombas y un intercambiador de calor, tal como se indicó en el apartado de evaluación de fuentes de calor residual. Las tecnologías existentes permiten asumir la viabilidad técnica de la implementación de las alternativas para el reciclado de energía, ya que no alteran el proceso fundamental para la obtención del producto final. Por dicho motivo, se evalúa la viabilidad económica.

El ahorro energético, en caso de implementarse el sistema, es de 225611 kJ y es equivalente a 6 m³ de gas. Dicho ahorro pasado a términos económicos se calcula como la diferencia entre el costo inicial de la etapa para 830 l y el equivalente económico de los 6 m³

que se ahorrarían con la estrategia de reutilización. Dicho equivalente surge de ingresar la cantidad ahorrada, en este caso los 6 m³, en la componente variable de la columna de precio mensual, en la Tabla 7, y luego dividirlo por las 16 veces mensuales que se produce. El valor obtenido es de \$ 22, valor que indica el costo del servicio para la etapa de calentamiento para un lote de producción. Por lo tanto, la diferencia con el costo inicial sin implementación de estrategia es \$8, lo cual significa US\$ 0,32 cada 830 l producidos.

Comparando los costos de depreciación con el ahorro, la viabilidad económica resulta negativa, dado que cada 830 l producidos el equipo se deprecia en un total de US\$ 1,26 compuestos de la siguiente forma; US\$ 0,4 por cada bomba y US\$ 0,46 del intercambiador. Por este motivo, es que se valora a esta etapa con un puntaje nulo.

3.6.3.2 Maceración

Si bien la maceración es un proceso que utiliza energía para alcanzar la temperatura a la que las enzimas son activadas, también existe un factor tiempo para que dicha activación se cumpla correctamente y se logre el tipo de cerveza planteada. Por lo tanto, no se encontró una viabilidad técnica de implementar algún enlace para la recuperación de calor residual y aplicación eficaz en esta etapa del proceso.

3.6.3.3 Cocción

Para la implementación de esta solución es necesario una bomba y un intercambiador de calor. Existiendo la viabilidad técnica con el mismo criterio que en la etapa de calentamiento, se evalúa la viabilidad económica.

Si se implementa el sistema se obtienen 115841 kJ, equivalentes a 3 m³ de gas. Dicho ahorro pasado a términos económicos se calcula como la diferencia entre el costo inicial de la etapa para 830 l y el equivalente económico de los 3 m³ que se ahorran con la estrategia de reutilización. Dicho equivalente surge de ingresar la cantidad ahorrada en la componente variable de la columna de precio mensual, en la Tabla 7, y luego dividiendo por las 16 producciones. El valor obtenido es de \$21, valor que indica el costo del servicio para la etapa de cocción para un lote de producción. Por lo tanto, la diferencia con el costo inicial sin implementación de estrategia es \$35, lo cual es significa US\$1,4 cada 830 l producidos.

Comparando los costos de depreciación con el ahorro, la viabilidad económica, para este caso, resulta positiva dado que cada 830 l producidos el equipo se deprecia en un total de US\$ 0,86 compuestos de la siguiente forma; US\$ 0,4 la bomba y US\$ 0,46 del intercambiador.

Entonces el equipamiento necesario se deprecia en un total de US\$ 0,86 por lote de 830 l compuestos de la siguiente forma; US\$ 0,4 por la bomba y US\$ 0,46 por cada

intercambiador. Luego la viabilidad económica, para este caso, es positiva ya que el ahorro es US\$ 1,4.

3.6.3.4 Enfriamiento

En la mayoría de las visitas a planta la etapa de enfriamiento consistía en depositar las cubas de fermentación en cámaras de frío. Se optó en el modelo presentado, la utilización de intercambiadores de calor para poder aprovechar el calor residual que se extrae de enfriar el mosto. Para la implementación de esta solución es necesario una bomba y dos intercambiadores de calor. Existiendo la viabilidad técnica, con el mismo criterio utilizado en las etapas anteriores, se evalúa la viabilidad económica.

De implementar el sistema se obtienen 341452 kJ (se toma el valor más alto de ahorro calculado en el apartado de evaluación de recuperación de valor residual). El calor que se obtiene del enfriamiento del mosto es equivalente al que genera un mechero consumiendo 10 m³ de gas. Dicho combustible es el utilizado en las etapas de calentamiento, cocción y maceración, por este motivo es que el equivalente de ahorro se da en unidades de m³.

Dicho ahorro, pasado a términos económicos, se calcula como la diferencia entre el precio cada 830 l de producción, considerando como consumo en la componente variable la suma de ambos volúmenes de gas necesarios (206 m³, pertenecientes a cocción y calentamiento) y el equivalente económico de los 10 m³ que se ahorran con la estrategia de reutilización multiplicado por el mismo precio y dividido por las 16 producciones. El valor obtenido para el primer término de la resta es de \$65 y para el segundo es \$22. De esta forma se calcula un ahorro económico de \$43 cada 830 l producidos. En dólares se traduce a US\$ 1,72.

Entonces el equipamiento necesario se deprecia en un total de US\$ 1,32 por lote de 830 l compuestos de la siguiente forma; US\$ 0,4 por la bomba y US\$ 0,46 por cada intercambiador. Luego la viabilidad económica, para este caso, es positiva ya que el ahorro energético es US\$ 1,72.

3.6.3.5 Fermentación

La fermentación es un proceso que libera calor, y únicamente requiere energía para mantener la temperatura baja con el fin de mantener el crecimiento de las levaduras. Debido a las temperaturas a las que ocurre este fenómeno es que se debe utilizar un sistema cerrado de amoníaco. No es viable termodinámicamente la implementación de agua de red ya que esta se encuentra a aproximadamente 20°C y debería extraer calor para mantener el

proceso a 16°C. Todos los métodos estudiados en el apartado de reciclado de energía utilizan el agua de red, o sus fases, para movilizar el calor residual.

3.6.4 Criterio 4: Impacto positivo sobre otras consideraciones ambientales de la organización

La fabricación de cerveza artesanal es un proceso industrial que, como cualquier otro, tiene impacto en el ambiente. Por dicho motivo este criterio busca ser integrador y abarcar la solución de externalidades que sean o tengan potencial de ser un riesgo para el desarrollo de la actividad. El criterio valora las etapas con una escala del cero al cinco, siendo cero las etapas con menor potencial para mejorar los impactos ambientales negativos generados, y cinco, las etapas que presentan mayores posibilidades de afectación. Se asignan los valores según conversión correspondiente a la escala utilizada en la tabla 9, dónde se cuantifican aspectos e impactos ambientales del proceso.

Vale aclarar que hay componentes, como el socioeconómico y el biótico, que dependen de la ubicación geográfica de la planta. En este caso, al ser un estudio general, no se tomarán en cuenta dichos componentes para el estudio pero se respetarán los valores de las componentes restantes que de ellos se desprende.

El gerente de una de las plantas visitadas mencionó la importancia de tener en cuenta los impactos ambientales que genera la actividad sobre el entorno. "Un problema que tenemos que solucionar es la utilización del agua. Usamos mucha agua para el proceso, es una demanda inherente a la naturaleza de la producción. La relación es 3:1 más o menos pero el gobierno municipal ya nos advirtió del exceso y vamos a tener problemas" (Gerente de planta de Baum haciendo referencia a los equipos de osmosis inversa durante una entrevista en planta, 2017).

| Componentes | Factores | Valor de impacto | Porcentaje de afectación |
|--------------------------|---|------------------|--------------------------|
| Recurso aire | Calidad de aire (gases de combustión, MP, olores) | -15,00 | -4,6% |
| | Nivel de ruido y vibraciones | -32,81 | -10,0% |
| Recurso agua | Calidad de agua (generación de efluentes) | -27,56 | -8,4% |
| Recurso suelo | Calidad de suelo | -4,00 | -1,2% |
| Desechos | Generación de desechos sólidos | -18,00 | -5,5% |
| Proceso geomorfodinámico | Erosión | -4,00 | -1,2% |
| | Geomorfología | -4,00 | -1,2% |
| | Inestabilidad | -4,00 | -1,2% |
| Medio biótico | Flora | -4,00 | -1,2% |
| | Fauna | -4,00 | -1,2% |
| | Ecosistemas | -4,00 | -1,2% |
| Socioeconómico | Actividades Comerciales | 80,00 | 24,5% |
| | Empleo | 72,00 | 22,0% |
| | Aspectos Paisajísticos | -4,00 | -1,2% |
| | Riesgos a la población | -24,00 | -7,3% |
| | Servicios básicos | -0,4 | -0,1% |
| | Calidad de vida de las comunidades | -5,00 | -1,5% |
| | Salud Ocupacional y seguridad laboral | -20,00 | -6,1% |
| Impacto Total | | -22,78 | |
| Porcentaje de Impacto | | | -7,0% |

Tabla 9: Valoración del impacto ambiental producido por el proceso. Fuente: Ministerio de ambiente del gobierno nacional del Ecuador, s.f.

3.6.4.1 Calentamiento de agua

Durante esta etapa el impacto ambiental existente es el agotamiento del recurso natural agua. Sin embargo, no existe transferencia de masa ya que la temperatura alcanzada es menor a la ebullición por lo que el 100% del agua que ingresa a calentador es utilizada en la maceración.

Por dicho argumento, se considera que la etapa no tiene potencial de mejorar los impactos ambientales negativos generados.

3.6.4.2 Maceración

La mezcla compuesta en su mayoría por agua potable de red se calienta hasta 78°C, temperatura por debajo del punto de ebullición. Por este motivo es que no se consideran la generación de vapores con compuestos orgánicos volátiles.

Al no haber potencial de mejoras ambientales trabajando sobre esta etapa, se decide darle a esta etapa un valor igual a cero.

3.6.4.3 Cocción

Si los vapores de cocción fueran condensados, además de disminuir la demanda energética, se conseguiría disminuir las emisiones a la atmósfera de vapor de agua y de compuestos orgánicos volátiles, los cuales son los causantes de los olores típicos de la cocción, siendo esta emisión un 8% del mosto (Instituto tecnológico alimentario Español, 2012).

La reducción de las emisiones que provocan olores desagradables en comunidades aledañas, y su impacto según la tabla 9, es que se valoriza la etapa con una puntuación igual a 1.

3.6.4.4 Enfriamiento

El fluido utilizado en el intercambiador de calor es agua potable de red. Este calor transferido al agua puede ser aprovechado, reutilizando el agua de salida del intercambiador como agua precalentada. De este modo se disminuye el requerimiento de suministro de agua de red, se disminuye la energía necesaria para llevar el agua hasta la temperatura inicial del proceso, se cumple con el requerimiento de la resolución provincial de AGOSBA N° 389/98, que indica un valor límite de temperatura (45°C) para la descarga de efluentes a redes cloacales (en el caso del agua no ser reutilizada luego de su paso por el intercambiador, y sin considerar tratamientos adecuados, sería vertida a una temperatura aproximada de 60°C, incumpliendo con la resolución).

Teniendo en cuenta que el aprovechamiento planteado permite ahorrar más de 336 l de agua y disminuir la cantidad de efluentes, a temperatura superior a la regulada, se valoriza esta etapa con un 2.

3.6.4.5 Fermentación

Durante el proceso de fermentación se produce anhídrido carbónico. Una parte del gas generado puede recuperarse para su uso en la cervecería, aproximadamente un 65%. Para que el anhídrido carbónico recuperado pueda ser utilizado en el proceso, debe ser filtrado, depurado, licuado y almacenado, lo que conlleva un consumo de energía y agua adicionales (Instituto tecnológico alimentario Español, 2012).

La reducción de este impacto, el mayor de la etapa no tiene correlación con la recuperación de calor residual por lo que no se considera como impacto positivo. Por dichos motivos, se valoriza esta etapa con un cero.

3.7 SELECCIÓN DE LA ETAPA A ANALIZAR

Fueron estudiadas las etapas propias de la elaboración del mosto y la fermentación. Para la selección del proceso se utilizan los resultados de la matriz de decisión presentada en la tabla 10, la cual establece una ponderación a los criterios: los pesos se asignaron en dos grupos que suman el 50% cada uno. El primer grupo se compone del criterio 2 y el criterio 4, dándole mayor peso al criterio 2 ya que como se aclaró anteriormente uno de los principales objetivos es generar un ahorro en los costos de los servicios, y se deberán focalizar los esfuerzos en la etapa que mayor consumo represente. Al criterio 4 se le asignó un menor peso ya que la reducción del impacto ambiental será consecuencia del ahorro de energía. El segundo grupo se compone del criterio 1 y el criterio 3, dándole mayor peso a la viabilidad técnico-económica de la implementación de vías de reciclado de la energía, ya que este factor determinará la factibilidad de reducir el consumo de energía por medio de vías de valorización, independientemente del porcentaje de energía sobre el total que este puesta en juego. La puntuación de cada etapa se realizó con las ponderaciones explicadas en la sección de cada criterio.

| | Criterio 1: Porcentaje del calor en juego en el proceso sobre el total consumido | Criterio 2: Valor económico del calor requerido | Criterio 3: Viabilidad técnico-económica del reciclado de energía | Criterio 4: Impacto positivo sobre otros aspectos ambientales de la organización | Total |
|--------------------|--|---|---|--|--------------|
| <i>Ponderación</i> | 20% | 45% | 30% | 5% | 100% |
| Calentamiento | 1 | 1 | 0 | 0 | 0,65 |
| Maceración | 1 | 1 | -2 | 0 | 0,05 |
| Cocción | 3 | 2 | 1 | 1 | 1,85 |
| Enfriamiento | 0 | 3 | 1 | 2 | 1,75 |
| Fermentación | 4 | 4 | -2 | 0 | 2 |

Tabla 10: Matriz de decisión de esfuerzos de reducción. Fuente: Elaboración propia.

Si bien el resultado de la matriz muestra que la etapa del proceso de producción en la cual hay que centrar los esfuerzos para reducir el costo energético es la fermentación, se descarta el actuar sobre esta etapa debido a que los métodos para disminuir los requerimientos energéticos se basan en transferir calor del sistema en el que esta magnitud es excedente (fuente de calor residual) al que se busca reducir su consumo, que en este caso sería la fermentación. Durante la totalidad de la etapa de fermentación el requerimiento energético es la extracción de calor para reducir y mantener la temperatura

óptima de fermentación para las levaduras. Por estos motivos es que no es posible la aplicación de la herramienta en esta etapa.

En segundo nivel de importancia, aparece la etapa de cocción. Debido a la poca cantidad de enlaces admisibles para la revalorización de energía entre esta etapa y las fuentes de calor fatal, es que se decide, con el fin de hacer más rico el resultado, agregar la evaluación pertinente de la etapa de calentamiento.

Entonces, con las dos etapas seleccionadas se procede a realizar la evaluación de vías de reducción del peso energético de las mismas sobre el total. Posteriormente, se utilizan como caso para modelizar la herramienta informática.

3.8 DESARROLLO DE HERRAMIENTA INFORMÁTICA

El objetivo del uso de la herramienta es brindar un soporte de ayuda a la toma de decisiones respecto a la implementación de vías de valorización del calor residual de las distintas etapas del proceso de elaboración de cerveza artesanal.

La herramienta se desarrolla en Visual Basic Excel (VBA), donde el usuario sólo tiene interacción con formularios dinámicos que solicitan los datos necesarios y presentan los resultados. Estos formularios se maximizan al tamaño de la pantalla del usuario para mayor comodidad en el uso. Así mismo, para evitar cualquier alteración del código, el usuario en ningún momento tiene interacción con el libro de Excel, ya que se minimiza automáticamente al abrir el archivo.

Los cálculos se desarrollan internamente en el código de programación del formulario principal, con la definición de las variables necesarias, lo cual permite modificar los valores en el libro para simular cambios en el proceso o tipo de cerveza sin necesidad de tener un conocimiento exhaustivo de VBA. Será preciso al momento de instalar la herramienta, la actualización de las tarifas de los servicios y el valor del cambio para obtener valores representativos de ahorro monetario. En este trabajo, se procede a modelizar la herramienta con el modelo de producción de cerveza tipo lager, utilizando los valores presentados en la sección "Modelo de Proceso para análisis de etapas".

Es importante aclarar que los criterios 1, 2 y 3 son evaluados a partir del volumen ingresado por el usuario, mientras que el criterio 4 permanece con la valoración justificada en el apartado anterior. En base a los resultados obtenidos de la evaluación de los criterios, es que se presentan a los usuarios los resultados y las distintas vías de revalorización de calor.

A continuación, se presentan las distintas etapas que atraviesa el usuario con el uso de la herramienta. El código principal con el que se programó la herramienta se encuentra en el Anexo III. Para un correcto funcionamiento de la herramienta debe configurarse el Office Microsoft Excel de modo tal que habilite el uso de macros. La secuencia de acciones necesarias están detalladas en el Anexo IV.

3.8.1 Presentación de la herramienta

Se considera que el usuario de la herramienta no debe tener la obligación de leer el presente trabajo para poder comprender el funcionamiento de la misma. Por tal motivo, es que se hace una breve introducción del objetivo de utilización la herramienta, dándole la opción de proseguir o no mediante la utilización de botones con simbología básica tal como se muestra en la figura 13.

En caso de que el usuario realice un "clic" sobre el tic, confirmando que desea continuar con el uso de la herramienta, se presenta un nuevo formulario con el modelo de producción tal como se muestra en la Figura 14. Si el usuario realiza un clic sobre la cruz roja, el programa se cierra y en ningún momento se tiene interacción con el libro de Excel.

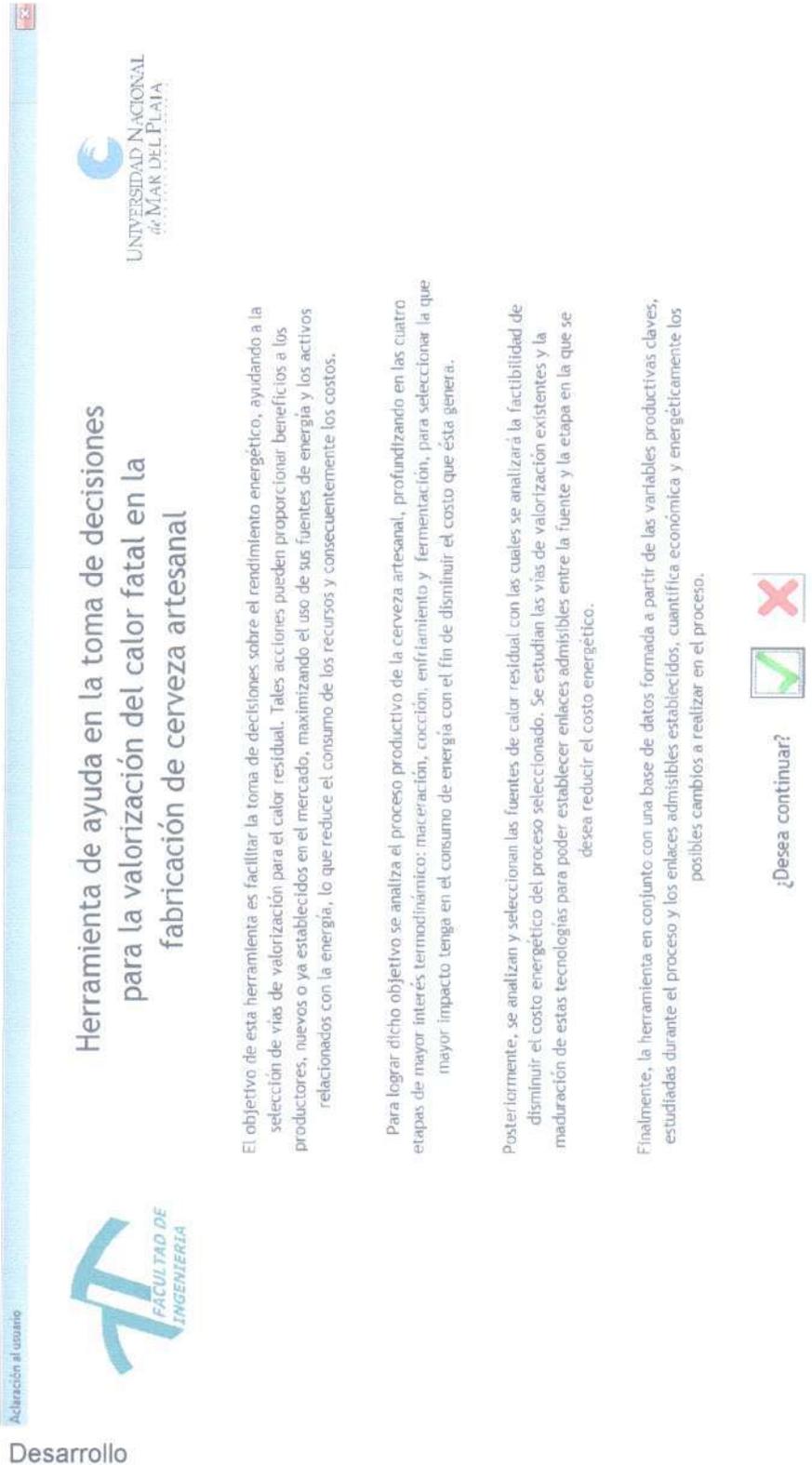


Figura 13: Formulario 1: Presentación de herramienta al usuario. Fuente: elaboración propia.

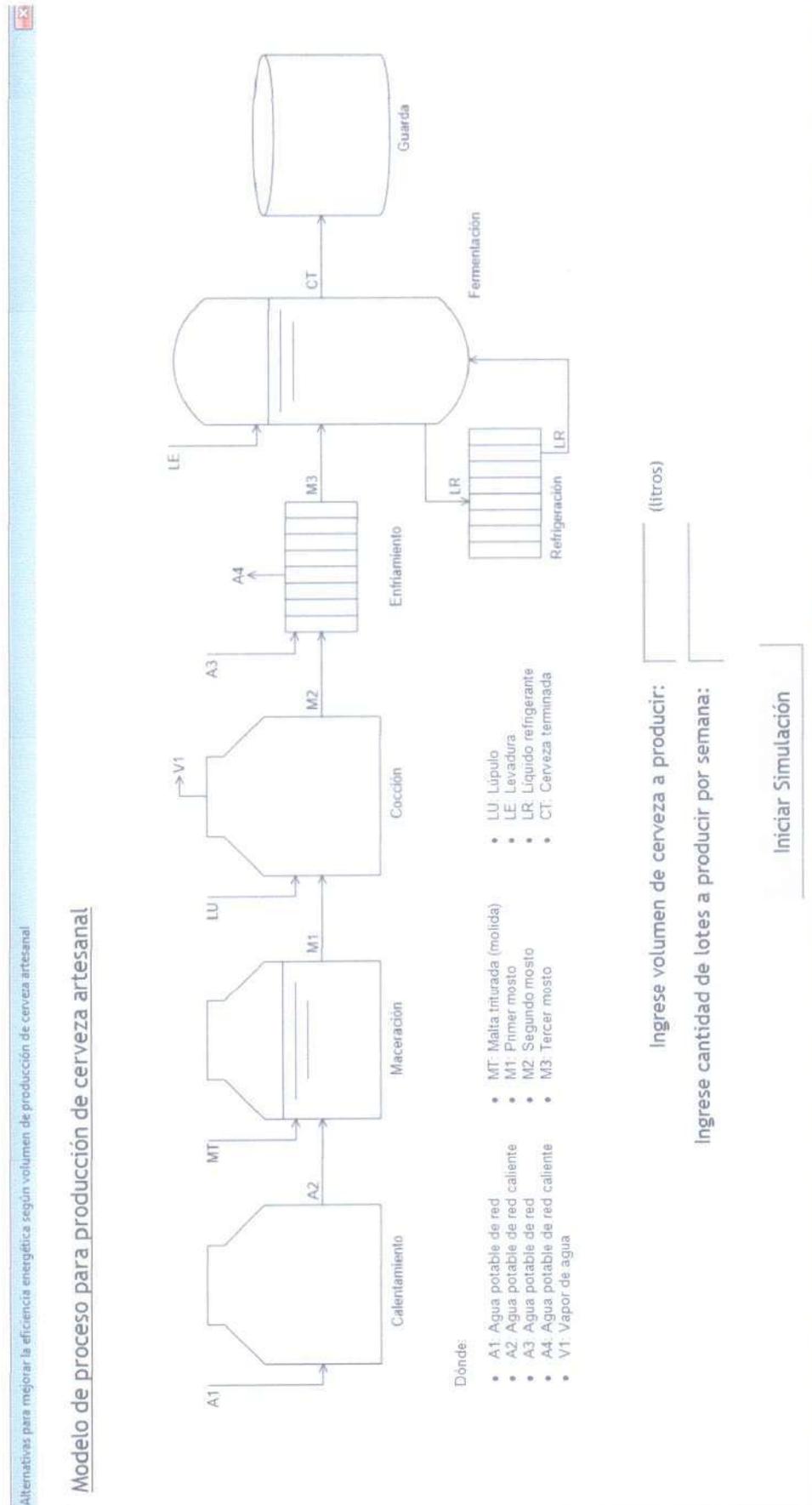


Figura 14: Formulario 2: Modelo de producción. Fuente: elaboración propia.

3.8.2 Modelo de proceso de producción de cerveza artesanal

Se presenta al usuario el modelo de proceso bajo el cual se diseña la herramienta. Se le indica en un cuadro de referencias las variables tenidas en cuenta en el proceso. Se solicita el ingreso del volumen de cerveza a producir en litros y la cantidad de lotes a producir en el transcurso de una semana. Esto influirá en los costos por litro de la cerveza a producir, ya que variará el costo de depreciación por lote, y consecuentemente aumentará o no el costo unitario. Dentro de la programación se aclara que se consideran 4 semanas por mes de producción, lo que resulta un total de 48 semanas anuales.

Se consideró que el usuario puede equivocarse en el ingreso de los datos o no ingresarlos completamente, por lo que, si alguno de los campos solicitados se encuentra vacío, o el valor no es numérico, ya sea por el ingreso involuntario de una letra o un carácter, la herramienta muestra un cartel de advertencia y solicita reingresar los datos, tal como se muestra en la Figura 15 y la Figura 16.

En esta etapa, el usuario puede decidir no realizar la simulación y cerrar la herramienta realizando un clic en la cruz roja que se encuentra en el margen superior derecho del formulario. En caso de presionar este botón, el usuario cierra el archivo y no tiene interacción alguna con el libro de Excel que contiene la programación.

Para que el usuario pueda visualizar los resultados que se calculan debe realizar un clic sobre el botón 'Iniciar Simulación'. Los resultados se visualizarán en un nuevo formulario (Figura 17), el cual presenta por pestañas las diferentes etapas y las opciones de valorización en cada una de ellas. En cada pestaña se detalla cuáles serían los equipos necesarios para reducir el consumo energético, los costos de los mismos según la depreciación considerada por lote, la energía ahorrada, y el ahorro monetario que implica el ahorro energético. Con estos resultados son con los que el usuario puede considerar la implementación de vías de valorización en busca de mejorar la eficiencia energética del proceso.

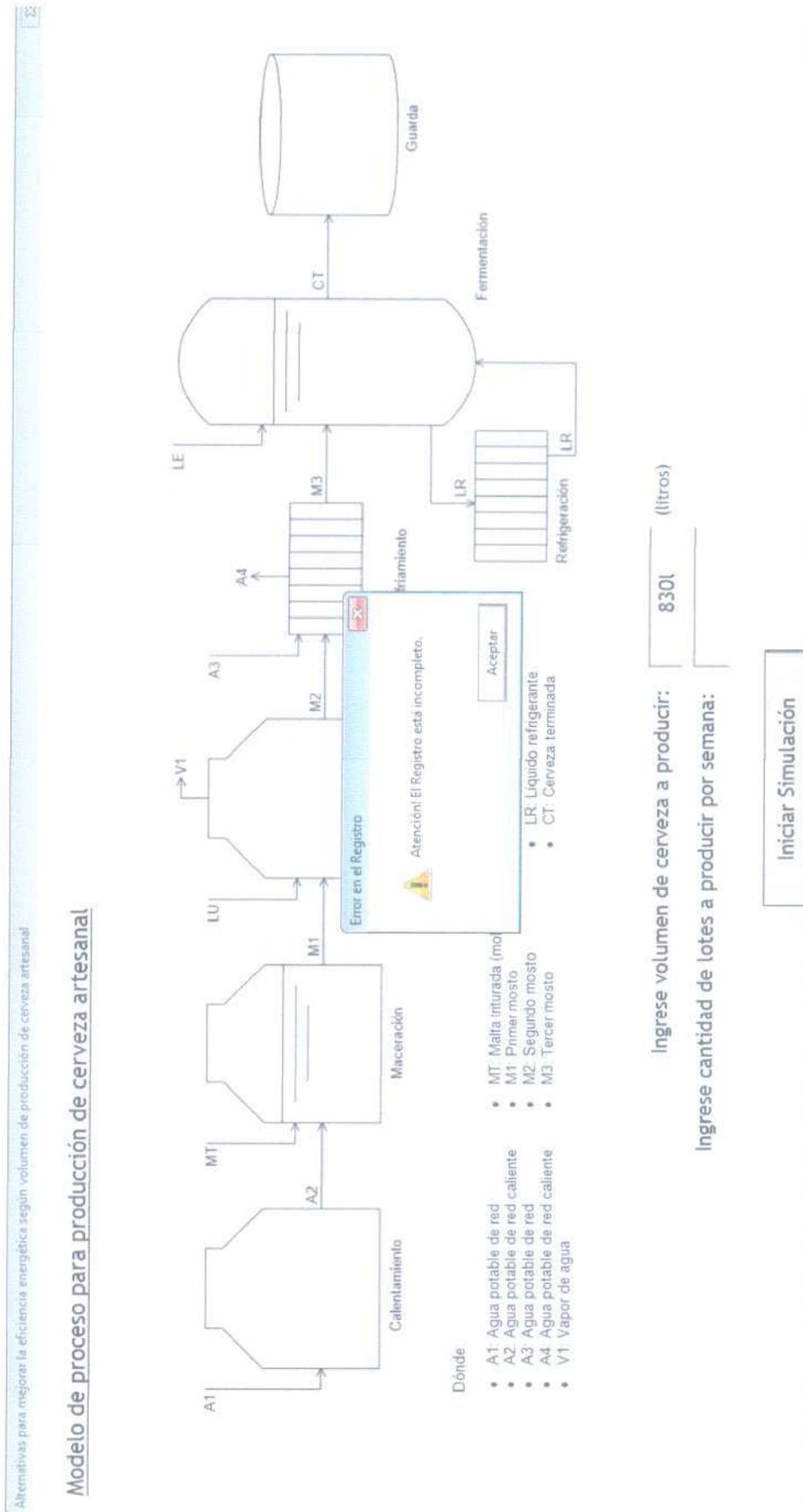


Figura 15: Formulario 2: Cartel de advertencia ante error en la carga de datos. Fuente: elaboración propia.

Modelo de proceso para producción de cerveza artesanal

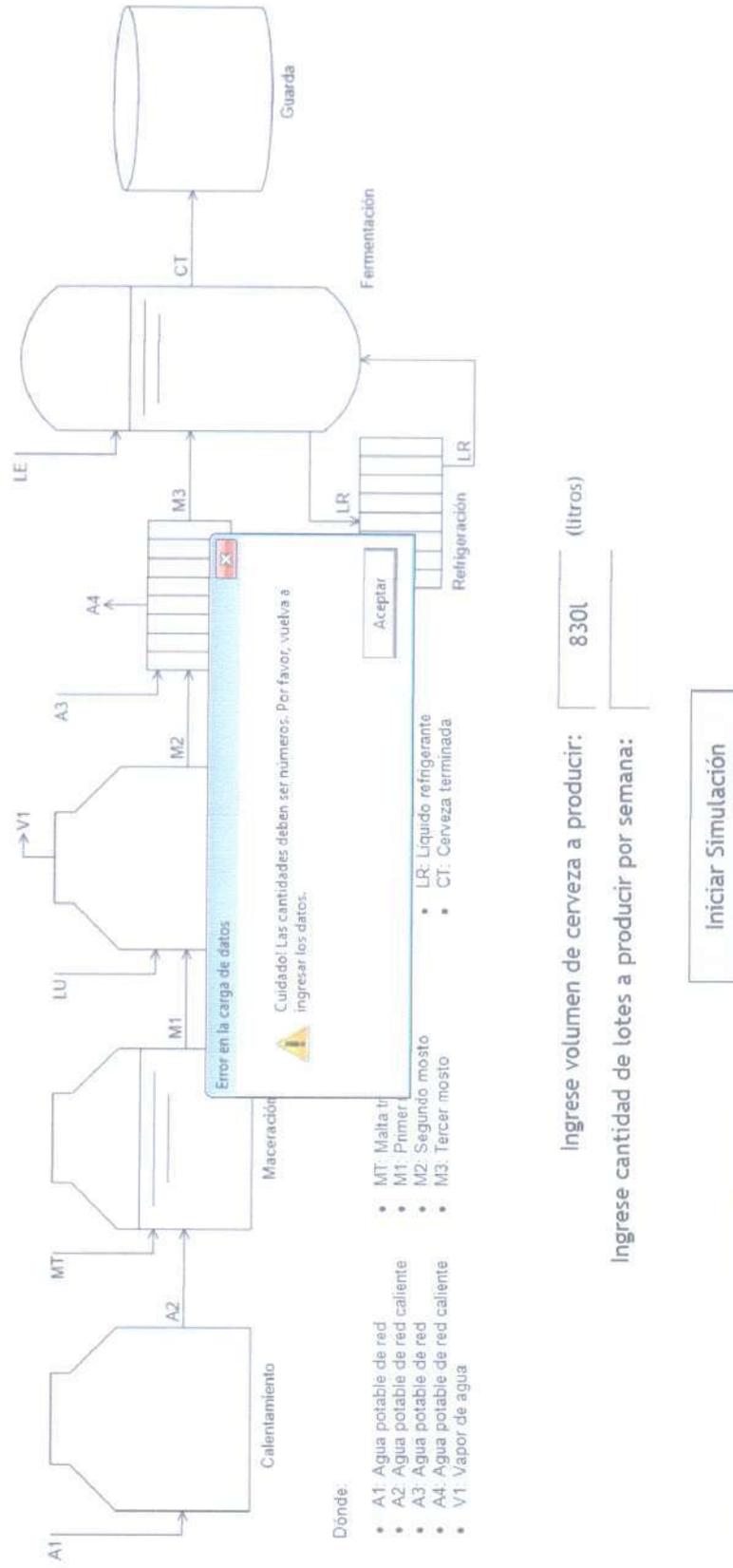


Figura 16: Formulario 2: Cartel de advertencia ante error en la carga de datos. Fuente: elaboración propia

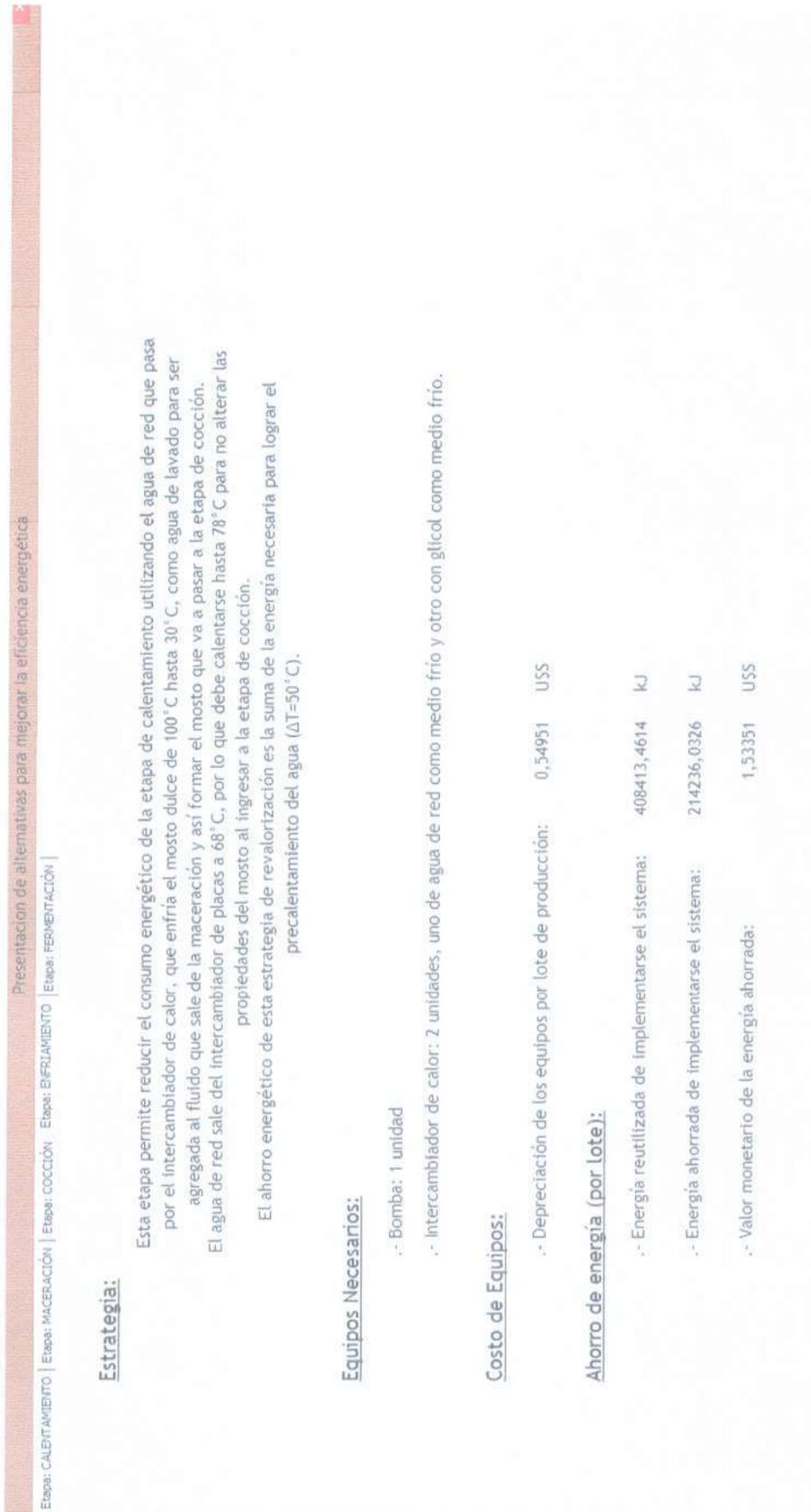


Figura 17: Formulario 3: Muestra de resultados según datos ingresados. Fuente: elaboración propia.

4. CONCLUSIÓN

El objetivo de este trabajo fue diseñar y desarrollar una herramienta para la valorización del calor residual de los procesos que integran la producción de la cerveza artesanal.

Para alcanzar los objetivos específicos planteados en el inicio del trabajo, y consecutivamente el general, se estudió en primera instancia cada una de las etapas, con soporte bibliográfico, distinguiendo las que fueran compatibles con el objetivo del presente trabajo según sus características termodinámicas. De esta distinción surgieron las etapas que integran los procesos de elaboración del mosto y de fermentación.

Posteriormente se elaboró un modelo estandarizado de fabricación para un nivel de producción determinado y receta de cerveza específica. Dicho modelo fue contrastado con productores de la ciudad para corroborar su pertinencia y factibilidad en cuanto a equipos planteados y valores de los parámetros. Los equipos planteados se corresponden con los utilizados en la zona de Mar del Plata y las diferencias calculadas en los parámetros tienen un impacto despreciable en los resultados cuantitativos del requerimiento energético, por lo que se escogieron los valores teóricos.

En función de las etapas del modelo se establecieron criterios, cuantitativos y cualitativos, para su evaluación con el fin de seleccionar la etapa objetivo en la cual, de utilizar la herramienta, habría mayor impacto positivo en los resultados energéticos de la empresa. Esta misma etapa sirvió como modelo para diseñar la herramienta de decisión. El resultado fue la etapa de cocción y se optó, a fin de hacer más rico el resultado, utilizar también la etapa de calentamiento.

De manera similar a lo realizado para seleccionar las etapas objetivos se determinaron y analizaron las fuentes de calor residual existentes en los procesos de elaboración de mosto y fermentación. Complementariamente a este análisis se estudiaron las formas de valorización posibles con la tecnología presente en el mercado. Se encontró la posibilidad de utilizar intercambiadores de placa como medio para la ejecución de estrategias de gestión de agua caliente.

A fin de determinar los enlaces admisibles se verificó la compatibilidad de la tecnología y la estrategia seleccionada con las fuentes de calor fatal disponible. De dicha intersección se concluyó que puede ser utilizado el calor entregado a las corrientes de agua que abandonan el proceso en la etapa de enfriamiento, para generar un ahorro energético en el resultado final.

Una vez determinado el modelo estandarizado, parámetros de fabricación y producción, etapa objetivo, fuentes de calor residual y enlaces admisibles se generó la herramienta informática en formato Macro y lenguaje de programación Visual Basic. Para la validación de la herramienta se probaron variaciones en el nivel de producción para comprobar su correcto funcionamiento.

La Macro generada cumple con el objetivo principal del trabajo de generar una herramienta que pueda valorar económicamente las decisiones sobre el calor generado involuntariamente durante la producción y que no es utilizado.

La herramienta tiene el potencial de ser aplicada en casos como ampliación de plantas, cambios en el proceso de fabricación, aumento de niveles de producción y diseño de plantas de fabricación de cerveza artesanal para la receta escogida, entre otras posibilidades, permitiendo ayudar a simular una aproximación a la inversión necesaria en equipos para utilizar la energía considerada pérdida y el impacto de dicha acción en la disminución de los costos de producción.

La herramienta también presenta una base sobre la cual, con conocimientos de procesos e informática, puede generalizarse para otras recetas de cerveza, u otros procesos de producción e industrias, y generar una base informática de ayuda para decisiones futuras.

5. BIBLIOGRAFÍA

- CALLEJA C., Jaime. (2013). Diseño de una planta de elaboración de cerveza artesanal para consumo directo. Tesis de grado en Ingeniería Química. España: Universidad de Cadiz.
- CANDELARIO, Alfredo M. (2015). Diseño de una industria micro cervecera Tesis de grado en Ingeniería Industrial. España: Universidad de La Laguna.
- CARRIZO, Guillermo A., GADALETA, Liliana., et al. (2016). Apunte rentabilidad. Cátedra Ingeniería económica para empresas industriales y de servicio, Facultad de Ingeniería. Mar del Plata.
- CÉSPEDES, Esteban. (2009). La teoría de la decisión de David Lewis y la paradoja de Newcomb. Arica: Universidad de Tarapacá.
- CHASE, Richard B., JACOBS, Robert F., AQUILANO, Nicholas J. (2009). ADMINISTRACIÓN DE OPERACIONES. Indiana.McGraw-Hill.
- ESLINGER, Hans M. (2000). Handbook of Brewing: Processes, Technology, Markets. Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- HARDWICK, William. (1994). Handbook of Brewing, William Hardwick. Estados Unidos: CRC PRESS.
- INSTITUTO VASCO DE COMPETITIVIDAD. PERELGRY, Eloy A., LARREA B., Macarena, DIAZ M., Ana C., KAMP, Bart. (2015). ¿Afectan los costes de energía a la competitividad de la industria? España: Universidad de Deusto.
- INSTITUTO TECNOLÓGICO AGROALIMENTARIO DE ESPAÑA. (2012). Mejoras técnicas disponibles en el sector cervecero. España.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE DE ECUADOR. (2013). Estudio de potenciales impactos ambientales y vulnerabilidad. Ecuador.
- MCMANUS, Brandi. (2009). Growing a Green Corporation. Estados Unidos: Schneider Electric.
- MORALES V., Luis M. (2013). Reingeniería de planta de cerveza artesanal Cherusker. Tesis de grado en Ingeniería Química. Quito: Universidad Central del Ecuador.
- OPTIMAGRID. (2010). Buenas prácticas para ahorro de energía.
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL PARA LA ESTANDARIZACIÓN. (2011). ISO 50001: Sistema de gestión de la energía.

PEREZ PATIÑO, Juan Antonio (1996). Tratamientos térmicos de los aceros. Tesis en opción al grado de maestro en ciencias de la mecánica con especialidad de los materiales: Universidad Autónoma de Nuevo León.

ROYSTON, M.G. (1996). Process engineering in the brewery. The A.P.V. Vol. 72.

SANCHO S., Ruben. (2015). Diseño de una micro-planta de fabricación de cerveza y estudio de técnica y procesos de producción. Tesis de grado en Ingeniería Química Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

SCHEER, Fred M. (2009). Thermal Process Engineering for Brewers. Estados Unidos: Krone Inc.

SCHNEIDER ELCTRICS. (2010). Reduciendo los costos de energía. Reducing the cost of energy.

SOTO CRUZ, Juan José. (1996). Fundamentos sobre ahorro de energía.

TALLA C., Elisa D. (2015). Ahorro de energía eléctrica en una industria cervecera como estrategia de excelencia operativa. Tesis de grado en Ingeniería Industrial. Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

URBINA, Arturo R. (2009). Recuperación de calor residual de baja temperatura en un proceso industrial. Maestría en ciencias con especialidad en ingeniería energética. Monterrey: Universidad tecnológica de Monterrey.

VARGAS SABADÍAS, Antonio (1995). Estadística descriptiva e inferencial. España: Universidad de Castilla-La Mancha.

WALTER P., Livia. GUTIERREZ, Adriana. (2015). Estrategias ambientales de las 3R a las 10R.

6. ANEXO I: Análisis de transferencia de calor

6.1 Calentamiento de Agua

En esta etapa debe calcularse el calor requerido para calentar el agua de red desde la temperatura a la que se encuentra hasta la temperatura requerida para la etapa de maceración (50°C). Deben tenerse en cuenta las pérdidas de calor por contacto con el aire. El volumen a precalentar de agua es 627 litros.

$$\{Energía\ acumulada\} = \{Entrada\} - \{Salida\} + \{Generación\} - \{Consumo\ de\ de\ energía\} \quad (21)$$

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{Calentamiento} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_{\infty}) \cdot dT \quad (22)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el Volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el Calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_0); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Análisis dimensional:

$$\left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot [m^3] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right] \cdot [K] = [kJ] - \left[\frac{kJ}{s \cdot m^2 \cdot K}\right] \cdot [m] \cdot [m] \cdot [K] \cdot [s] \quad (23)$$

Consideraciones:

- Perfil homogéneo de temperatura del fluido dentro del tanque.
- Efecto conductivo en la pared del tanque despreciable respecto a la pérdida por convección con el aire (Nro. de Biot bajo). No se considera caída de temperatura en el espesor del tanque. La temperatura de la pared externa es la temperatura del fluido.
- Pérdida de calor ocurre únicamente en dirección radial. Se asume Z/r suficientemente grande para despreciar transferencia de calor en esa dirección. El coeficiente de convección del aire sobre el tanque se obtiene de bibliografía y es $0,025 \text{ kW/m}^2 \cdot K$.
- Condiciones ambientales controladas. La temperatura del aire se mantiene invariable. $T_{\infty} = 20^\circ C$. El agua que ingresa para el calentamiento se encuentra a $20^\circ C$.

- Variación de la densidad del agua despreciable con la temperatura. Se adopta el valor 989 kg/m³.
- Variación de Cp del agua despreciable con la temperatura. Se adopta el valor 4,214 kJ/kg.K.
- Factor de aprovechamiento igual a 0,80. Este factor de seguridad contempla todas las pérdidas de calor asociadas la propia generación de la llama a partir del combustible. Se obtiene el factor de experiencias previas realizadas.
- La variación de la temperatura T con el tiempo se conoce empíricamente. Para un tanque de estas dimensiones y con este tipo de calentamiento se halla una relación lineal de T con t, subiendo la temperatura 1K cada 60 segundos calentamiento. De esta manera, queda definida T(t) según la ecuación 23.

$$T(t) = T_0 + \frac{t[s]}{60} \quad (24)$$

Dónde: T_0 es la temperatura inicial; $T(t)$ es la variación de la temperatura en función del tiempo; $t[s]$ es el tiempo expresado en segundos.

Se resuelve el balance planteado con todos los valores geométricos y propiedades ya definidas y se halla:

$$Q_{\text{Calentamiento}} = 101331,7 \text{ kJ}$$

6.2 Maceración

6.2.1 Etapa I

En esta primera etapa de la maceración, se mantiene la temperatura del fluido constante e igual a 50°C durante 20 minutos. Luego se eleva la temperatura hasta 67°C en un tiempo de 16 minutos (a razón de 1°C cada 60 segundos). Por este motivo, la pérdida de calor por convección con el aire se calcula en dos términos (uno con temperatura fija e igual a 50°C y otro con temperatura variable con el tiempo desde 50°C a 67°C). El balance resulta:

$$\begin{aligned} \{Energía\ acumulada\} & \quad (25) \\ & = \{Entrada\} - \{Salida\} + \{Generación\} - \{Consumo\ de\ de\ energía\} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT & = Q_{\text{Maceración-Etl}} \cdot f_{\text{aprovechamiento}} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (50^\circ\text{C} - T_\infty) \cdot 1200s - \\ & h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_\infty) \cdot dT \end{aligned} \quad (26)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el Volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el Calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_o); T_∞ es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Siendo $T_o = 50^\circ\text{C}$, $T_f = 67^\circ\text{C}$, $t_0 = 0\text{s}$, $t_f = 1020\text{ s}$ (tiempo que tarda en elevarse la temperatura del fluido en 17°C , desde 50°C hasta 67°C) y $T(t) = 50 + t/60$.

Las consideraciones son las mismas realizadas en la etapa de precalentamiento de agua. Como la reacción con la malta recién comienza en esta etapa, se consideran las propiedades del fluido de esta etapa iguales a las del agua (densidad, calor específico).

Se obtiene entonces:

$$Q_{\text{Maceración-EtI}} = 64839,6 \text{ kJ}$$

6.2.2 Etapa II

En esta etapa se mantiene el mosto durante 30 minutos a 67°C y luego se realiza un calentamiento hasta 72°C en un lapso de tiempo de 5 minutos (a razón de 1°C por minuto). Análogamente a la etapa I, el balance de energía resulta:

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_o}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{\text{Maceración-EtII}} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (67^\circ\text{C} - T_\infty) \cdot 1800\text{s} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_\infty) \cdot dT \quad (27)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el Volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el Calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_o); T_∞ es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Siendo $T_o = 67^\circ\text{C}$, $T_f = 72^\circ\text{C}$, $t_0 = 0\text{s}$, $t_f = 300\text{ s}$ (tiempo que tarda en elevarse la temperatura del fluido en 5°C , desde 67°C hasta 72°C) y $T(t) = 67^\circ\text{C} + t/60$.

Las consideraciones son las mismas realizadas en la Etapa I y se obtiene entonces:

$$Q_{\text{Maceración-EtII}} = 28633,9 \text{ kJ}$$

6.2.3 Etapa III

Durante la última etapa de la maceración, se mantiene el mosto durante media hora a 72°C y luego se realiza un calentamiento hasta 78°C en un lapso de tiempo de 6 minutos (a razón de un grado centígrado por minuto). El balance de energía resulta semejante a las dos etapas anteriores:

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{Maceración-EtIII} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (72^\circ C - T_\infty) \cdot 1800s - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_\infty) \cdot dt \quad (28)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el Volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el Calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_i) y la temperatura inicial del intercambio (T_o); T_∞ es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Siendo $T_o = 72^\circ C$, $T_f = 78^\circ C$, $t_0 = 0s$, $t_f = 360s$ (tiempo que tarda en elevarse la temperatura del fluido en 6°C, desde 72°C hasta 78°C) y $T(t) = 72 + t/60$.

Las consideraciones son las mismas realizadas que en las etapas anteriores y se obtiene entonces:

$$Q_{Maceración-EtIII} = 33626 \text{ kJ}$$

De la sumatoria de los calores de combustión requeridos en las tres etapas de la maceración se obtiene entonces:

$$Q_{Maceración} = Q_{Maceración-EtI} + Q_{Maceración-EtII} + Q_{Maceración-EtIII} = 127099,5 \text{ kJ} \quad (29)$$

6.3 Cocción

Luego de la etapa de maceración se sigue por la cocción del mosto. Durante esta etapa se realizan diferentes adiciones de lúpulo. Al agregar el lúpulo mientras el mosto hierve, éste le transfiere componentes amargos y aromáticos, al isomerizarse los α -ácidos insolubles en iso- α -ácidos solubles. Al mismo tiempo van precipitándose sustancias albuminoides.

Durante la cocción del mosto dulce ocurren los siguientes procesos de especial importancia:

- Disolución y transformación de componentes del lúpulo.
- Formación y precipitación de proteínas y polifenoles.

- Evaporación de agua.
- Esterilización del mosto.
- Destrucción de todas las enzimas.
- Reducción del pH del mosto.
- Evaporación de sustancias aromáticas indeseadas.

El mosto, que sale a 78°C de la maceración, se calienta hasta 100°C en un lapso de tiempo de 20 minutos (a razón de 1,1 °C por minuto). Luego del calentamiento se mantiene el mosto a 100°C durante 90 minutos hasta que finaliza la cocción. Además, se tiene una pérdida de vapor de agua del 8% del volumen del mosto que ingresa al tanque.

El mosto que sale del macerador es muy concentrado y por ello se le agrega agua de lavado para diluirlo y obtener la composición requerida para el producto final. De bibliografía se obtiene la proporción entre agua de lavado y mosto generado en el macerador, y resulta para este caso que se requieren 376 l de agua de lavado. El agua de lavado debe calentarse hasta 78°C y luego de combinarse con el fluido que sale del macerador se forma el mosto que ingresa a la etapa de cocción.

El volumen de mosto de cocción es la suma del mosto que sale del macerador más el agua de lavado. En este caso del macerador salen 527 l (100 l quedan retenidos como humedad en la malta) y se le agregan 376 l de agua de lavado, teniéndose entonces 903 litros de mosto para la cocción.

Consideraciones:

- Mismas consideraciones que para la etapa de Calentamiento. Perfil homogéneo de temperatura para el mosto. Biot bajo así que se considera únicamente efectos convectivos para la pérdida por convección con el aire. Pérdida de calor radial únicamente. Variación con la temperatura de la densidad del mosto despreciable. Variación con la temperatura de Cp del mostro despreciable. Factor de aprovechamiento ya definido en 0,8.
- Tengo en cuenta dos etapas de pérdida de calor convectivo:
 - Una etapa inicial donde el mosto dulce se está calentando y la pérdida convectiva es variable ya que $T(t)$ y la fuerza impulsora varía durante el calentamiento.
 - Una segunda etapa donde la temperatura del mosto dulce ya se encuentra en la temperatura de cocción y se mantiene constante durante el tiempo remanente de cocción.

- Se genera una pérdida de vapor de agua de aproximadamente 8% del volumen de mosto dulce. Este vapor de agua no es aprovechable para una realimentación al sistema ya que contiene materia orgánica indeseada.
- Densidad del mosto = 1030 kg/m³. Cp del mosto = 4,1 kJ/kg.K. Valores obtenidos de bibliografía.

El balance energético resulta entonces:

$$\{Energía\ acumulada\} \quad (30)$$

$$= \{Entrada\} - \{Salida\} + \{Generación\} - \{Consumo\ de\ de\ energía\}$$

$$\rho \cdot V \cdot \int_{T_0}^{T_f} C_p \cdot dT = Q_{Cocción} \cdot f_{aprovechamiento} - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot \int_{t_0}^{t_f} (T(t) - T_{\infty}) \cdot dT - h \cdot \pi \cdot D \cdot z \cdot (100^{\circ}C - T_{\infty}) \cdot 5400s - 0,08 \cdot \rho \cdot V \cdot \lambda \quad (31)$$

Dónde: ρ es la densidad del agua; V es el Volumen que ocupa la masa de agua; C_p es el Calor específico a presión constante; ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se equilibra el sistema (T_f) y la temperatura inicial del intercambio (T_0); T_{∞} es la temperatura ambiente; Q es el calor requerido en la etapa; $f_{aprovechamiento}$ es el factor de aprovechamiento; h es el coeficiente de convección del aire, z es la altura del equipo y D es el diámetro del equipo.

Análisis dimensional:

$$\left[\frac{kg}{m^3}\right] \cdot [m^3] \cdot \left[\frac{kJ}{kg \cdot K}\right] \cdot [K] = [kJ] - \left[\frac{kJ}{s \cdot m^2 \cdot K}\right] \cdot [m] \cdot [m] \cdot [K] \cdot [s] - \left[\frac{kJ}{m^3}\right] \cdot [m^3] \cdot \left[\frac{kJ}{kg}\right] \quad (32)$$

Siendo $T_0 = 78^{\circ}C$, $T_f = 100^{\circ}C$, $t_0 = 0s$, $t_f = 1200s$ (tiempo que tarda en elevarse la temperatura del fluido en $22^{\circ}C$, desde $78^{\circ}C$ hasta $100^{\circ}C$), $T(t) = 78 + t(s)/54,55$ y λ el calor de vaporización que resulta 2257 kJ/kg para las condiciones de la cocción (presión atmosférica). Las propiedades geométricas del tanque en este caso varían según lo indicado previamente.

Las consideraciones son las mismas realizadas que en las etapas anteriores y se obtiene entonces:

$$Q_{Cocción} = 383018 \text{ kJ}$$

6.4 Enfriamiento de mosto dulce previo a la fermentación

El mosto dulce sale de la etapa de cocción a $100^{\circ}C$. El volumen generado de mosto dulce es 830 litros (antes de la cocción eran 903 litros pero se pierde el 8% como vapor de agua) y se estima, por bibliografía, que se tarda 45 minutos en realizarse la totalidad del intercambio de calor. De aquí se obtiene un caudal volumétrico de mosto dulce de 1106 l/h.

Esta corriente debe enfriarse hasta llegar a 16°C, temperatura de ingreso para le etapa de fermentación.

El enfriamiento se realiza en dos etapas. Inicialmente se enfría con agua de red en un intercambiador de placas, hasta alcanzarse una temperatura de 30°C y luego se continúa el enfriamiento en otro intercambiador de placas pero utilizando glicol como refrigerante. Para ambas etapas de enfriamiento se utiliza intercambiadores de placas a contracorriente.

6.4.1 Etapa I: enfriamiento con agua de red

Para el diseño del primer intercambiador, se busca calcular el caudal de agua de red necesaria para el enfriamiento y el área de intercambio del intercambiador de placas. Si se requiere que el agua de red (corriente fría) salga del intercambiador a 68°C, se puede calcular el caudal según:

$$Q = -w_h \cdot Cp_h \cdot (T_{h,out} - T_{h,in}) = w_c \cdot Cp_c \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (33)$$

Dónde: Q es el calor, w es el caudal, Cp es el calor específico; T es la temperatura; el subíndice h indica hot (corriente caliente, mosto dulce) y el subíndice c indica cold (corriente fría, agua de red). De esta ecuación se obtiene el calor intercambiado:

$$Q = 90,82 \text{ kW}$$

Y el caudal de agua de red (w_c) para realizar el enfriamiento deseado:

$$w_c = 1634,3 \text{ l/h}$$

El área de intercambio se calcula según:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{log} \quad (34)$$

Dónde: Q es el calor, U es el coeficiente global de transferencia de calor; A es el área de intercambio; ΔT_{log} es la variación logarítmica de la temperatura. Dicho coeficiente depende de diversas variables del sistema y se puede obtener mediante tablas. Entrando a la tabla con la corriente de servicio, las propiedades estimadas de la corriente a enfriar (viscosidad cinemática, conductividad térmica y capacidad calorífica) y el tipo de placas a emplear, se obtiene un coeficiente global de transferencia de calor de:

$$U = 3,0 \frac{\text{kW}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \quad (35)$$

Y siendo:

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{h-in} - T_{c-out}) - (T_{h-out} - T_{c-in})}{\ln\left(\frac{T_{h-in} - T_{c-out}}{T_{h-out} - T_{c-in}}\right)} = 18,91 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (36)$$

Dónde: ΔT_{log} es la variación logarítmica de la temperatura; T es la temperatura; el subíndice h indica hot (corriente caliente, mosto dulce) y el subíndice c indica cold (corriente fría, agua de red).

Se despeja entonces el área de intercambio y se obtiene:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{log}} = 1,6 \text{ m}^2 \quad (37)$$

Dónde: Q es el calor, U es el coeficiente global de transferencia de calor; A es el área de intercambio; ΔT_{log} es la variación logarítmica de la temperatura.

Y considerando un intercambiador de placas con placas de $0,4 \text{ m}^2$ de área cada una, se obtiene que se requiere un total de 4 placas.

6.4.2 Etapa II: enfriamiento con glicol

Análogamente a los cálculos realizados para el primer intercambiador, se realiza el cálculo para esta segunda etapa de enfriamiento donde el mosto dulce desciende su temperatura de 30°C hasta 16°C . Para ello, se emplea como corriente de servicio glicol a 4°C .

El calor requerido a intercambiar se calcula según:

$$Q = -w_h \cdot C_{p_h} \cdot (T_{h,out} - T_{h,in}) \quad (38)$$

$$Q = 18,16 \text{ kW}$$

Dónde: Q es el calor, w es el caudal, C_p es el calor específico; T es la temperatura; el subíndice h indica hot (corriente caliente, mosto dulce).

Y si se dispone un caudal de glicol, provisto de un equipo de refrigeración, de 1300 l/h , se obtiene la temperatura de salida del glicol según:

$$Q = 18,16 \text{ kW} = w_c \cdot C_{p_c} \cdot (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (39)$$

Dónde: Q es el calor, w es el caudal, C_p es el calor específico; T es la temperatura; y el subíndice c indica cold (corriente fría, agua de red).

Siendo la densidad del etilenglicol 1110 kg/m^3 y calor específico a presión constante (C_p) $2,408 \text{ kJ/kg.K}$, se obtiene:

$$T_{c,out} = 18,03 \text{ } ^\circ\text{C}$$

En este caso el valor de U se estima por tabla y el valor resulta:

$$U = 2,5 \frac{kW}{m^2 \cdot K}$$

Y siendo:

$$\Delta T_{log} = \frac{(T_{h-in} - T_{c-out}) - (T_{h-out} - T_{c-in})}{\ln\left(\frac{T_{h-in} - T_{c-out}}{T_{h-out} - T_{c-in}}\right)} = 9,67 \text{ } ^\circ C \quad (40)$$

Dónde: ΔT_{log} es la variación logarítmica de la temperatura; T es la temperatura; el subíndice h indica hot (corriente caliente, mosto dulce) y el subíndice c indica cold (corriente fría, agua de red).

Se obtiene un área de intercambio de:

$$A = \frac{Q}{U \cdot \Delta T_{log}} = 0,75 \text{ } m^2 \quad (41)$$

Dónde: Q es el calor, U es el coeficiente global de transferencia de calor; A es el área de intercambio; ΔT_{log} es la variación logarítmica de la temperatura.

Teniéndose cada placa de $0,40 \text{ } m^2$ de área, se requerirían dos placas para realizar el enfriamiento en esta etapa.

6.4.3 Aprovechamiento del agua de red de enfriamiento y del vapor de agua generado

El agua de red que enfría el mosto dulce de $100^\circ C$ hasta $30^\circ C$ puede ser utilizada como agua de lavado para agregar al fluido que sale de la maceración y así formar el mosto que va a pasar por la etapa de cocción. El agua de red que sale del intercambiador de placas sale a $68^\circ C$ y el caudal es 1634 l/h .

Como se enunció previamente, el tiempo de intercambio se estima en 45 minutos, y siendo el primer intercambiador (en el cual la corriente de servicio es agua de red) del doble de placas que el segundo, se estima que el tiempo durante el cual circulan las corrientes en el primer intercambiador es aproximadamente 30 minutos. Para ese tiempo se puede calcular entonces el volumen de agua de red que circula y resulta 817 litros.

Para el agua de lavado se requieren 376 litros de agua de red. Puede utilizarse entonces el agua de red a $68^\circ C$ que sale de intercambiador, calentándose estos 376 litros hasta $78^\circ C$ para pasar luego a la etapa de cocción. Quedan entonces 441 litros de agua a $68^\circ C$ que salen del intercambiador libres para utilización en otra etapa del proceso.

El calor requerido para calentar el agua de lavado hasta $78^\circ C$ es entonces:

$$Q_{\text{calentamiento-lavado}} = \rho_{\text{Agua}} \cdot V \cdot c p_{\text{Agua}} \cdot (T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}}) \quad (42)$$

$$Q_{\text{calentamiento-lavado}} = 989 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,376 \text{ m}^3 \cdot 4,214 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \cdot (351\text{K} - 341\text{K})$$

$$Q_{\text{calentamiento-lavado}} = 15670 \text{ kJ}$$

Dónde: Q es el calor, ρ es la densidad, $c p$ es el calor específico; T es la temperatura.

El aumento de 10°C en la temperatura del agua de lavado puede lograrse mediante el aprovechamiento del vapor de agua generado en la etapa de cocción. En la etapa de cocción se evaporaron 71,2 kg de agua que pueden condensarse y aprovecharse nuevamente su calor. El calor asociado a la condensación de ese vapor de agua es:

$$Q_{\text{cond}} = m \cdot \lambda = 71,2 \text{ kg} \cdot 2257 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} = 160716 \text{ kJ} \quad (43)$$

Dónde: m es la masa y λ es el calor de vaporización.

Es decir que se liberan 160716 kJ al condensarse el vapor de agua, calor aprovechable para calentar corrientes del proceso como por ejemplo la corriente de lavado que requiere 15670 kJ. Queda remanente entonces 145046 kJ del calor de condensación que podría aprovecharse para otra etapa del proceso (por ejemplo precalentamiento de agua hasta 50°C). Además, el agua condensada se encuentra a 100°C, también siendo una fuente aprovechable de calor para elevar la temperatura de alguna corriente del proceso.

6.5 Fermentación

Los 830 litros de mosto dulce generados ingresan al tanque de fermentación a 16°C. Al agregarse la levadura comienza el proceso de respiración y fermentación del mosto, desprendiéndose calor por las reacciones que ocurren y elevándose la temperatura del mosto de 16°C hasta la temperatura primaria de fermentación (20°C) en aproximadamente 12 horas. Durante esta etapa no es necesario realizar remoción de calor.

Una vez alcanzada la temperatura primaria de fermentación (20°C), el mosto se fermenta durante 4 días. En este proceso de fermentación también se genera calor que, de no ser removido, elevaría la temperatura del mosto a temperaturas no deseadas para la ejecución de esta etapa. Así, debe diseñarse un sistema de intercambio de calor tal que se remueva todo el calor generado por las reacciones de fermentación, manteniéndose así la temperatura del mosto en 20°C. Debe tenerse en cuenta el intercambio de calor con el aire por convección a través de la pared del tanque, pero en este caso, como la temperatura de mosto es 20°C y la temperatura del aire también, no hay fuerza impulsora que permita la transferencia de calor.

El calor generado por las reacciones puede estimarse a conociéndose la gravedad específica de la cerveza previa a comenzar la fermentación y al finalizar la fermentación. Esta variable del mosto puede medirse mediante un hidrómetro, refractómetro, picnómetro, etc. y empíricamente se obtuvo que, al comenzar la fermentación la cerveza tiene una gravedad específica de 12 °P y al finalizar la fermentación de 3 °P, aproximadamente. La gravedad específica o densidad específica respecto al agua depende directamente del contenido de azúcares fermentables presentes en el mosto. Así, por la forma en que se define la gravedad específica, la diferencia entre el valor de esta variable al finalizar y al comenzar la fermentación representa el contenido porcentual de azúcares fermentables consumidos durante el proceso de fermentación. Entonces:

$$\Delta E = 12 \% (^{\circ}P) - 3 \% (^{\circ}P) = 9\% \quad (44)$$

Dónde: ΔE es la variación de la energía interna y $^{\circ}P$ es la unidad correspondiente a la gravedad específica.

El calor generado por la reacción de fermentación de los azúcares presentes en el mosto resulta entonces:

$$Q_{generado} = \rho_{mosto} \cdot V \cdot \frac{\Delta E}{100} \cdot \Delta H_r \quad (45)$$

Dónde: Q es el calor, ρ es la densidad; V es el volumen; ΔE es la variación de la energía interna ; ΔH_r es la variación de la entalpía.

ΔH_r se obtuvo para la fermentación de glucosa por Ley de Hess, obteniéndose un valor de 79 kJ/mol, que equivale a 439 kJ/kg. Si se considera que todos los azúcares fermentables presentes en el mosto son glucosa y despreciando la variación de la densidad durante el proceso:

$$Q_{generado} = 1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,83m^3 \cdot 0,09 \cdot 439 \frac{kJ}{kg}$$

$$Q_{generado} = 33777,1 kJ$$

Durante los 4 días que se realiza la fermentación de los azúcares presentes en el mosto debe entonces removerse 32352,8 kJ de calor para que la temperatura del mosto se mantenga constante e igual a 20°C.

Al finalizarse esta etapa debe enfriarse la cerveza hasta 1°C en un lapso de un día, para así entrar en la etapa de maduración. Considerando densidad y cp invariable durante el proceso, el calor que debe removerse se calcula según:

$$Q_{enfriamiento} = \rho_{mosto} \cdot V \cdot cp_{mosto} \cdot (T_{fermentación} - T_{maduración}) \quad (46)$$

Diseño y desarrollo de herramienta para la valorización del calor fatal industrial en la fabricación de cerveza artesanal.

$$Q_{enfriamiento} = 1030 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,83 m^3 \cdot 4,1 \frac{kJ}{kg \cdot K} \cdot (293K - 274K)$$

$$Q_{enfriamiento} = 66596,7 kJ$$

Dónde: Q es el calor, ρ es la densidad, C_p es el calor específico; T es la temperatura.

Como el enfriamiento se realiza en 24 horas, el calor puede calcularse por unidad de tiempo como:

$$Q_{enfriamiento} = \frac{66596,7 kJ}{1 \text{ día}} \cdot \frac{1 \text{ día}}{24 h} \cdot \frac{1 h}{60 \text{ min}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 s} = 0,77 kW$$

Si se asume que se usa vaporización directa con amoníaco para refrigerar el mosto al finalizar la fermentación, y siendo la capacidad de remoción de calor del amoníaco 1300 kJ/kg, el caudal requerido de amoníaco sería:

$$Q_{NH_3} = \frac{0,77 kW}{1300 kJ/kg} = 0,0005929 \frac{kg}{s} = 2,13 \frac{kg}{h} NH_3$$

7. ANEXO II: Cálculo de entalpía de la reacción de fermentación

Para calcular la entalpía de la reacción de fermentación se utilizó la ley de Hess. Partiendo de la reacción de fermentación de la glucosa $C_6H_{12}O_6$, cuyos productos son etanol $C_2H_5OH_{(l)}$ más dióxido de carbono y conociendo de tablas: $\Delta H_c^0(C_6H_{12}O_6) = -2813$ KJ/mol y $\Delta H_c^0(C_2H_5OH_{(l)}) = -1367$ KJ/mol

Se escribieron las ecuaciones termoquímicas correspondientes a ambas reacciones:



Pero se desea conocer la entalpía de la reacción final, cuya ecuación termoquímica es:



Por Ley de Hess, estableceremos coeficientes que afectarán a las ecuaciones termoquímicas iniciales con el objetivo de obtener la ecuación deseada (49). De este modo afectamos la ecuación (47) con un coeficiente igual a 1, ya que no queremos afectar los moles de glucosa, y a la ecuación (48) con un coeficiente igual a -2, ya que deseamos que mol de etanol sea un producto y lo tenemos presente como reactivo. Por estos mismos coeficientes se afectará a los valores de entalpía, por lo que se obtiene el siguiente resultado:



Por lo tanto, el valor de la entalpía de la reacción será:

$$\Delta H_T = -2813 \text{ KJ/mol} - (-2) * 1367 \text{ KJ/mol} = -79 \text{ KJ/mol}$$

Por la convención de signos, se entiende en el resultado que por cada mol de glucosa que fermenta se desprenden 79 KJ/mol.

8. ANEXO III: Código principal de herramienta interactiva

En el presente anexo se detalla el código fuente, en lenguaje Visual Basic, de la herramienta informática generada a partir del análisis del modelo del presente trabajo.

Se detalla la declaración de variables, constantes físicas, constantes de la receta de fabricación, constantes medidas experimentalmente y los cálculos según la receta del tipo de cerveza que se decidió producir.

```
Private Sub InicioSimulacion_Click()
```

```
'Evitar que el programa avance si no se completa un numero
```

```
If TextBox1 = "" Or TextBox2 = "" Then
```

```
    MsgBox "Atención! El Registro está incompleto.", vbExclamation, "Error en el Registro"
```

```
End If
```

```
'Lanzar advertencia de error si no se ingresan numeros
```

```
If (Not IsNumeric(TextBox1)) And (TextBox1 <> "") And (Not IsNumeric(TextBox1)) And  
(TextBox1 <> "") Then
```

```
    MsgBox "Cuidado! Las cantidades deben ser números. Por favor, vuelva a ingresar los  
datos.", vbExclamation, "Error en la carga de datos"
```

```
    TextBox1 = ""
```

```
End If
```

```
'Con un valor numérico, iniciar el proceso de cálculo
```

```
If IsNumeric(TextBox1) Then
```

```
"Dimensionamiento de variables
```

```
    Dim volumen_usuario As String
```

```
    Dim volumen_lote As String
```

```
    Dim coef_conv_aire As String
```

```
    Dim temp_aire As String
```

```
    Dim den_agua As String
```

```
    Dim cp_agua As String
```

```
    Dim presion_atm As String
```

```
    Dim calor_vapor As String
```

```
    Dim entalpia_fermentacion As String
```

```
    Dim equivalencia_entalpia As String
```

```
    Dim den_mosto As String
```

```
    Dim cp_mosto As String
```

```
    Dim cp_glicol As String
```

```
    Dim cap_amoniacos As String
```

```
    Dim factor_aprov As String
```

```
    Dim pi As String
```

```
    Dim altura_calentamiento As String
```

Dim diametro_calentamiento As String
Dim espesor_calentamiento As String
Dim altura_maceracion As String
Dim diametro_maceracion As String
Dim espesor_maceracion As String
Dim altura_coccion As String
Dim diametro_coccion As String
Dim espesor_coccion As String
Dim altura_fermentacion As String
Dim diametro_fermentacion As String
Dim espesor_fermentacion As String
Dim potencia_bomba As String

Dim A_calentamiento As String
Dim C_calentamiento As String
Dim A_maceracion_1 As String
Dim C1_maceracion_1 As String
Dim C2_maceracion_1 As String
Dim A_maceracion_2 As String
Dim C1_maceracion_2 As String
Dim C2_maceracion_2 As String
Dim A_maceracion_3 As String
Dim C1_maceracion_3 As String
Dim C2_maceracion_3 As String
Dim A_coccion As String
Dim C1_coccion As String
Dim C2_coccion As String
Dim B_coccion As String
Dim calor_generado_fermentacion As String
Dim calor_enfriamiento_fermentacion As String

Dim calor_calentamiento As String
Dim calor_et1_maceracion As String
Dim calor_et2_maceracion As String
Dim calor_et3_maceracion As String
Dim calor_maceracion As String
Dim calor_coccion As String
Dim energia_enfriamiento As String
Dim calor_fermentacion As String
Dim calor_total As String

Dim temp_i_calentamiento As String
Dim temp_f_calentamiento As String
Dim tiempo_proceso_calentamiento As String

Dim tiempo_total_maceracion As String
Dim tiempo_1_const_maceracion As String
Dim tiempo_1_cal_maceracion As String

Dim tiempo_2_const_maceracion As String
Dim tiempo_2_cal_maceracion As String
Dim tiempo_3_const_maceracion As String
Dim tiempo_3_cal_maceracion As String
Dim temp_i_maceracion As String
Dim temp_1_maceracion As String
Dim temp_2_maceracion As String
Dim temp_3_maceracion As String
Dim agua_lavado As String

Dim vapor_coccion As String
Dim calor_vaporizacion As String
Dim tiempo_1_coccion As String
Dim tiempo_2_coccion As String
Dim temp_i_coccion As String
Dim temp_f_coccion As String
Dim volumen_coccion As String

Dim tiempo_total_enfriamiento As String
Dim tiempo_agua_red As String
Dim tiempo_glicol As String
Dim conversion_energia_tiempo As String
Dim temp_i_mosto_enf As String
Dim temp_i_agua_red_enf As String
Dim temp_f_agua_red_enf As String
Dim temp_i_glicol As String
Dim temp_f_glicol As String

Dim gravedad_especifica As String "es un porcentaje
Dim temp_primaria_fermentacion As String
Dim temp_i_fermentacion As String
Dim temp_f_fermentacion As String
Dim tiempo_fermentacion_primaria As String
Dim tiempo_fermentacion As String
Dim tiempo_maduracion As String
Dim tiempo_total_fermentacion As String

"Definición de las constantes generales

volumen_usuario = (TextBox1.Value) / 1000
volumen_lote = (volumen_usuario / 1.3248)
coef_conv_aire = Hoja1.Cells(2, 2)
temp_aire = Hoja1.Cells(3, 2)
den_agua = Hoja1.Cells(4, 2)
cp_agua = Hoja1.Cells(5, 2)
presion_atm = Hoja1.Cells(6, 2)
calor_vapor = Hoja1.Cells(7, 2)
entalpia_fermentacion = Hoja1.Cells(8, 2)

```
equivalencia_entalpia = Hoja1.Cells(85, 2)
den_mosto = Hoja1.Cells(42, 2)
cp_mosto = Hoja1.Cells(43, 2)
cp_glicol = Hoja1.Cells(57, 2)
cap_amoniac = Hoja1.Cells(75, 2)
factor_aprov = Hoja1.Cells(9, 2)
pi = Hoja1.Cells(10, 2)
```

```
"Definición de las variables de los equipos
altura_calentamiento = Hoja3.Cells(3, 17)
diametro_calentamiento = Hoja3.Cells(4, 17)
espesor_calentamiento = Hoja3.Cells(5, 17)
altura_maceracion = Hoja3.Cells(6, 17)
diametro_maceracion = Hoja3.Cells(7, 17)
espesor_maceracion = Hoja3.Cells(8, 17)
altura_coccion = Hoja3.Cells(9, 17)
diametro_coccion = Hoja3.Cells(10, 17)
espesor_coccion = Hoja3.Cells(11, 17)
altura_fermentacion = Hoja3.Cells(14, 17)
diametro_fermentacion = Hoja3.Cells(15, 17)
espesor_fermentacion = Hoja3.Cells(16, 17)
potencia_bomba = Hoja3.Cells(20, 14)
```

```
"Definición de las constantes de la etapa de calentamiento
temp_i_calentamiento = Hoja1.Cells(15, 2)
temp_f_calentamiento = Hoja1.Cells(16, 2)
tiempo_proceso_calentamiento = Hoja1.Cells(14, 2) * 60
```

```
"Definición de las constantes de la etapa de maceración
tiempo_total_maceracion = Hoja1.Cells(26, 2) * 60
tiempo_1_const_maceracion = Hoja1.Cells(27, 2) * 60
tiempo_1_cal_maceracion = Hoja1.Cells(28, 2) * 60
tiempo_2_const_maceracion = Hoja1.Cells(29, 2) * 60
tiempo_2_cal_maceracion = Hoja1.Cells(30, 2) * 60
tiempo_3_const_maceracion = Hoja1.Cells(31, 2) * 60
tiempo_3_cal_maceracion = Hoja1.Cells(32, 2) * 60
temp_i_maceracion = Hoja1.Cells(33, 2)
temp_1_maceracion = Hoja1.Cells(34, 2)
temp_2_maceracion = Hoja1.Cells(35, 2)
temp_3_maceracion = Hoja1.Cells(36, 2)
agua_lavado = Hoja1.Cells(37, 2) / 100 " es un porcentaje sobre el volumen
```

```
"Definición de las constantes de la etapa de cocción
vapor_coccion = Hoja1.Cells(44, 2) / 100 " es un porcentaje sobre el volumen
calor_vaporizacion = Hoja1.Cells(45, 2)
tiempo_1_coccion = Hoja1.Cells(46, 2) * 60
tiempo_2_coccion = Hoja1.Cells(47, 2) * 60
temp_i_coccion = Hoja1.Cells(48, 2)
```

temp_f_coccion = Hoja1.Cells(49, 2)

"Definición de las constantes de la etapa de enfriamiento

tiempo_total_enfriamiento = Hoja1.Cells(62, 2) * 60

tiempo_agua_red = Hoja1.Cells(63, 2) * 60

tiempo_glicol = Hoja1.Cells(64, 2) * 60

conversion_energia_tiempo = Hoja1.Cells(70, 2)

temp_i_mosto_enf = Hoja1.Cells(65, 2)

temp_i_agua_red_enf = Hoja1.Cells(66, 2)

temp_f_agua_red_enf = Hoja1.Cells(67, 2)

temp_i_glicol = Hoja1.Cells(68, 2)

temp_f_glicol = Hoja1.Cells(69, 2)

"Definición de las constantes de la etapa de fermentación

gravedad_especifica = Hoja1.Cells(77, 2) / 100

temp_primaria_fermentacion = Hoja1.Cells(78, 2)

temp_i_fermentacion = Hoja1.Cells(79, 2)

temp_f_fermentacion = Hoja1.Cells(80, 2)

tiempo_fermentacion_primaria = Hoja1.Cells(81, 2)

tiempo_fermentacion = Hoja1.Cells(82, 2)

tiempo_maduracion = Hoja1.Cells(83, 2)

tiempo_total_fermentacion = Hoja1.Cells(84, 2)

"CALCULO CRITERIO 1: Cálculo de energía según el volumen de producción (el volumen inicial de agua necesario se define como volumen de lote, y no es igual al valor del volumen de producción deseado, ya que se considera en los siguientes cálculos el proporcional volumen correspondiente al agua de lavado)

$A_{\text{calentamiento}} = \text{den_agua} * \text{cp_agua} * (\text{temp_f_calentamiento} - \text{temp_i_calentamiento})$

$C_{\text{calentamiento}} = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_calentamiento} * \text{diametro_calentamiento} * \pi * ((\text{temp_i_calentamiento} * \text{tiempo_proceso_calentamiento}) + ((\text{tiempo_proceso_calentamiento} * \text{tiempo_proceso_calentamiento}) / 120) - (\text{temp_i_calentamiento} * \text{tiempo_proceso_calentamiento}))$

$\text{calor_calentamiento} = ((A_{\text{calentamiento}} * \text{volumen_lote}) + C_{\text{calentamiento}}) / \text{factor_aprov}$

$A_{\text{maceracion_1}} = \text{den_agua} * \text{cp_agua} * (\text{temp_1_maceracion} - \text{temp_i_maceracion})$

$C1_{\text{maceracion_1}} = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * (\text{temp_i_maceracion} - \text{temp_aire}) * \text{tiempo_1_const_maceracion}$

$C2_{\text{maceracion_1}} = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * ((\text{temp_i_maceracion} * \text{tiempo_1_cal_maceracion}) + ((\text{tiempo_1_cal_maceracion} * \text{tiempo_1_cal_maceracion}) / 120) - (\text{temp_aire} * \text{tiempo_1_cal_maceracion}))$ "El 120 corresponde al divisor resultante de la integral (se multiplica la ecuacion planteada con divisor 60 por 1/2)

$$\text{calor_et1_maceracion} = ((A_maceracion_1 * \text{volumen_lote}) + C1_maceracion_1 + C2_maceracion_1) / \text{factor_aprov}$$

$$A_maceracion_2 = \text{den_agua} * \text{cp_agua} * (\text{temp_2_maceracion} - \text{temp_1_maceracion})$$
$$C1_maceracion_2 = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * (\text{temp_1_maceracion} - \text{temp_aire}) * \text{tiempo_2_const_maceracion}$$
$$C2_maceracion_2 = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * ((\text{temp_1_maceracion} * \text{tiempo_2_cal_maceracion}) + ((\text{tiempo_2_cal_maceracion} * \text{tiempo_2_cal_maceracion}) / 120) - (\text{temp_aire} * \text{tiempo_2_cal_maceracion}))$$

"El 120 corresponde al divisor resultante de la integral (se multiplica la ecuacion planteada con divisor 60 por 1/2)

$$\text{calor_et2_maceracion} = ((A_maceracion_2 * \text{volumen_lote}) + C1_maceracion_2 + C2_maceracion_2) / \text{factor_aprov}$$

$$A_maceracion_3 = \text{den_agua} * \text{cp_agua} * (\text{temp_3_maceracion} - \text{temp_2_maceracion})$$
$$C1_maceracion_3 = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * (\text{temp_2_maceracion} - \text{temp_aire}) * \text{tiempo_3_const_maceracion}$$
$$C2_maceracion_3 = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_maceracion} * \text{diametro_maceracion} * \pi * ((\text{temp_2_maceracion} * \text{tiempo_3_cal_maceracion}) + ((\text{tiempo_3_cal_maceracion} * \text{tiempo_3_cal_maceracion}) / 120) - (\text{temp_aire} * \text{tiempo_3_cal_maceracion}))$$

"El 120 corresponde al divisor resultante de la integral (se multiplica la ecuacion planteada con divisor 60 por 1/2)

$$\text{calor_et3_maceracion} = ((A_maceracion_3 * \text{volumen_lote}) + C1_maceracion_3 + C2_maceracion_3) / \text{factor_aprov}$$

$$\text{volumen_coccion} = \text{volumen_lote} * 1.44$$

$$A_coccion = \text{den_mosto} * \text{cp_mosto} * (\text{temp_f_coccion} - (\text{temp_i_coccion} - 1))$$

"La temperatura inicial de coccion es 78 grados

$$C1_coccion = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_coccion} * \text{diametro_coccion} * \pi * (\text{temp_f_coccion} - \text{temp_aire}) * \text{tiempo_2_coccion}$$

$$C2_coccion = \text{coef_conv_aire} * \text{altura_coccion} * \text{diametro_coccion} * \pi * ((\text{temp_i_coccion} * \text{tiempo_1_coccion}) + ((\text{tiempo_1_coccion} * \text{tiempo_1_coccion}) / 120) - (\text{temp_aire} * \text{tiempo_1_coccion}))$$

$$B_coccion = \text{vapor_coccion} * \text{den_mosto} * \text{calor_vaporizacion}$$

$$\text{calor_coccion} = ((A_coccion * \text{volumen_coccion}) + (B_coccion * \text{volumen_coccion}) + C1_coccion + C2_coccion) / \text{factor_aprov}$$

$$\text{energia_enfriamiento} = \text{potencia_bomba} * \text{tiempo_total_enfriamiento} * \text{conversion_energia_tiempo} * 2$$

$$\text{calor_generado_fermentacion} = \text{den_mosto} * \text{volumen_usuario} * \text{gravedad_especifica} * \text{equivalencia_entalpia}$$

$$\text{calor_enfriamiento_fermentacion} = \text{den_mosto} * \text{volumen_usuario} * \text{cp_mosto} * (\text{temp_primaria_fermentacion} - \text{temp_f_fermentacion})$$

'Escritura de resultado en Hoja de Evaluación de Criterios para determinar el peso de cada etapa

```
Hoja2.Cells(12, 2) = calor_calentamiento / 1
Hoja2.Cells(13, 2) = calor_et1_maceracion / 1
Hoja2.Cells(14, 2) = calor_et2_maceracion / 1
Hoja2.Cells(15, 2) = calor_et3_maceracion / 1
Hoja2.Cells(17, 2) = calor_coccion / 1
Hoja2.Cells(18, 2) = energia_enfriamiento / 1
Hoja2.Cells(19, 2) = calor_generado_fermentacion / 1
Hoja2.Cells(20, 2) = calor_enfriamiento_fermentacion / 1
```

'Asignar peso a las etapas 1er CRITERIO: con una determinación del peso porcentual de las etapas (automático en hoja), da peso según valoración

"Dimensionamiento de nuevas variables

```
Dim peso_C1_calentamiento As Variant 'C1=criterio 1
Dim peso_C1_maceracion As Variant
Dim peso_C1_coccion As Variant
Dim peso_C1_enfriamiento As Variant
Dim peso_C1_fermentacion As Variant
Dim valoracionC1_N1_1 As Variant 'N1_1=Nivel 1 de valoracion, 1er valor
Dim valoracionC1_N1_2 As Variant 'N1_2=Nivel 1 de valoracion, 2do valor
Dim valoracionC1_N2_1 As Variant
Dim valoracionC1_N2_2 As Variant
Dim valoracionC1_N3_1 As Variant
Dim valoracionC1_N3_2 As Variant
Dim valoracionC1_N4_1 As Variant
Dim valoracionC1_N4_2 As Variant
Dim valoracionC1_N5_1 As Variant
Dim valoracionC1_N5_2 As Variant
Dim valoracionC1_N6_2 As Variant
```

Dim valor_C1_1 As String 'Valor que se le va a asignar al criterio dependiendo del rango de peso

```
Dim valor_C1_2 As String
Dim valor_C1_3 As String
Dim valor_C1_4 As String
Dim valor_C1_5 As String
Dim valor_C1_6 As String
Dim Criterio1_calentamiento As String
Dim Criterio1_maceracion As String
Dim Criterio1_coccion As String
Dim Criterio1_enfriamiento As String
Dim Criterio1_fermentacion As String
```

"Asignar a las variables definidas, valores leídos desde el libro de excel

```
peso_C1_calentamiento = Hoja2.Cells(25, 2)
peso_C1_maceracion = Hoja2.Cells(26, 2)
peso_C1_coccion = Hoja2.Cells(27, 2)
```

```
peso_C1_enfriamiento = Hoja2.Cells(28, 2)
peso_C1_fermentacion = Hoja2.Cells(29, 2)
valoracionC1_N1_1 = Hoja2.Cells(3, 8)
valoracionC1_N1_2 = Hoja2.Cells(3, 10)
valoracionC1_N2_1 = Hoja2.Cells(4, 8)
valoracionC1_N2_2 = Hoja2.Cells(4, 10)
valoracionC1_N3_1 = Hoja2.Cells(5, 8)
valoracionC1_N3_2 = Hoja2.Cells(5, 10)
valoracionC1_N4_1 = Hoja2.Cells(6, 8)
valoracionC1_N4_2 = Hoja2.Cells(6, 10)
valoracionC1_N5_1 = Hoja2.Cells(7, 8)
valoracionC1_N5_2 = Hoja2.Cells(7, 10)
valoracionC1_N6_2 = Hoja2.Cells(8, 10)
```

```
' With peso_C1_calentamiento And peso_C1_maceracion And peso_C1_coccion And
peso_C1_enfriamiento And peso_C1_fermentacion
```

```
' .NumberFormat = "0.00%"
```

```
' End With
```

```
' With valoracionC1_N1_1 And valoracionC1_N1_2 And valoracionC1_N2_1 And
valoracionC1_N2_2 And valoracionC1_N3_1 And valoracionC1_N3_2 And
valoracionC1_N4_1 And valoracionC1_N4_2 And valoracionC1_N5_1 And
valoracionC1_N5_2 And valoracionC1_N6_2
```

```
' .NumberFormat = "0.00%"
```

```
' End With
```

```
valor_C1_1 = Hoja2.Cells(3, 11)
valor_C1_2 = Hoja2.Cells(4, 11)
valor_C1_3 = Hoja2.Cells(5, 11)
valor_C1_4 = Hoja2.Cells(6, 11)
valor_C1_5 = Hoja2.Cells(7, 11)
valor_C1_6 = Hoja2.Cells(8, 11)
```

"Condiciones de valoración

'Calentamiento

```
If (peso_C1_calentamiento >= valoracionC1_N1_1) And (peso_C1_calentamiento <
valoracionC1_N2_1) Then
```

```
    Criterio1_calentamiento = valor_C1_1
```

```
    Else
```

```
        If (peso_C1_calentamiento >= valoracionC1_N2_1) And (peso_C1_calentamiento <
valoracionC1_N3_1) Then
```

```
            Criterio1_calentamiento = valor_C1_2
```

```
            Else
```

```
                If (peso_C1_calentamiento >= valoracionC1_N3_1) And (peso_C1_calentamiento
< valoracionC1_N4_1) Then
```

```
                    Criterio1_calentamiento = valor_C1_3
```

```
                    Else
```



```
Criterio1_coccion = valor_C1_1
Else
If (peso_C1_coccion >= valoracionC1_N2_1) And (peso_C1_coccion <
valoracionC1_N3_1) Then
Criterio1_coccion = valor_C1_2
Else
If (peso_C1_coccion >= valoracionC1_N3_1) And (peso_C1_coccion <
valoracionC1_N4_1) Then
Criterio1_coccion = valor_C1_3
Else
If (peso_C1_coccion >= valoracionC1_N4_1) And (peso_C1_coccion <
valoracionC1_N5_1) Then
Criterio1_coccion = valor_C1_4
Else
If (peso_C1_coccion >= valoracionC1_N5_1) And (peso_C1_coccion <
valoracionC1_N6_2) Then
Criterio1_coccion = valor_C1_5
Else
If (peso_C1_coccion >= valoracionC1_N6_2) Then
Criterio1_coccion = valor_C1_6
End If
End If
End If
End If
End If
End If
'Enfriamiento
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N1_1) And (peso_C1_enfriamiento <
valoracionC1_N2_1) Then
Criterio1_enfriamiento = valor_C1_1
Else
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N2_1) And (peso_C1_enfriamiento <
valoracionC1_N3_1) Then
Criterio1_enfriamiento = valor_C1_2
Else
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N3_1) And (peso_C1_enfriamiento <
valoracionC1_N4_1) Then
Criterio1_enfriamiento = valor_C1_3
Else
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N4_1) And (peso_C1_enfriamiento
< valoracionC1_N5_1) Then
Criterio1_enfriamiento = valor_C1_4
Else
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N5_1) And
(peso_C1_enfriamiento < valoracionC1_N6_2) Then
Criterio1_enfriamiento = valor_C1_5
Else
If (peso_C1_enfriamiento >= valoracionC1_N6_2) Then
```

```
        Criterio1_enfriamiento = valor_C1_6
    End If
End If
End If
End If
End If
End If
'Fermentación
If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N1_1) And (peso_C1_fermentacion <
valoracionC1_N2_1) Then
    Criterio1_fermentacion = valor_C1_1
Else
    If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N2_1) And (peso_C1_fermentacion <
valoracionC1_N3_1) Then
        Criterio1_fermentacion = valor_C1_2
    Else
        If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N3_1) And (peso_C1_fermentacion <
valoracionC1_N4_1) Then
            Criterio1_fermentacion = valor_C1_3
        Else
            If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N4_1) And (peso_C1_fermentacion
< valoracionC1_N5_1) Then
                Criterio1_fermentacion = valor_C1_4
            Else
                If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N5_1) And
(peso_C1_fermentacion < valoracionC1_N6_2) Then
                    Criterio1_fermentacion = valor_C1_5
                Else
                    If (peso_C1_fermentacion >= valoracionC1_N6_2) Then
                        Criterio1_fermentacion = valor_C1_6
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If
End If
End If
End If
```

```
"Escritura del valor del criterio en libro
Hoja2.Cells(4, 2) = Criterio1_calentamiento
Hoja2.Cells(5, 2) = Criterio1_maceracion
Hoja2.Cells(6, 2) = Criterio1_coccion
Hoja2.Cells(7, 2) = Criterio1_enfriamiento
Hoja2.Cells(8, 2) = Criterio1_fermentacion
```

'Asignar peso a las etapas 2do CRITERIO: con una determinación del peso porcentual de las etapas (automático en hoja), da peso según valoración

"Dimensionamiento de nuevas variables

Dim poder_calorifico_gas As String

Dim bomba_enfriamiento As String
Dim bomba_fermentacion As String
Dim energia_requerida_calentamiento As String
Dim energia_requerida_maceracion As String
Dim energia_requerida_coccion As String
Dim energia_requerida_enfriamiento As String
Dim energia_requerida_fermentacion As String

'Lectura de variables desde libro
poder_calorifico_gas = Hoja4.Cells(3, 6)
bomba_enfriamiento = Hoja4.Cells(3, 9)
bomba_fermentacion = Hoja4.Cells(3, 12)

'Escritura de resultado parcial en Hoja de Evaluación de Criterios para determinar el peso de cada etapa

Hoja2.Cells(12, 3) = (calor_calentamiento / 1) / poder_calorifico_gas
Hoja2.Cells(13, 3) = (calor_et1_maceracion / 1) / poder_calorifico_gas
Hoja2.Cells(14, 3) = (calor_et2_maceracion / 1) / poder_calorifico_gas
Hoja2.Cells(15, 3) = (calor_et3_maceracion / 1) / poder_calorifico_gas
Hoja2.Cells(17, 3) = (calor_coccion / 1) / poder_calorifico_gas
Hoja2.Cells(18, 3) = bomba_enfriamiento * volumen_usuario * 1000
Hoja2.Cells(19, 3) = ((calor_generado_fermentacion / 1) / ((calor_generado_fermentacion / 1) + (calor_enfriamiento_fermentacion / 1))) * bomba_fermentacion * volumen_usuario * 1000
Hoja2.Cells(20, 3) = ((calor_enfriamiento_fermentacion / 1) / ((calor_generado_fermentacion / 1) + (calor_enfriamiento_fermentacion / 1))) * bomba_fermentacion * volumen_usuario * 1000

"Dimensionamiento de nuevas variables

Dim peso_C2_calentamiento As Variant 'C2=criterio 2
Dim peso_C2_maceracion As Variant
Dim peso_C2_coccion As Variant
Dim peso_C2_enfriamiento As Variant
Dim peso_C2_fermentacion As Variant
Dim valoracionC2_N1_1 As Variant 'N1_1=Nivel 1 de valoracion, 1er valor
Dim valoracionC2_N1_2 As Variant 'N1_2=Nivel 1 de valoracion, 2do valor
Dim valoracionC2_N2_1 As Variant
Dim valoracionC2_N2_2 As Variant
Dim valoracionC2_N3_1 As Variant
Dim valoracionC2_N3_2 As Variant
Dim valoracionC2_N4_1 As Variant
Dim valoracionC2_N4_2 As Variant
Dim valoracionC2_N5_1 As Variant
Dim valoracionC2_N5_2 As Variant
Dim valoracionC2_N6_2 As Variant
Dim valor_C2_1 As String 'Valor que se le va a asignar al criterio dependiendo del rango de peso
Dim valor_C2_2 As String

```
Dim valor_C2_3 As String
Dim valor_C2_4 As String
Dim valor_C2_5 As String
Dim valor_C2_6 As String
Dim Criterio2_calentamiento As String
Dim Criterio2_maceracion As String
Dim Criterio2_coccion As String
Dim Criterio2_enfriamiento As String
Dim Criterio2_fermentacion As String
```

"Asignar a las variables definidas, valores leídos desde el libro de excel

```
peso_C2_calentamiento = Hoja2.Cells(25, 4)
peso_C2_maceracion = Hoja2.Cells(26, 4)
peso_C2_coccion = Hoja2.Cells(27, 4)
peso_C2_enfriamiento = Hoja2.Cells(28, 4)
peso_C2_fermentacion = Hoja2.Cells(29, 4)
valoracionC2_N1_1 = Hoja2.Cells(3, 13)
valoracionC2_N1_2 = Hoja2.Cells(3, 15)
valoracionC2_N2_1 = Hoja2.Cells(4, 13)
valoracionC2_N2_2 = Hoja2.Cells(4, 15)
valoracionC2_N3_1 = Hoja2.Cells(5, 13)
valoracionC2_N3_2 = Hoja2.Cells(5, 15)
valoracionC2_N4_1 = Hoja2.Cells(6, 13)
valoracionC2_N4_2 = Hoja2.Cells(6, 15)
valoracionC2_N5_1 = Hoja2.Cells(7, 13)
valoracionC2_N5_2 = Hoja2.Cells(7, 15)
valoracionC2_N6_2 = Hoja2.Cells(8, 15)
valor_C2_1 = Hoja2.Cells(3, 16)
valor_C2_2 = Hoja2.Cells(4, 16)
valor_C2_3 = Hoja2.Cells(5, 16)
valor_C2_4 = Hoja2.Cells(6, 16)
valor_C2_5 = Hoja2.Cells(7, 16)
valor_C2_6 = Hoja2.Cells(8, 16)
```

"Condiciones de valoración

'Calentamiento

```
If (peso_C2_calentamiento >= valoracionC2_N1_1) And (peso_C2_calentamiento <
valoracionC2_N2_1) Then
    Criterio2_calentamiento = valor_C2_1
Else
    If (peso_C2_calentamiento >= valoracionC2_N2_1) And (peso_C2_calentamiento <
valoracionC2_N3_1) Then
        Criterio2_calentamiento = valor_C2_2
    Else
        If (peso_C2_calentamiento >= valoracionC2_N3_1) And (peso_C2_calentamiento
< valoracionC2_N4_1) Then
            Criterio2_calentamiento = valor_C2_3
        Else
```



```
Criterio2_coccion = valor_C2_1
Else
If (peso_C2_coccion >= valoracionC2_N2_1) And (peso_C2_coccion <
valoracionC2_N3_1) Then
Criterio2_coccion = valor_C2_2
Else
If (peso_C2_coccion >= valoracionC2_N3_1) And (peso_C2_coccion <
valoracionC2_N4_1) Then
Criterio2_coccion = valor_C2_3
Else
If (peso_C2_coccion >= valoracionC2_N4_1) And (peso_C2_coccion <
valoracionC2_N5_1) Then
Criterio2_coccion = valor_C2_4
Else
If (peso_C2_coccion >= valoracionC2_N5_1) And (peso_C2_coccion <
valoracionC2_N6_2) Then
Criterio2_coccion = valor_C2_5
Else
If (peso_C2_coccion >= valoracionC2_N6_2) Then
Criterio2_coccion = valor_C2_6
End If
End If
End If
End If
End If
End If
'Enfriamiento
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N1_1) And (peso_C2_enfriamiento <
valoracionC2_N2_1) Then
Criterio2_enfriamiento = valor_C2_1
Else
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N2_1) And (peso_C2_enfriamiento <
valoracionC2_N3_1) Then
Criterio2_enfriamiento = valor_C2_2
Else
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N3_1) And (peso_C2_enfriamiento <
valoracionC2_N4_1) Then
Criterio2_enfriamiento = valor_C2_3
Else
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N4_1) And (peso_C2_enfriamiento
< valoracionC2_N5_1) Then
Criterio2_enfriamiento = valor_C2_4
Else
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N5_1) And
(peso_C2_enfriamiento < valoracionC2_N6_2) Then
Criterio2_enfriamiento = valor_C2_5
Else
If (peso_C2_enfriamiento >= valoracionC2_N6_2) Then
```

```
        Criterio2_enfriamiento = valor_C2_6
    End If
End If
End If
End If
End If
End If
'Fermentación
If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N1_1) And (peso_C2_fermentacion <
valoracionC2_N2_1) Then
    Criterio2_fermentacion = valor_C2_1
Else
    If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N2_1) And (peso_C2_fermentacion <
valoracionC2_N3_1) Then
        Criterio2_fermentacion = valor_C2_2
    Else
        If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N3_1) And (peso_C2_fermentacion <
valoracionC2_N4_1) Then
            Criterio2_fermentacion = valor_C2_3
        Else
            If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N4_1) And (peso_C2_fermentacion
< valoracionC2_N5_1) Then
                Criterio2_fermentacion = valor_C2_4
            Else
                If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N5_1) And
(peso_C2_fermentacion < valoracionC2_N6_2) Then
                    Criterio2_fermentacion = valor_C2_5
                Else
                    If (peso_C2_fermentacion >= valoracionC2_N6_2) Then
                        Criterio2_fermentacion = valor_C2_6
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If
End If
End If
End If

"Escritura del valor del criterio en libro
Hoja2.Cells(4, 3) = Criterio2_calentamiento
Hoja2.Cells(5, 3) = Criterio2_maceracion
Hoja2.Cells(6, 3) = Criterio2_coccion
Hoja2.Cells(7, 3) = Criterio2_enfriamiento
Hoja2.Cells(8, 3) = Criterio2_fermentacion

'Asignar peso a las etapas 3er CRITERIO: con una determinación del peso porcentual de
las etapas (automático en hoja), da peso según valoración
"Dimensionamiento de nuevas variables
Dim lotes_semanales As String
```

Dim semanas_año As Integer
Dim lotes_anuales As String
Dim valor_residual As Integer
Dim cant_lotes_totales_intercambiador As String
Dim cant_lotes_totales_bomba As String
Dim vida_util_intercambiador As String
Dim vida_util_bomba As String

Dim volumen_1_intercambiador As String
Dim volumen_2_intercambiador As String
Dim volumen_3_intercambiador As String
Dim volumen_4_intercambiador As String

Dim depreciacion_vol1_intercambiador_red As String "Solo considera el intercambiador que tiene como medio frio el agua de red

Dim depreciacion_vol2_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_vol3_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_vol4_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_vol1_intercambiador As String "Se considera el combo de intercambiadores: agua de red + glicol
Dim depreciacion_vol2_intercambiador As String
Dim depreciacion_vol3_intercambiador As String
Dim depreciacion_vol4_intercambiador As String
Dim depreciacion_bomba As String

Dim depreciacion_lote_vol1_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_lote_vol2_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_lote_vol3_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_lote_vol4_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_lote_vol1_intercambiador As String "Se evalua la depreciacion por lote segun la depreciacion anual calculada antes

Dim depreciacion_lote_vol2_intercambiador As String
Dim depreciacion_lote_vol3_intercambiador As String
Dim depreciacion_lote_vol4_intercambiador As String
Dim depreciacion_lote_bomba As String

Dim depreciacion_litro_vol1_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_litro_vol2_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_litro_vol3_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red As String
Dim depreciacion_litro_vol1_intercambiador As String
Dim depreciacion_litro_vol2_intercambiador As String
Dim depreciacion_litro_vol3_intercambiador As String
Dim depreciacion_litro_vol4_intercambiador As String
Dim depreciacion_litro_bomba As String

Dim costo_energia_litro As String
Dim costo_energia_mensual As String

```
Dim costo_energia_calentamiento_litro As String
Dim costo_energia_maceracion_litro As String
Dim costo_energia_coccion_litro As String
Dim costo_energia_enfriamiento_litro As String
Dim costo_energia_fermentacion_litro As String
Dim costo_energia_calentamiento_mensual As String
Dim costo_energia_maceracion_mensual As String
Dim costo_energia_coccion_mensual As String
Dim costo_energia_enfriamiento_mensual As String
Dim costo_energia_fermentacion_mensual As String
```

"Lectura de valores desde libro

```
lotes_semanales = TextBox2.Value
vida_util_intercambiador = Hoja3.Cells(30, 18)
vida_util_bomba = Hoja3.Cells(34, 18)
volumen_1_intercambiador = Hoja3.Cells(30, 14)
volumen_2_intercambiador = Hoja3.Cells(31, 14)
volumen_3_intercambiador = Hoja3.Cells(32, 14)
volumen_4_intercambiador = Hoja3.Cells(33, 14)
```

```
costo_energia_mensual = Hoja2.Cells(22, 4)
costo_energia_calentamiento_mensual = Hoja2.Cells(12, 4)
costo_energia_maceracion_mensual = Hoja2.Cells(16, 4)
costo_energia_coccion_mensual = Hoja2.Cells(17, 4)
costo_energia_enfriamiento_mensual = Hoja2.Cells(18, 4)
costo_energia_fermentacion_mensual = Hoja2.Cells(21, 4)
```

```
depreciacion_vol1_intercambiador_red = Hoja3.Cells(40, 22)
depreciacion_vol2_intercambiador_red = Hoja3.Cells(41, 22)
depreciacion_vol3_intercambiador_red = Hoja3.Cells(42, 22)
depreciacion_vol4_intercambiador_red = Hoja3.Cells(43, 22)
depreciacion_vol1_intercambiador = Hoja3.Cells(40, 14)
depreciacion_vol2_intercambiador = Hoja3.Cells(41, 14)
depreciacion_vol3_intercambiador = Hoja3.Cells(42, 14)
depreciacion_vol4_intercambiador = Hoja3.Cells(43, 14)
depreciacion_bomba = Hoja3.Cells(44, 14)
```

"Cálculo de valores

```
semanas_año = 48 'Se consideran 4 semanas por mes
lotes_anuales = lotes_semanales * semanas_año
valor_residual = 0 "Se considera caso pesimista en el que el equipo no tiene valor de
reventa
cant_lotes_totales_intercambiador = lotes_anuales * vida_util_intercambiador
cant_lotes_totales_bomba = lotes_anuales * vida_util_bomba

depreciacion_lote_vol1_intercambiador = depreciacion_vol1_intercambiador /
lotes_anuales
```

$$\text{depreciacion_lote_vol2_intercambiador} = \text{depreciacion_vol2_intercambiador} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol3_intercambiador} = \text{depreciacion_vol3_intercambiador} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol4_intercambiador} = \text{depreciacion_vol4_intercambiador} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol1_intercambiador_red} = \text{depreciacion_vol1_intercambiador_red} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol2_intercambiador_red} = \text{depreciacion_vol2_intercambiador_red} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol3_intercambiador_red} = \text{depreciacion_vol3_intercambiador_red} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_vol4_intercambiador_red} = \text{depreciacion_vol4_intercambiador_red} / \text{lot es_anuales}$$
$$\text{depreciacion_lote_bomba} = \text{depreciacion_bomba} / \text{lot es_anuales}$$

$$\text{depreciacion_litro_vol1_intercambiador_red} = \text{depreciacion_lote_vol1_intercambiador_red} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol2_intercambiador_red} = \text{depreciacion_lote_vol2_intercambiador_red} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol3_intercambiador_red} = \text{depreciacion_lote_vol3_intercambiador_red} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red} = \text{depreciacion_lote_vol4_intercambiador_red} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol1_intercambiador} = \text{depreciacion_lote_vol1_intercambiador} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol2_intercambiador} = \text{depreciacion_lote_vol2_intercambiador} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol3_intercambiador} = \text{depreciacion_lote_vol3_intercambiador} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_vol4_intercambiador} = \text{depreciacion_lote_vol4_intercambiador} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{depreciacion_litro_bomba} = \text{depreciacion_lote_bomba} / (\text{volumen_usuario} * 1000)$$

$$\text{costo_energia_litro} = \text{costo_energia_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{costo_energia_calentamiento_litro} = \text{costo_energia_calentamiento_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{costo_energia_maceracion_litro} = \text{costo_energia_maceracion_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{costo_energia_coccion_litro} = \text{costo_energia_coccion_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{costo_energia_enfriamiento_litro} = \text{costo_energia_enfriamiento_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$
$$\text{costo_energia_fermentacion_litro} = \text{costo_energia_fermentacion_mensual} / (\text{lot es_semanales} * 4 * \text{volumen_usuario} * 1000)$$

"Calculo de costos de adquisición de equipos considerado por litro vs ahorro monetario alcanzado por el ahorro energético. Para los intercambiadores se consideran diferentes volúmenes

```
'Etapa calentamiento: precisa de dos bombas y un intercambiador de calor (agua)
If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_1_intercambiador Then
    costo_depreciacion_calentamiento = (1 * depreciacion_litro_vol1_intercambiador_red)
+ (2 * depreciacion_litro_bomba)
Else
    If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_2_intercambiador And (volumen_usuario *
1000) >= volumen_1_intercambiador Then
        costo_depreciacion_calentamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol2_intercambiador_red) + (2 * depreciacion_litro_bomba)
    Else
        If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_3_intercambiador And (volumen_usuario
* 1000) >= volumen_2_intercambiador Then
            costo_depreciacion_calentamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol3_intercambiador_red) + (2 * depreciacion_litro_bomba)
        Else
            If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_4_intercambiador And
(volumen_usuario * 1000) >= volumen_3_intercambiador Then
                costo_depreciacion_calentamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red) + (2 * depreciacion_litro_bomba)
            Else
                If (volumen_usuario * 1000) > volumen_4_intercambiador Then
                    costo_depreciacion_calentamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red) + (2 * depreciacion_litro_bomba)
                End If
            End If
        End If
    End If
End If
End If
End If
Hoja2.Cells(12, 5) = costo_depreciacion_calentamiento
```

```
'Etapa de cocción: precisa de una bomba y un intercambiador de calor (agua)
If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_1_intercambiador Then
    costo_depreciacion_coccion = (1 * depreciacion_litro_vol1_intercambiador_red) + (1 *
depreciacion_litro_bomba)
Else
    If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_2_intercambiador And (volumen_usuario *
1000) >= volumen_1_intercambiador Then
        costo_depreciacion_coccion = (1 * depreciacion_litro_vol2_intercambiador_red) +
(1 * depreciacion_litro_bomba)
    Else
        If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_3_intercambiador And (volumen_usuario
* 1000) >= volumen_2_intercambiador Then
            costo_depreciacion_coccion = (1 * depreciacion_litro_vol3_intercambiador_red)
+ (1 * depreciacion_litro_bomba)
        Else
```

```
        If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_4_intercambiador And
(volumen_usuario * 1000) >= volumen_3_intercambiador Then
            costo_depreciacion_coccion = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red) + (1 * depreciacion_litro_bomba)
        Else
            If (volumen_usuario * 1000) > volumen_4_intercambiador Then
                costo_depreciacion_coccion = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador_red) + (1 * depreciacion_litro_bomba)
            End If
        End If
    End If
End If
Hoja2.Cells(17, 5) = costo_depreciacion_coccion
```

'Etapa de enfriamiento: precisa de una bomba y un como de intercambiadores de calor (1 de agua y 1 de glicol)

```
    If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_1_intercambiador Then
        costo_depreciacion_enfriamiento = (1 * depreciacion_litro_vol1_intercambiador) + (1 *
depreciacion_litro_bomba)
    Else
        If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_2_intercambiador And (volumen_usuario *
1000) >= volumen_1_intercambiador Then
            costo_depreciacion_enfriamiento = (1 * depreciacion_litro_vol2_intercambiador) +
(1 * depreciacion_litro_bomba)
        Else
            If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_3_intercambiador And (volumen_usuario
* 1000) >= volumen_2_intercambiador Then
                costo_depreciacion_enfriamiento = (1 * depreciacion_litro_vol3_intercambiador)
+ (1 * depreciacion_litro_bomba)
            Else
                If (volumen_usuario * 1000) <= volumen_4_intercambiador And
(volumen_usuario * 1000) >= volumen_3_intercambiador Then
                    costo_depreciacion_enfriamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador) + (1 * depreciacion_litro_bomba)
                Else
                    If (volumen_usuario * 1000) > volumen_4_intercambiador Then
                        costo_depreciacion_enfriamiento = (1 *
depreciacion_litro_vol4_intercambiador) + (1 * depreciacion_litro_bomba)
                    End If
                End If
            End If
        End If
    End If
Hoja2.Cells(18, 5) = costo_depreciacion_enfriamiento
```

"Escritura de resultados en formulario de presentación

```
UserForm3.Label64.Caption = costo_depreciacion_enfriamiento * (volumen_usuario * 1000)
UserForm3.Label65.Caption = costo_depreciacion_coccion * (volumen_usuario * 1000)
UserForm3.Label66.Caption = costo_depreciacion_calentamiento * (volumen_usuario * 1000)
```

"Calculo de ahorro energético y correspondiente ahorro monetario.

```
Dim calor_condensacion_vapor As String
Dim calor_agua_lavado As String
Dim temp_ingreso_intercambiador As String
Dim temp_egreso_intercambiador As String
Dim calor_agua_lavado_original As String
Dim calor_calentamiento_mosto As String
Dim volumen_agua_enfriamiento As String
Dim volumen_agua_intercambiador As String
Dim calor_ahorrado_coccion As String
Dim calor_agua_red As String
Dim valor_energia_estrategia3 As String
```

'Lectura de variables desde el libro

```
volumen_agua_intercambiador = Hoja3.Cells(5, 9) / 1000
temp_ingreso_intercambiador = Hoja3.Cells(4, 7)
temp_egreso_intercambiador = Hoja3.Cells(4, 9)
```

'Cálculo del calor disponible resultante de la condensación del vapor de agua (Energía residual disponible desde la etapa de cocción)

```
calor_condensacion_vapor = (vapor_coccion * volumen_usuario * 1000) * calor_vaporizacion
```

'Cálculo del calor disponible resultante del agua de enfriamiento (Energía residual disponible desde la etapa de enfriamiento)

```
calor_agua_enfriamiento = den_agua * cp_agua * volumen_agua_intercambiador * (temp_egreso_intercambiador - temp_ingreso_intercambiador)
```

'cálculo de energía necesaria para calentar el mosto a temp de cocción (Estrategia 1)

```
calor_calentamiento_mosto = den_mosto * cp_mosto * (temp_f_coccion - temp_3_maceracion) * volumen_coccion
```

'cálculo de energía necesaria para calentar el agua de enfriamiento para utilizarla como agua de lavado (Estrategia 2)

```
calor_agua_lavado = den_agua * (volumen_lote * agua_lavado) * cp_agua * (temp_3_maceracion - temp_egreso_intercambiador)
```

'calculo de energia necesaria para calentar el agua de red (estrategia 3)

```
calor_agua_red = A_calentamiento * volumen_lote
```

'calculo de energia ahorrada en la coccion (Ahorro estrategia 1)

```
calor_ahorrado_coccion = ((A_coccion * volumen_coccion) + C2_coccion) / factor_aprov
```

'calculo de energía ahorrada por no tener que llevar el agua de lavado a 78° (Ahorro estrategia 2)

$\text{calor_agua_lavado_original} = (\text{den_agua} * (\text{volumen_lote} * \text{agua_lavado}) * \text{cp_agua} * \text{temp_3_maceracion}) + (\text{C_calentamiento})$

'El ahorro que permite la estrategia 3 es equivalente al calor de calentamiento

"Escritura de cálculos en libro

Hoja2.Cells(36, 2) = calor_condensacion_vapor * 1

Hoja2.Cells(37, 2) = calor_agua_enfriamiento * 1

Hoja2.Cells(41, 2) = calor_calentamiento_mosto * 1

Hoja2.Cells(42, 2) = calor_agua_lavado * 1

Hoja2.Cells(43, 2) = calor_agua_red * 1

Hoja2.Cells(46, 2) = calor_ahorrado_coccion * 1

Hoja2.Cells(47, 2) = calor_agua_lavado_original * 1

Hoja2.Cells(48, 2) = calor_calentamiento * 1

Hoja2.Cells(41, 3) = (calor_calentamiento_mosto * 1) / poder_calorifico_gas

Hoja2.Cells(42, 3) = (calor_agua_lavado * 1) / poder_calorifico_gas

Hoja2.Cells(43, 3) = (calor_agua_red * 1) / poder_calorifico_gas

Hoja2.Cells(41, 4) = (calor_ahorrado_coccion * 1) / poder_calorifico_gas

Hoja2.Cells(42, 4) = (calor_agua_lavado_original * 1) / poder_calorifico_gas

Hoja2.Cells(43, 4) = (calor_calentamiento * 1) / poder_calorifico_gas

"Componente fija de los costos

'Definicion de variables

Dim costo_fijo_gas As String

Dim componente_fija_estrategia1 As String

Dim componente_fija_estrategia2 As String

Dim componente_fija_estrategia3 As String

Dim costo_calentamiento_lote As String

Dim costo_maceracion_lote As String

Dim costo_coccion_lote As String

Dim costo_enfriamiento_lote As String

Dim costo_fermentacion_lote As String

Dim costo_calentamiento_mes As String

Dim costo_maceracion_mes As String

Dim costo_coccion_mes As String

Dim costo_enfriamiento_mes As String

Dim costo_fermentacion_mes As String

'Lectura de valores desde libro

costo_fijo_gas = Hoja4.Cells(3, 2)

costo_variable_gas = Hoja4.Cells(3, 3)

'Costos originales del consumo energético por lote