

GLOSARIO DE TERMINOS

Alcohol etanol: Un compuesto orgánico con la fórmula $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$, que es el producto final de la fermentación alcohólica.

Azúcar: Un carbohidrato simple que se caracteriza por su sabor dulce y su solubilidad en agua. Los azúcares más comunes son la glucosa, la fructosa y la sacarosa.

Bagazo: El residuo fibroso que queda después de la extracción del jugo de la caña de azúcar.

Caña de azúcar: Una planta tropical que se cultiva por su jugo rico en sacarosa.

Enzima: Una proteína que cataliza una reacción química específica.

Etanol: Un alcohol simple con la fórmula $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$.

Fermentación: Un proceso metabólico anaeróbico en el que los microorganismos convierten azúcares en etanol y dióxido de carbono.

Glucosa: Un monosacárido simple con la fórmula $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$, que es la principal fuente de energía para los organismos vivos.

Levadura: Un hongo unicelular que se utiliza comúnmente en la fermentación alcohólica.

Mosto: Es el zumo o jugo obtenido de la uva recién exprimida, antes de que inicie el proceso de fermentación alcohólica. Es la base para la elaboración del vino.

pH: Una medida de la acidez o alcalinidad de una solución.

Proceso: Una serie de pasos que se llevan a cabo para lograr un objetivo específico.

Reacción: Un proceso químico en el que se transforman los reactivos en productos.

Sacarosa: Un disacárido compuesto por una unidad de glucosa y una unidad de fructosa.

Sustrato: La molécula que se transforma en una reacción enzimática.

Temperatura: Una medida de la energía cinética promedio de las partículas en una sustancia.

INTRODUCCION

ANTECEDENTES

La fermentación alcohólica se constituyó en uno de los problemas más enigmáticos para los alquimistas. Durante los siglos XVIII y XIX, los químicos se empeñaron en abordar el fenómeno de la fermentación alcohólica a través de la formulación de reacciones químicas, aplicando los métodos que habían demostrado ser eficaces en el estudio de otros fenómenos naturales. Químicos destacados como Lavoisier (1743-1794), Gay-Lussac (1778-1850), Thénard (1777-1857) y Dumas (1800-1884) investigaron la conversión de la caña de azúcar en alcohol utilizando métodos cuantitativos. Lavoisier propuso una formulación simplificada del proceso que parecía revelar la esencia del fenómeno, excluyendo la participación de la levadura. Los químicos contemporáneos asumían que la levadura era un agente constante y probablemente iniciador de la fermentación. Sin embargo, aunque se pensaba que la levadura iniciaba la reacción, su participación activa en el proceso no era evidente. Berzelius (1779-1848) denominó a este fenómeno inusual "catálisis" y definió el término "fermento" como un ejemplo de actividad catalítica. Posteriormente, Schwann (1810-1882) descubrió que la pepsina era la sustancia responsable de la digestión albuminosa en el estómago, y la consideró como alineada con la definición de catalizadores propuesta por Berzelius, abarcando tanto minerales como sustancias orgánicas y materia viva. Liebig (1803-1873) criticó el uso de los términos "catalizador" y "pepsina", considerándolos conceptos imprecisos. En 1837, Cagniard de La Tour (1777-1859), Schwann y Kützing (1807-1893) identificaron de manera independiente la levadura como un organismo vivo que se alimenta durante la fermentación del azúcar. En 1839, a solicitud de la Academia de Ciencias de Francia, Turpin (1772-1853) confirmó en París las observaciones microscópicas realizadas por Cagniard de La Tour. A pesar de esto, Berzelius, Liebig y Wöhler (1880-1882) rechazaron la visión vitalista y, en ese mismo año, Liebig y Wöhler publicaron un artículo que ridiculizaba la noción orgánica de la levadura. En 1858, Traube (1826-1894) sostuvo que todas las fermentaciones producidas por organismos vivos eran el resultado de reacciones químicas y no de una fuerza vital.

La fermentación alcohólica representó un enigma que cautivó a científicos a lo largo de los siglos. Alquimistas y químicos de los siglos XVIII y XIX, como Lavoisier, Gay-Lussac y Berzelius, intentaron desentrañar este proceso a través de reacciones químicas. Sin embargo, el descubrimiento del papel crucial de la levadura introdujo una dimensión biológica que desafió las explicaciones meramente químicas.

Este hallazgo generó un intenso debate entre los científicos. Por un lado, los defensores del vitalismo sostenían que la fermentación era un proceso vital inherente a los organismos vivos y no reducible a simples reacciones químicas. Por otro lado, los partidarios del mecanicismo buscaban explicar la fermentación exclusivamente a través de leyes químicas y físicas, sin recurrir a fuerzas vitales

misteriosas.

Investigadores como Cagniard de La Tour, Schwann y Kützing fueron pioneros en identificar la levadura como un organismo vivo esencial para la fermentación. Sin embargo, sus observaciones fueron inicialmente rechazadas por figuras influyentes como Berzelius y Liebig, quienes mantenían una visión más reduccionista del fenómeno. Estos científicos prominentes argumentaron que la levadura simplemente iniciaba la fermentación, pero no participaba activamente en ella.

La controversia entre el vitalismo y el mecanicismo refleja la evolución del pensamiento científico y la dificultad de reconciliar las observaciones experimentales con las teorías establecidas. A medida que avanzaba la investigación, se acumulaban más evidencias que respaldaban la idea de que la fermentación era un proceso biológico complejo mediado por la actividad de microorganismos.

La resolución de este debate tuvo un impacto profundo en el desarrollo de la bioquímica y la microbiología. La comprensión del papel de las levaduras en la fermentación facilitó avances significativos en la producción de alimentos, bebidas y productos químicos, y sentó las bases para el desarrollo de la teoría microbiana de las enfermedades, una de las contribuciones más importantes de la ciencia a la salud pública.

La Fermentación en la Industria del Azúcar y el Alcohol

La fermentación alcohólica, proceso biológico esencial en la industria del azúcar y el alcohol, que como vimos ha capturado la atención de científicos y expertos industriales debido a su impacto significativo en la producción de bebidas alcohólicas y bioetanol. Este proceso, mediado predominantemente por levaduras, implica la conversión de azúcares en etanol y dióxido de carbono. Las levaduras, especialmente *Saccharomyces cerevisiae*, juegan un papel central en la fermentación alcohólica, ya que son capaces de transformar los azúcares presentes en materias primas como la melaza, mieles y jugo de caña de azúcar que es fundamental para la producción de bioetanol, un combustible renovable que ha ganado relevancia en el contexto de la sostenibilidad energética.

Desde una perspectiva científica e industrial, la fermentación alcohólica ha sido objeto de intensos estudios y desarrollos tecnológicos. Los métodos utilizados para optimizar este proceso han evolucionado significativamente desde los primeros descubrimientos de los químicos y alquimistas del siglo XVIII y XIX, quienes intentaron desentrañar los mecanismos de la fermentación sin una comprensión completa del papel de las levaduras. A

medida que se avanzó en el conocimiento de la microbiología, se descubrió que las levaduras no solo iniciaban, sino que eran esenciales para el proceso fermentativo. Este entendimiento ha permitido a la industria mejorar las técnicas de fermentación, aumentando la eficiencia y el rendimiento en la producción de alcohol.

La fermentación alcohólica, impulsada por la acción de las levaduras, se ha convertido en un proceso altamente sofisticado que involucra la optimización de condiciones como la temperatura, el pH y la concentración de azúcares para maximizar la producción de etanol. La evolución de la tecnología en este campo ha llevado al desarrollo de sistemas de fermentación controlados, que permiten una mayor precisión en la gestión del proceso y una producción más eficiente y sostenible. En el ámbito industrial, la fermentación alcohólica se ha integrado en un contexto más amplio de biotecnología, donde la manipulación genética de levaduras y el uso de técnicas avanzadas de fermentación han permitido la mejora continua del rendimiento y la calidad del producto final.

Perspectiva Global

A nivel global, la fermentación alcohólica ha evolucionado considerablemente, con un impacto significativo en la industria del azúcar y el alcohol. En las últimas décadas, la producción de bioetanol ha experimentado un crecimiento notable, impulsado por la búsqueda de alternativas sostenibles a los combustibles fósiles y la creciente demanda de productos biológicos (Pimentel et al., 2008). La fermentación alcohólica no solo es crucial para la elaboración de bebidas alcohólicas, como el whisky, el vino y la cerveza, sino también para la producción de bioetanol, un biocombustible que ha ganado importancia en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (Dinan et al., 2012).

En 2023, la producción global de bioetanol alcanzó aproximadamente 113 mil millones de litros, con un crecimiento sostenido en los últimos años debido a la expansión de políticas energéticas que promueven el uso de biocombustibles (International Energy Agency, 2023). Este crecimiento ha sido acompañado por mejoras en las tecnologías de fermentación, como la optimización de cepas de levaduras y la implementación de procesos de fermentación continua, que han aumentado la eficiencia y reducido los costos operativos (Klemm et al., 2004).

Perspectiva Internacional

Brasil se destaca a nivel internacional como el principal productor y exportador de bioetanol, gracias a su infraestructura avanzada y políticas gubernamentales favorables. La industria azucarera brasileña ha experimentado una expansión significativa, con la producción de bioetanol aumentando de 26 mil millones de litros en 2015 a más de 31 mil millones de litros en 2023 (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis [ANP], 2023). Este crecimiento ha sido respaldado por el Programa Nacional de Biocombustibles, que fomenta la inversión en tecnología y la modernización de las instalaciones de producción (Moraes et al., 2020).

Brasil ha logrado una notable eficiencia en la producción de bioetanol debido a la utilización de técnicas avanzadas de fermentación y a la implementación de sistemas de cogeneración de energía que optimizan el uso de residuos agrícolas (Santos et al., 2019). El país también ha establecido una red de distribución eficiente que facilita la exportación de bioetanol a mercados internacionales, consolidándose como un líder global en la producción de biocombustibles (World Ethanol & Biofuels Report, 2022).

Perspectiva Nacional

En Bolivia, la industria de fermentación está en un proceso de expansión y modernización. La producción de alcohol a partir de caña de azúcar, especialmente en las regiones del trópico, ha experimentado un incremento notable. En 2022, Bolivia produjo aproximadamente 1.2 millones de litros de alcohol, un aumento respecto a los 900 mil litros registrados en 2017 (Ministerio de Desarrollo Productivo y Economía Plural, 2023). Este incremento refleja la creciente inversión en infraestructura y tecnología, así como el impulso del gobierno para promover la industria azucarera local.

Las plantas de producción de alcohol en Bolivia están adoptando nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia de la fermentación y la calidad del producto. La modernización de los procesos incluye la implementación de sistemas de control de temperatura avanzados y la optimización de las condiciones de fermentación para maximizar la conversión de azúcares en etanol (Gutiérrez et al., 2021). Además, Bolivia está explorando oportunidades para

exportar alcohol a mercados vecinos como Perú y Brasil, lo que podría impulsar aún más el crecimiento de la industria en el país (Observatorio de Comercio Internacional, 2023).

Asimismo; el 14 de marzo, el Órgano Ejecutivo aprobó el Decreto Supremo 5135, que establece la sustitución progresiva de la importación de insumos, aditivos y diésel oil mediante la incorporación de mezclas de biodiésel y alcohol anhidro en los combustibles fósiles, con un límite de hasta el 25%. Esta medida tiene como objetivo reducir la dependencia de las importaciones y promover el uso de biocombustibles en el país. Sin embargo, la implementación de esta medida no será inmediata y se espera que entre en vigencia a partir del año 2024.

Tabla 1 Producción de Alcohol Etanol a diferentes niveles.

Producción de Alcohol Etanol a Nivel Mundial:

Estados Unidos: En 2020, el consumo de etanol para combustible alcanzó aproximadamente 14.08 mil millones de galones. El etanol representa alrededor del 10% de la gasolina convencional en Estados Unidos.

Brasil: En 2020, Brasil produjo alrededor de 35.8 mil millones de litros de etanol, de los cuales aproximadamente el 66% se destinó al mercado de combustibles.

Unión Europea: En 2019, se consumieron alrededor de 5.7 mil millones de litros de etanol en la UE, y aproximadamente el 80% se utilizó como biocombustible.

Producción de Alcohol Etanol en Bolivia:

Cantidades:

Producción 2023: 520 millones de litros (aproximado)

490 millones de litros vendidos a YPF hasta

Producción de Alcohol Etanol en Sudamérica:

Brasil: Es líder en la producción y consumo de etanol en Sudamérica. En 2020, produjo alrededor de 35.8 mil millones de litros de etanol, consolidándose como el principal productor y consumidor a nivel mundial.

Argentina: En 2020, se produjeron alrededor de 2.3 mil millones de litros de etanol en Argentina, principalmente para uso en mezclas con gasolina.

Datos relevantes

La producción de etanol en Bolivia ha aumentado significativamente en los últimos años, con un crecimiento del 48% entre 2022 y 2023.

Se espera que la producción continúe

octubre de 2023.

50% exportado.

Producción 2022: 135,9 millones de litros.

Meta 2024: 220 millones de litros.

Aumento:

2023: 48% más que en 2022.

Detalles Adicionales:

Se espera mezclar 380 millones de litros de gasolina con etanol para el 2025 (requiriendo 700 millones de litros de producción).

La producción de etanol genera un impacto positivo en la economía del país, ahorrando divisas y generando empleo

creciendo en los próximos años, impulsada por la demanda interna y la meta del gobierno de mezclar etanol con gasolina.

El precio por litro de etanol que los ingenios venden a YPFB en Bolivia es **Bs 4,94** (bolivianos).

Los ingenios azucareros habían solicitado un aumento del precio a Bs 5,40 por litro, pero YPFB lo rechazó argumentando que el precio actual es superior al precio internacional del etanol, que se encuentra en \$us 0,66 el litro.

Fuente: (elaboración propia)

OBJETIVOS

Objetivo General

- Optimizar el proceso de fermentación para la obtención de etanol en el ingenio azucarero Roberto Barbery Paz; UNAGRO.

Objetivos Específicos

- Realizar la caracterización fisicoquímica de la melaza como materia prima.
- Diagnosticar las diferentes posibilidades del proceso productivo.
- Desarrollar las diferentes posibilidades del proceso productivo estableciendo las condiciones operativas respectivas de la fermentación.
- Determinar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del mosto fermentado.
- Evaluar el rendimiento de producción de mosto obtenido.
- Realizar un análisis de los resultados obtenidos.
- Establecer conclusiones y recomendaciones.

JUSTIFICACION DEL PROYECTO

Justificación Tecnológica:

Implementar sistemas de control y monitoreo de fermentación de vanguardia, aprovechando herramientas de análisis de datos, para optimizar las condiciones de fermentación y maximizar el rendimiento en el proceso de fermentación para la obtención de etanol.

Emplear biotecnologías y genómica avanzadas para seleccionar y desarrollar cepas de levadura de alto rendimiento y enzimas que mejoren la eficiencia de la fermentación, la calidad del producto y la robustez del proceso.

Justificación Económica:

Optimizar el proceso de fermentación para reducir significativamente los costos de producción, incluyendo materias primas, energía y mano de obra, lo que conduce a una mayor rentabilidad y sostenibilidad financiera.

Maximizar el rendimiento de etanol por unidad de materia prima de melaza, lo que se traduce en una mayor generación de ingresos y mejores retornos económicos.

Mejorar la competitividad del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz UNAGRO en el mercado de bioetanol, atrayendo nuevos clientes, expandiendo la participación de mercado y impulsando el crecimiento económico en la región.

Justificación Social:

Contribuir al desarrollo social y económico de Mineros, Santa Cruz de la Sierra, creando nuevas oportunidades de empleo, promoviendo negocios locales y apoyando iniciativas comunitarias.

Demostrar el compromiso del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz UNAGRO con la responsabilidad social al participar activamente con la comunidad, abordar las necesidades locales y promover prácticas sostenibles.

Justificación Ambiental:

Optimizar el proceso de fermentación para minimizar el consumo de recursos naturales, como agua y energía, reduciendo la huella ambiental de la producción de etanol.

Implementar métodos de producción más limpios, estrategias de reducción de residuos y tecnologías de control de emisiones para minimizar el impacto ambiental del proceso de fermentación.

Contribuir a la transición hacia un futuro energético más sostenible al producir bioetanol de manera responsable con el medio ambiente, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigando el cambio climático.

Justificación Personal:

Me motiva la búsqueda de soluciones a problemas concretos que enfrenta la industria del etanol en Bolivia. Considero que mi trabajo puede tener un impacto tangible en la mejora de los procesos productivos y la sostenibilidad de la industria.

A lo largo de mi formación universitaria he adquirido un conjunto de conocimientos y técnicas en el campo de la ingeniería química. Este trabajo de tesis me permitirá poner en práctica estos conocimientos y desarrollar habilidades de investigación y análisis.

Demostrar mi formación y experiencia: Mi experiencia laboral en el ámbito de la industria del etanol me ha permitido adquirir conocimientos prácticos y una comprensión profunda de

los desafíos que enfrenta este sector. Este trabajo de tesis será una oportunidad para demostrar mi capacidad como ingeniero químico y mi potencial para contribuir al desarrollo de la industria.

CAPITULO I

DESCRIPCION DE LA PLANTA

1.1 DESCRIPCION DE LA PLANTA

1.1.1 Definición De La Materia Prima

1.1.1.1 Melaza

La melaza, un subproducto viscoso y oscuro de la producción de azúcar, es un líquido rico en azúcares residuales que se obtiene tras la cristalización sucesiva de la sacarosa (White, 2008). Según (Pérez, 2012). La producción de melaza es un proceso inherente a la fabricación del azúcar. Tras la extracción del jugo de la caña, este se somete a una serie de procesos de purificación y concentración. Durante estas etapas, se forman cristales de azúcar que son separados del líquido residual, el cual se enriquece progresivamente en azúcares no cristalizables y otros compuestos. Este líquido residual es la melaza (Boitel, 2015).

Las propiedades fisicoquímicas de la melaza son determinantes para su valorización. Además de su alta viscosidad y densidad, destaca su color oscuro, debido a la presencia de compuestos fenólicos y melanoidinas (Hernández, 2018). Su pH ligeramente ácido y su contenido variable en humedad influyen en su estabilidad y en su comportamiento durante los procesos industriales. Según (Ramos, 2017), la composición química de la melaza, rica en azúcares reductores y no reductores, minerales y compuestos nitrogenados, la convierte en un sustrato ideal para la fermentación microbiana.

Valores estimados de la composición cuantitativa (porcentaje en peso) de la melaza:

- **Sacarosa:** La sacarosa en la melaza de caña de azúcar suele estar en el rango del 45% al 55% en peso.
- **Azúcares reductores:** Los azúcares reductores, como glucosa y fructosa, pueden variar, pero su contenido total generalmente está en el rango del 15% al 25% en peso.
- **Minerales:** Los minerales, como hierro, calcio, potasio y magnesio, pueden estar presentes en cantidades que representan aproximadamente del 5% al 10% en peso.
- **Nitrógeno total:** El contenido de nitrógeno total, que incluye proteínas y aminoácidos, suele estar en el rango del 1% al 3% en peso.

- **Otros compuestos:** Los otros compuestos, como ácidos orgánicos y compuestos aromáticos, pueden variar en su concentración y, a menudo, representan menos del 5% en peso.

Es importante destacar que estas cifras son aproximadas y pueden variar en función de varios factores, como la calidad de la caña de azúcar, el proceso de extracción y el grado de refinado de la melaza.

Valores óptimos de principales parámetros de la melaza:

- **pH:** El pH óptimo para la melaza generalmente se encuentra en el rango de 5.5 a 6.5. Este rango es ligeramente ácido a neutro y es adecuado para preservar la estabilidad de la melaza.
- **Brix:** El Brix se refiere a la concentración de azúcares solubles en la melaza. Los valores óptimos de Brix pueden variar según la aplicación, pero típicamente se encuentran en un rango de 75 a 85 grados Brix. Esta medida indica la concentración de azúcares en la melaza.
- **Densidad:** La densidad de la melaza puede variar según su concentración de sólidos. En términos generales, la densidad de la melaza debe ser mayor que la del agua, lo que es típico para soluciones azucaradas concentradas. La densidad específica variará según el contenido de sólidos, pero suele estar en el rango de 1.4 a 1.6 g/cm³.
- **Sacarosa:** La melaza generalmente contiene una cantidad significativa de sacarosa, que suele estar en el rango del 40% al 60% en peso.
- **Glucosa y fructosa:** Los azúcares reductores, como la glucosa y la fructosa, suelen estar presentes en cantidades que representan aproximadamente del 15% al 25% en peso. Sin embargo, estos valores pueden variar dependiendo de la melaza específica.
- **Azúcares no fermentescibles:** El contenido de azúcares no fermentescibles, que incluye compuestos como los azúcares reductores y otros carbohidratos que no son fácilmente fermentados por levaduras, es deseable en algunos casos para dar a la melaza ciertas propiedades. Estos pueden representar alrededor del 5% en peso o más.

1.1.1.2 Jugo de caña

El jugo de caña de azúcar, un líquido naturalmente dulce extraído de la caña de azúcar (*Saccharum officinarum*), este jugo se obtiene mediante la extracción del líquido dulce contenido en los tallos de la caña de azúcar, y su composición puede variar según la variedad de caña, el clima y el proceso de extracción.

El jugo de caña es una fuente natural de azúcares, principalmente sacarosa, pero también contiene glucosa y fructosa. Además, es rico en minerales como calcio, hierro, potasio y magnesio, así como en vitaminas del complejo B (Pérez, 2012). Su sabor dulce y su aroma característico lo hacen muy apreciado en diversas culturas.

Características de la caña de azúcar:

- **Sabor dulce:** El jugo de caña de azúcar es conocido por su sabor dulce y refrescante. La dulzura es proporcionada principalmente por la sacarosa, y el contenido de sacarosa en el jugo puede estar en el rango del 15% al 20% en peso.
- **Azúcares reductores:** Además de la sacarosa, el jugo de caña de azúcar también contiene azúcares reductores, como glucosa y fructosa, que pueden variar en el rango del 1% al 5% en peso. Estos azúcares contribuyen a su sabor dulce y se consideran más fácilmente fermentables.
- **Contenido de fibra:** El jugo de caña de azúcar puede contener una cantidad apreciable de fibra insoluble en suspensión, que a menudo se retira antes de su consumo. La concentración de fibra en el jugo crudo puede variar, pero suele estar en el rango del 1% al 3% en peso.
- **Contenido de agua:** El contenido de agua en el jugo de caña de azúcar puede variar, pero suele ser alto, representando aproximadamente del 75% al 80% en peso del jugo.
- **Otros compuestos:** El jugo de caña de azúcar también puede contener compuestos aromáticos y minerales, que pueden variar según la variedad de caña y las condiciones de crecimiento.

Valores óptimos de principales parámetros del jugo:

- **pH:** El pH del jugo de caña de azúcar suele estar en el rango ligeramente ácido a neutro, típicamente alrededor de 5.5 a 6.5. Este rango de pH es adecuado para

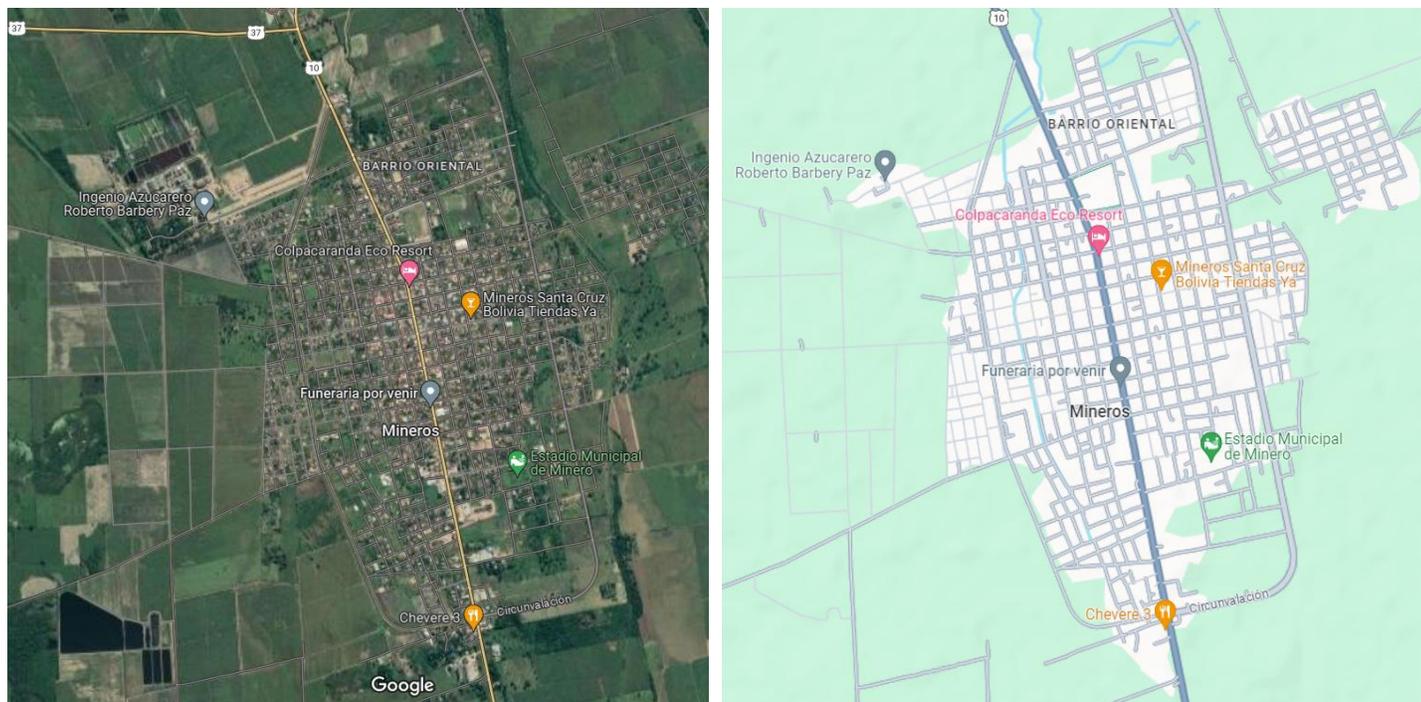
mantener la estabilidad del jugo y prevenir la proliferación de microorganismos no deseados.

- **Brix:** El Brix es una medida de la concentración de azúcares solubles en el jugo. En el caso del jugo de caña de azúcar, el Brix puede variar, pero generalmente se encuentra en el rango de 15° a 20° Brix. Esto indica que el jugo es relativamente rico en azúcares, lo que le confiere su sabor dulce característico.
- **Densidad:** La densidad del jugo de caña de azúcar varía según su concentración de sólidos. La densidad específica puede estar en el rango de 1.03 a 1.10 g/cm³, dependiendo de la concentración de azúcares en el jugo. Una densidad mayor indica una mayor concentración de sólidos solubles en el jugo.

1.1.2 Localización De La Planta

Imágenes 1 – 1,2 Ubicación y vista satelital del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz

UNAGRO



Fuente: Google maps

Ubicación Técnica del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz UNAGRO:

El Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz UNAGRO se encuentra situado en las coordenadas geográficas 17°41'12.0"S 63°20'30.0"W, en el municipio de Mineros, provincia Obispo Santistevan, departamento de Santa Cruz, Bolivia.

Descripción Geográfica Detallada:

- **Latitud:** 17°41'12.0" Sur
- **Longitud:** 63°20'30.0" Oeste
- **Altitud:** 300 metros sobre el nivel del mar
- **Región:** Llanos Orientales de Bolivia
- **Bioma:** Bosque seco tropical
- **Clima:** Cálido y húmedo, con una precipitación anual promedio de 1.500 mm

Referencias Geográficas:

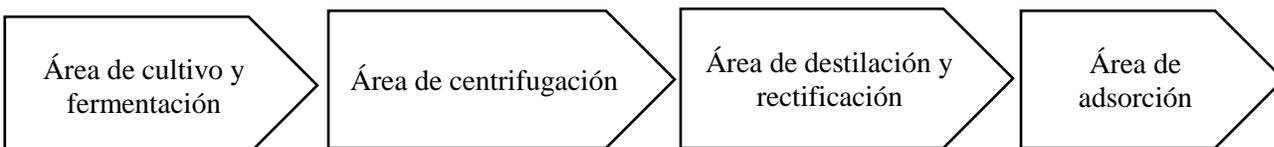
- A 22 kilómetros al norte de la ciudad de Montero
- A 100 kilómetros al noreste de la ciudad de Santa Cruz de la Sierra
- A orillas del río Ichilo

1.1.3 Distribución De La Planta

El ingenio Roberto Barbery paz, cuenta con el área de destilería separada de fabrica central, lugar donde se realiza la producción del azúcar, melaza y jugo de caña; siendo estos últimos dos materias primas que se dirige hacia el área de destilería para la producción de etanol.

Dentro del área de destilería, existen diferentes zonas de trabajo como se muestra en el siguiente diagrama.

Diagrama 1 -1. Distribución de la planta



Fuente: (elaboración propia)

1.1.3.1 Área de cultivo y fermentación

En esta área se desempeña un papel crucial en el proceso de producción de alcohol, realizando una supervisión y administración en toda la fase de fermentación; debe ser eficiente y conforme a estándares de calidad. Se debe tener riguroso control en todos los aspectos de la fermentación, desde la preparación de materias primas hasta la fermentación propiamente dicha, garantizando que se sigan los procedimientos y los tiempos adecuados.

1.1.3.2 Área de centrifugación

Este rol se centra en la operación y control de centrifugadoras industriales para separar el mosto en vino y crema de levadura para su posterior reutilización.

El desempeño de esta función implica una serie de tareas clave que garantizan un proceso de separación óptimo y eficiente. Los deberes incluyen la configuración y el funcionamiento de las centrifugadoras, así como la monitorización constante de su desempeño durante el

proceso. La operación de estas máquinas requiere un alto grado de precisión y conocimiento técnico para asegurar que el mosto y la crema de levadura se separen adecuadamente.

1.1.3.3 Área de destilación y rectificación

En este sector se supervisa y opera de manera inmediata todos los componentes automatizados y manuales que componen el proceso de producción. Esto se lleva a cabo en una sofisticada sala de control, que actúa como el núcleo central del proceso. Desde esta sala de control, el operador tiene la capacidad de realizar ajustes y modificaciones en tiempo real según las necesidades del proceso.

Este profesional está a cargo de monitorear con atención las variables clave del proceso de destilación, garantizando que se mantengan dentro de los rangos de funcionamiento óptimos. Además, es capaz de intervenir de inmediato para corregir cualquier desviación que pueda afectar la calidad del producto final. Su habilidad en la operación de esta tecnología avanzada es fundamental para garantizar la eficiencia y el cumplimiento de los estándares de calidad en la producción.

1.1.3.4 Área de adsorción

En esta área se le da un doble tratamiento al alcohol previamente obtenido, este proceso de adsorción se da para purificar alcohol de 95°GL a 99.5°GL se basa en el uso de zeolitas, materiales cristalinos porosos que actúan como tamices moleculares. El alcohol impuro se introduce en un lecho de zeolita, donde las moléculas de agua, debido a su polaridad, son selectivamente adsorbidas en los poros de la zeolita, mientras que el alcohol, menos polar, pasa a través del lecho con una concentración aumentada. Cuando la zeolita se satura, se regenera mediante la aplicación de calor o la reducción de presión, liberando el agua adsorbida. Para un proceso continuo, se emplean múltiples lechos, alternando entre adsorción y regeneración. La eficiencia del proceso depende del tipo de zeolita, las condiciones de operación (temperatura, presión, caudal) y el mantenimiento adecuado de la zeolita

1.2 DESCRIPCIÓN DE LOS PRINCIPALES PROCESOS

1.2.1 Fermentación

La fermentación es un proceso biológico crucial en la industria azucarera que se basa en la conversión de azúcares, en particular la sacarosa, en productos finales útiles, como etanol y dióxido de carbono, mediante la acción de microorganismos; en este caso las levaduras. Este proceso desempeña un papel fundamental en la producción de una amplia variedad de productos, desde azúcar hasta alcohol y productos químicos industriales.

La fermentación alcohólica se controla cuidadosamente para optimizar la producción de etanol, que puede tener aplicaciones diversas, como la producción de bebidas alcohólicas, combustibles, productos químicos y más. Para ello, se ajustan factores como la concentración de sacarosa en el sustrato, la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes para las levaduras.

1.2.1.1 Fermentación microbiana

La fermentación microbiana es un proceso biológico que implica la conversión de sustratos orgánicos en productos finales, como ácidos, alcoholes o gases, a través de la actividad metabólica de microorganismos, como bacterias, levaduras u hongos. Este proceso desempeña un papel fundamental en diversas industrias, incluida la industria azucarera, donde se utiliza para producir productos como etanol, ácidos orgánicos y otros compuestos.

Existen varios tipos de fermentación microbiana, cada uno de los cuales está asociado con diferentes microorganismos y condiciones de operación. Algunos de los tipos de fermentación microbiana más comunes incluyen:

- **Fermentación alcohólica:** En este proceso, las levaduras, principalmente de la especie *Saccharomyces cerevisiae*, convierten azúcares, como la sacarosa de la caña de azúcar, en etanol y dióxido de carbono. Es el proceso central en la producción de bebidas alcohólicas y biocombustibles como el etanol.
- **Fermentación láctica:** En esta fermentación, las bacterias lácticas, como *Lactobacillus* y *Streptococcus*, convierten los azúcares en ácido láctico. Este proceso

es esencial en la producción de alimentos fermentados como el yogur, el queso y el chucrut, y también se utiliza en la fermentación de vegetales y productos cárnicos.

- **Fermentación acética:** Las bacterias acéticas, como Acetobacter, transforman los productos intermedios de fermentación (como el alcohol) en ácido acético (vinagre). Este proceso se utiliza en la producción de vinagre y otros productos ácidos.

Las características comunes de la fermentación microbiana incluyen:

- **Conversión de sustratos:** Los microorganismos consumen sustratos, como azúcares o compuestos orgánicos, como fuente de energía y carbono, transformándolos en productos finales específicos.
- **Generación de energía:** La fermentación es una vía metabólica que permite a los microorganismos generar energía en ausencia de oxígeno (anaerobia). A diferencia de la respiración celular, que utiliza oxígeno, la fermentación no produce tanta energía, pero es esencial en ambientes anaeróbicos.
- **Producción de productos finales característicos:** Cada tipo de fermentación está asociado con la producción de productos finales característicos, como etanol, ácidos orgánicos o gases. Estos productos pueden tener aplicaciones en diversas industrias, desde la alimentaria hasta la química y la farmacéutica.

1.2.2 Conversión de azúcar en etanol y sus reacciones químicas involucradas:

La producción de etanol de caña de azúcar implica dos procesos principales:

El proceso de conversión de azúcar en etanol es sin duda una serie de reacciones complejas en la que se ven involucradas diferentes moléculas en los pasos que se describen a continuación:

1.2.2.1 Desdoblamiento de la sacarosa:

La enzima sacarasa cataliza la hidrólisis de la sacarosa, liberando una molécula de glucosa y otra de fructosa.



La sacarosa, el azúcar principal de la caña de azúcar, es un disacárido compuesto por una

molécula de glucosa y una de fructosa unidas por un enlace glucosídico. Para que las levaduras puedan fermentar la sacarosa y producir etanol, primero debe descomponerse en sus dos azúcares componentes: glucosa y fructosa. Este proceso, conocido como **hidrólisis de la sacarosa**, es catalizado por una enzima específica llamada **sacarasa** o **invertasa**.

La Hidrolisis de la Sacarosa o Sacarificación Enzimática, se da en una pequeña pero importante serie de pasos que se describen a continuación:

a. Reconocimiento y unión: La molécula de sacarosa se acerca a la enzima sacarasa, estableciendo interacciones débiles con su sitio activo. Estas interacciones, como enlaces de hidrógeno y fuerzas de Van der Waals, permiten que la sacarosa se posicione correctamente para la reacción.

b. Activación del sustrato: Una vez unida, la sacarosa sufre una ligera distorsión en su estructura inducida por la enzima. Esta distorsión debilita el enlace glucosídico que une la glucosa y la fructosa, preparándolas para la ruptura.

c. Ataque nucleofílico: Una molécula de agua, actuando como nucleófilo, ataca el enlace glucosídico. El oxígeno del agua se une al átomo de carbono anomérico de la glucosa, mientras que el protón del agua se une al átomo de oxígeno del enlace glucosídico.

d. Ruptura del enlace y liberación de productos: El enlace glucosídico se rompe, liberando una molécula de glucosa y otra de fructosa. La enzima libera los productos, quedando libre para catalizar la hidrólisis de otra molécula de sacarosa.

La glucosa, ahora libre, se convierte en el protagonista principal de la siguiente etapa: LA GLUCÓLISIS.

1.2.2.2 Glucólisis: El corazón de la fermentación:

La glucólisis es una serie de 10 reacciones enzimáticas que ocurren en el citoplasma celular. A lo largo de este proceso, una molécula de glucosa se descompone en dos moléculas de piruvato, liberando energía en forma de ATP y NADH.

1.2.2.2.1 Ecuaciones de la glucólisis:

a) Etapa preparatoria:

- $\text{Glucosa} + \text{ATP} \rightarrow \text{Glucosa-6-fosfato} + \text{ADP}$
- $\text{Glucosa-6-fosfato} \rightarrow \text{Fructosa-6-fosfato}$

- Fructosa-6-fosfato → Fructosa-1,6-bisfosfato
- Fructosa-1,6-bisfosfato → Fructosa-2,6-bisfosfato + Gliceraldehído-3-fosfato
- Fructosa-2,6-bisfosfato + H₂O → Fructosa-6-fosfato + Pi

b) Etapa de división:

- Gliceraldehído-3-fosfato → 1,3-Bisfosfoglicerato + NADH + H⁺
- 1,3-Bisfosfoglicerato → 3-fosfoglicerato + ATP
- 3-fosfoglicerato → 2-fosfoglicerato
- 2-fosfoglicerato → Fosfoenolpiruvato + H₂O

c) Etapa de recuperación de energía:

- Fosfoenolpiruvato → Piruvato + ATP

1.2.2.2.2 Generación de ATP y NADH:

- La glucólisis produce **2 moléculas de ATP** y **2 moléculas de NADH** por cada molécula de glucosa.
- El ATP es la "moneda de energía" de la célula, utilizada para impulsar diversos procesos celulares.
- El NADH es una coenzima rica en energía que será utilizada en la siguiente etapa.

1.2.2.2.3 Del piruvato al acetaldehído:

- El piruvato se convierte en acetaldehído a través de la **descarboxilación oxidativa del piruvato**, liberando una molécula de CO₂ y generando **1 NADH**:



1.2.2.2.4 La etapa final: La formación de etanol

- El acetaldehído se reduce a etanol, el producto final deseado de la fermentación, mediante la **reacción de reducción del acetaldehído**:



1.2.2.2.5 Balance general:

La ecuación química resume la fermentación alcohólica:



1.2.2.2.6 Subproductos:

- Además del etanol y el dióxido de carbono, la fermentación alcohólica produce otros subproductos en pequeñas cantidades, como ácido acético y glicerol.

Tabla I – 1 Cuadro resumido de las etapas más relevantes en la fase de fermentación

Glucólisis	$\text{Glucosa} + 2 \text{ ATP} + 2 \text{ Pi} \rightarrow 2 \text{ Piruvato} + 2 \text{ NADH} + 2 \text{ H}^+ + 4 \text{ ADP} + 4 \text{ H}_2\text{O}$	<p>La glucosa se convierte en dos moléculas de piruvato a través de una serie de 10 reacciones enzimáticas.</p> <p>Se produce ATP y NADH, moléculas de energía celular.</p> <p>Se libera dióxido de carbono como producto final.</p>
Descarboxilación Oxidativa Del Piruvato	$\text{Piruvato} + \text{CoA} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{Acetil-CoA} + \text{CO}_2 + \text{NADH}$	<p>El piruvato se descarboxila, liberando una molécula de dióxido de carbono.</p> <p>Se genera una molécula de acetil-CoA y se produce NADH.</p>
Regeneración De NAD⁺	$\text{NADH} + \text{H}^+ + \frac{1}{2} \text{ O}_2 \rightarrow \text{NAD}^+ + \text{H}_2\text{O} + \text{Energía}$	<p>El NADH se oxida a NAD⁺, liberando energía en forma de ATP. Este proceso es esencial para que la fermentación continúe.</p>
Descarboxilación Del Piruvato A Acetaldehído	$\text{Piruvato} + \text{NAD}^+ \rightarrow \text{Acetaldehído} + \text{CO}_2 + \text{NADH}$	<p>El piruvato, producto final de la glucólisis, se descarboxila, liberando una molécula de dióxido de carbono.</p> <p>Se genera una molécula de acetaldehído y se produce NADH, una coenzima rica en energía.</p>
Reducción Del Acetaldehído A Etanol:	$\text{Acetaldehído} + \text{NADH} + \text{H}^+ \rightarrow \text{Etanol} + \text{NAD}^+$	<p>El acetaldehído se reduce a etanol, el producto final deseado de la fermentación alcohólica.</p> <p>Se consume NADH, liberando un protón (H⁺).</p> <p>Se produce NAD⁺, regenerando la coenzima para su reutilización.</p>
Balance General De La	$\text{Glucosa} + 2 \text{ NAD}^+ \rightarrow 2 \text{ Etanol} + 2$	Esta ecuación resume la reacción

Fermentación Alcohólica: $\text{CO}_2 + 2 \text{NADH} + \text{Energía}$

general de la fermentación alcohólica, donde una molécula de glucosa se convierte en dos moléculas de etanol y dos moléculas de dióxido de carbono, liberando energía en forma de ATP

Ecuación simplificada de la fermentación alcohólica $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ (glucosa) \rightarrow 2 $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ (Etanol) + 2 CO_2

Ecuación que describe de manera simplificada y balanceada la obtención de etanol a partir de la glucosa y la formación de CO_2 como subproducto principal.

1.2.3 Variables principales en la fermentación

1.2.3.1 Grados Brix

Mayor Concentración de Azúcares (Grados Brix Altos): Cuando el jugo de caña de azúcar tiene una alta concentración de azúcares (un alto valor en grados Brix), proporciona un sustrato rico en azúcares para las levaduras. Esto es beneficioso para la producción de alcohol, ya que las levaduras tienen más sustrato disponible para fermentar. Cuanto más azúcar haya en el jugo, más alcohol se puede producir a partir de una cantidad dada de materia prima.

Mayor Tiempo de Fermentación: Sin embargo, es importante tener en cuenta que, a medida que aumenta la concentración de azúcares en el jugo de caña (grados Brix más altos), la fermentación puede volverse más lenta. Las levaduras pueden experimentar dificultades para fermentar eficientemente en entornos de alta concentración de azúcares debido a factores como la osmolaridad y la toxicidad del etanol producido.

Control de pH: La concentración de azúcares en el jugo de caña de azúcar también puede influir en el pH del medio de fermentación. Las levaduras fermentan los azúcares y producen ácido acético, lo que puede disminuir el pH.

Valores de grados brix: la preparación de mosto debe estar entre 22 a 24 grados brix.

1.2.3.2 PH

Óptimas Condiciones de pH: El pH óptimo para la mayoría de las levaduras utilizadas en la fermentación alcohólica se encuentra en un rango ligeramente ácido a neutro, generalmente alrededor de 4 a 7. En este rango, las levaduras funcionan de manera más eficiente y

convierten los azúcares del jugo de caña en alcohol de manera efectiva. El pH adecuado es esencial para garantizar una fermentación vigorosa y completa.

Inhibición de la Fermentación a pH Extremadamente Ácido o Alcalino: Cuando el pH se desvía significativamente de los rangos óptimos y se vuelve extremadamente ácido (pH bajo) o alcalino (pH alto), puede inhibir la actividad de las levaduras. A pH extremadamente bajo, las levaduras pueden experimentar un estrés tóxico y tener dificultades para crecer y fermentar. A pH extremadamente alto, la actividad enzimática de las levaduras puede disminuir, lo que también afecta negativamente la fermentación.

Formación de Subproductos No Deseados: Cambios en el pH durante la fermentación pueden dar lugar a la formación de subproductos no deseados, como ácido acético. Estos subproductos pueden afectar negativamente el sabor y la calidad del producto final.

1.2.3.3 Temperatura

Velocidad de fermentación: La temperatura influye en la velocidad a la que ocurre la fermentación.

Los rangos de temperatura para una buena fermentación se hallan entre 33 a 35 grados centígrados.

Eficiencia enzimática: Las enzimas responsables de descomponer los azúcares y convertirlos en alcohol funcionan de manera más eficiente a temperaturas específicas. Una temperatura adecuada garantiza que estas enzimas sean activas y efectivas.

Control de contaminantes: La temperatura puede ayudar a controlar la proliferación de microorganismos no deseados y prevenir infecciones o contaminaciones en el proceso de fermentación.

Calidad del producto: La temperatura influye en el perfil de sabor y aroma del producto final. Temperaturas inadecuadas pueden dar como resultado sabores y aromas no deseados en el alcohol producido.

1.2.3.4 Oxígeno

Contaminación microbiológica: El oxígeno puede promover el crecimiento de microorganismos no deseados que compiten con las levaduras en el proceso de fermentación. Esto puede dar como resultado infecciones o contaminaciones que afectan la calidad del alcohol.

Consumo de oxígeno al inicio: Las levaduras a menudo consumen oxígeno al comienzo de la fermentación para sintetizar los componentes necesarios para su crecimiento y reproducción. Reducir la concentración de oxígeno en el inicio de la fermentación puede favorecer la producción de alcohol.

1.2.3.5 Viabilidad de las levaduras

La viabilidad de las levaduras se refiere a la capacidad de una población de células de levadura para mantenerse viva y funcional. La viabilidad es un indicador crucial en procesos de fermentación, donde una alta viabilidad asegura una conversión eficiente de azúcares en alcohol u otros productos.

Esta variable indica la proporción de células vivas en la población total. Un porcentaje alto indica una alta viabilidad, lo que generalmente es deseable en procesos de fermentación.

Esto se puede determinar de manera cuantitativa mediante la siguiente fórmula:

$$\text{Viabilidad (\%)} = ((\text{Células Totales} - \text{Células Muertas}) / \text{Células Totales}) * 100$$

Se busca valores de viabilidad superiores a 8.5×10^7 para considerar una mejora de eficiencia

1.2.4 Centrifugación

La centrifugación posterior a la fermentación alcohólica es un proceso utilizado en la producción de alcohol a partir de caña de azúcar para separar sólidos y levaduras del líquido fermentado. En este proceso, el líquido fermentado se introduce en una centrífuga, una máquina que gira rápidamente a una velocidad aproximada de 5000 R.P.M. generando una fuerza centrífuga que separa los componentes por densidad

La centrifugación posterior a la fermentación tiene varios propósitos:

- Clarificación: Elimina los sólidos y las levaduras restantes del líquido separado, en este caso el vino, dejándolo claro y limpio.
- Recuperación de levaduras: Las levaduras recuperadas pueden reutilizarse en futuros procesos de fermentación, lo que ahorra costos y recursos.
- Mejora de la eficiencia: Al eliminar las partículas sólidas, se evita la obstrucción de tuberías y equipos posteriores, lo que mejora la eficiencia de la producción.
- Control de la calidad: La centrifugación contribuye a la producción de alcohol de alta calidad al eliminar impurezas no deseadas.

1.2.5 Destilación

1.2.5.1 Destilación Fraccionada:

Para obtener niveles de alcohol más altos, se utiliza la destilación fraccionada. En este proceso, los vapores producidos en la destilación primaria se pasan a través de una columna de destilación fraccionada. Esta columna consta de múltiples bandejas o placas, cada una a una temperatura diferente. A medida que los vapores ascienden por la columna, se condensan en las bandejas que corresponden a sus puntos de ebullición. Esto permite una separación más eficiente de los componentes.

Entre los compuestos obtenidos en el proceso tenemos como producto principal y en mayor cantidad al Etanol, así también y en porcentajes muy bajos a otros compuestos como el Metanol, Iso-Propanol, N-Propanol, Acetatos De Etilo, 2 Butanol, Iso-Butanol entre otros.

1.2.5.2 Rectificación:

En este punto, la destilación fraccionada se combina con la rectificación, que es la purificación adicional del alcohol. El proceso de rectificación generalmente se realiza utilizando múltiples columnas de destilación fraccionada en serie o torres de rectificación. Cada etapa de destilación y rectificación aumenta la concentración de alcohol en el producto final.

1.2.5.3 Adsorción:

Alimentación del alcohol de 95 grados: El alcohol de 95 grados Gay-Lussac, que contiene aproximadamente 95% de etanol y el resto de agua e impurezas, se alimenta al proceso.

Adsorbente: Se utiliza un adsorbente sólido selectivo para separar el etanol del agua y las impurezas. El adsorbente más comúnmente utilizado es el tamiz molecular, que tiene la capacidad de adsorber moléculas de agua, pero no las de etanol.

Columna de adsorción: El alcohol se hace pasar a través de una columna de adsorción empacada con tamiz molecular. A medida que el alcohol fluye a través de la columna, las moléculas de agua son retenidas por el tamiz, mientras que el etanol fluye a través de la columna sin ser adsorbido.

Producto de etanol concentrado: El producto que sale de la columna de adsorción contiene un etanol concentrado con una graduación más alta, generalmente alrededor de 99,5 grados Gay-Lussac. Este etanol está prácticamente libre de agua e impurezas.

1.2.5.4 Regeneración:

Desorción: Para regenerar el adsorbente saturado de agua, es necesario llevar a cabo un proceso de desorción. En este proceso, se calienta el tamiz molecular saturado para liberar el agua retenida en forma de vapor.

Recuperación de agua: El vapor de agua desorbido se condensa y se recoge para su posterior tratamiento o eliminación.

Reactivación del adsorbente: El tamiz molecular desorbido se enfría y se encuentra listo para su reutilización en el proceso de adsorción. Este ciclo de adsorción y regeneración se repite para mantener la eficiencia del sistema.

Los ciclos de adsorción y regeneración se dan cada 300 segundos, luego de este tiempo; los tamices están listos para absorber el agua presente en el alcohol de 95°.

1.2.6 Estándares de calidad:

El etanol de caña de azúcar debe cumplir con ciertos estándares de calidad para su uso en diferentes aplicaciones. Las normas internacionales y bolivianas vigentes establecen especificaciones para parámetros como:

Contenido de etanol: Debe ser igual o superior a un porcentaje mínimo especificado (generalmente 95% o más).

Impurezas: Se establecen límites máximos para la presencia de impurezas como metanol, acetaldehído, ésteres, metales pesados, etc.

Propiedades físicas: Se controlan parámetros como la densidad, la viscosidad, el color y el pH.

1.2.6.1 Normas internacionales:

Codex Alimentarius: Establece estándares para el etanol de caña de azúcar utilizado en la industria alimentaria.

Organización Internacional de Normalización (ISO): Desarrolla normas para la producción, análisis y comercialización del etanol.

1.2.6.2 Normas bolivianas:

Norma Boliviana NB 1100: Especifica los requisitos de calidad para el alcohol etílico anhidro de uso industrial.

Norma Boliviana NB 1101: Establece los requisitos de calidad para el alcohol etílico potable. Es importante verificar las normas específicas aplicables al uso previsto del etanol de caña de azúcar para garantizar su calidad y seguridad.

1.2.7 Aditivos

1.2.7.1 Ácido sulfúrico

Estabilización del pH: En algunas fermentaciones, el pH puede fluctuar debido a la producción de ácidos o bases por las levaduras. Agregar ácido sulfúrico en cantidades controladas puede estabilizar el pH, evitando fluctuaciones extremas que podrían afectar la fermentación.

Mejora de la seguridad: La adición de ácido sulfúrico puede contribuir a la seguridad microbiológica del medio. Al reducir el pH, se dificulta el crecimiento de microorganismos no deseados, lo que puede prevenir infecciones o contaminaciones que afecten la fermentación.

1.2.7.2 Urea

Suministro de nitrógeno: La urea es una fuente de nitrógeno, que es un nutriente esencial para el crecimiento de las levaduras en la fermentación. Si el mosto o medio de fermentación carece de nitrógeno disponible, la adición de urea puede proporcionar a las levaduras el nitrógeno necesario para un crecimiento saludable y una fermentación eficiente.

Control del equilibrio nutricional: La adición de urea puede ser parte de un enfoque integral para mantener un equilibrio nutricional adecuado en el medio de fermentación. Junto con otros nutrientes como fosfato y vitaminas, la urea puede contribuir a proporcionar a las levaduras las condiciones ideales para el crecimiento y la producción de alcohol.

1.2.7.3 Fosfato

Coenzima y ATP: El fosfato se utiliza como componente esencial en la síntesis de coenzimas y trifosfato de adenosina (ATP), que son moléculas de alta energía necesarias para las reacciones bioquímicas en las levaduras. Estas reacciones incluyen la conversión de azúcares en alcohol y dióxido de carbono, el proceso principal de la fermentación alcohólica.

pH y equilibrio iónico: El fosfato también puede actuar como un regulador del pH en el medio de fermentación. Los sistemas de fosfato pueden ayudar a mantener el equilibrio iónico en el medio, lo que es importante para el funcionamiento adecuado de las levaduras y para evitar cambios drásticos en el pH que podrían afectar la fermentación.

Regulación del estrés osmótico: El fosfato puede ayudar a regular el estrés osmótico que experimentan las levaduras durante la fermentación debido a la concentración de azúcares en el mosto. Esto es importante para garantizar que las levaduras funcionen de manera efectiva y no se vean inhibidas por condiciones estresantes.

1.2.7.4 Formol

El formol, también conocido como formaldehído, es un compuesto químico utilizado como desinfectante y agente de limpieza en diversas aplicaciones industriales, incluida la limpieza de equipos como las cubas de fermentación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que el formol es una sustancia química tóxica y corrosiva, por lo que su manipulación debe realizarse con precaución y siguiendo las normas de seguridad adecuadas.

El formol es altamente tóxico y debe manejarse siguiendo estrictas medidas de seguridad. Se debe utilizar en un entorno bien ventilado, utilizando equipos de protección personal.

1.2.7.5 Biocida

Un biocida es una sustancia química o un microorganismo que se utiliza para matar o inhibir el crecimiento de organismos no deseados, como bacterias, hongos, algas y otros microorganismos, en aplicaciones industriales, incluida la limpieza y

desinfección de cubas y líneas de conexión. Los biocidas actúan de diversas maneras para eliminar o controlar la proliferación de microorganismos en sistemas y equipos. La elección del biocida y el proceso de limpieza específico dependerán de la aplicación y de los microorganismos objetivo. Es fundamental seguir las instrucciones del fabricante y las normativas locales de seguridad y medio ambiente al usar biocidas. La seguridad del personal, la eficacia y la gestión adecuada de los residuos son consideraciones importantes en la aplicación de biocidas en la limpieza de equipos industriales.

1.2.7.6 Dióxido de cloro

Desinfección: El dióxido de cloro es un desinfectante efectivo que mata o inhibe el crecimiento de microorganismos no deseados, como bacterias y hongos. Cuando se agrega al mosto en la cuba de fermentación, el dióxido de cloro ataca y destruye las células de estos microorganismos. Esto es especialmente importante para garantizar que las levaduras seleccionadas para la fermentación sean las dominantes y no sean competidas por microorganismos no deseados.

Reducción de impurezas: El dióxido de cloro puede ayudar a reducir la presencia de impurezas en el mosto, como compuestos orgánicos y materia orgánica que puedan afectar negativamente la fermentación o la calidad del producto final.

Eliminación de microorganismos patógenos: Además de su acción desinfectante, el dióxido de cloro también puede ser efectivo en la eliminación de microorganismos patógenos que puedan estar presentes en el mosto, lo que contribuye a la seguridad del producto final.

1.2.7.7 Antiespumante

Control de la espuma: La espuma es una acumulación de burbujas de gas en la superficie del líquido durante la fermentación. Puede ser problemática ya que puede llenar los espacios disponibles en la cuba de fermentación, dificultando el monitoreo del proceso y la adición de ingredientes o agitación. Además, un exceso de espuma puede conducir a desbordamientos o pérdida de producto.

Optimización de la producción: En algunos casos, la formación de espuma excesiva puede afectar negativamente la eficiencia de la fermentación. Las burbujas de espuma pueden atrapar levaduras y otras partículas en suspensión, lo que puede reducir la velocidad de fermentación y la producción de alcohol.

Control de sabores no deseados: La formación de espuma puede atrapar compuestos volátiles y aromáticos, lo que puede llevar a la pérdida de sabores y aromas deseables en el producto final. El antiespumante puede ayudar a prevenir la retención de estos compuestos en la espuma.

1.2.7.8 Soda caustica

Ajuste del pH: El NaOH se utiliza para ajustar el pH del destilado. Durante la fermentación y la destilación, los componentes ácidos y básicos pueden estar presentes, lo que puede afectar la calidad y la estabilidad del alcohol. La adición de NaOH se realiza para neutralizar cualquier acidez presente y asegurarse de que el pH del destilado esté dentro de un rango adecuado.

Eliminación de ácidos volátiles: En algunos casos, los ácidos volátiles pueden formarse durante la fermentación y llevarse a la destilación. Estos ácidos pueden afectar negativamente el sabor y la calidad del alcohol. El NaOH se utiliza para neutralizar y eliminar estos ácidos volátiles, lo que contribuye a un destilado de mejor calidad.

Regulación del equilibrio iónico: El NaOH puede ayudar a mantener el equilibrio iónico en el destilado, lo que es importante para el funcionamiento adecuado de las reacciones químicas en la destilación. El equilibrio iónico también puede influir en la formación de subproductos no deseados.

Mejora de la calidad del destilado: El NaOH, al contribuir al ajuste del pH y la eliminación de impurezas ácidas, puede ayudar a mejorar la calidad del destilado al eliminar sabores y olores no deseados.

1.2.7.9 Antiincrustante

La adición de un antiincrustante en el proceso de destilación después de la fermentación tiene como objetivo prevenir la formación de incrustaciones o depósitos

en el equipo y las superficies de contacto, como las paredes de la columna de destilación, los intercambiadores de calor y otras partes del sistema. Estos depósitos pueden estar compuestos por compuestos orgánicos e inorgánicos que se encuentran en el destilado, y pueden ser problemáticos por varias razones:

Eficiencia de transferencia de calor: La formación de incrustaciones puede reducir la eficiencia de los intercambiadores de calor y, por lo tanto, disminuir la eficiencia general del proceso de destilación. Esto puede resultar en un mayor consumo de energía y en la necesidad de tiempos de operación más largos para alcanzar la graduación deseada del producto.

Obstrucción de tuberías y componentes: Las incrustaciones pueden obstruir las tuberías y componentes, lo que afecta el flujo del destilado y puede requerir paradas para limpiar y despejar los bloqueos, lo que conlleva tiempos de inactividad no deseados.

Reducción de la vida útil del equipo: La acumulación de incrustaciones puede dañar las superficies del equipo con el tiempo, lo que puede acortar su vida útil y requerir costosas reparaciones o reemplazos.

Calidad del producto: Las incrustaciones pueden afectar la calidad del producto final, ya que pueden contener impurezas que se transferirían al destilado.

1.2.7.10 Aire

La aireación o oxigenación es un aspecto crucial en el proceso de fermentación alcohólica, y su función principal es suministrar oxígeno a las levaduras al comienzo de la fermentación.

Estimulación del crecimiento inicial de las levaduras: Al comienzo de la fermentación, las levaduras necesitan oxígeno para crecer y multiplicarse. La aireación permite que las levaduras se reproduzcan rápidamente, lo que es importante para establecer una población robusta y activa que realizará la fermentación alcohólica de manera eficiente.

Mejora de la viabilidad y la vitalidad de las levaduras: La aireación adecuada contribuye a la viabilidad y la vitalidad de las levaduras. Esto significa que las

levaduras estarán más saludables y serán más resistentes a las condiciones adversas que pueden surgir durante la fermentación.

Aceleración del inicio de la fermentación: La presencia de oxígeno en las primeras etapas de la fermentación acelera el inicio de la conversión de azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Esto es beneficioso para reducir el tiempo de fermentación y aumentar la productividad.

Reducción de compuestos no deseados: La aireación inicial puede ayudar a reducir la producción de compuestos no deseados, como ésteres y aldehídos, que pueden afectar negativamente el sabor y el aroma del producto final. Un inicio de fermentación más rápido y saludable puede disminuir la producción de estos compuestos.

1.3 SERVICIOS AUXILIARES

Se usa la fibra sobrante de caña de azúcar conocidas como bagazo para producir energía usando los métodos existentes de quema para impulsar turbinas de vapor y generar electricidad.

Se usan calderas a más alta presión de modo que se pueda producir más energía, permitiendo que la planta de etanol del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz se convierta en autónomas en términos de energía. Esto contribuye significativamente a mantener la producción de etanol a bajos costos.

La producción del alcohol etílico es realizada a través de procesos eficientes y automáticos. El proceso de manufactura no es muy complejo y es fácil de realizar. El control de la contaminación y el mantenimiento y reparación de las maquinarias y equipos también son fáciles. (Ibarra Oropeza, Silvia. *Producción de etanol a partir de melaza de la caña de azúcar*. Tesis de grado, Universidad Privada del Valle, Santa Cruz, Bolivia, 2011).

Tabla I- 2 balance de masa

BALANCE DE MASA		
FLUIDO	MASA	CONDICIONES
Vapor	58 t/n	Escape Saturado 150kgf/Cm ²
Agua Fría	864 m ³ /h	33°C PH 6,5-8,5
Agua Fría	30 m ³ /h	33°C PH 6,5-8,5
		Refrigeración

Vino	150 m3/h	Fermentado Y Centrifugado 7- 10 GL
Vinaza	146 m3/h	0-0,03° GL

Fuente: Sector Destilería IARPB

1.4 MANEJO DE MATERIALES

1.4.1 Levaduras

Las levaduras iniciales son proporcionadas en paquetes que las protegen de cualquier agente externo que pueda afectar el rendimiento a la hora de trabajar, a su vez dicho empaque se encuentra protegido por empaques que protegen la integridad de los paquetes desde el transporte hasta la apertura del mismo dentro del área de fermentación. Todos los cuidados referidos a embalaje y transporte están basados en normativas internacionales y nacionales tales como:

- **Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Transporte de Mercancías Peligrosas por Carretera (ADR):** Este convenio establece un marco internacional para el transporte de mercancías peligrosas por carretera, incluyendo las levaduras. El ADR clasifica las levaduras como mercancías peligrosas de la Clase 9 (sustancias diversas y objetos peligrosos).
- **Ley General de Transporte Terrestre (Ley N° 2163):** Esta ley establece las normas generales para el transporte terrestre en Bolivia, incluyendo el transporte de mercancías peligrosas. La Ley N° 2163 remite a las normas complementarias establecidas por el Ministerio de Transportes y Obras Públicas.
- **Reglamento General de Transporte Terrestre de Sustancias Peligrosas (Decreto Supremo N° 29233):** Este decreto establece las normas específicas para el transporte terrestre de sustancias peligrosas en Bolivia, incluyendo las levaduras. El Decreto Supremo N° 29233 detalla los requisitos de seguridad, embalaje, etiquetado, documentación y condiciones de transporte para cada tipo de sustancia peligrosa.
- **Resolución Ministerial de Transporte y Obras Públicas N° 027/2018:** Esta resolución aprueba el Manual de Transporte Terrestre de Sustancias Peligrosas, que proporciona una guía detallada para el cumplimiento del Decreto Supremo N° 29233.

1.5 OPERACIÓN Y CONTROL

1.5.1 Área de Cultivo y Fermentación:

El área de cultivo y fermentación constituye la base para la producción de alcohol, siendo responsable de transformar las materias primas en un sustrato fermentable. Esta área abarca una serie de operaciones cruciales, que incluyen:

1. **Preparación de la Materia Prima:** El proceso comienza con la preparación meticulosa de las materias primas, transporte de la melaza o jugo de caña, desde el área fabrica central de azúcar a destilería, mezcla de la materia prima con agua para ajustar los grados brix de entre 25 a 23 y ajuste del pH del sustrato a valores aproximados de 4,4 para garantizar condiciones óptimas para el crecimiento y la fermentación de la levadura.
2. **Cultivo de Levadura:** El cultivo de levadura implica la propagación de cepas de levadura específicamente seleccionadas por su eficiencia de fermentación y capacidad de producción de alcohol. El control cuidadoso de las condiciones de crecimiento, incluida la temperatura, el pH y la disponibilidad de nutrientes, es primordial para lograr una población de levadura sana y activa.
3. **Fermentación:** El corazón del proceso de fermentación radica en la conversión controlada de azúcares en etanol por las células de levadura cultivadas. El monitoreo y ajuste rigurosos de parámetros críticos como la temperatura, el pH, la concentración de azúcar y la actividad de la levadura son esenciales para garantizar una cinética de fermentación óptima y la calidad del producto.
4. **Monitoreo y Control:** El monitoreo y control continuos son los pilares de una fermentación exitosa. El análisis regular de variables críticas, incluido el consumo de azúcar, la producción de etanol y la viabilidad de la levadura, proporciona información valiosa sobre el proceso de fermentación. Se implementan acciones correctivas oportunas, como ajustes de temperatura o suplementación de nutrientes, para mantener condiciones óptimas y prevenir desviaciones que podrían comprometer la calidad del producto.

1.5.2 Área de Centrifugación:

El área de centrifugación juega un papel central en la separación del mosto fermentado en dos corrientes distintas: vino y crema de levadura. Esta etapa de separación es crucial para preparar el vino para la destilación posterior y para recuperar valiosas células de levadura para su reutilización en fermentaciones futuras. Las operaciones clave en esta área incluyen:

1. **Preparación del Mosto:** Antes de la centrifugación, el mosto fermentado se somete a pasos preparatorios para optimizar la eficiencia de separación. Esto puede implicar ajustar la temperatura, el pH o la adición de floculantes para mejorar la agregación de las células de levadura.
2. **Operación de la Centrifugadora:** El corazón del proceso de centrifugación radica en la operación eficiente de las centrífugas. El control cuidadoso de los parámetros de la centrífuga, incluida la velocidad, el caudal y la temperatura, es esencial para lograr una separación efectiva de las fases de vino y crema de levadura.
3. **Monitoreo y Control:** El monitoreo y control continuos son fundamentales para garantizar un rendimiento óptimo de la centrífuga. El análisis regular de los parámetros de calidad tanto del vino como de la crema de levadura, como la concentración de etanol, el recuento de células de levadura y el contenido de sólidos suspendidos, proporciona información valiosa para los ajustes del proceso.
4. **Reutilización de la Crema de Levadura:** La crema de levadura recuperada representa un recurso valioso para fermentaciones posteriores. La inactivación y el almacenamiento adecuados de la crema de levadura son esenciales para mantener su viabilidad y prevenir la contaminación.

1.5.3 Área de Destilación y Rectificación:

El área de destilación y rectificación se encarga de transformar el vino fermentado en alcohol de alta pureza mediante la separación selectiva del etanol de otros componentes volátiles. Esta área abarca dos etapas clave de destilación:

1. **Destilación Primaria:** La etapa de destilación primaria involucra la separación del etanol del vino fermentado, dando como resultado un concentrado de etanol crudo.

El control cuidadoso de los parámetros de destilación, incluida la temperatura, la presión y las tasas de flujo de vapor, es esencial para lograr una recuperación eficiente de etanol y minimizar la destilación de impurezas indeseables.

2. **Destilación de Rectificación:** La etapa de destilación de rectificación purifica aún más el concentrado de etanol crudo, eliminando las impurezas restantes y produciendo alcohol de alta pureza. Este proceso involucra múltiples columnas de destilación, cada una diseñada para separar impurezas específicas según sus volatilidades relativas.

1.5.4 Área de Adsorción:

El área de adsorción funciona como la etapa final de pulido, eliminando las impurezas residuales del alcohol de alta pureza producido en el área de destilación y rectificación. Esta área utiliza el principio de adsorción para atrapar selectivamente las impurezas en materiales adsorbentes, mejorando aún más la pureza del alcohol. Las operaciones clave en esta área incluyen:

1. **Preparación del Alcohol:** Antes de la adsorción, el alcohol se somete a pasos preparatorios para optimizar el proceso. Esto puede implicar ajustar la temperatura, el pH mediante aplicación de soda caustica, o eliminar los gases disueltos que podrían interferir con la eficiencia de adsorción.
2. **Paso por Columnas de Adsorción:** El alcohol se pasa por columnas de adsorción llenas de materiales adsorbentes específicamente elegidos para capturar y eliminar las impurezas residuales; en este caso utilizamos zeolita como material adsorbente. La selección cuidadosa de los adsorbentes y el control de las condiciones de operación de la columna, incluyendo el flujo, la temperatura y la presión, son cruciales para lograr una eliminación óptima de las impurezas y la pureza del producto.
3. **Regeneración del Adsorbente:** A medida que los materiales adsorbentes se saturan de impurezas, deben regenerarse para mantener su capacidad de adsorción. Este proceso de regeneración generalmente involucra la elución de las impurezas adsorbidas con un solvente adecuado y la reactivación de los adsorbentes para su reutilización.

4. **Monitoreo y Control:** El monitoreo y control continuos son esenciales para garantizar un rendimiento óptimo de la adsorción. El análisis regular de la pureza del alcohol y otros parámetros críticos, como el flujo, la temperatura y la presión, proporciona información valiosa sobre el proceso de adsorción. Se implementan ajustes oportunos a las condiciones de operación para mantener una eficiencia óptima en la eliminación de impurezas y la calidad del producto.

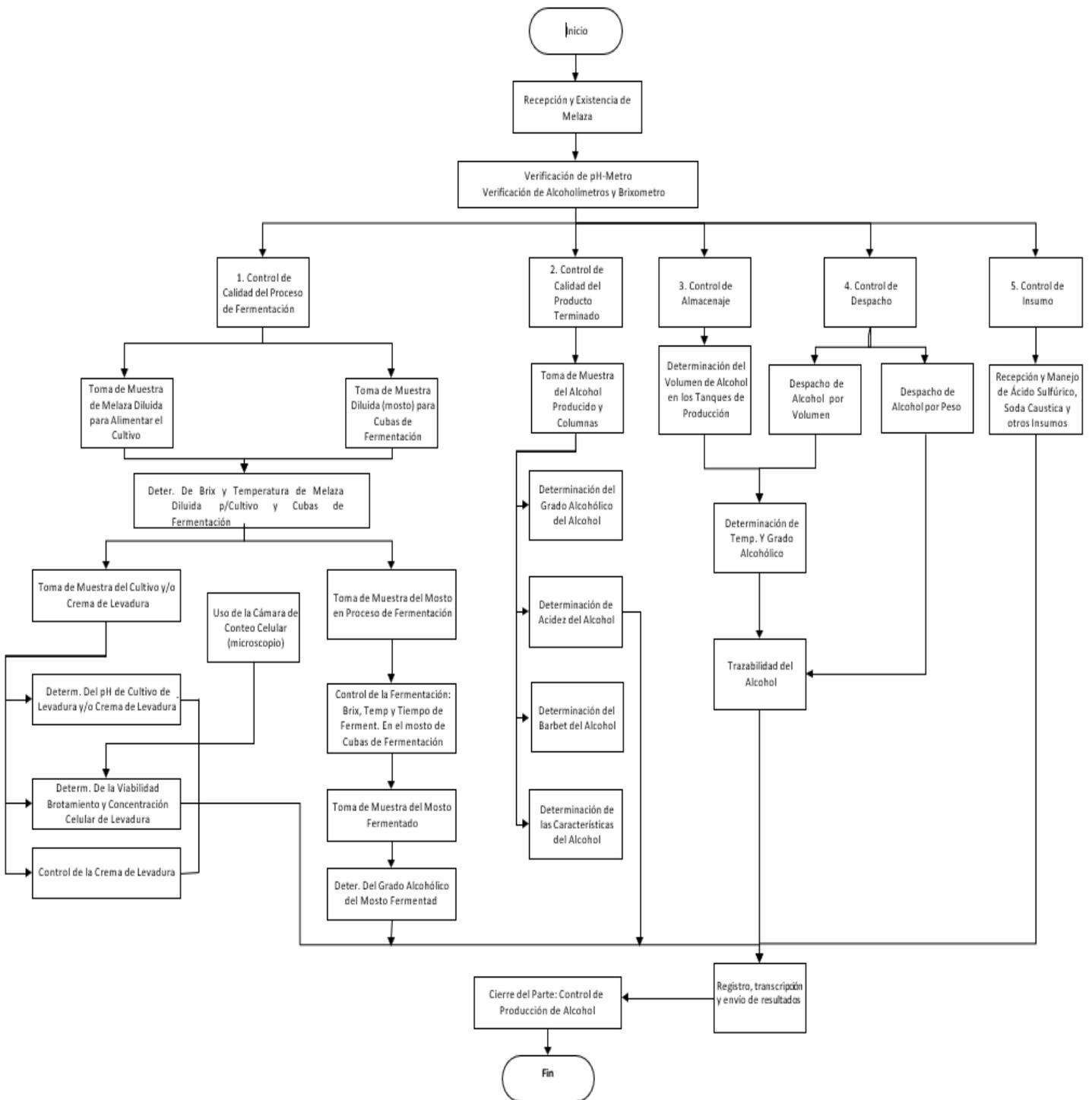
1.6 CONTROL DE CALIDAD

La implementación de un riguroso programa de análisis en cada etapa del proceso productivo es esencial para asegurar la calidad del alcohol producido y el cumplimiento de las normativas sectoriales. Los análisis permiten monitorear los parámetros críticos del proceso, detectar posibles contaminaciones y optimizar el rendimiento de las operaciones unitarias.

Estos controles de calidad son realizados por químicos especializados en el área de producción, procesos azucareros y procesos alcohólicos a partir de la caña de azúcar; dichos análisis se realizan en el laboratorio de destilería, lugar donde se hace seguimiento a los valores de cada variable de manera instantánea si a materia prima consumida o producto obtenido se refiere, estos análisis se realizan para cada área del proceso productivo, regulando cada operación unitaria que participa en la producción de nuestro producto en cuestión.

Los análisis y controles de calidad se ven indicados y organizados para un mejor estudio en el siguiente diagrama:

Diagrama I-2 Control De Calidad Sector Destilería IARBP



Fuente: Laboratorio Sector Destilería IARBP

1.7 ELIMINACIÓN DE EFLUENTES

La vinaza es un subproducto líquido de gran complejidad que surge como residuo de la producción de alcohol en ingenios azucareros. Su composición varía considerablemente dependiendo de diversos factores como la materia prima utilizada, el proceso de fermentación y las condiciones operativas de la planta. Según Metcalf & Eddy, Inc. (2003), esta variabilidad en la composición se debe a la diversidad de procesos industriales y a las características de la materia prima.

1.7.1 Características Físicoquímicas:

La vinaza se caracteriza por su alta carga orgánica, rica en compuestos fenólicos, ácidos orgánicos (como el acético y láctico), alcoholes superiores, ésteres y una considerable cantidad de nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio. Además, presenta un pH ácido y una elevada demanda bioquímica de oxígeno (DBO), lo que indica su alta capacidad contaminante. Tchobanoglous, Burton, y Stensel (2003) destacan que la elevada DBO de la vinaza es una de las principales razones por las cuales se considera un contaminante potencial.

1.7.2 Impacto Ambiental:

Debido a su composición, la vinaza representa un serio problema ambiental si no se gestiona adecuadamente. Su descarga directa en cuerpos de agua puede causar eutrofización, acidificación, toxicidad para la vida acuática y alteraciones en los ecosistemas. Numerosos estudios, como los revisados por Metcalf & Eddy, Inc. (2003), han demostrado los efectos negativos de la vinaza en los ecosistemas acuáticos.

1.7.3 Tratamiento y Disposición:

Existen diversas tecnologías para el tratamiento de la vinaza, que buscan reducir su carga contaminante y permitir su reutilización o disposición final de manera segura. Algunos de los tratamientos más comunes incluyen el tratamiento biológico, físico-químico y térmico. Según Tchobanoglous, Burton, y Stensel (2003), la selección del tratamiento más adecuado depende de las características de la vinaza y de los objetivos del tratamiento.

La reutilización de la vinaza tratada como fertilizante en la agricultura es una alternativa atractiva, pero debe realizarse con precaución debido a su alta salinidad y contenido de metales pesados. Estudios como los de (García, M. A., & Rojas, J. L. (2008). Evaluación del impacto ambiental de la aplicación de vinaza en cultivos de caña de azúcar. *Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas*, 37(2), 123-135.) han evaluado la viabilidad de esta práctica, destacando la importancia de realizar análisis detallados de la calidad del suelo y de las plantas antes y después de la aplicación de vinaza.

1.7.4 Normativa y Legislación:

Debido a su potencial contaminante, la gestión de la vinaza está regulada por diversas normativas nacionales e internacionales que establecen límites máximos permisibles para su descarga en cuerpos de agua y su aplicación en suelos. Estas normativas varían según el país y la región, y se basan en los resultados de investigaciones científicas como las revisadas por Metcalf & Eddy, Inc. (2003).

El tratamiento propuesto consiste en su evaporación y posterior incineración. La función del tren de evaporación (cuatro efectos) es concentrar los sólidos solubles y demás componentes poco volátiles presentes en las vinazas hasta un valor cercano al 12% en peso, ya que en esta concentración se hacen aptas para su incineración.

CAPITULO II

2. CONCEPCION DEL PROBLEMA

2.1 Identificación Del Problema.

El proceso de fermentación alcohólica es una de las fases más importantes y relevantes para a producción de etanol, ya que en este proceso es donde se forman todos los productos y subproductos que luego pasaran a separarse y concentrarse en procesos posteriores antes de su obtención final. Su optimización es esencial para garantizar la eficiencia y calidad del producto final.

En el transcurso de este proceso, es fundamental gestionar y controlar diversas variables de manera precisa, de forma que sus configuraciones nos proporcionen resultados que evidencien tanto eficiencia como un desempeño óptimo. Es esencial asegurar que cada variable sea administrada adecuadamente para lograr valores que reflejen la eficacia del sistema y un rendimiento sobresaliente.

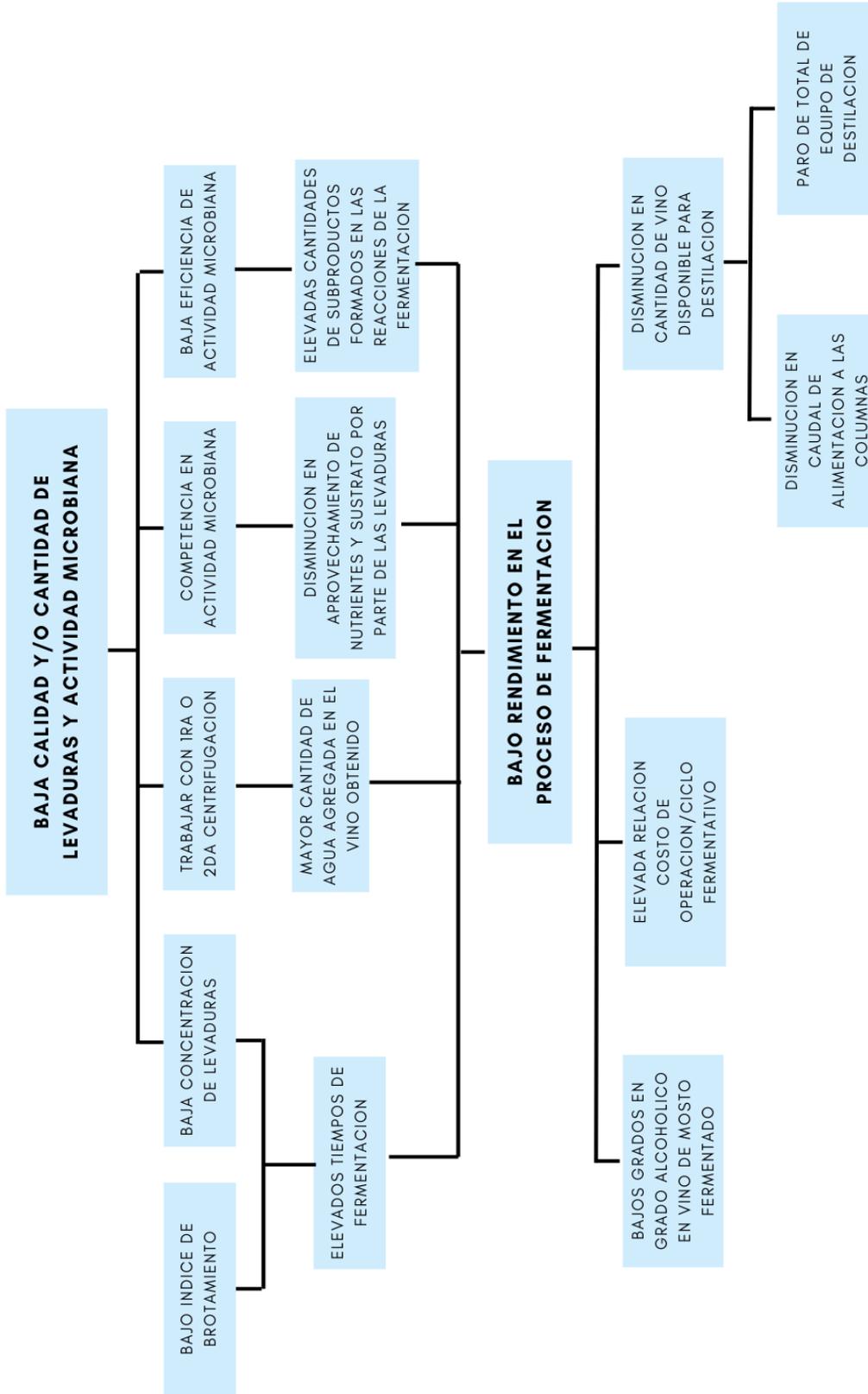
Entre los desafíos significativos en este proceso se encuentran los tiempos de fermentación, la velocidad y eficiencia de las reacciones, y el control de temperatura en las cubas de fermentación. La evolución en las técnicas y tecnologías para abordar estos problemas ha sido considerable, permitiendo mejoras sustanciales en la eficiencia y consistencia del proceso (Madigan et al., 2015; Doran, 2013).

Después de dar un vistazo general a las diversas problemáticas que impactan el proceso de fermentación en general, procederemos a enfocarnos en los desafíos específicos que debemos minimizar en nuestro proceso de fermentación en la planta de producción de etanol en cuestión; para ello presentamos el siguiente árbol de problemas:

CAUSAS

EFFECTOS

FIGURA II - I ARBOL DE PROBLEMAS



2.1.1 Desarrollo de las problemáticas a considerar:

1. Bajo índice de brotamiento celular

El bajo índice de brotamiento celular en la fermentación industrial de etanol puede limitar la eficacia del proceso, al reducir la cantidad de levaduras activas disponibles para la fermentación. Este problema puede ser causado por diversos factores, incluyendo condiciones subóptimas durante la propagación de levaduras y la presencia de contaminantes. Según un estudio de Wyman et al. (2019), "el brotamiento celular insuficiente puede resultar en una baja tasa de fermentación y una menor eficiencia en la conversión de azúcares a etanol" (Wyman et al., 2019).

2. Baja concentración de levaduras

La baja concentración de levaduras en el mosto fermentable puede reducir la eficiencia del proceso de fermentación, afectando negativamente la producción de etanol. Una concentración insuficiente de levaduras puede llevar a una fermentación incompleta o a una producción reducida de etanol. Según Gertz et al. (2021), "la concentración adecuada de levaduras es crucial para asegurar una fermentación eficiente y la producción óptima de etanol" (Gertz et al., 2021).

Elevados tiempos de fermentación

Los elevados tiempos de fermentación se refieren a los periodos prolongados necesarios para que las levaduras conviertan los azúcares en etanol durante el proceso de fermentación. En la industria de producción de etanol, la eficiencia del proceso de fermentación es crucial para la rentabilidad y la capacidad de producción. Según Zhang et al. (2021), "los tiempos prolongados de fermentación pueden ser indicativos de problemas en la actividad de las levaduras o en las condiciones del proceso, y pueden resultar en un aumento en los costos de producción" (Zhang et al., 2021).

2.1.2 Consecuencias directas al proceso productivo

- **Reducción en la capacidad de producción**

Los largos tiempos de fermentación reducen la capacidad de producción, ya que cada lote requiere más tiempo para completar el proceso. Esto puede limitar la cantidad de etanol producido en un período dado y reducir la eficiencia general de la planta. Como señalan Li et al. (2020), "el aumento en los tiempos de fermentación puede causar una disminución en el volumen total de producción y afectar la eficiencia operativa" (Li et al., 2020).

- **Incremento en los costos operativos**

Los tiempos prolongados de fermentación pueden llevar a un incremento en los costos operativos, incluyendo el consumo de energía, el uso de equipos y el costo de mano de obra. La prolongación del proceso también puede causar la acumulación de subproductos que requieren tratamiento adicional, aumentando aún más los costos. Según Kumar et al. (2019), "los costos operativos asociados con tiempos de fermentación prolongados pueden ser significativos, afectando la rentabilidad de la producción de etanol" (Kumar et al., 2019).

- **Calidad del producto final**

Los largos tiempos de fermentación pueden afectar la calidad del etanol producido. La exposición prolongada a condiciones de fermentación puede aumentar la formación de subproductos no deseados, como ácidos y aldehídos, que pueden comprometer la pureza del etanol y la calidad del producto final. Según a estudios de Martínez et al. (2022), "una fermentación prolongada puede resultar en la acumulación de compuestos indeseables que afectan negativamente la calidad del etanol" (Martínez et al., 2022).

- **Requerimientos de almacenamiento y manejo**

Un tiempo de fermentación prolongado puede incrementar el tiempo que los tanques de fermentación deben estar en operación, afectando los requisitos de almacenamiento y manejo de los materiales fermentables. Esto puede llevar a un aumento en la necesidad de espacio y a una mayor complejidad en la gestión de inventarios. Según Tang et al. (2023), "los largos

tiempos de fermentación pueden complicar el manejo y almacenamiento de los materiales fermentables, incrementando los desafíos logísticos" (Tang et al., 2023).

3. Trabajar con una o dos etapas de centrifugación para la separación de las levaduras del mosto fermentado

La separación de levaduras del mosto fermentado mediante centrifugación es un método eficiente para recuperar las levaduras y preparar el mosto para etapas posteriores, como la destilación. Este proceso generalmente se realiza en dos etapas de centrifugación, con cada etapa diseñada para optimizar la separación de levaduras y clarificar el mosto.

Primera Centrifugación

En la primera centrifugación, el mosto fermentado se somete a una velocidad alta de centrifugación para separar las levaduras y sólidos en suspensión del líquido. Según Lemos et al. (2019), "la primera centrifugación se enfoca en la eliminación inicial de levaduras y sólidos, lo cual mejora la calidad del mosto para la destilación" (Lemos et al., 2019).

Segunda Centrifugación y Adición de Agua

La segunda centrifugación se realiza con una modificación en el proceso: se agrega agua al mosto fermentado antes de centrifugarlo nuevamente. Esta adición diluye el contenido alcohólico del mosto, reduciendo su grado alcohólico. La dilución facilita la separación adicional de las levaduras y otros sólidos residuales. Como señalan González et al. (2021), "la adición de agua en la segunda centrifugación reduce el grado alcohólico del mosto, lo que puede facilitar una separación más eficiente de las levaduras y clarificar aún más el líquido" (González et al., 2021).

Impacto en el grado alcohólico

La reducción del grado alcohólico del mosto fermentado durante la segunda centrifugación puede ser significativa, y su impacto debe ser considerado en el contexto de la eficiencia del proceso global. La disminución del contenido alcohólico puede afectar la eficiencia en la destilación subsiguiente, ya que el etanol es el componente objetivo a recuperar. Según Fink

et al. (2022), "la adición de agua durante la centrifugación reduce la concentración de etanol, lo cual puede requerir ajustes en el proceso de destilación para recuperar la cantidad deseada de etanol" (Fink et al., 2022).

Separación de levaduras del vino o mosto fermentado

La separación eficiente de las levaduras del vino o mosto fermentado es un aspecto crucial en la producción de etanol y otros productos fermentados. Este proceso permite la recuperación de levaduras para su reutilización en futuros ciclos de fermentación, optimizando así la economía del proceso. La separación de levaduras se realiza típicamente mediante técnicas como centrifugación, filtración o sedimentación. Según a estudios de Toh et al. (2020), "la separación adecuada de levaduras del mosto fermentado no solo mejora la eficiencia del proceso de fermentación, sino que también facilita la reutilización de levaduras, reduciendo costos y mejorando la sostenibilidad" (Toh et al., 2020).

Según un estudio de Jiranek et al. (2022), "la reutilización de levaduras permite una gestión más económica de los recursos y contribuye a una fermentación más consistente y controlada" (Jiranek et al., 2022).

4. Competencia microbiana: levaduras vs bacterias

La competencia entre levaduras y bacterias es un problema significativo en la fermentación industrial, ya que las bacterias pueden competir con las levaduras por nutrientes y producir subproductos no deseados, como ácidos y compuestos tóxicos. Esta competencia puede disminuir la eficiencia de la fermentación y la calidad del etanol producido. Según Oliveira et al. (2020), "la presencia de bacterias competidoras puede reducir la población de levaduras y afectar negativamente el rendimiento del proceso de fermentación" (Oliveira et al., 2020).

Durante la fermentación industrial, la competencia entre levaduras y bacterias por los nutrientes y sustratos puede afectar negativamente la eficiencia del proceso. Las bacterias competidoras, como las especies de *Lactobacillus* y *Acetobacter*, pueden consumir azúcares y otros nutrientes destinados a las levaduras, alterando el equilibrio del proceso fermentativo. Según a estudios de Pereira et al. (2021), "la competencia microbiana puede reducir

significativamente la disponibilidad de nutrientes para las levaduras, afectando la tasa de fermentación y la producción de etanol" (Pereira et al., 2021).

Formación de dextranas y su efecto perjudicial

Una de las consecuencias perjudiciales de la competencia microbiana es la formación de dextranas, que son polisacáridos producidos principalmente por bacterias del género *Leuconostoc*. Las dextranas se forman a partir de la glucosa y pueden acumularse en el mosto fermentado, creando problemas significativos en el proceso de fermentación. La formación de dextranas puede reducir la disponibilidad de azúcares fermentables para las levaduras, lo que impacta negativamente en la eficiencia de la fermentación.

La presencia de dextranas puede afectar la fermentación de varias maneras. En primer lugar, las dextranas pueden obstruir los equipos de fermentación y filtración, lo que dificulta el manejo y procesamiento del mosto. Además, al consumir glucosa para su formación, las dextranas disminuyen la cantidad de azúcar disponible para las levaduras, reduciendo así la producción de etanol. Según Kral et al. (2019), "la formación de dextranas no solo reduce la disponibilidad de sustratos fermentables, sino que también puede llevar a la acumulación de subproductos indeseables" (Kral et al., 2019).

Así también pueden afectar la calidad del producto final al aumentar viscosidad en el mosto y alterar las características organolépticas del etanol producido. La viscosidad incrementada puede dificultar la separación de etanol durante la destilación y la clarificación, afectando la pureza del etanol y la eficiencia del proceso. Según Kumar et al. (2021), "las dextranas pueden aumentar la viscosidad del mosto, lo que lleva a problemas en el procesamiento y una calidad inferior del producto final" (Kumar et al., 2021).

5. Baja eficiencia en actividad microbiana de las levaduras en la fermentación

Impacto en la actividad microbiana y eficiencia de fermentación

La baja actividad microbiana de las levaduras puede afectar significativamente la eficiencia del proceso de fermentación, limitando la conversión de azúcares a etanol. Según Zha et al. (2020), "la actividad microbiana reducida de las levaduras puede resultar en una tasa de

fermentación más baja, con una conversión incompleta de azúcares y una menor producción de etanol" (Zha et al., 2020).

La eficiencia de estas reacciones depende directamente de la actividad microbiana de las levaduras. Según a estudios de Pérez et al. (2021), "una baja actividad microbiana resulta en una tasa reducida de glucólisis y fermentación alcohólica, afectando la producción total de etanol y el rendimiento global del proceso" (Pérez et al., 2021).

Elevadas cantidades de subproductos formados en las reacciones de fermentación

Podemos observar que una baja eficiencia de actividad microbiana no solo reduce la eficiencia de conversión de azúcares a etanol, sino que también provoca la formación de subproductos no deseados. Estos subproductos, como acetaldehídos, aceites fusel y acetales, son el resultado de desajustes en las condiciones fermentativas, tales como la competencia microbiana y la baja concentración de levaduras activas.

La acumulación de estos compuestos afecta tanto la calidad del producto final como los costos operativos del proceso de destilación, pues requieren tratamientos adicionales para ser eliminados o mitigados.

Formación de Acetaldehídos

El acetaldehído (CH_3CHO) es uno de los principales subproductos de la fermentación alcohólica y se forma durante la etapa inicial del metabolismo del etanol a partir del piruvato, el cual es descarboxilado en presencia de la enzima piruvato descarboxilasa, liberando dióxido de carbono y generando acetaldehído. **Reacción de Formación de acetaldehído**

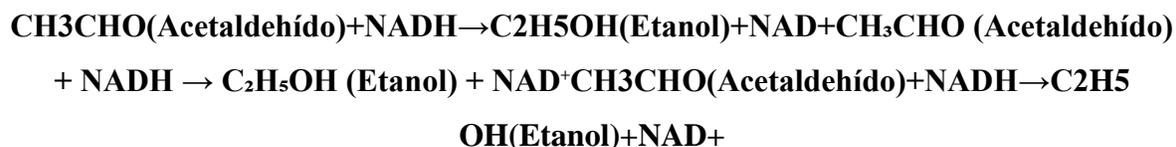


Bajo condiciones óptimas, el acetaldehído es rápidamente reducido a etanol por la acción de la enzima alcohol deshidrogenasa.

Sin embargo, cuando la actividad fermentativa es baja o cuando hay competencia microbiana,

el metabolismo se vuelve menos eficiente y los niveles de acetaldehído en el medio aumentan considerablemente.

Reacción Reducción de acetaldehído a etanol



Este incremento en la concentración de acetaldehído no solo es perjudicial por su toxicidad para las células de levadura, sino que también altera el perfil sensorial del etanol producido.

En la industria, un contenido elevado de acetaldehído puede generar sabores no deseados en el etanol, y su eliminación en las etapas de destilación requiere condiciones adicionales, lo que incrementa los costos operativos (Bauer & Pretorius, 2000). A nivel industrial, la presencia elevada de acetaldehído también puede dificultar la separación de etanol en las columnas de destilación, ya que este subproducto tiene un punto de ebullición cercano al del etanol, lo que dificulta su eliminación durante el proceso de destilación (Zhou et al., 2019).

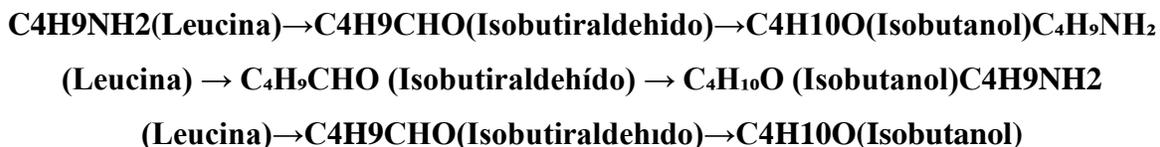
Formación de Aceites Fusel

Los aceites fusel, conocidos también como alcoholes superiores, son subproductos comunes en la fermentación alcohólica que incluyen alcoholes como el propanol ($\text{C}_3\text{H}_7\text{OH}$), isobutanol ($\text{C}_4\text{H}_{10}\text{O}$), y alcohol amílico ($\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}$). Estos compuestos se forman principalmente a partir de la degradación de aminoácidos y se incrementan en condiciones de bajo rendimiento fermentativo, cuando las levaduras se ven obligadas a metabolizar fuentes alternativas de carbono y nitrógeno para compensar la baja disponibilidad de glucosa y otros azúcares.

El mecanismo de formación de aceites fusel sigue el camino del catabolismo de aminoácidos por la vía de Ehrlich, que involucra la transaminación de un aminoácido, su descarboxilación a un aldehído y su posterior reducción a un alcohol. A nivel industrial, la formación excesiva de aceites fusel afecta negativamente la calidad del etanol, ya que estos compuestos tienen puntos de ebullición más altos que el etanol, lo que dificulta su eliminación en la destilación. La presencia de aceites fusel en el etanol final puede dar lugar a un producto de menor calidad

y con un perfil aromático indeseado (López et al., 2015).

Reacción de Formación de alcohol isobutanol (Ruta Ehrlich)

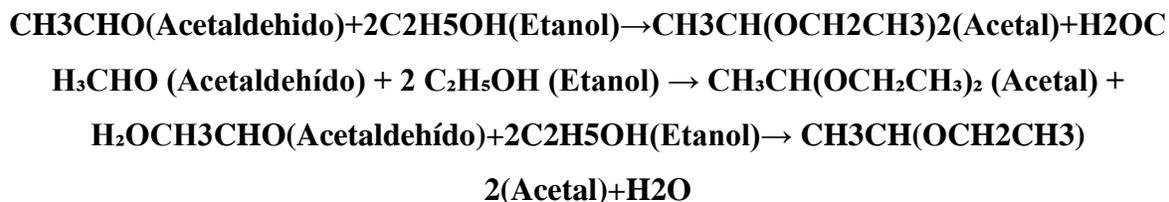


Los aceites fusel no solo presentan problemas sensoriales, sino que también pueden interferir con las operaciones de purificación del etanol y generar residuos problemáticos que deben ser gestionados adecuadamente. La eliminación de estos compuestos suele requerir procesos adicionales de rectificación, lo que incrementa significativamente los costos de producción.

Formación de Acetales

Otro subproducto común en condiciones de baja eficiencia microbiana es la formación de acetales. Los acetales se generan por la reacción del etanol con los aldehídos, especialmente el acetaldehído, en presencia de condiciones ácidas. Los acetales tienen puntos de ebullición elevados y su presencia puede comprometer la calidad del etanol y la eficiencia de la destilación. A nivel industrial, los acetales suelen formarse cuando hay acumulación excesiva de acetaldehído en el mosto, como ocurre en procesos fermentativos ineficientes.

Reacción de Formación de acetales

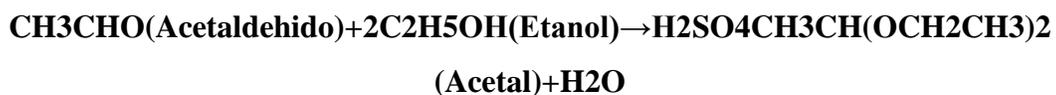


Los acetales no se eliminan fácilmente en el proceso de destilación debido a su alta estabilidad química y su punto de ebullición elevado. La acumulación de estos compuestos en el producto final afecta negativamente la pureza del etanol y puede requerir tratamientos adicionales para reducir su concentración a niveles aceptables (Gibson et al., 2007). Además, en plantas de producción de etanol a partir de caña de azúcar, donde las impurezas del sustrato

también pueden contribuir a la formación de estos compuestos, la eliminación de acetales implica un desafío técnico adicional.

En el contexto industrial, el ácido sulfúrico agregado a la crema de levadura para controlar el pH también actúa como catalizador, facilitando la formación de acetales a partir del acetaldehído generado durante la fermentación.

Reacción de formación de acetales:



El ácido sulfúrico (H_2SO_4) desempeña un papel clave como catalizador en esta reacción, al protonar el grupo carbonilo del acetaldehído, haciendo que este sea más susceptible a la reacción con el etanol. Aunque el ácido sulfúrico se añade principalmente para controlar el pH y evitar el crecimiento de microorganismos no deseados, su presencia aumenta el riesgo de formación de acetales si los niveles de acetaldehído son elevados debido a un bajo rendimiento fermentativo.

Como se ha señalado anteriormente, los diversos problemas identificados se interrelacionan y culminan en una problemática común: **El Bajo Rendimiento Del Proceso De Fermentación**. Este problema no solo afecta la eficiencia de la etapa de fermentación, sino que también tiene repercusiones significativas en la etapa de destilación y en la calidad del producto final. La interacción de factores como la baja actividad de las levaduras, los largos tiempos de fermentación, la competencia microbiana y la formación de dextranas provoca una reducción en la conversión de azúcares en etanol, comprometiendo la eficiencia global del proceso. Esta disminución en la eficiencia durante la fermentación se traduce en una serie de efectos que serán descritos a continuación:

2.1.3 Efectos de las problemáticas desarrolladas

Bajos grados alcohólicos en vino de mosto fermentado

Los bajos grados alcohólicos en el mosto fermentado pueden complicar el proceso de destilación, ya que una menor concentración de etanol requiere mayores esfuerzos para alcanzar las concentraciones deseadas de etanol en el producto final. La destilación se vuelve menos eficiente, lo que puede llevar a una mayor necesidad de energía y a un aumento en los costos operativos. Según Fink et al. (2022), "la baja concentración de etanol en el mosto fermentado puede incrementar los costos asociados con la destilación y la purificación del etanol" (Fink et al., 2022).

La producción de etanol con bajos grados alcohólicos también puede afectar la rentabilidad, ya que se necesita procesar más volumen de mosto para obtener una cantidad suficiente de etanol. Además, la calidad del etanol puede verse comprometida si el mosto fermentado contiene mayores niveles de subproductos indeseables debido a una fermentación incompleta. Según García et al. (2022), "los bajos grados alcohólicos pueden llevar a un producto final de menor calidad y a una reducción en la rentabilidad del proceso de fermentación" (García et al., 2022).

Impacto en la Relación Costo de Operación/Ciclo Fermentativo

El impacto de un bajo rendimiento en la relación costo de operación/ciclo fermentativo en una planta de producción de etanol a partir de caña de azúcar es evidente en varias áreas clave de la operación. En primer lugar, una baja concentración de levaduras en el mosto tiene un efecto directo sobre la velocidad de conversión de azúcares en etanol, lo que prolonga los tiempos de fermentación. Esto implica que los reactores fermentativos permanecen ocupados durante más tiempo, reduciendo la capacidad de producción total de la planta y aumentando los costos operativos relacionados con el consumo energético necesario para mantener condiciones óptimas de temperatura, agitación y oxigenación. Bauer y Pretorius (2000) afirman que una baja concentración de levaduras genera ciclos fermentativos más largos, lo que incrementa el costo de operación por cada ciclo debido al tiempo extendido de uso de equipos y energía.

Además, la adición de agua durante el proceso de centrifugación, necesaria para separar la levadura del mosto fermentado, aumenta el volumen total de líquido que debe procesarse en etapas posteriores, como la destilación. Esta dilución de las concentraciones de etanol incrementa el consumo energético en la etapa de concentración, ya que es necesario evaporar una mayor cantidad de agua para recuperar el etanol deseado. Según Rodríguez et al. (2018), este incremento en el volumen total procesado afecta directamente el costo de destilación, dado que el proceso se vuelve menos eficiente y requiere mayores cantidades de energía para alcanzar las concentraciones finales de etanol.

La competencia microbiana, específicamente la interacción entre levaduras y bacterias, es otro factor que contribuye al aumento de los costos operativos. En plantas de producción de etanol a partir de caña de azúcar, es común que bacterias como *Lactobacillus* compitan con las levaduras por los nutrientes disponibles en el mosto. Esta competencia no solo reduce el rendimiento del proceso, sino que también obliga a recurrir a tratamientos adicionales, como la adición de antibióticos o el uso de condiciones más estrictas de esterilización, lo que incrementa los costos de insumos y mano de obra (Gibson et al., 2007). Como resultado, el costo de operación por ciclo fermentativo se eleva debido a la necesidad de implementar estrategias adicionales de control microbiano, lo que impacta la viabilidad económica del proceso.

Por último, los ciclos fermentativos prolongados no solo afectan la eficiencia energética y el consumo de insumos, sino que también reducen la productividad global de la planta. Al extenderse los tiempos de fermentación, la capacidad de la planta para procesar más lotes de mosto se ve disminuida, lo que resulta en una menor producción de etanol en un período dado. Esto genera una relación desfavorable entre los costos fijos (como la amortización de equipos y gastos generales) y la cantidad de etanol producido, lo que incrementa significativamente el costo unitario por litro de etanol (Zhou et al., 2019). Este desequilibrio entre costos y producción es uno de los principales desafíos operativos en plantas de etanol con bajo rendimiento fermentativo.

Estas problemáticas no solo afectan los costos operativos, sino que también genera una disminución en la cantidad de etanol disponible para las etapas subsiguientes del proceso, en

especial la destilación. Este efecto tiene un impacto directo en dos áreas críticas: la disminución del caudal de alimentación a las columnas de destilación y, en algunos casos, el paro total de equipos o columnas de destilación debido a la baja disponibilidad de mosto fermentado.

Disminución del Caudal de Alimentación a las Columnas de Destilación

Una de las consecuencias más inmediatas es la reducción en el caudal de mosto alimentado a las columnas de destilación. Cuando el proceso fermentativo es ineficiente debido a factores ya descritos, la cantidad de etanol producido en cada ciclo es menor. Esto se traduce en un menor volumen de líquido que contiene etanol disponible para ser procesado en la destilación.

La destilación es un proceso que requiere un caudal constante y adecuado para operar de manera eficiente. Si el caudal de alimentación disminuye, las columnas de destilación no pueden operar en condiciones óptimas, lo que afecta su eficiencia y aumenta el consumo energético por cada unidad de etanol producido. Como señalan Zhou et al. (2019), la destilación de etanol a partir de mosto diluido o en menor volumen requiere mayores tiempos de operación o ajustes en las condiciones del proceso, lo que incrementa los costos por unidad de producto final. Además, una disminución en el caudal de alimentación puede desestabilizar las condiciones de equilibrio dentro de la columna, afectando la calidad del destilado y obligando a realizar ajustes operativos que aumentan los costos de mantenimiento y energía.

Paro Total de Equipos o Columnas de Destilación

En situaciones más extremas; puede ocasionar la paralización total de equipos o columnas de destilación debido a la falta de mosto disponible para procesar. El paro de una columna de destilación representa una pérdida significativa de productividad, ya que el equipo no está generando etanol, pero los costos asociados al mantenimiento y la mano de obra continúan acumulándose. La destilación es una operación continua, y cualquier interrupción en el suministro de mosto provoca ineficiencias y, potencialmente, daños a largo plazo en el equipo por variaciones bruscas en las condiciones operativas. Rodríguez et al. (2018) mencionan

que los sistemas de destilación diseñados para procesar grandes volúmenes de mosto fermentado no son fácilmente ajustables a caudales significativamente reducidos, lo que aumenta el riesgo de paradas no programadas y un mayor desgaste de los componentes.

El paro de una columna de destilación no solo afecta la producción de etanol, sino que también puede interrumpir el flujo operativo de toda la planta. La reactivación de una columna tras un paro implica costos adicionales, como el tiempo y los recursos necesarios para reiniciar el equipo en condiciones óptimas. Además, un paro total puede generar cuellos de botella en otras áreas del proceso, afectando la capacidad de almacenamiento de mosto fermentado o la programación de los ciclos de fermentación. Como resultado, *la planta enfrenta una disminución significativa en su capacidad de producción y una pérdida económica derivada de la falta de aprovechamiento de la infraestructura existente* (Bauer & Pretorius, 2000).

2.2 Descripción De Alternativas Técnicas De Solución.

Dentro de las alternativas técnicas de solución se plantea; la aplicación de enzimas como una herramienta para mejorar el rendimiento de la fermentación. Se evaluó el efecto de diferentes tratamientos enzimáticos sobre la crema de levadura y el mosto, frente a un proceso más convencional en donde se omite la adición de enzimas y de este modo reducir los costos del proceso. Este enfoque tiene como objetivo seleccionar la mejor manera de trabajar entre tres alternativas, cada una de las cuales ofrece una estrategia diferente para optimizar el proceso productivo y reducir la formación de subproductos indeseables en la fase de fermentación. Así también poder evaluar el comportamiento de las diferentes variables involucradas dentro de la fermentación y el rendimiento de conversión de los azúcares del mosto en etanol y los costos de cada alternativa propuesta.

Las alternativas específicas de trabajo se basan en la incorporación de dos tipos de aditivos enzimáticos para el tratamiento del sustrato, en contraste con la alternativa actual que únicamente utiliza las enzimas presentes de forma natural en el mosto fermentado. Sin embargo, en todas las alternativas se contempla la desinfección con dióxido de cloro y la adición de productos reguladores de la fermentación, garantizando el cumplimiento de los parámetros de calidad independientemente de la alternativa elegida.

El trabajo se realizó de manera práctica y se pondrá en marcha las tres alternativas de manera simultánea si las condiciones lo permiten, de no poder lograrse se realizarán las pruebas de manera intercalada y solo se seleccionará los datos cuyos valores y situaciones se asemejen más tomando en cuenta factores y variables de operación que no entraran en juego dentro del estudio final, sin embargo, dichas variables pueden afectar de manera directa o indirecta el proceso de fermentación.

De igual manera, es importante destacar que el presente trabajo se enfoca en el proceso de fermentación para la obtención de alcohol potable (96%), alcohol etanol anhidro (99.5%) y alcohol hidratado (95%). Esto incluye su posterior dilución a alcohol 70% y la producción del ya mencionado etanol anhidro.

Estos aditivos enzimáticos serán denominados enzima A y enzima B respectivamente, y debido a la inversión que significa el agregar aditivos, solo se elegirá una de las tres opciones propuestas:

Tabla II- 1 Tabla De Alternativas De Trabajo Propuestas

ALTERNATIVA 1	TRABAJAR SIN ADITIVOS Y UNICAMENTE CON DESINFECCION MEDIANTE EL USO DE DIOXIDO DE CLORO
ALTERNATIVA 2	DESINFECCION Y TRATAMIENTO ENZIMATICO CON ADITIVOS DE NUTRIENTES Y ENZIMA EFFYMOLL
ALTERNATIVA 3	DESINFECCION Y TRATAMIENTO ENZIMATICO CON ADITIVOS DE NUTRIENTES Y ENZIMA ENZIPRO

Las tres alternativas serán evaluadas mediante el análisis del comportamiento de las variables involucradas en el proceso productivo. Se seleccionarán cubas específicas y similares para garantizar la homogeneidad de los valores que deben mantenerse constantes y observar los cambios en las variables del producto final.

Se aplicarán las cantidades recomendadas por cada fabricante y se considerarán los costos de producción, inversión, análisis y operación en cada alternativa. Posteriormente, se compararán todas las alternativas y se relacionarán con el rendimiento obtenido para determinar la opción más óptima y rentable para la planta.

2.2.1 Aplicación de los insumos a estudiar

2.2.1.1 Enzimas

Para el caso de ambas enzimas los fabricantes recomiendan agregar los insumos diluyendo previamente en un recipiente inocuo una cantidad que alcance una concentración igual a 5ppm, los gramos de estas enzimas varían según el tamaño de cubas con las que se trabajara debido a la variación de capacidad que poseen.

Se debe agregar la enzima una vez toda la crema de levadura disponible este en la cuba de fermentación, esto es aproximadamente un 50% de capacidad de la cuba, así también los niveles de pH deben estar superior a 3,5.

2.2.1.2 Dióxido de cloro

Para la aplicación de este insumo se recomienda agregar el dióxido a la crema de levadura directamente alcanzando una concentración igual a 300 ppm, sin embargo, debe ser de manera periódica, agregando en un ciclo fermentativo y dejando descansar tres ciclos para poder agregar nuevamente dióxido de cloro a la cuba respectiva.

Como el dióxido de cloro se agrega únicamente a la crema, el pH recomendado debe estar en valores cercanos a 2.5.

2.2.2 Clasificación detallada del estudio

2.2.2.1 Tipo de Estudio:

Cuasiexperimental Longitudinal Multivariado De Optimización De Procesos Con Elementos De Investigación-Acción

la clasificación del trabajo como cuasi experimental se debe a la manipulación de una variable diferente a una investigación aleatoria dentro de los grupos experimentales: las diferentes alternativas de trabajo. Esta característica distintiva lo diferencia de un experimento verdadero. Como señala Campbell y Stanley (1963), los diseños cuasi-experimentales son útiles cuando la asignación aleatoria no es factible, como en muchos contextos industriales.

Si bien este estudio se clasifica principalmente como cuasi-experimental debido a las limitaciones en la asignación aleatoria, la participación activa de químicos expertos y la sujeción a normas regulatorias le confieren características de una **investigación-acción**. (Lewin, K. (1946). *Action research and minority problems*. Journal of Social Issues, 2(4), 34-46.)

La investigación-acción implica una estrecha colaboración entre investigadores y profesionales del campo para resolver problemas prácticos; quienes no solo ejecutan el proceso, sino que también pueden aportar conocimientos valiosos para la interpretación de los resultados y la identificación de posibles mejoras.

Esta clasificación destaca la naturaleza híbrida de este estudio, que combina los elementos de control característicos de los experimentos con la flexibilidad y la orientación a la acción de la investigación-acción.

Características Distintivas:

- **Gran cantidad de datos:** La medición de múltiples variables genera un gran volumen de datos que requieren análisis estadísticos avanzados.
- **Interrelaciones complejas:** Las variables están interrelacionadas de manera compleja, lo que dificulta la interpretación de los resultados y requiere el uso de modelos estadísticos adecuados.

- **Enfoque holístico:** El estudio considera el proceso fermentativo en su conjunto, evaluando el impacto de las diferentes variables en los resultados finales.

2.2.2.2 Diseño de Muestreo:

Muestreo Sistemático de Panel con Bloques y Medidas Repetidas

Este diseño combina elementos de varios métodos de muestreo y diseño experimental para proporcionar una comprensión profunda de un fenómeno a lo largo del tiempo. (Cochran, W. G. (1977). Sampling techniques. John Wiley & Sons.).

- **Muestreo Sistemático:** Se selecciona un punto de partida y luego se seleccionan elementos a intervalos regulares. En este caso, se selecciona una cuba y una alternativa para iniciar y luego tomar medidas en cada cuba.
- **Panel:** Se sigue a las mismas unidades de análisis (las cubas) a lo largo del tiempo, lo que permite observar cambios y tendencias.
- **Bloques:** Las cubas se agrupan en bloques (por ejemplo, por tamaño, ubicación, etc.) para controlar la variabilidad y mejorar la precisión de las estimaciones.
- **Medidas Repetidas:** Se toman múltiples mediciones en cada unidad de análisis a lo largo del tiempo, lo que permite evaluar cambios y tendencias.

2.2.3 Desarrollo De Las Variables A Estudiar

Para un estudio más riguroso del proceso, se seleccionaron diversas variables en sus diferentes etapas.

- **Crema de Levadura:** Se evaluaron las siguientes variables: viabilidad celular, concentración celular y pH de la crema.
- **Mezcla Crema-Mosto:** Se midieron el tiempo de fermentación, el contenido de azúcares fermentescibles y la atenuación de grados Brix.
- **Vino Obtenido:** Se analizaron los grados Gay-Lussac y pH.
- **Balances:** Se registraron el volumen total, el volumen de vino obtenido y el volumen de crema utilizado en cuba.

- **Rendimientos:** Se calcularon los rendimientos teóricos y los rendimientos reales del proceso.

2.2.4 Desarrollo De Estudio De Alternativas

Para poder realizar este estudio, se elaboró un registro digital de seguimiento de cada ciclo fermentativo, tomando en cuenta múltiples variables y sus respectivos valores de registros oficiales que se manejan dentro del laboratorio del sector de destilería de la planta en cuestión. Estos datos fueron corregidos y verificados por químicos especialistas de turno.

Este registro fue elaborado tomando en cuenta como sub división: el tipo de enzima o dióxido agregado, los tiempos de descanso entre cada alternativa donde no se agregó ninguna enzima o dióxido; así también se dividió el registro por cubas, por fecha de llenado y por número de orden correspondiente a la correlatividad del número de ciclo fermentativo en general.

Así también se llenó el registro sin omitir ningún contratiempo, entre los que podemos recalcar: paros por energía eléctrica, refuerzo con cultivo nuevo, uso de solo cultivo, aumento de temperatura en cubas de fermentación, etc.

Esto con el fin de ver el comportamiento de los aditivos sobre las levaduras en situaciones reales de operación y producción industrial.

Para este estudio se depuro algunos datos que no son representativos, como ser los valores obtenidos en ciclos donde hubo paro general, ciclos donde hubo cultivo y crema o solo cultivo, valores de rendimiento con picos que sobresalen de lo normal debido a factores externos o casos especiales donde se tuvo valores sobresalientes pero que no siguen la tendencia o continuidad lógica en el resto de valores.

La selección de datos relevantes nos ofrece un mejor estudio con resultados más representativos dentro de un ámbito real, enfoque que busca este trabajo.

Las variables elegidas fueron elegidas y clasificadas según la fase de ciclo fermentativo en el que se encuentren, luego fueron combinadas entre si según dependencia o sinergia en el proceso fermentativo.

- Para estudio crema-levadura: Viabilidad vs concentración, pH crema vs pH final en vino.
- Para estudio crema-mosto: concentración vs viabilidad vs tiempo de fermentación, atenuación de brix vs tiempo de fermentación
- Para estudio vino-alcohol: Viabilidad vs concentración vs grado alcohólico de vino, tiempo de fermentación vs grado alcohólico de vino.
- Para estudio en balances: volumen total de cuba vs viabilidad vs volumen de vino obtenido, volumen total vs volumen de crema vs grado alcohólico, volumen total vs azúcar fermentescibles vs volumen de vino.
- Para estudio en rendimientos: rendimiento teórico vs rendimiento real

Para una mejor comprensión se explican las siguientes variables:

- Azúcar fermentescible: cantidad de azúcares presentes en la materia prima a consumirse y dependiente de variables que indican la calidad de la melaza; estos valores se obtienen de manera experimental y está regido bajo la siguiente ecuación:

Azúcares Fermentescibles = (Pol * 1,05) Azúcares Reductores – Azúcares Infermentescibles

Determinación de azúcares reductores por estequiometria:



Sacarosa agua glucosa fructosa

Por estequiometria sabemos que 342 g de sacarosa absorben 18 g de agua para producir 360 g de "azúcares invertidos" (glucosa + fructosa resultante de la inversión de la sacarosa). Proporcionalmente. 100 g de sacarosa producirán 105,263 g de azúcares invertidos, o se necesitan 95 g de sacarosa para producir 100 g de azúcares invertidos. La sacarosa se puede transformar en azúcares invertidos (ART o azúcares reductores totales) multiplicando la masa de sacarosa (SAC) por 1,05263 o, más precisamente, dividiéndola por 0,95.

$$sacarosa \text{ en ART} = \frac{SAC * 2 * 180}{342} = \frac{SAC}{0,95}$$

El ART se puede determinar directamente en materiales que contienen azúcares (caldos, jarabes, masas, mieles) utilizando diversas técnicas, como la oxidorreductometría y la colorimetría. cromatografía. Indirectamente, cuando se conoce el contenido de azúcares reductores (AR), el ART se puede estimar mediante la ecuación:

$$ART = \frac{SAC}{0,95} + AR$$

Rendimiento Teórico Y Rendimiento Real

El rendimiento teórico hace referencia a la cantidad teórica de sacarosa convertida en etanol, para eso necesitamos la cantidad de azucars fermentescibles que tenemos en nuestra materia prima por cada ciclo fermentativo; luego procedemos a calcular nuestro rendimiento con la siguiente formula:

$$\text{Rendimiento Teórico} = \text{Azucars Fermentescibles} * \text{Factor De Multiplicación Para Transformaciones Estequiométricas (ART en alcohol L/kg ART)}$$

Para rendimiento real relacionamos los kg de melaza de la materia prima consumida con los litros de alcohol absoluto obtenidos en cada ciclo fermentativo, tal y como indica la siguiente ecuación:

$$\text{Rendimiento real} = \frac{\text{alcohol absoluto}}{\text{kg de melaza de materia prima}} * 100$$

$$\text{Alcohol Absoluto} = \text{volumen de vino} * \frac{\text{grado alcoholico}}{100}$$

$$\text{volumen de vino} = \text{volumen total de cuba} * \text{factor alcohol producido}$$

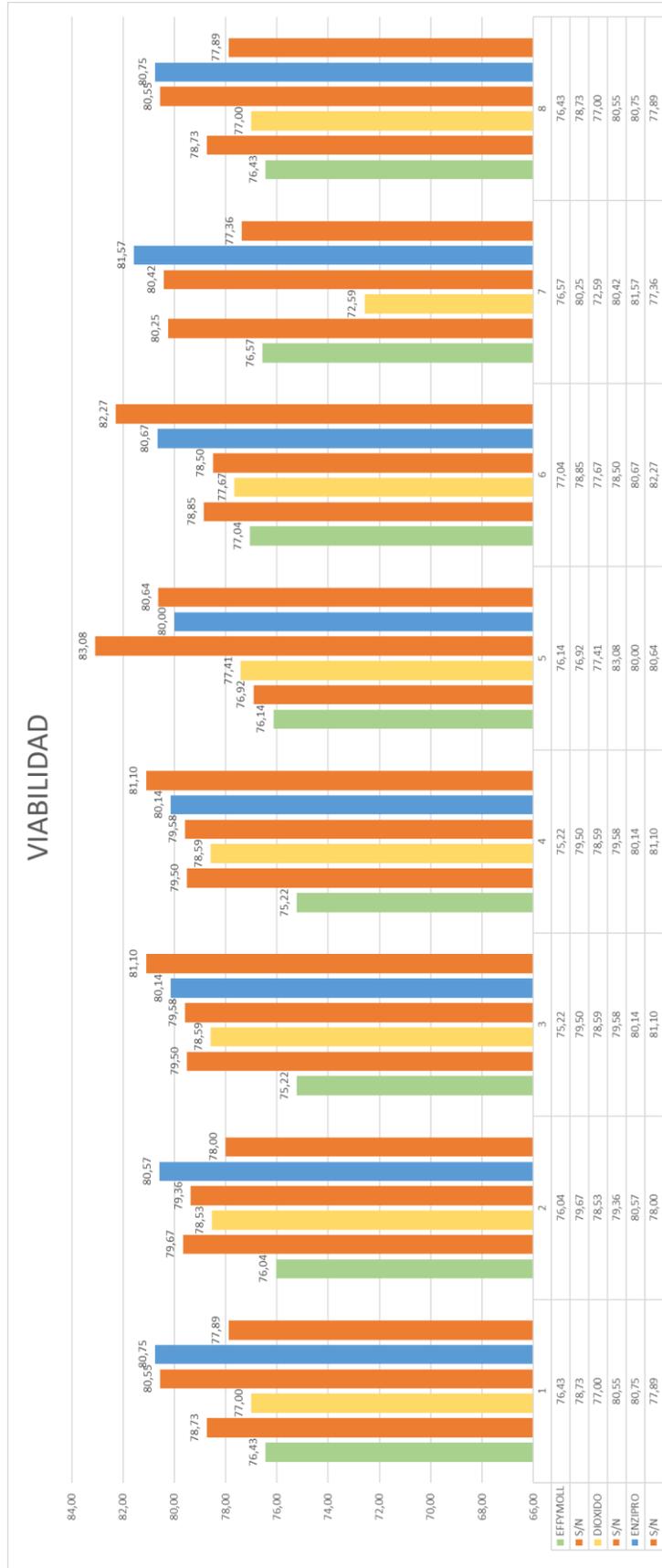
El resto de variables son determinadas por mediciones directas en laboratorio y fueron explicadas anteriormente.

Una vez conociendo cada variable ya sea simple o compuesta, procedemos a armar nuestro sistema de variables para el estudio y ver cómo se comportan las levaduras en cada ciclo

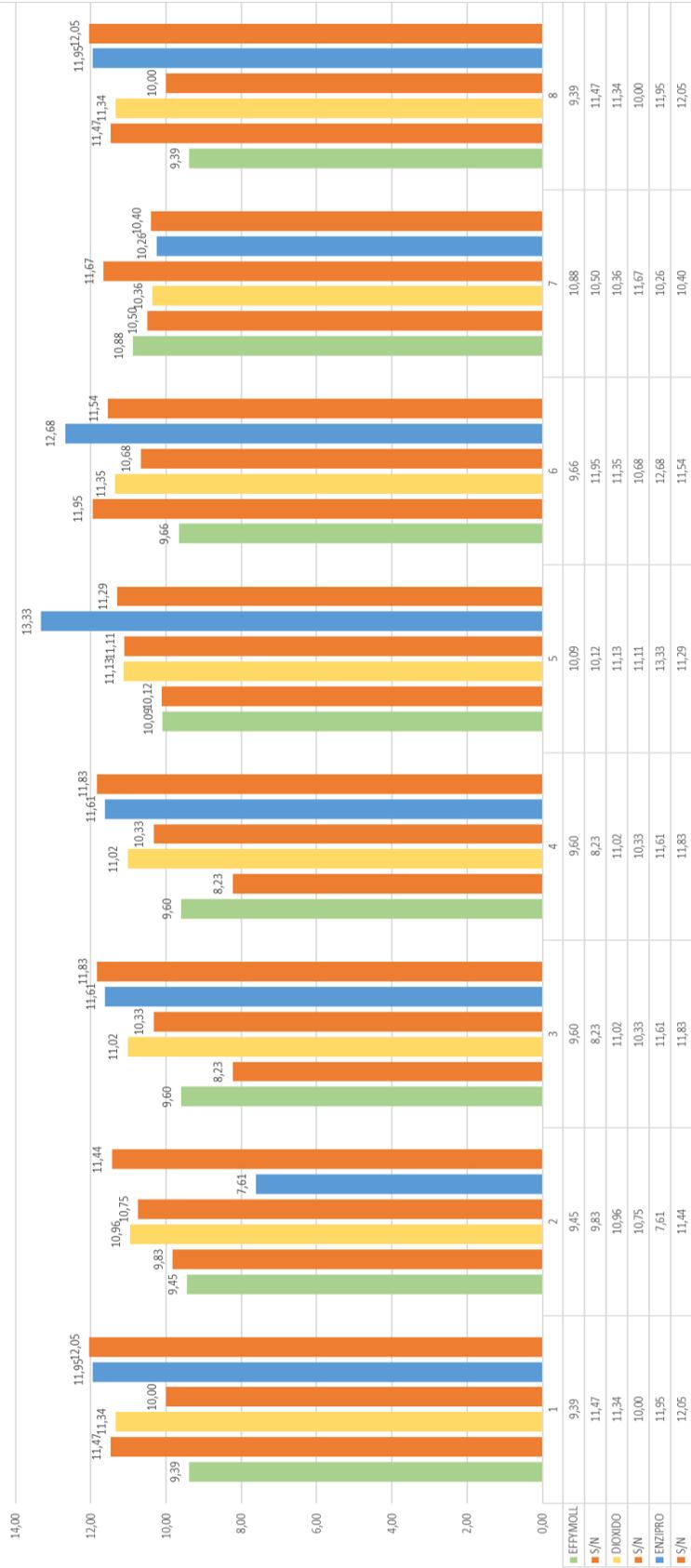
fermentativo durante cada fase donde se trabajó con las diferentes alternativas de trabajo durante tiempos específicos y con fases de descanso entre ellas para poder evaluar de mejor manera los datos obtenidos.

A continuación, se muestran las tablas de promedios recopilados, ordenados y clasificados por cubas y las variables más representativas para este estudio:

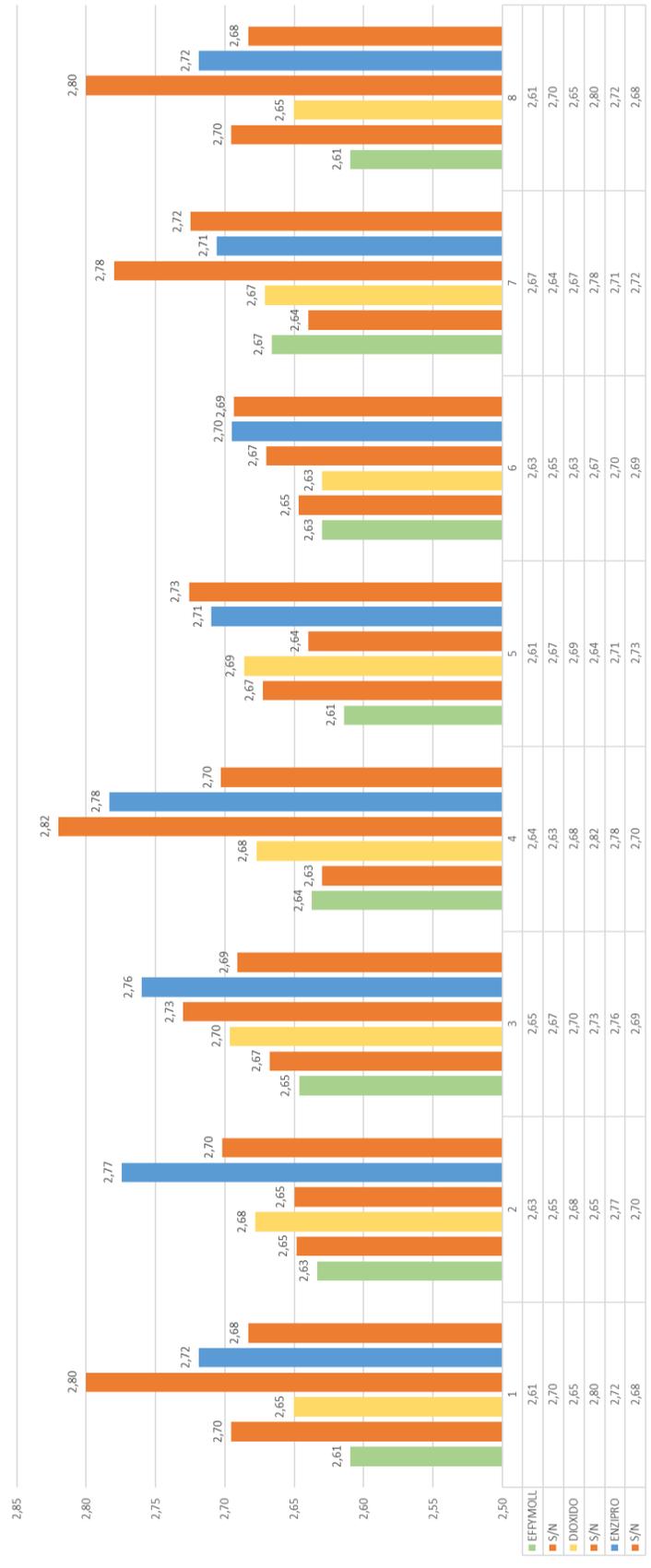
Gráfico II – 1;13 promedios de los datos obtenidos



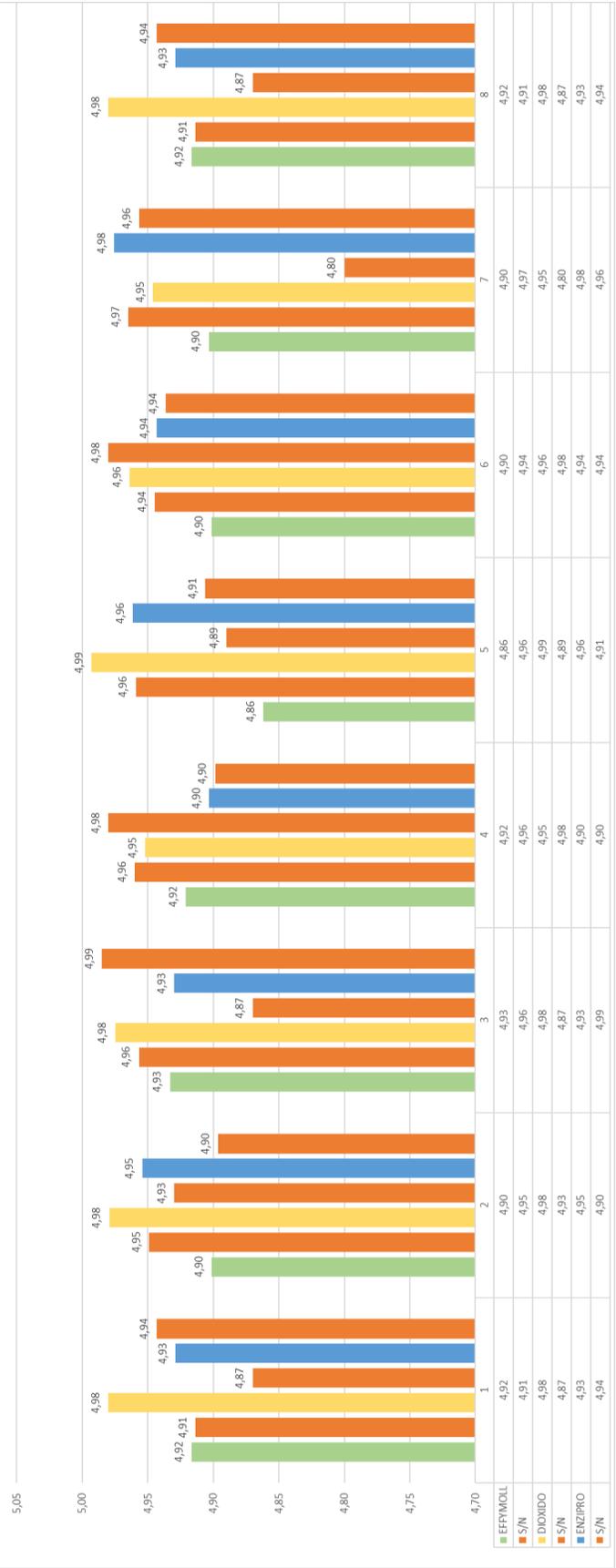
CONCENTRACION DE LEVADURAS

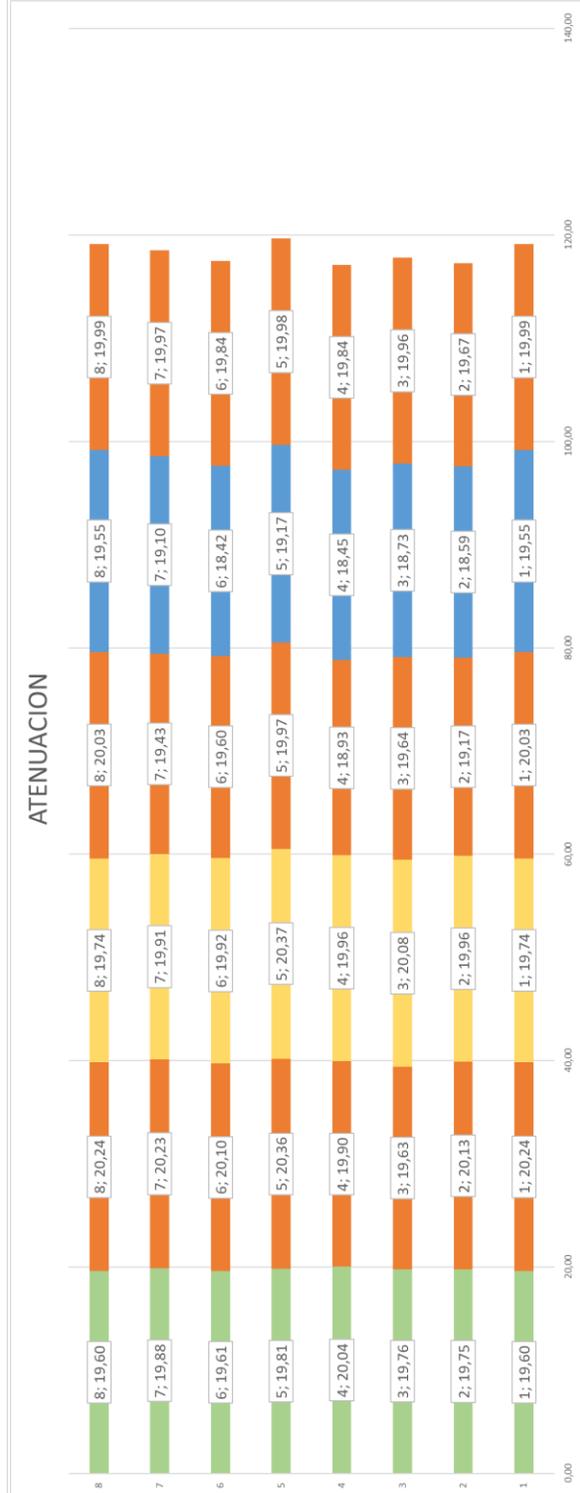
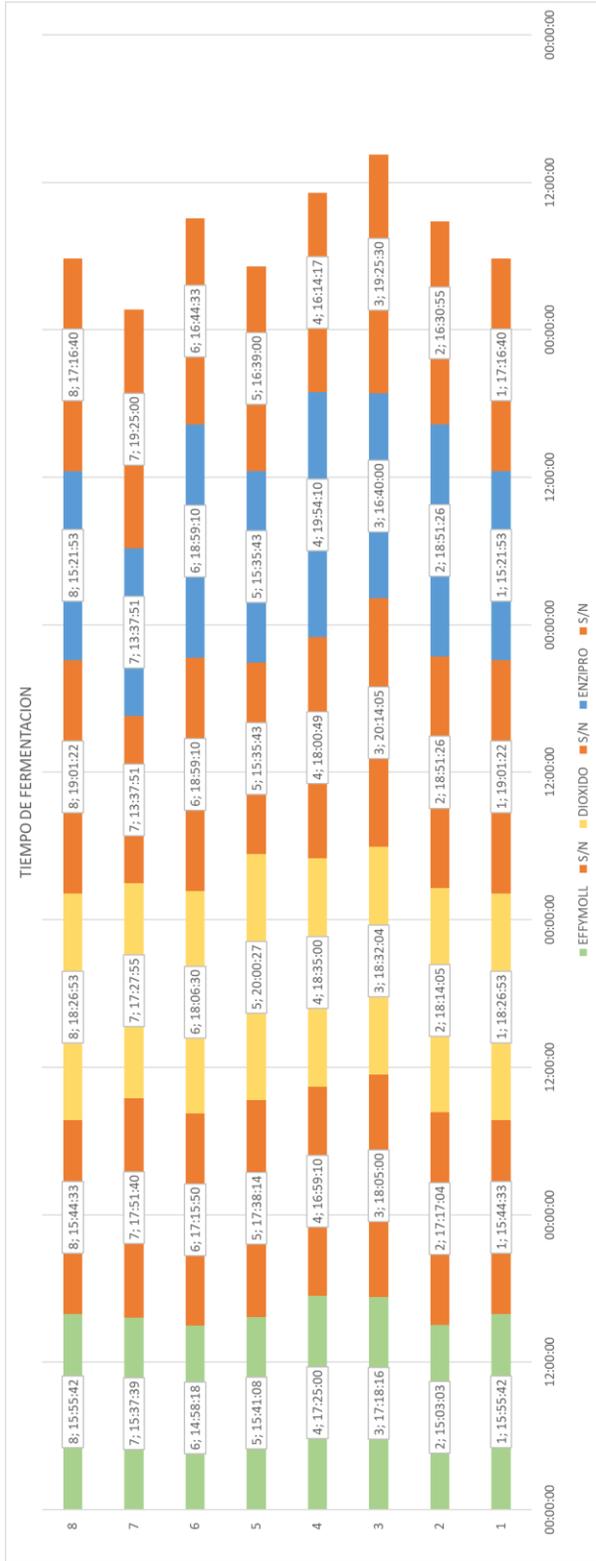


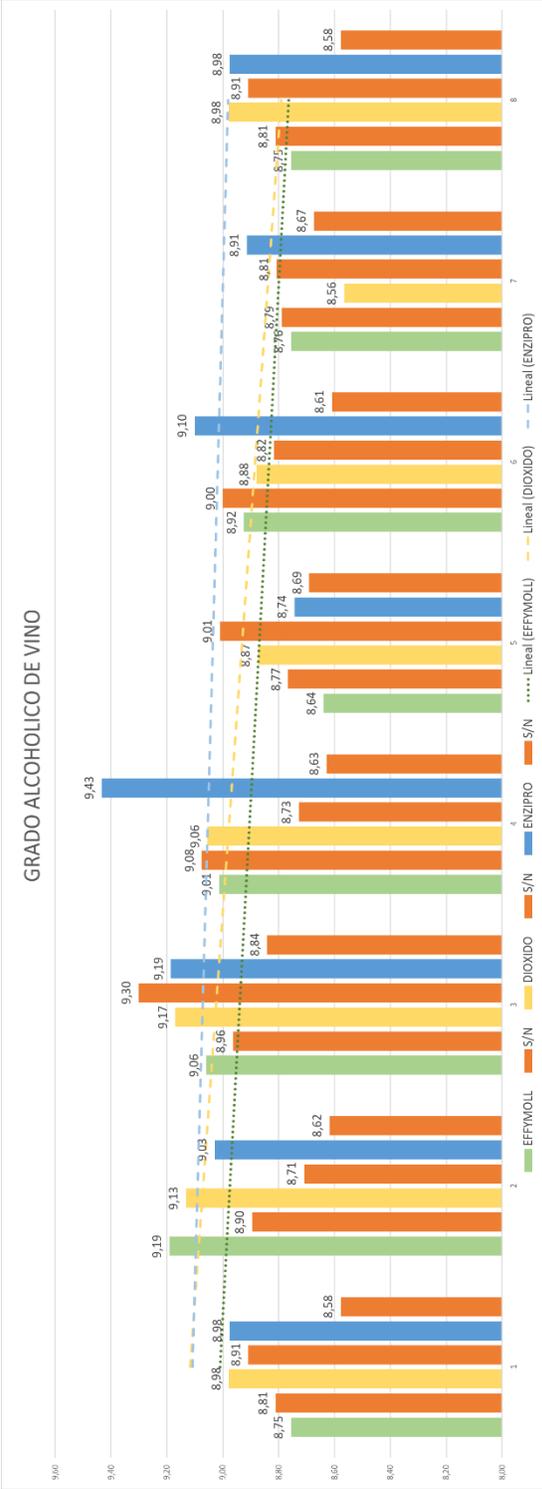
PH CREMA



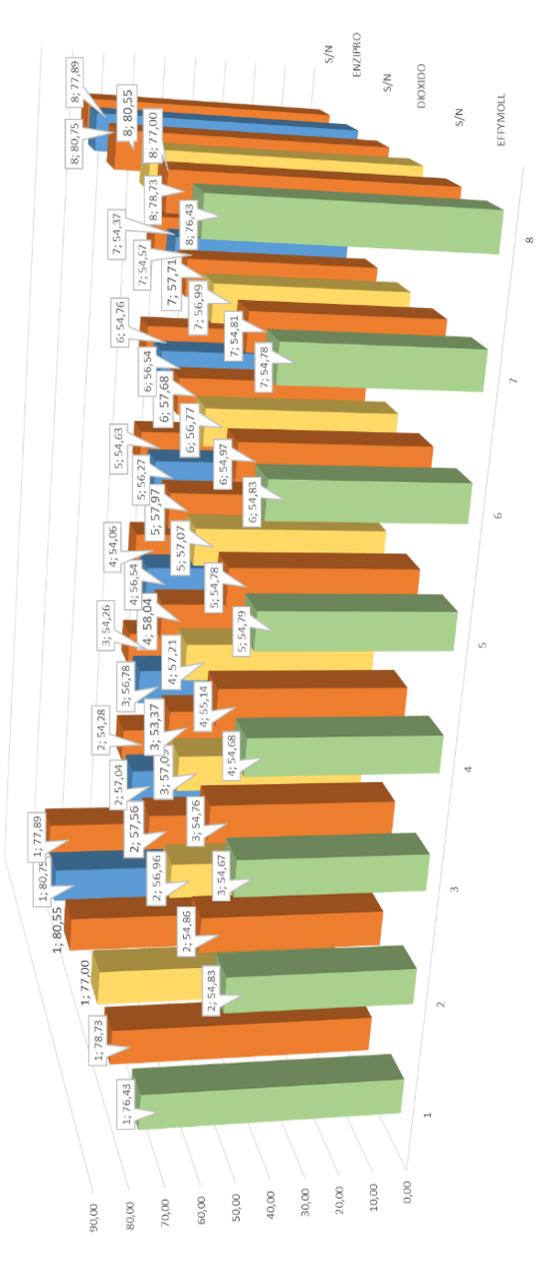
PH FINAL

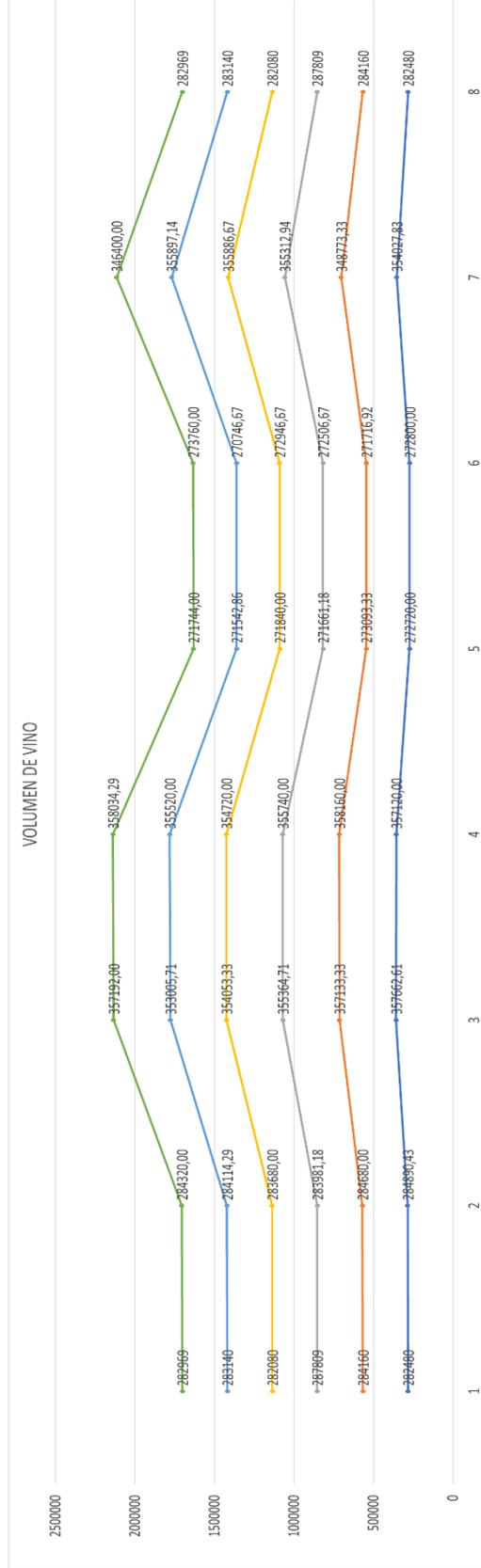
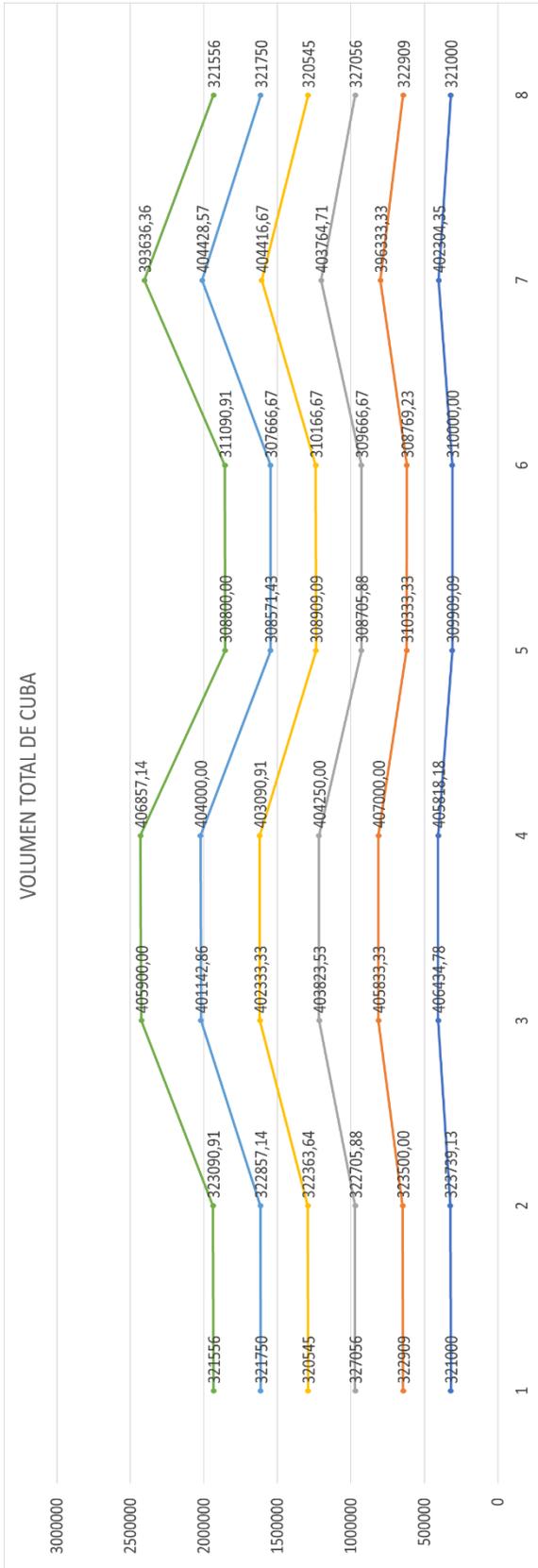


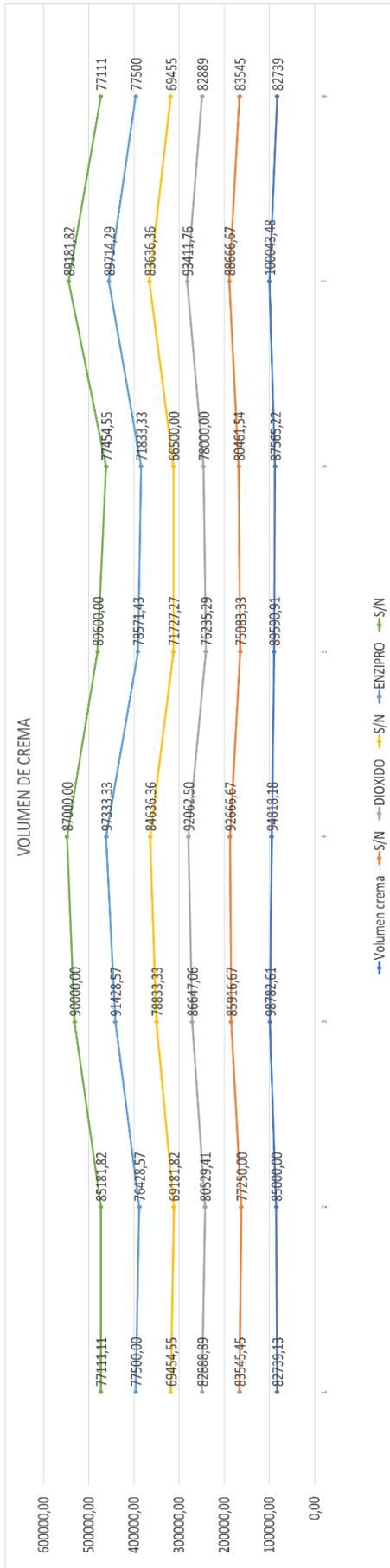




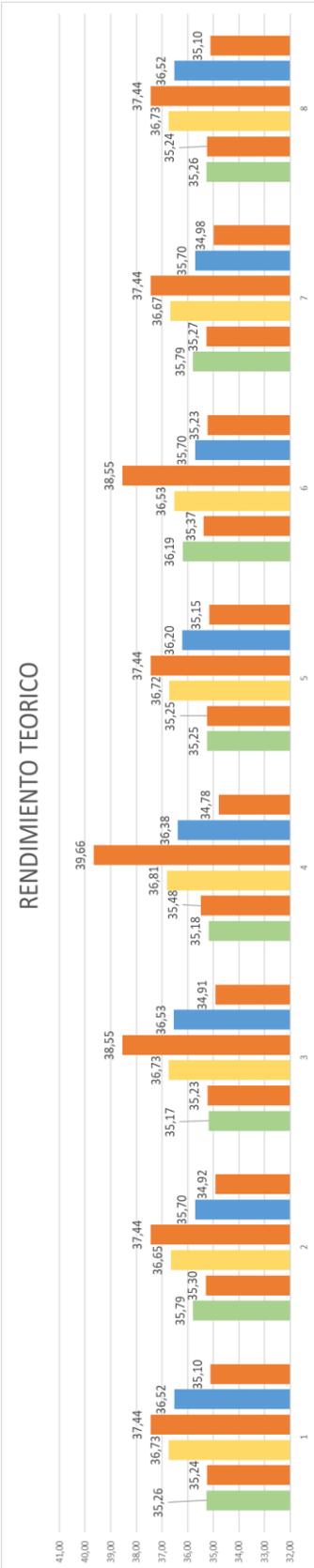
AZUCAR FERMENTESCIBLE







RENDIMIENTO TEORICO



RENDIMIENTO REAL



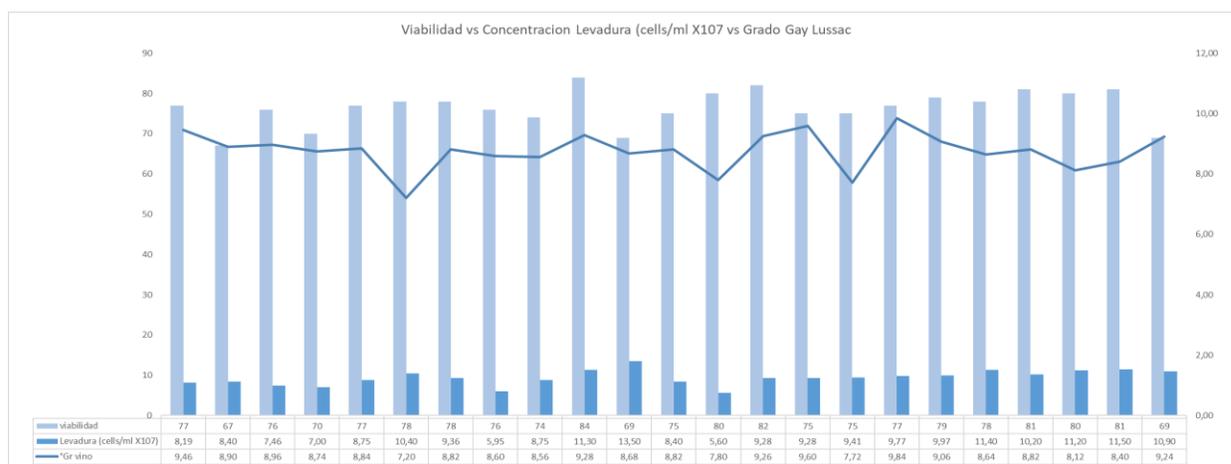
2.2.5 Análisis e interpretación de los datos obtenidos

2.2.5.1 Effymoll

Se presentan valores significativamente bajos de viabilidad frente a las otras alternativas, de igual manera la concentración posee los valores más bajos en este estudio sin embargo estos se encuentran dentro de un rango permitido de operación.

Esos valores de viabilidad y concentración no siguen una tendencia fácil de predecir con exactitud los valores oscilan y varían mucho en cada ciclo fermentativo.

Podemos encontrar un comportamiento similar cuando nos referimos al grado alcohólico del vino, donde notamos que el rango de variación entre ciclos es muy notorio e inconsistente obteniéndose valores entre 8.3 hasta 10.1 Gay Lussac aproximadamente. *Ejemplo grafica cuba 401*



Los valores de pH indican medios más ácidos frente a las demás alternativas lo que nos propone que es encima también posee agentes reguladores de pH que conlleva a un menor uso de ácido sulfúrico o aditivos reguladores externos.

Los valores de atenuación de brix son mayores; dato que podemos observar con mejor detalle en el estudio por cubas, también podemos observar que los valores de brix del llenado fueron ligeramente mayores, pero se trabajó con brix final similar en todas las alternativas. Aun así, se puede observar que los mejores tiempos de fermentación en promedio los tiene esta

alternativa de proceso, dato que se ve reflejado en los mejores valores de atenuación de brix/hora que se pudo calcular en este estudio.

En cuanto al grado alcohólico se refiere y como ya indicamos antes vas a tener un rango de variación significativo entre ciclos, los promedios por cubas nos arrojaron valores entre 8.9 y 9.1 Gay Lussac. Así también vale recalcar que la tendencia apunta más hacia los 9.10 grados Gay Lussac, y que los promedios se ven perjudicados por eventos que perjudicaron a la fermentación y que le costó a la levadura entre dos a tres ciclos fermentativos volver a los valores más altos de grado alcohólico.

Analizando los valores de llenado de Cuba podemos observar que se sitúan en la media en promedio y en combinación con los volúmenes de crema se obtuvo buenos valores de volumen de vino obtenido, pero sin ser los mejores y colocándose ligeramente por detrás de los resultados obtenidos por el dióxido de cloro.

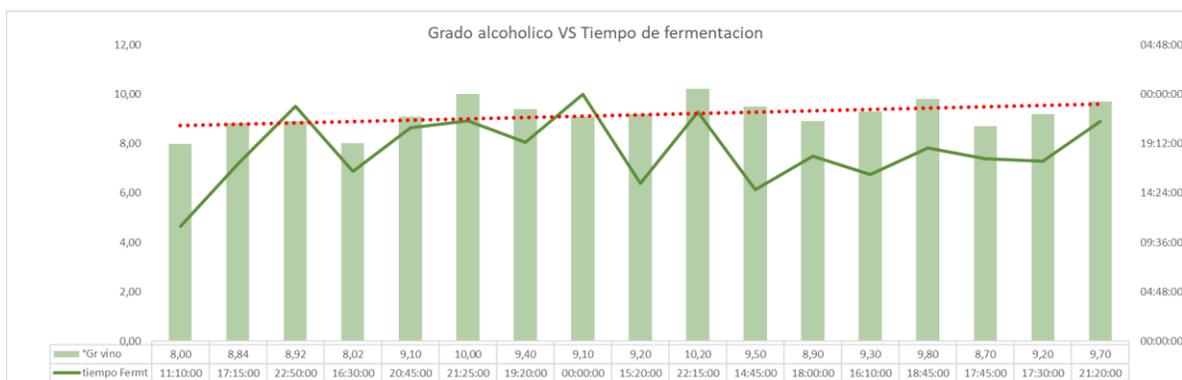
Otra variable a recalcar es la cantidad de azúcares fermentables presentes en esta fase y como pese a tener valores notoriamente inferiores frente al resto de alternativas se pudo obtener resultados previamente indicados.

Sin embargo, los rendimientos teóricos y reales salieron relativamente Bajos en comparación a las otras opciones de trabajo; esto fue debido a los grados alcohólicos bajos que se tuvo a lo largo de esta fase y los valores de materia prima utilizada fueron los causantes y afectar directamente en los rendimientos finales.

2.2.5.2 Dióxido de cloro

Los niveles de viabilidad se ven mejorados frente al Effymoll no obstante aún se sitúa bajo la media de valores obtenidos en cuanto a los tiempos de fermentación podemos notar que son ligeramente más elevados frente a las dos alternativas tomando en cuenta que este tiempo se tuvo dificultades en operación y pesa la depuración de valores fuera del rango para traer una comparación más representativa, se puede observar que el dióxido ha ayudado a bajar los tiempos de fermentación buscando una mejoría luego de enfrentar estos problemas técnicos.

Observando la variable de grado alcohólico en vino se nota una tendencia lineal en sus valores frente a las otras dos alternativas; donde se puede observar una mejora para valores relativamente bajos sin embargo también se observa una caída de grado alcohólico frente a valores cercanos de 9.10 obtenidos al trabajar con las enzimas. Lo que nos deja unos valores límites de mejoría de entre 9,2 y 10,17 grados gay Lussac aproximadamente; entregando resultados muy similares entre sí ya que el dióxido trabaja buscando una linealidad y constancia sin entregar los picos sobresalientes en sus valores. *Ejemplo grafico cuba 403*



Esta linealidad se ve afectada por valores bajos obtenidos por algún problema de operación, que le cuesta de 2 a 3 ciclos fermentativos recuperarse y alcanzar valores óptimos que caracterizan al dióxido. También se mantienen estos datos para ver el comportamiento de las levaduras tras este tipo de eventos y de qué manera logra recuperarse y cuánto tiempo le toma hacerlo.

Los niveles de pH se vieron incrementados lo que demuestra que la regulación de pH en esta fase se da únicamente por acción microbiológica y aditivos externos al dióxido de cloro, lo que indica qué se debe agregar mayor cantidad de estos en cada ciclo fermentativo si se trabaja con esa alternativa.

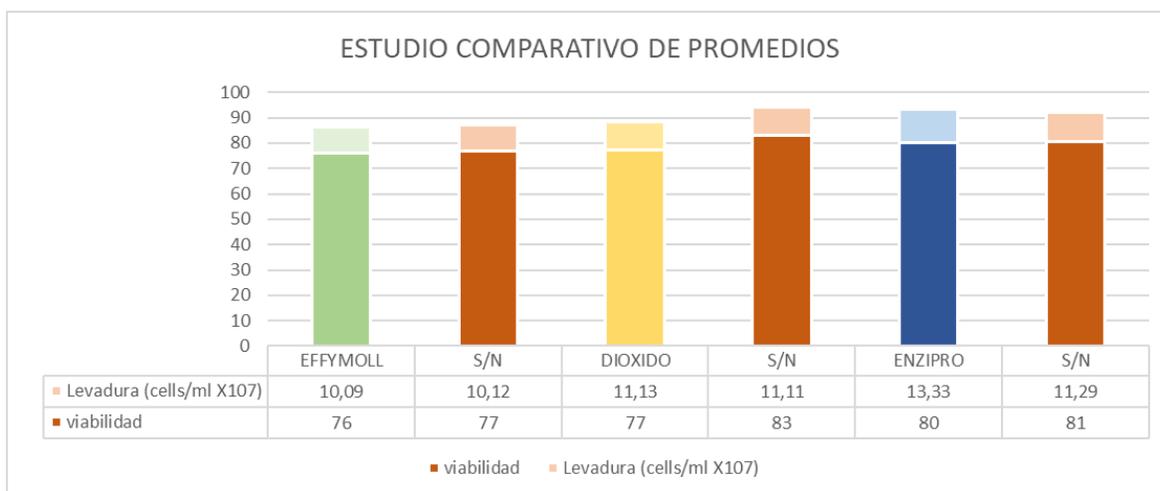
Si observamos los valores de atenuación y nos enfocamos en los valores de atenuación de brix/hora son los más bajos frente a las otras dos alternativas, y no solo afectó en su fase de agregación, sino que también afectó al tiempo de descanso posterior a su aplicación no se pudo evidenciar de manera significativa una disminución en los valores de atenuación.

Los volúmenes de crema fueron reducidos en 6.74% aproximadamente frente a los volúmenes de crema que se obtuvieron con el Effymoll, los niveles de crema recuperado y utilizado se ven disminuidos lo que indica que en esta fase ocurrió una mayor depuración de levaduras, sin embargo también podemos observar que en esta fase se encuentran los mayores niveles del volumen totales de Cuba y lo más importante mayores niveles de vino producido; resultados obtenidos también gracias a un incremento significativo en azúcares fermentables presentes en la materia prima.

Los rendimientos también tuvieron mejorías frente al Effymoll sobre todo en el rendimiento teórico, el rendimiento real no tuvo un incremento tan significativo debido a la tendencia lineal que busca el dióxido de cloro en sus valores de grado alcohólico.

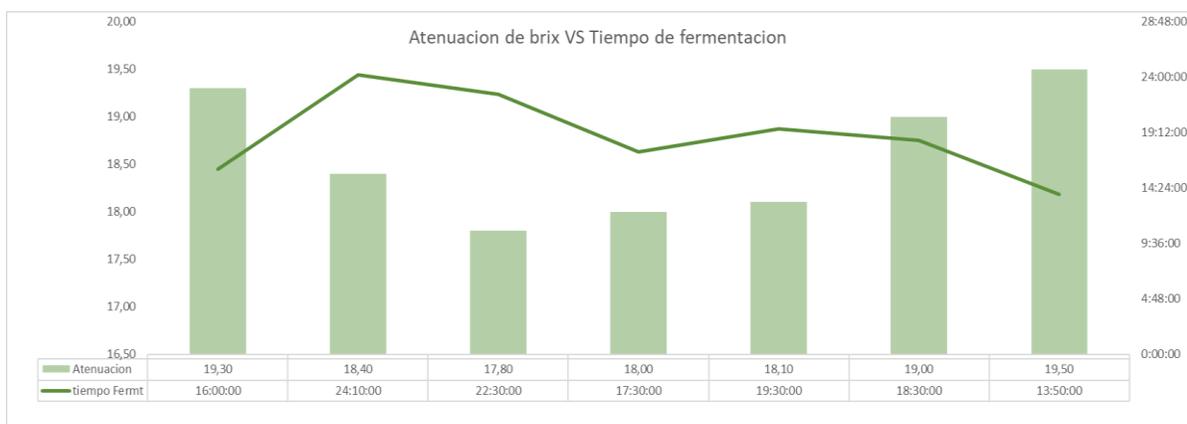
2.2.5.3 Enzipro

Los niveles de viabilidad tienen los valores más elevados frente a las demás alternativas no solamente busca una mejoría sino también una linealidad en valores superiores a lo largo del tiempo. (Cuba 405)



Los tiempos de fermentación también buscan una tendencia lineal de ser mejores frente a las otras alternativas en el promedio general, sin embargo podemos observar que las mejorías no se dan en todas las cubas ese es el caso de la Cuba 402 404 y 406 respectivamente, donde en ocasiones puntuales obtuvo valores superiores a 24 horas debido igual a problemas operacionales y aunque en esta fase está enzima tiende a bajar los tiempos de fermentación;

le tomó aproximadamente de 3 a 4 ciclos fermentativos recuperarse y volver a los niveles donde demuestra una mejoría significativa. *Ejemplo grafica 402.*



En la variable de grado alcohólico se nota unos valores más elevados si nos referimos al promedio general, sin embargo, esto se debe a algunos picos elevados que dio en cubas puntuales, también podemos observar que los valores obtenidos de grado alcohólico se encuentran entre 8.74 y 9.43 aproximadamente, dato que nos indica una gran variación y que se aleja de una tendencia lineal que caracterizaba al dióxido de cloro.

Pese a ello; se muestra una clara mejoría frente a la otra enzima según los datos que se observan hasta ahora.

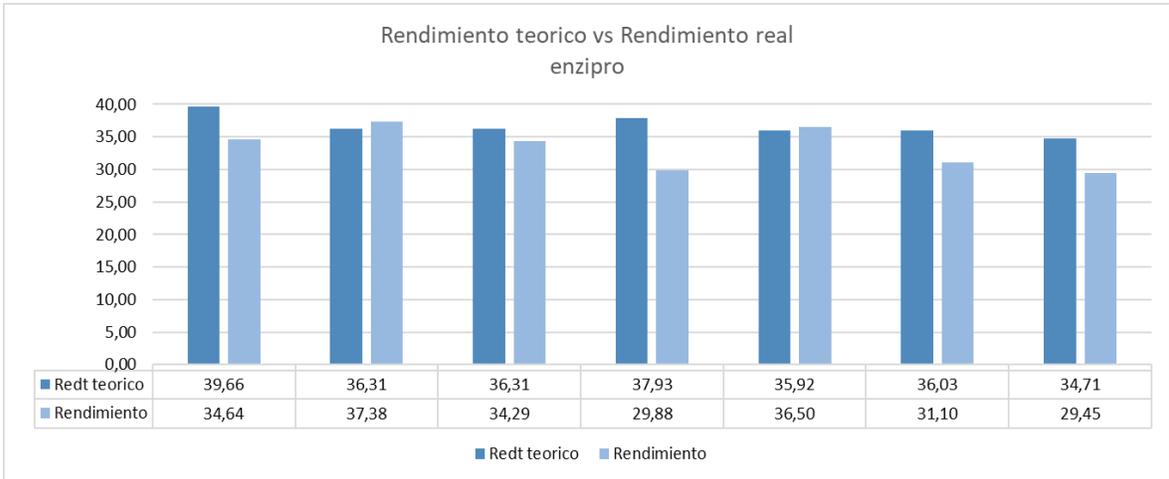
Si observamos los niveles de atenuación brix/hora; podemos notar que sus valores son de aproximadamente 1.16, lo que nos demuestra una mejoría frente al dióxido de cloro, pero ubicándose detrás de la otra enzima, también vale recalcar que los valores de atenuación de brix fueron menores que el resto de alternativas lo que puede indicar que se trabajó con una ligera disminución en el brix del llenado durante estos ciclos fermentativos.

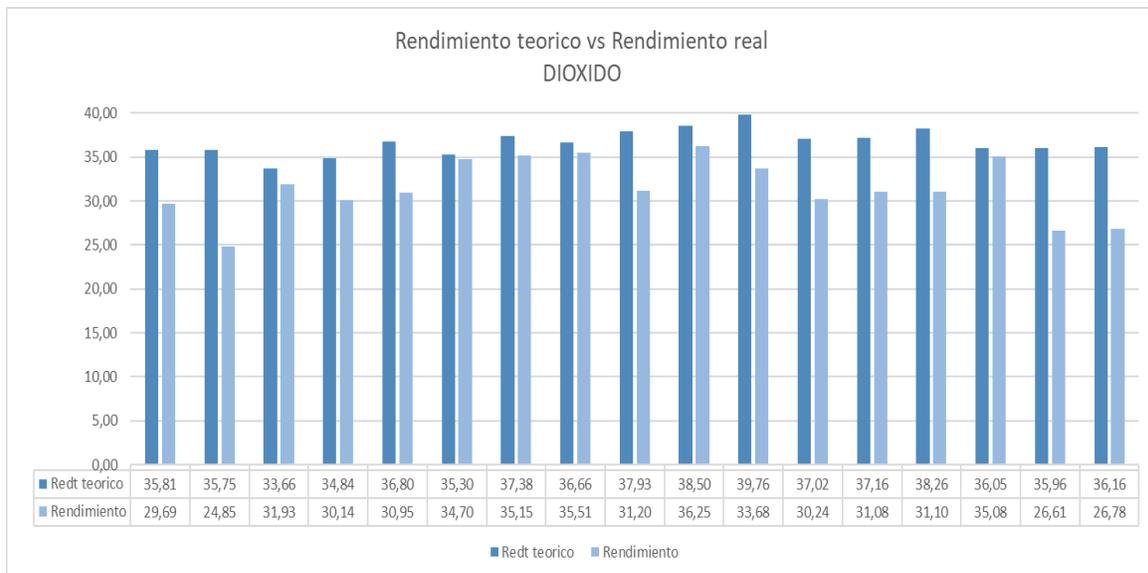
Otra variable también que se debe observar con detenimiento es el de los azúcares fermentables disponibles en esta fase que, aunque nos indique picos más elevados en el promedio global podemos notar en el análisis por cubas que sus valores se sitúan en la media entre las otras dos alternativas acercándose un poco más a los valores que se tuvo al trabajar con el dióxido de cloro.

Situaciones similares ocurren con los volúmenes de crema, pero con una tendencia a ser menor que las demás alternativas en la mayoría de las cubas; valores que se ven reflejados en el promedio general donde se muestra cómo este volumen queda por detrás del resto de alternativas de trabajo.

También podemos notar que con esos volúmenes de crema se tuvo valores más Bajos en cuanto al llenado de las cubas lo que repercutía en valores más bajos de volumen de vino obtenido en cada ciclo.

La media global del rendimiento teórico y rendimiento real se ve disparada debido a algunos picos en los grados obtenidos en los vinos. También es importante recalcar que aquí se tuvo valores más altos frente a la competencia debido a la linealidad de los resultados cosa que repercutió en el promedio global, que, frente al conjunto de valores en rendimiento obtenidos en las otras alternativas, se puede observar picos más bajos que ocasionaron una caída en sus promedios generales; es decir esta mejoría se ve más por demérito de los otros valores que por mérito de esta enzima. *(Ejemplo 402 Dióxido Vs Enzipro)*





Condiciones Operativas

- pH Óptimo:** Para la aplicación de las enzimas se precisa obtener un pH del medio igual o superior a 3.5 eso será un indicador que nos dirá si está o no listo el medio para recibir la enzima y aprovecharla en su máxima capacidad.
- Cantidad de levaduras presentes:** Para poder ser aprovechar a su totalidad tanto el dióxido de cloro como las enzimas, la Cuba ya debe estar con la cantidad total de levaduras presentes en la crema de levadura, tomando en cuenta también que el llenado de las cubas se hace agregando el mosto y la levadura de manera simultánea, el volumen de la Cuba apto para recibir las enzimas es aproximadamente la mitad de la capacidad de la misma.
- Temperatura:** La temperatura recomendada para agregar los aditivos es la misma temperatura recomendada para poder operar y trabajar en un ciclo fermentativo industrial; esa temperatura oscila entre 34 y 33 grados centígrados.

2.3 Selección De La Alternativa De Solución Más Apropiaada De Acuerdo A Criterios Apropiaados

Como vimos en la comparación entre las alternativas propuestas, podemos notar diferentes comportamientos de la levadura, las variables y los ciclos fermentativos en sí.

Por una parte, tenemos al Effymoll que pese a sus bajos niveles de viabilidad y de concentración celular; logro un alto performance en el consumo y conversión de azucars en alcohol en cuanto a tiempo se refiere, alcanzando buenos valores de atenuación de brix/ hora, pero no alcanzando valores que representen una mejoría frente a las otras alternativas.

Otra variable que destaco sin duda fue el pH, cuyos valores mostraron que no solo se trata de una sola enzima, sino que posee otros componentes que conforman este aditivo, y que ayudan a regular el pH y reducir ligeramente los costos en consumo de ácido sulfúrico.

No obstante, podemos ver como los valores de rendimiento, lo sitúan por debajo de su competencia, ya que los bajos valores de grado alcohólico obtenidos en el vino fermentado, repercuten en cantidades más bajas de alcohol absoluto disponible para una destilación.

Si por otra parte se analizan los datos del dióxido tendremos una mejoría en cuanto a viabilidad y concentración se refiere, mejoría que se mantuvo incluso en el tiempo de descanso posterior a su aplicación, así también podemos observar mejoría en los grados alcohólicos del vino obtenido en la fermentación, pese a existir situaciones externas que perjudicaron el proceso fermentativo, los valores de grado alcohólico descendieron a valores muy cercanos a 9°GL, y no le tomo más de 3 ciclos fermentativos volver a los valores más altos que destacan a esta alternativa de trabajo.

Aunque también debemos notar que su punto débil son los tiempos de fermentación, los cuales están dentro de lo permitido pero sobresalen de manera negativa frente a las demás opciones, estos valores en promedio general lo ubican por detrás de su competencia, pero en un análisis por cubas podemos observar que en algunos casos se sitúa en la media, no obstante estos bajos tiempos de fermentación podemos notarlos en los datos de atenuación de brix/

hora que arrojo el análisis comparativo, lo que nos dejan valores totalmente mejorables y que puede ser un factor diferencial a la hora de elegir una alternativa.

También es bueno recalcar que los niveles en volumen de crema de levadura se vieron reducidos, lo cual nos indica que hubo una mayor depuración de levadura en esta fase, variable que puede afectar en el consumo de azúcares por parte de las levaduras, las cuales al poseer buenos índices de viabilidad lograron una mejor cantidad volúmenes de vino obtenido, lo que repercute directamente en unos buenos valores de rendimiento de la fermentación tanto teóricos como reales.

Por último tenemos a la última enzima a analizar; Enzipro, la cual nos dio unos buenos valores de viabilidad y concentración frente a las demás alternativas, otra variable que tuvo una mejoría notable fue la del tiempo de fermentación en cuanto a promedios generales, sin embargo y dentro de un estudio más preciso podemos notar que este comportamiento de mejoría o es consistente, y que en un 40% de las cubas se obtuvo valores puntuales superiores a las 24 horas, valores que no solo refleja un problema externo sino que también nos demostró que la mejoría de esas cubas tardó entre 3 a 4 ciclos fermentativos y aun así no se obtuvo tiempos de fermentación mejores a los demás.

Algunos picos de mejoría ayudaron a bajar el promedio general de los tiempos de fermentación, pero en un estudio más detallado de los valores, podemos notar una característica de esta alternativa, y es el de la notable oscilación que nos entregó en su fase de agregación.

También recalcar que los niveles de atenuación fueron mejorados frente al dióxido de cloro mas no frente a la otra enzima, de igual manera el consumo de brix no es lo suficientemente eficiente como para obtener unos niveles de rendimiento que den una clara mejoría frente a las demás alternativas.

A fin de visualizar de manera clara los criterios de evaluación y seleccionar la alternativa más adecuada para nuestro proceso fermentativo, hemos diseñado una matriz de ponderación. En esta matriz, asignaremos una puntuación del 1 al 5 a cada criterio, siendo 5

la puntuación más alta. Al sumar las puntuaciones obtenidas por cada alternativa, podremos identificar aquella que mejor se ajusta a nuestros requerimientos

Tabla II – 2 comparativa de alternativas

tabla comparativa de alternativas	concentacion y viabilidad microbiana	tiempo de fermentacion	grado alcoholico	ph	volumenes de vino obtenido	rendimiento	adaptacion	TOTAL
EFFYMOLL	2	4	2	4	3	3	3	21
DIOXIDO DE CLORO	3	3	4	3	4	4	5	26
ENZIPRO	4	3	3	4	3	5	3	25

Fuente: elaboración propia

Como podemos observar el dióxido de cloro es la alternativa que obtuvo una mayor puntuación, y podemos observarlo en el comportamiento que tuvo a lo largo de la fase de prueba, los buenos valores obtenidos en diferentes variables, y la tendencia a mantenerse lineal en los mismos conforme pase el tiempo ayudaron a no solo mejorar el proceso sino a poder afrontar y acomodar sus resultados luego de cualquier percance técnico que puede darse en una industria.

2.4 Definición de condiciones y capacidad.

Muchas veces la aplicación de algún aditivo en la industria debe ser considerado debido al requerimiento de las condiciones necesarias para poder ejecutarlas; sin embargo, en este caso no se necesita de una instalación en específica para poder poner en marcha cualquier alternativa propuesta, lo que genera una ventaja tanto a nivel técnico como tecnológico.

2.5 Selección del o los equipos necesarios.

La versatilidad de las alternativas propuestas radica en su compatibilidad con el equipamiento ya existente en la planta. Dado que solo se requiere un recipiente de medición estéril, es posible adaptarlas a diferentes procesos y productos sin la necesidad de inversiones adicionales en maquinaria especializada. Esta característica las convierte en una solución flexible y adaptable a las necesidades cambiantes de la producción.

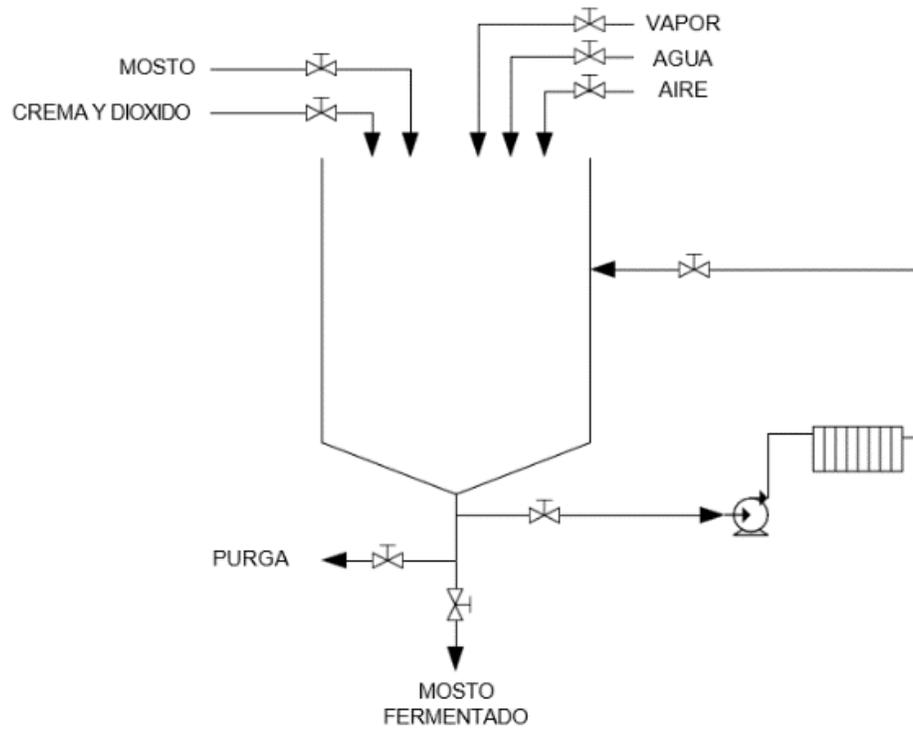
Al eliminar la necesidad de adquirir equipo especializado, las alternativas propuestas ofrecen una ventaja económica significativa. La inversión inicial se limita a un recipiente de medición, lo que reduce considerablemente los costos de implementación. Además, la simplicidad del proceso minimiza los riesgos de errores operativos.

CAPITULO III

3.ESPECIFICACION Y DISEÑO DEL EQUIPO

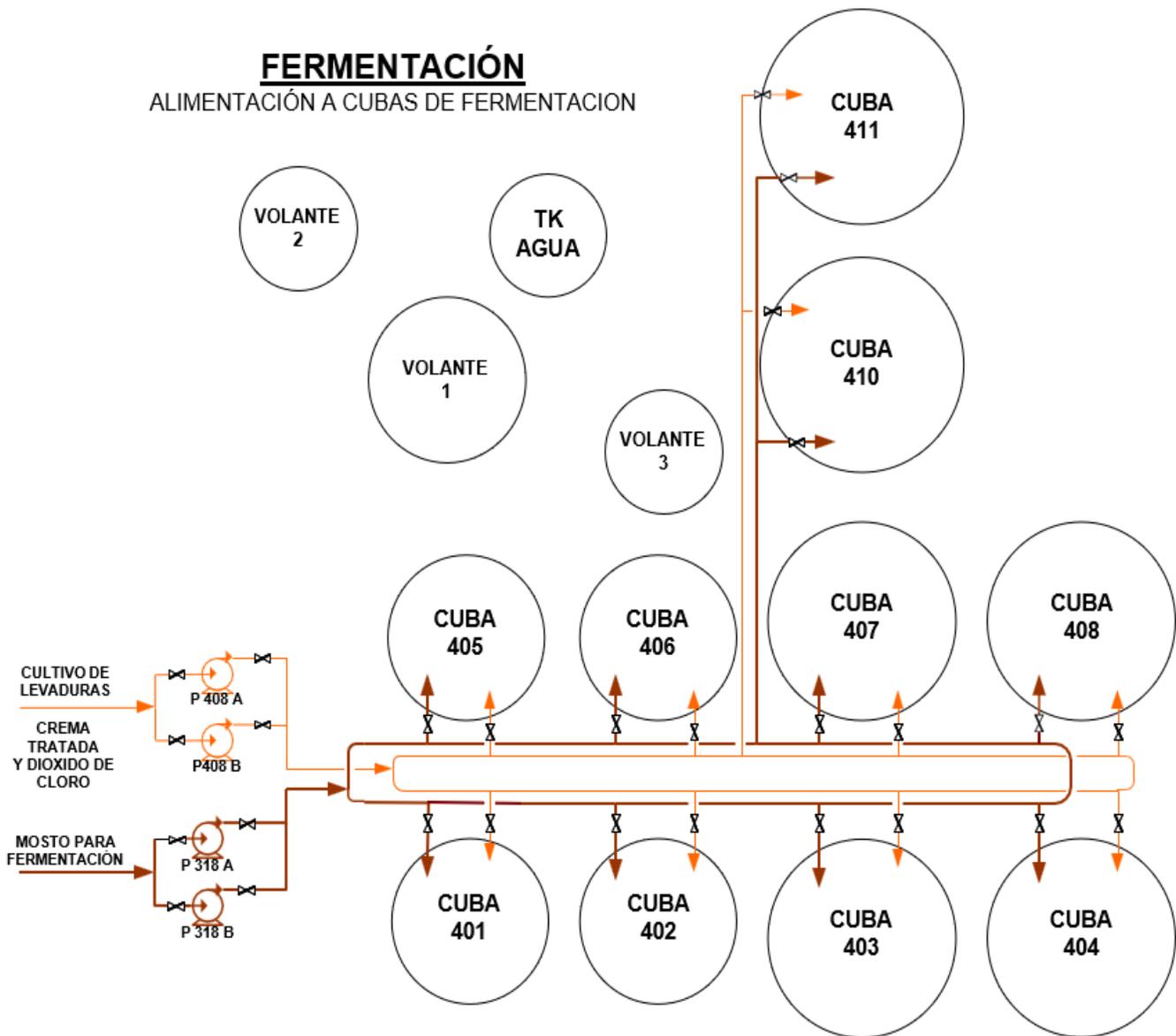
3.1 Diagramas de flujo

3.1.1 Diagrama de tanque de dilución con dióxido de cloro



Fuente: elaboración propia

3.1.2 Diagrama alimentación a cubas de fermentación con dióxido de cloro

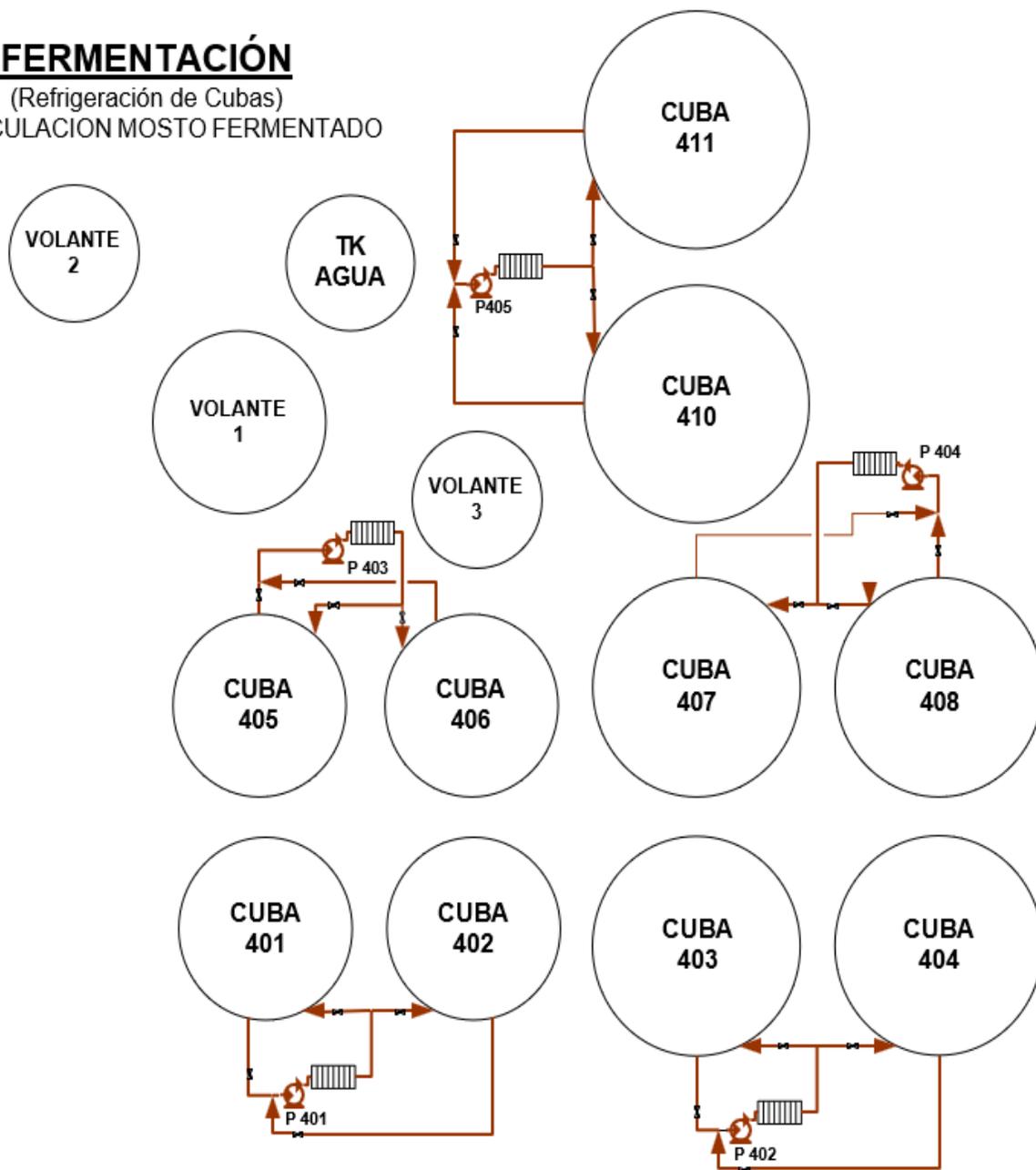


Fuente: elaboración propia

3.1.3 Diagrama refrigeración de mosto fermentado

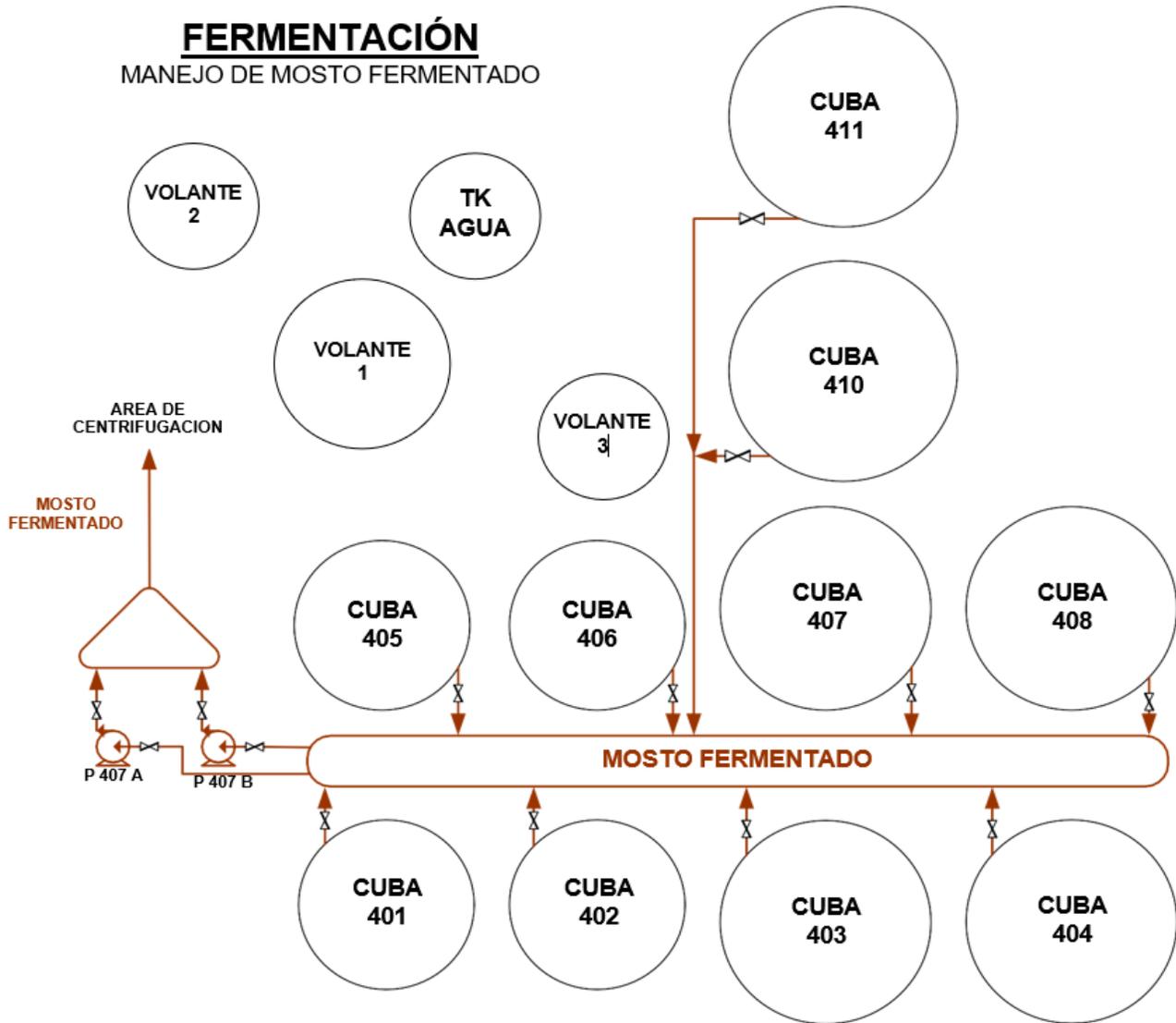
FERMENTACIÓN

(Refrigeración de Cubas)
RECIRCULACION MOSTO FERMENTADO



Fuente: elaboración propia

3.1.4 Diagrama despacho de mosto fermentado a área de centrifugación

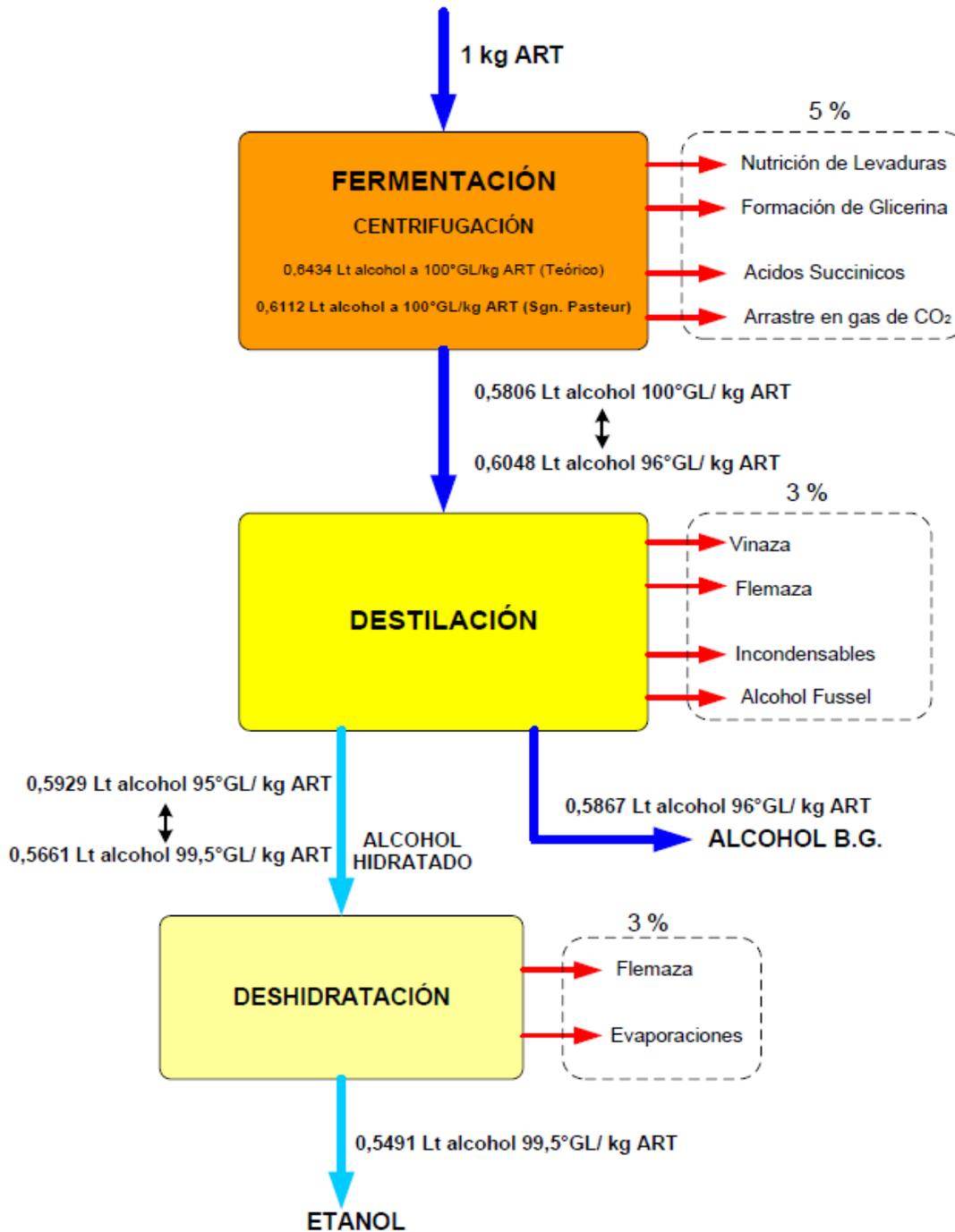


Fuente: elaboración propia

3.2 Balance de materia y energía

3.2.1 Diagrama balance de masa global en destilería

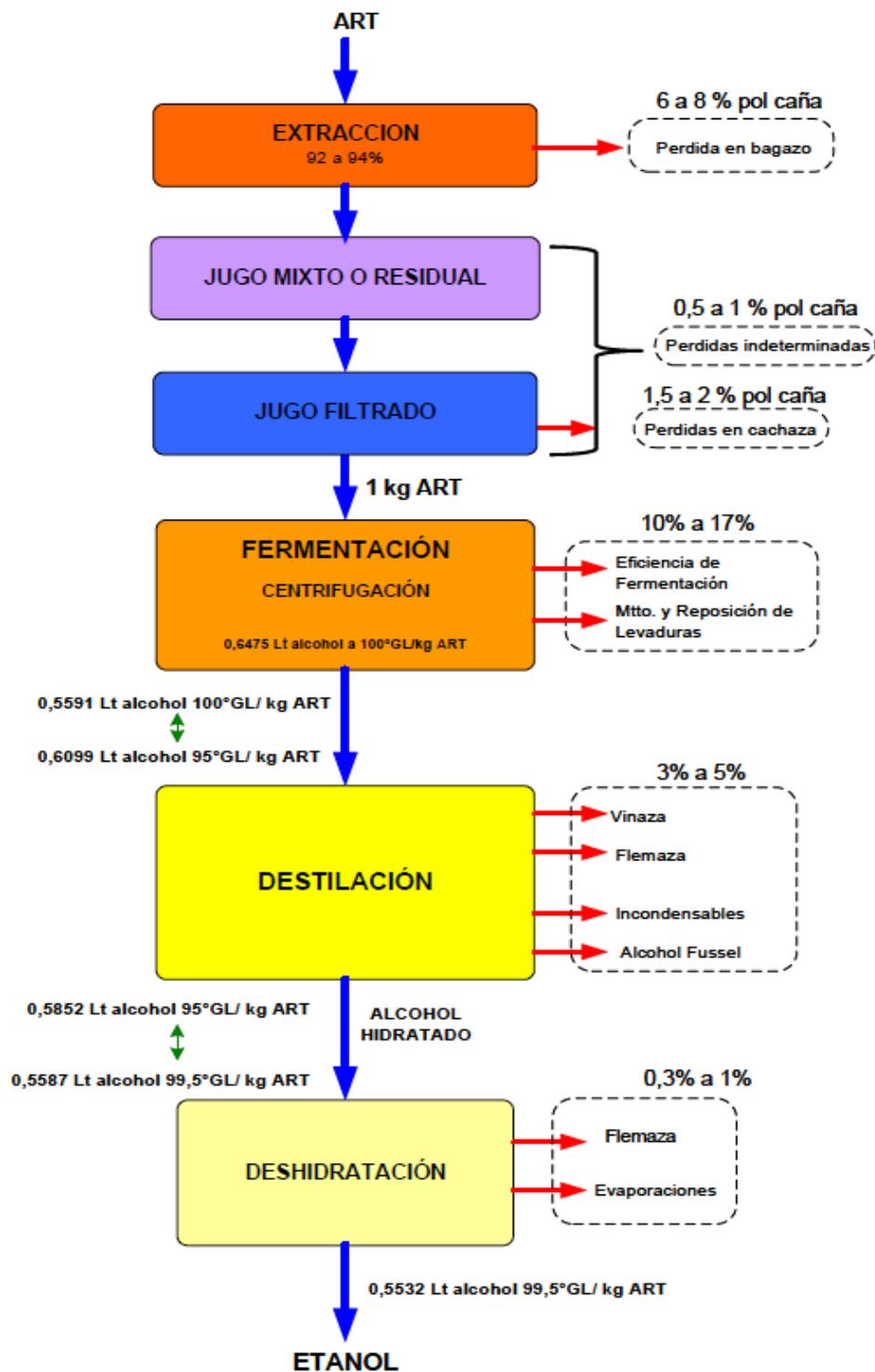
BALANCE DE MASA DESTILERÍA



Fuente: elaboración propia

3.2.2 Diagrama balance de masa global de alcoholen destilería

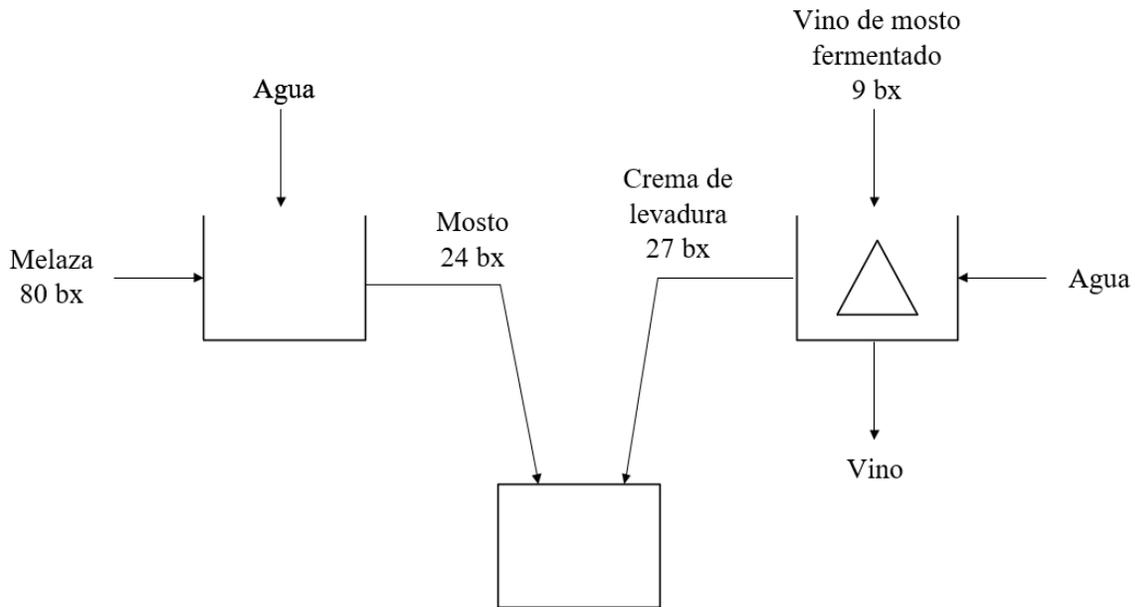
BALANCE DE MASA DE ALCOHOL



Fuente: elaboración propia

3.2.3 Balance de materia de mosto fermentado

Diagrama de flujo III - 1 balance de materia mosto fermentado



Fuente: elaboración propia

Balance en cubas pequeñas:

- Volumen de la cuba: 580000 litros
- Kilogramos de melaza: 155000 kg

Entrada de Melaza:

Melaza Sólidos: 80% de 155000 kg = $0.80 \times 155000 = 124000$ kg de sólidos

Agua en Melaza: 20% de 155000 kg = $0.20 \times 155000 = 31000$ kg de agua

Tanque de Dilución:

Volumen del mosto: 580000 litros = 580 m^3

Sólidos en el mosto: 24% de 580000 kg = $0.24 \times 580000 = 139200$ kg de sólidos

Agua en el mosto: 76% de 580000 kg = $0.76 \times 580000 = 440800$ kg de agua

Fermentación:

Sólidos en la crema: 27% de 580000 kg = 0.27 x 580000 = 156600 kg de sólidos

Agua en la crema: 73% de 580000 kg = 0.73 x 580000 = 423400 kg de agua

Centrifugación:

Sólidos en mosto post-centrifugación: 9% de 580000 kg = 0.09x580000 = 52200 kg de sólidos

Agua en mosto post-centrifugación: 91% de 580000 kg 0.91 x 580000 = 527800 kg de agua

Sólidos en vino: 7% de 580000 kg = 0.07 x 580000 = 40600 kg de sólidos

Agua en vino: 93% de 580000 kg = 0.93 x 580000 = 539400 kg de agua

Dióxido de Cloro:

$$\text{dioxido de cloro (g)} = \frac{\text{PPM} \times \text{VOLUMEN DE CREMA (L)}}{1000000}$$

Sólidos en crema: 156600 kg

Densidad de mosto: 1030kg/m³

$$\text{volumen de crema (L)} = \frac{156600 \text{ kg}}{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \times 1000 = 152233.98 \text{ L}$$

$$\text{dioxido de cloro (g)} = \frac{300 \text{ PPM} \times 152233.98 \text{ L}}{1000000} \times 1000 = 45.67 \text{ g}$$

Cantidad agregada: 45.67 g

Volumen de dióxido de cloro líquido: 45.678 = 45.67 L / 1g/L

Balance Global:

Total de Sólidos en Crema: $156600 \text{ kg} + 45.67 \text{ g} = 156645.67 \text{ kg}$

Volumen Total de Crema: $152233.90 \text{ L} + 45.67 \text{ L} = 152279.65 \text{ L}$

Balance para cubas grandes:

- Volumen de la cuba: 410000 litros
- Kilogramos de melaza: 100000 kg

Entrada de Melaza:

Melaza Sólidos: 80% de 100000 kg = $0.80 \times 100000 = 80000 \text{ kg}$ de sólidos

Agua en Melaza: 20% de 100000 kg = $0.20 \times 100,000 = 20000 \text{ kg}$ de agua

Tanque de Dilución:

Volumen del mosto: 410000 litros = 410 m^3

Sólidos en el mosto: 24% de 410000 kg = $0.24 \times 410,000 = 98400 \text{ kg}$ de sólidos

Agua en el mosto: 76% de 410000 kg = $0.76 \times 410000 = 311600 \text{ kg}$ de agua

Fermentación:

Sólidos en la crema: 27% de 410000 kg = $0.27 \times 410000 = 110700 \text{ kg}$ de sólidos

Agua en la crema: 73% de 410000 kg = $0.73 \times 410000 = 299300 \text{ kg}$ de agua

Centrifugación:

Sólidos en mosto post-centrifugación: 9% de 410000 kg = $0.09 \times 410000 = 36900 \text{ kg}$ de sólidos

Agua en mosto post-centrifugación: 91% de 410000 kg = $0.91 \times 410000 = 373100 \text{ kg}$ de agua

Sólidos en vino: 7% de 410000 kg $0.07 \times 410000 = 28700$ kg de sólidos

Agua en vino: 93% de 410000 kg $= 0.93 \times 410000 = 381300$ kg de agua

Dióxido de Cloro:

$$\text{volumen de crema (L)} = \frac{110700 \text{ kg}}{1030 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \times 1000 = 107475.73 \text{ L}$$

$$\text{dioxido de cloro (g)} = \frac{300 \text{ PPM} \times 107475.73 \text{ L}}{1000000} \times 1000 = 32.24 \text{ g}$$

Cantidad agregada: 32.24 g

Volumen de dióxido de cloro líquido:

$$32.24 \text{ g} = 32.24 \text{ L} / 1\text{g/L}$$

Balance Global:

Total de Sólidos en Crema: $110700 \text{ kg} + 32.24\text{g} = 110732.24 \text{ kg}$

Volumen Total de Crema: $107475.73 \text{ L} + 32.24 \text{ L} = 107507.97 \text{ L}$

3.2.4 Calculo Rendimiento Fermentación



Glucosa. Masa molecular: 180 gr

$$C = 6 \cdot 12 = 72$$

$$H = 12 \cdot 1 = 12$$

$$O = 6 \cdot 16 = 96$$

Alcohol. Masa molecular: $46 \text{ gr} \cdot 2 = 92 \text{ gr}$.

$$C = 2 \cdot 12$$

$$H = 6 \cdot 1$$

$$O = 1 \cdot 16$$

$$\begin{array}{ccc} 180 \text{ gr} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr } C_6H_{12}O_6 & \rightarrow & 92 \text{ gr} \times 1 \text{ kg}/1000 \text{ gr } C_2H_5OH \\ & & 0.18 \text{ kg} \qquad \qquad \qquad 0.092 \text{ kg} \end{array}$$

$$1 \text{ kg } C_6H_{12}O_6 = 0.5111 \text{ kg } C_2H_5OH \text{ (alcohol absoluto)}$$

$$\text{Densidad del alcohol 100\% a } 20^\circ \text{C} = 0.7893 \text{ Kg/Lt}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg } C_6H_{12}O_6 &= 0.5111 \text{ kg } C_2H_5OH / 0.7893 \text{ Kg/Lt} \\ &= 0.6475 \text{ Lt } C_2H_5OH \text{ a } 100^\circ \text{GL} \end{aligned}$$

Solo se aprovecha 95 parte de glucosa en la fermentación, siendo las otras 5 partes utilizadas por la levadura en su nutrición, formación de glicerina, acido succínicos y otros. De esta aclaración se tiene.

$$\begin{aligned} 1 \text{ kg } C_6H_{12}O_6 &= 0.6434 \text{ Lt } C_2H_5OH \text{ a } 100^\circ \text{GL (95/100)} \\ &= 0.6112 \text{ Lt } C_2H_5OH \text{ a } 100^\circ \text{GL} \end{aligned}$$

Este valor de rendimiento en la práctica es imposible, para efectos de cálculos se toma un 95% de rendimiento, **que según Pasteur es el máximo obtenido en las mejores destilerías del mundo:**

0.6112 Lt C₂H₅OH a 100 °GL – 100%

X - 95 %

$$X = (0.6112 \times 95\%) / 100\%$$

$$X = 0.5806 \text{ Lt C}_2\text{H}_5\text{OH a 100 °GL}$$

Para fines de comercialización y producción, el alcohol se declara a 96 °GL, por lo tanto.

$$1 \text{ kg C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 = 0.5806 \text{ Lt C}_2\text{H}_5\text{OH a 100 °GL} / 96 \text{ °GL}$$

$$= 0.6047 \text{ Lt a 96 °GL}$$

Entonces el rendimiento por kilogramo de melaza sería de **0.6047** litros de alcohol a 96°gl, tomando un ideal de 95% de aprovechamiento

BALANCE DE AZUCAR

Análisis para 100 kilos de melaza

$$\text{Bx} = 88,291$$

$$\text{Pol} = 39,419$$

$$\text{Az Red} = 16,166$$

$$\text{Az Inf} = 5.5$$

Calculo Azúcar Fermentecible

$$\text{Az ferm} = \text{Pol} \times 1.05 + \text{Az red} - \text{Az inf}$$

$$= 39.419 \times 1.05 + 16.166 - 5.5$$

$$= 52,06$$

$$\text{Az ferm a 90 °Brix} = \text{Az Ferm} \times \text{°Brix} / 90 \text{ °Brix}$$

$$= 52.06 \times 88.291 / 90$$

$$= 51,07 / 100$$

$$= 0.5107$$

$$\text{Calculo de rendimiento teórico} = 0.5107 \times 0.6047$$

$$= 0.3088 \text{ Litros de alcohol/ kg de melaza.}$$

1 tonelada de melaza produce 308 litros de alcohol “TEORICO”

3.2.5 Balance de energía

Intercambiador de calor:

Datos:

Tipo de flujo: Contracorriente

Fluidos: Agua de enfriamiento y mosto fermentado

Temperaturas (°C):

- Entrada de agua fría: 20
- Salida deseada de agua fría: 31
- Entrada de mosto (ambos caudales): 37

Caudales (L/s):

- Mosto máximo: 26.85

Presión máxima (MPa): 1.5

Área de transferencia (mm²): 259.46

Propiedades (estimadas):

- Cp agua: 4186 J/kg·K
- Cp mosto: 3900 J/kg·K
- Densidad agua: 1000 kg/m³
- Densidad mosto: 1030 kg/m³
- U (coeficiente global): 1000 W/m²K
- Material placas: Acero inoxidable 316L
- Espesor placas: 1 mm

Desarrollo:

Caudal másico mosto máximo:

$$26.85 \text{ L/s} * 1030 \text{ kg/m}^3 * 1 \text{ m}^3/1000 \text{ L} / 1 \text{ s} = 27.64 \text{ kg/s}$$

Cálculo de la LMTD:

$$\Delta T1 = 37^\circ\text{C} - 31^\circ\text{C} = 6^\circ\text{C}$$

$$\Delta T2 = 37^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 17^\circ\text{C}$$

$$\text{LMTD} = (\Delta T1 - \Delta T2) / \ln(\Delta T1/\Delta T2) = 10.96 \text{ }^\circ\text{C}$$

Cálculo del calor transferido:

$$\text{Para caudal máximo: } Q = U * A * \text{LMTD} = 1000 \text{ W/m}^2\text{K} * 259.46 * 10^{-6} \text{ m}^2 * 10.96 \text{ K} = 2.84 \text{ kW}$$

Verificación del área:

$$Q = U * A * \text{LMTD}$$

$$Q = 2840 \text{ W (calculado anteriormente)}$$

$$A = Q / (U * \text{LMTD}) = 2840 \text{ W} / (1000 \text{ W/m}^2\text{K} * 10.96 \text{ K}) = 2.59 * 10^{-4} \text{ m}^2 = 259 \text{ mm}^2$$

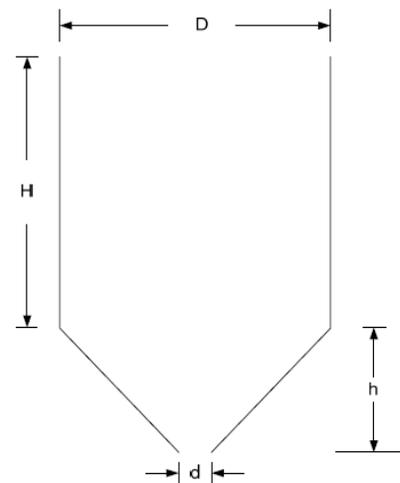
3.3 Diseño y dimensionamiento de los equipos necesarios

3.3.1 Cubas de fermentación

Gráfico III – 2 Dimensiones de cubas de fermentación

CUBAS DE FERMENTACIÓN

CUBA	CILINDRO			CONO INFERIOR			VOLUMEN TOTAL (Litros)
	H (cm)	D (cm)	VOLUMEN (Litros)	h (cm)	d (cm)	VOLUMEN (Litros)	
401	600.00	680.00	217,901	100.0	17.0	12,416	230,317
402	664.00	680.00	241,144	100.0	17.0	12,416	253,560
403	605.00	764.00	277,352	100.0	17.0	15,629	292,981
404	600.00	764.00	275,060	100.0	17.0	15,629	290,689
405	760.00	670.00	267,950	100.0	17.0	12,058	280,008
406	760.00	670.00	267,950	100.0	17.0	12,058	280,008
407	730.00	764.00	334,657	100.0	17.0	15,629	350,286
408	730.00	764.00	334,657	100.0	17.0	15,629	350,286
410	1220.00	798.10	610,322	100.0	17.0	17,038	627,360
411	1220.00	798.10	610,322	100.0	17.0	17,038	627,360
412	780.00	908.00	505,075	458.4	51.0	104,812	609,887
413	780.00	908.00	505,075	458.4	51.0	104,812	609,887

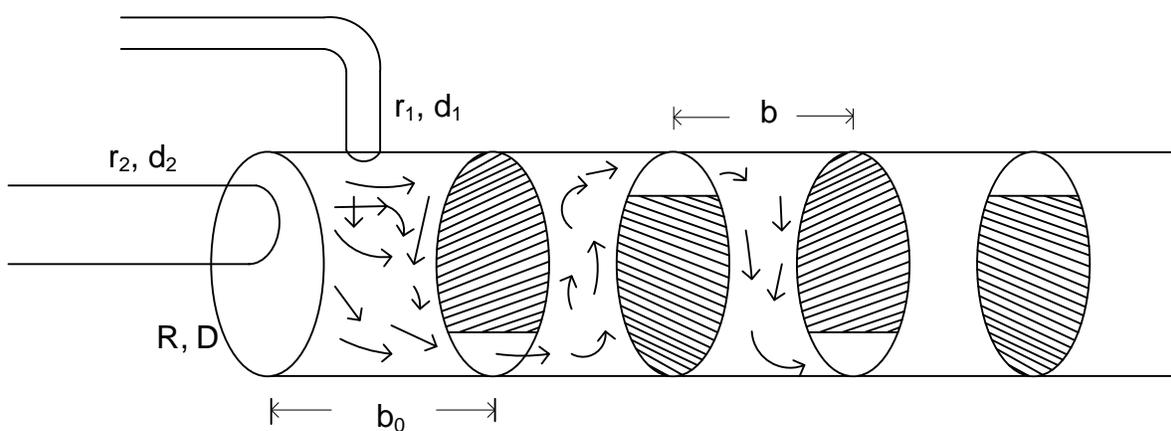


3.3.2 Mezclador de melaza

Gráfico III – 3 Dimensiones de Mezclador De Melaza

DIAM		RADIO	
tubo		tubo	Area
d	d	r	
(pulg)	(cm)	(cm)	(cm ²)
2	5,08	2,54	20,27
4	10,16	5,08	81,07
			101,34
DIAM		RADIO	
tubo		tubo	Area
D	D	R	
(pulg)	(cm)	(cm)	(cm ²)
10	25,40	12,70	506,71

b= 8,0	b₀= 12,0
---------------	----------------------------



3.3.3 Tanque almacenamiento de alcohol

Gráfico III – 4 Dimensiones de cubas de fermentación

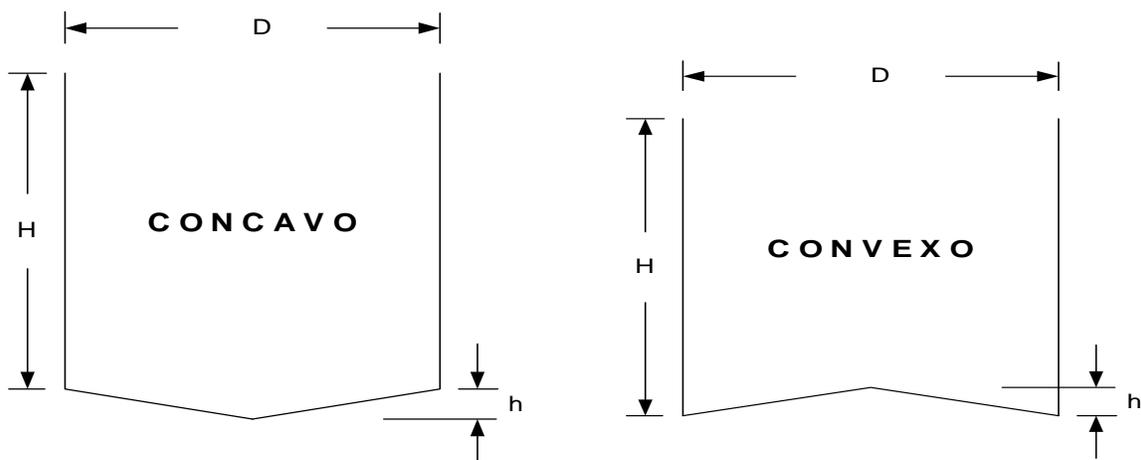


Tabla dimensiones de tanques de almacenamiento

DESCRIPCION	FORMA DEL CONO	H	R	D	h	VOLUMEN CONO	VOLUMEN CILINDRO	VOLUMEN TOTAL	VOL/cm
		(cm)	(cm)	(cm)	(cm)	(L)	(L)	(L)	(L/cm)
Tanque # 1 (*)	CONVEXO	1.200,0	1.073,10	2.146,2	30	72.354	4.232.687	4.305.040	3.617,68
Tanque # 2 (*)	CONCAVO	1.258,8	1.074,95	2.149,9	36	43.562	4.569.652	4.613.214	3.630,17
Tanque # 3 (*)	CONCAVO	901,9	874,25	1.748,5	30	24.012	2.165.606	2.189.618	2.401,16
Tanque # 4	-	1.040,0	399,00	798,0	-	-	520.150	520.150	500,14
Tanque # 5	CONCAVO	700,0	870,50	1.741,0	37	29.361	1.666.424	1.695.785	2.380,61
Tanque # 6	CONVEXO	1.027,0	813,50	1.627,0	30	41.580	2.072.815	2.114.395	2.079,05
Tanque # 7	CONVEXO	1.050,0	1.499,00	2.998,0	56	263.542	7.016.807	7.280.349	7.059,16
Tanque # 8	CONVEXO	1.200,0	1.046,00	2.092,0	35	80.203	4.004.416	4.084.619	3.437,27
Tanque # 9	CONVEXO	1.245,0	1.165,00	2.330,0	35	99.490	5.159.256	5.258.746	4.263,85

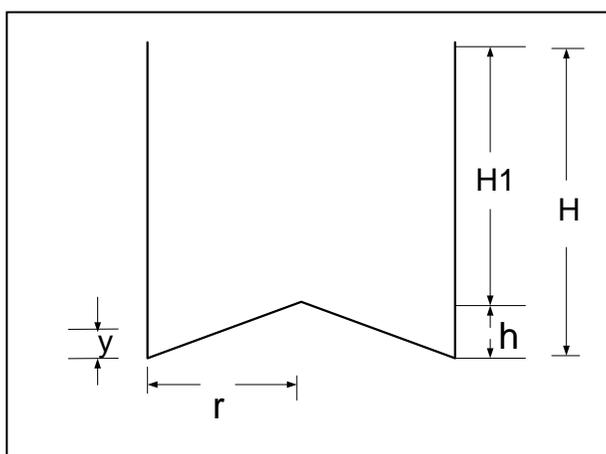
Fuente: elaboración propia

3.4 Especificación de los equipos

3.4.1 Cubas de fermentación

Las cubas de fermentación tienen como material de construcción el acero inoxidable 316L, este material es el más adecuado para poder almacenar una sustancia con tendencia a corroer materiales como es la melaza.

Como se indicó anteriormente, las cubas de fermentación son previstas de un cono convexo; las medidas de estas cubas fueron modificadas a lo largo del tiempo sin embargo el diseño de construcción y medida corresponden al siguiente sistema de medición:



3.4.2 Tanques de almacenamiento de alcohol

Tabla III – 1 descripción de materiales necesarios para tanques de alcohol

MATERIALES								
ITEM	CANT.	DESCRIPCION	MATERIAL	A	B	AREA (m ²)	PESO (Kg)	OBSERVACIONES
				(m.)	(m.)			
1	7	CHAPA e=3/8"	ASTMA36	1,5	6	63	4725	CUERPO Y CONO
2	6	CHAPA e=5/16"	ASTMA36	1,5	6	54	3402	CUERPO
3	1	CHAPA e=3/16"	ASTMA36	1,5	6	9	342	CANAL

Fuente: Laboratorio de destilería IARBP

CAPITULO IV

4.EVALUACION ECONOMICA

4.1 ESTUDIO ECONÓMICO DE COSTO DE CAPITAL

Un dato relevante en este análisis es el que la planta no necesita con cambios estructurales ni de instalación para poder aplicar cualquier de estas alternativas.

4.1.1 Costos de capacitación

De igual manera para los costos de capacitación, no se tiene problemas ya que la información respectiva con las enzimas viene en formato digital y/o virtual, lo que no significa gastos representativos de capacitación; debido a la facilidad de aplicación que posee. No obstante, en cada turno se tiene a un asistente correspondiente que está a cargo de cada praxis que se realiza en las instalaciones.

4.1.2 Costos de insumos

Para el caso del dióxido de cloro manejamos un costo de inversión de 28 dólares el kilogramo.

No se contemplan gastos de mantenimiento ni preventivo ni correctivo o destinados para contingencias, por ello estas variables quedan de lado en el análisis económico y solo nos centraremos en los costos de insumo y costos en aplicación.

4.2 COSTO EN OPERACIÓN Y APLICACION

Como indicamos previamente, no se contemplan gastos adicionales en la fase operativa y de aplicación de estas alternativas, al poseer todos medios para poder aplicarlos y no requerir personal especializado exclusivamente para la aplicación de estos insumos, esta actividad se sumará a las labores diarias del personal presente en el turno en cuestión.

4.2.1 Costo de aplicación

Para poder calcular los costos de operación debemos contemplar las cantidades que se adicionaran en cada ciclo fermentativo.

A través del siguiente cuadro se muestra las cantidades medias de aplicación y los costos que representan:

Tabla IV - 1 cálculos cantidad-costos en aplicación de insumos

Sustancia	Concentración (ppm)	Volumen medio (L)	Masa necesaria aproximada (kg)	Costo por kg (\$)	Costo total aproximado (\$)
Dióxido de cloro	100	410000	41	28,74	1178,34
Dióxido de cloro	100	500000	50	28,74	1437

Fuente: Elaboración Propia

En el anterior cuadro se muestran las cantidades de dióxido que se debe agregar diferenciando en cubas chicas y cubas grandes respectivamente, así también se considera la concentración a la cual se debe trabajar; según recomendación de los fabricantes, y las masas aproximadas a agregar con sus respectivos costos.

También se debe analizar que por turno se centrifugan 2 cubas chicas y una cuba grande en promedio, de este modo podemos tener unos costos aproximados de aplicación por turnos:

Tabla IV - 2 cálculos cantidad-costos en aplicación de insumos por turno

Sustancia	Concentración (ppm)	Volumen medio (L)	Masa necesaria aproximada (kg)	Costo por kg (\$)	Costo total aproximado (\$)	cantidad de cubas/turno	Costo total aproximado/turno (\$)
Dióxido de cloro cubas chicas	100	410000	41	28,74	1178,34	2	2356,68
Dióxido de cloro cubas grandes	100	500000	50	28,74	1437	1	1437

Fuente: Elaboración Propia

Como aclaración se debe recalcar que la adición del dióxido no es de 100 ppm por ciclo, sino que se adicionan en la forma en que el fabricante recomienda y fue explicado en anteriores capítulos; sin embargo y para simplicidad en el estudio de consumo mantenemos esta suposición.

4.3 OPTIMIZACIÓN ECONÓMICA

La optimización económica en la aplicación de aditivos se basa en mejorar la eficiencia de las reacciones bioquímicas que ocurren durante el proceso de fermentación, con el menor uso de recursos económicos posibles, optimizar el aprovechamiento de los azúcares disponibles para su conversión en etanol, y lograr una mayor estabilidad en la calidad y cantidad de levaduras a lo largo del tiempo, con la menor cantidad de recursos disponibles. En última instancia, estas mejoras contribuyen a incrementar los rendimientos del proceso de fermentación en general, tomando en cuenta todas las variables mencionadas anteriormente y observando cuantitativamente los niveles de aprovechamiento de los insumos y materias disponibles lo cual impacta directamente en los costos operacionales del proceso.

4.3.1 Aprovechamiento de recursos disponibles

Uso de Equipos y material Disponibles: La planta ya cuenta con instrumental y equipamiento necesario para poder aplicar los aditivos de cualquier, situación que descarta costos a considerar antes de poner en marcha cualquier alternativa planteada. Esta estrategia reduce significativamente los costos de capital y mejora el retorno de la inversión.

4.3.2 Control de costos operativos

Minimización de Insumos: Al implementarse esta alternativa de trabajo se puede ver mejorías frente a las enzimas y a no utilizar ningún aditivo; esto también se puede ver reflejado en el consumo de otros insumos.

"La incorporación de dióxido de cloro en los procesos fermentativos de plantas surcoalcoholeras presenta un potencial significativo para optimizar el uso de nutrientes. Estudios preliminares indican que este compuesto puede modular el metabolismo microbiano, favoreciendo la asimilación de nitrógeno y fósforo y reduciendo la producción

de amoníaco. Se ha observado una disminución del 15% en la demanda de urea y un 10% en la de fosfatos en fermentaciones tratadas con dióxido de cloro, en comparación con los controles. Estos resultados sugieren que el dióxido de cloro podría actuar como un agente quelante, mejorando la disponibilidad de nutrientes para los microorganismos y reduciendo la pérdida de nitrógeno por volatilización. Sin embargo, se requieren investigaciones adicionales para elucidar completamente los mecanismos involucrados y evaluar el impacto a largo plazo en la productividad y sostenibilidad de los procesos fermentativos. (Lee, J. H., Kim, S. B., & Park, J. M. (2022). Effect of chlorine dioxide on nutrient utilization and microbial community in anaerobic digestion of food waste. *Journal of Environmental Engineering*, 148(1), 04021123.)"

Eficiencia Energética: La adopción de estas alternativas también implica mejoras en la eficiencia energética, un factor clave tanto durante la zafra como en las fases posteriores. La energía utilizada proviene de turbogeneradores que operan utilizando el bagazo como combustible, por lo que es fundamental controlar cada hora operativa y maximizar su aprovechamiento dentro del proceso operacional.

El uso de estos aditivos proporciona mejoras en los tiempos de fermentación, acelerando las reacciones y aumentando el consumo de azúcares en función del tiempo. Algunas de estas alternativas lograron valores sobresalientes, asegurando una buena cantidad de vino disponible para la destilación, lo que también resultó en mayores índices de alimentación a las columnas de destilación y mayores caudales de alcohol obtenidos por turno.

4.3.3 Análisis de Costos y Beneficios:

Evaluación de Inversiones: Se realizan análisis de costo-beneficio antes de implementar cualquier alternativa. De igual manera, este estudio comparativo será una herramienta valiosa que contribuirá a la toma de decisiones y a la justificación de futuras inversiones.

Mejora en la Calidad del Producto: Al tener una mejoría a nivel microbiológico también tendremos una mejoría a nivel químico, en cuanto a disminución de sub productos aromáticos que dan malos sabores a nuestros productos finales.

4.3.4 Reducción de Pérdidas y Desperdicios:

Gestión de Residuos: Entre los factores a considerar se encuentra la cantidad de desperdicio generada en cada ciclo, incluyendo la levadura muerta que se descarta durante la centrifugación. Una buena viabilidad celular garantiza una menor proporción de levadura muerta, mientras que una alta concentración de levaduras ayuda a reducir el descarte generado y asegura una cantidad adecuada para el siguiente ciclo.

4.3.5 Monitoreo y Ajustes Continuos:

Revisión Periódica de Resultados: La realización de auditorías económicas y revisiones periódicas del desempeño y performance del área de fermentación; permite identificar alguna desviación de los valores de las variables, y los resultados obtenidos en cada ciclo fermentativo.

4.4 ANÁLISIS DE RENTABILIDAD.

Para el área de destilería en general estas alternativas ya promueven una mejoría en gastos, tanto a nivel energético como en aprovechamiento de la materia prima que es provista desde fabrica central como la levadura que se recupera en cada ciclo de centrifugación.

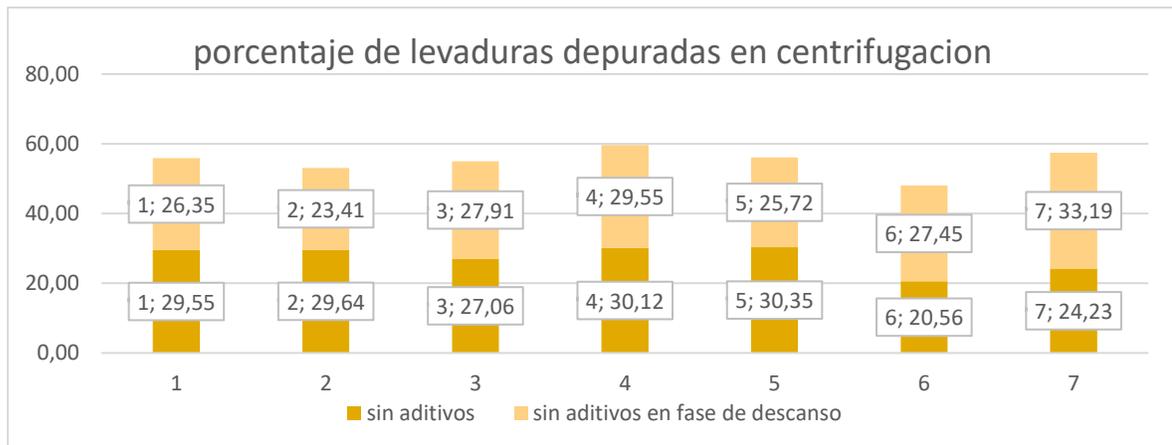
4.4.1 Cuantificación de cantidad de crema depurada sin el uso de ninguna alternativa

Durante los ciclos fermentativos donde no se agregaba ningún aditivo que proponen las alternativas planteadas se llegaban a índices cercanos a 30% de concentración de levaduras depuradas en centrifugación.

A continuación, se muestran datos que muestran estos datos de manera cuantitativa:

sin aditivos	sin aditivos en fase de descanso
29,55	26,35
29,64	23,41
27,06	27,91
30,12	29,55
30,35	25,72
20,56	27,45
24,23	33,19

Gráfico IV- 1 porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación

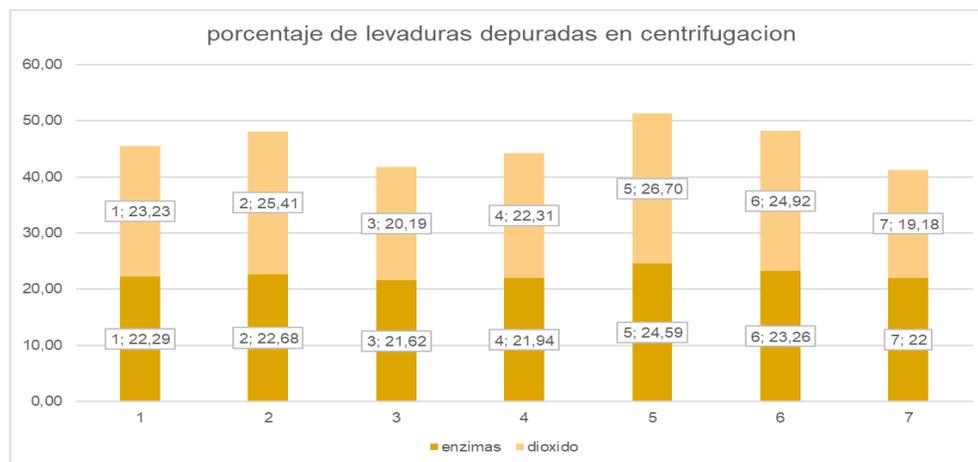


Fuente. Elaboración propia

4.4.2 Cuantificación de cantidad de crema depurada con el uso de alternativas propuestas

enzimas	dioxido
22,29	23,23
22,68	25,41
21,62	20,19
21,94	22,31
24,59	26,70
23,26	24,92
22	19,18

Gráfico IV – 2 porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación



Fuente. Elaboración propia

4.4.3 Impacto Económico De La Cantidad De Crema Depurada

Para poder dimensionar el impacto de los cambios que sugieren las alternativas; sacamos las diferencias de los porcentajes de levadura depurada para todos los casos a analizar:

Tabla IV – 3 diferencias de porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación

diferencias de los porcentajes de levadura depurada	diferencias frente a las enzimas	diferencias frente al dióxido
sin aditivos	4,73	4,22
sin aditivos en fase de descanso	5,02	4,52

Fuente. Elaboración propia

Podemos evidenciar que los las diferencias oscilan entre 4.22% y 5.02% aproximadamente; valores que a priori no parece existir una mejora significativa; sin embargo, debemos adecuar estos porcentajes a las cantidades aproximadas de crema que se utilizan.

Tabla IV – 4 diferencias de porcentaje de levaduras depuradas en centrifugación

calculo de cantidad de crema depurada aproximada	volumen de crema promedio	diferencias frente a las enzimas sin aditivos	diferencias frente a las enzimas sin aditivos en fase de descanso	diferencias frente al dióxido sin aditivos	diferencias frente al dióxido sin aditivos en fase de descanso
cubas chicas	80000	3781	4017	3379	3616
cubas grandes	140000	6616	7030	5914	6328

Fuente. Elaboración propia

Como vemos las cantidades oscilan entre 3781 litros y 6328 litros de crema depurada por ciclo aproximadamente en los casos donde no se usa ninguna de las alternativas en el proceso.

Para el cálculo de ahorro monetario en los volúmenes de levadura depurada; partimos del precio de la levadura seleccionada PE-2 seca, la cual tiene un precio aproximado de 4 dólares por kilogramo (Usd/ Kg).

Lo que combinando con los volúmenes calculados tenemos:

Tabla IV - 5 diferencias de perdida monetaria en levadura depurada

perdida monetaria en levadura depurada	diferencias frente a las enzimas sin aditivos	diferencias frente a las enzimas sin aditivos en fase de descanso	diferencias frente al dióxido sin aditivos	diferencias frente al dióxido sin aditivos en fase de descanso
cubas chicas	15122	16069	13518	14464
cubas grandes	26464	28120	23656	25312

Fuente. Elaboración propia

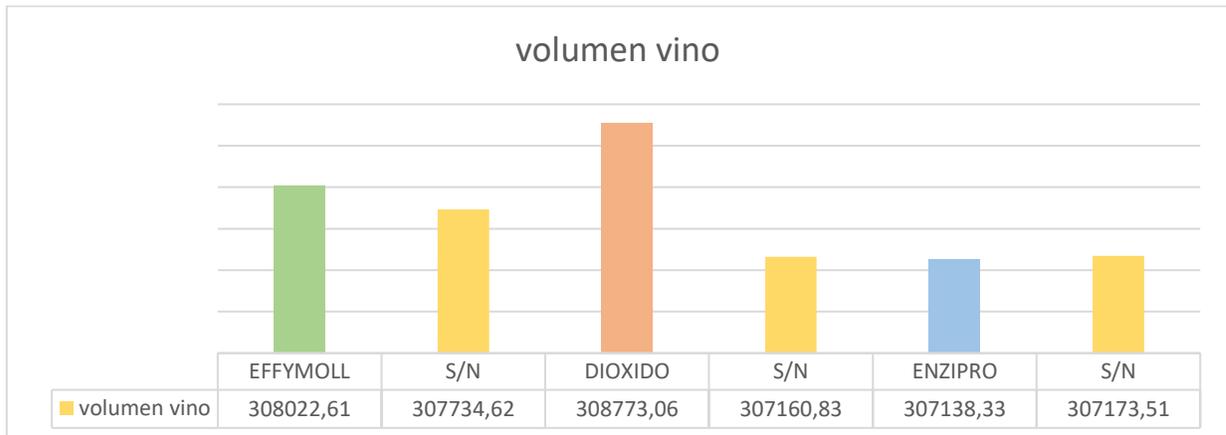
El uso de las alternativas planteadas refleja una mejora en el ámbito económico, resultados que se evidencian de manera más clara al observar las cantidades expresadas anteriormente.

4.4.4 Impacto Económico En La Producción

La fermentación al ser el corazón de destilería es donde mas cuidado debemos poner, pues una buena fermentación nos dará unos buenos componentes para separar y concentrar al momento de destilar, sin embargo, una buena velocidad de fermentación sin involucrar la calidad de la misma es crucial para mantener constantes los caudales de alimentación a las columnas de destilación.

A continuación, se muestra los resultados de los volúmenes de vino obtenido en un espectro más general:

Imagen IV – I comparación de muestra de volúmenes de vino

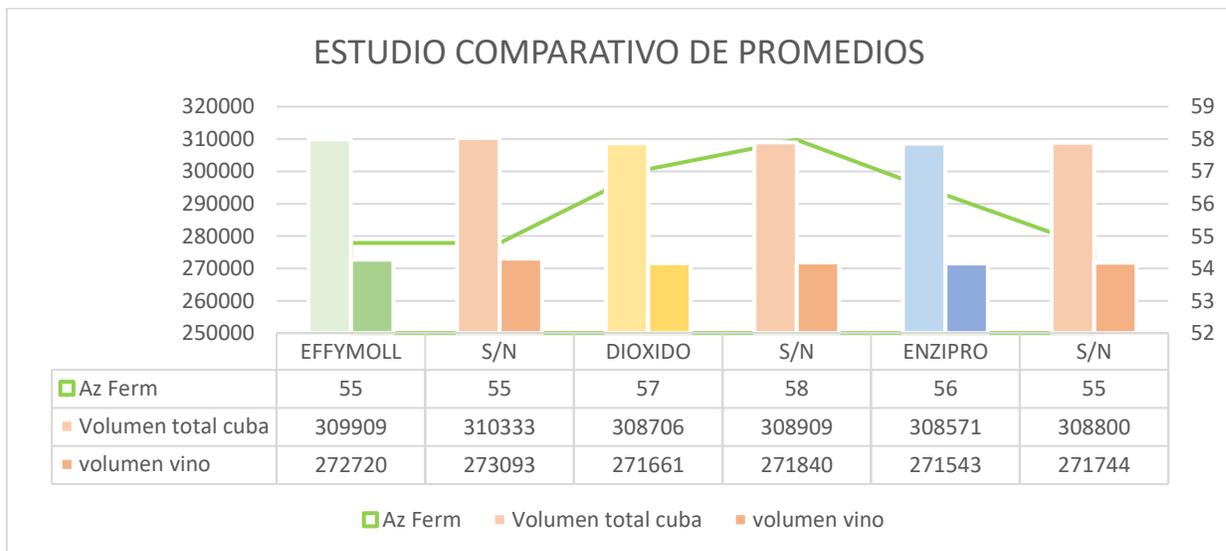


Fuente. Elaboración propia

Podemos ver los volúmenes de vino obtenido a lo largo de todo el proceso de comparación y cabe destacar como las 2 primeras alternativas superan a las demás en una comparación de promedios generales.

Aunque si indagamos un poco más los volúmenes de vino producido tienen directa relación con los volúmenes de llenado de cuba

Imagen IV – II comparación de muestra de azúcares fermentescibles volúmenes de vino y volúmenes de cuba



Fuente. Elaboración propia

Podemos observar que el llenado de la cuba fue ligeramente inferior dándonos resultados más bajos al momento de calcular los volúmenes de vino bruto para destilación.

De igual manera podemos ver la variación de azúcares fermentescibles o fermentables en las diferentes etapas del estudio.

Entonces una vez visto las anteriores alternativas con mas detenimiento nos queda ver otras dos variables importantes en la producción: los grados gay Lussac del vino obtenido y el tiempo de fermentación.

Si tenemos buenos volúmenes de vino disponibles en las cubas de fermentación y tanques de almacenamiento podemos asegurar un caudal constante de alimentación a las columnas, sin embargo y a nivel de aprovechamiento energético es factible, ya que no es necesario el mismo uso energético para un caudal inferior de producción.

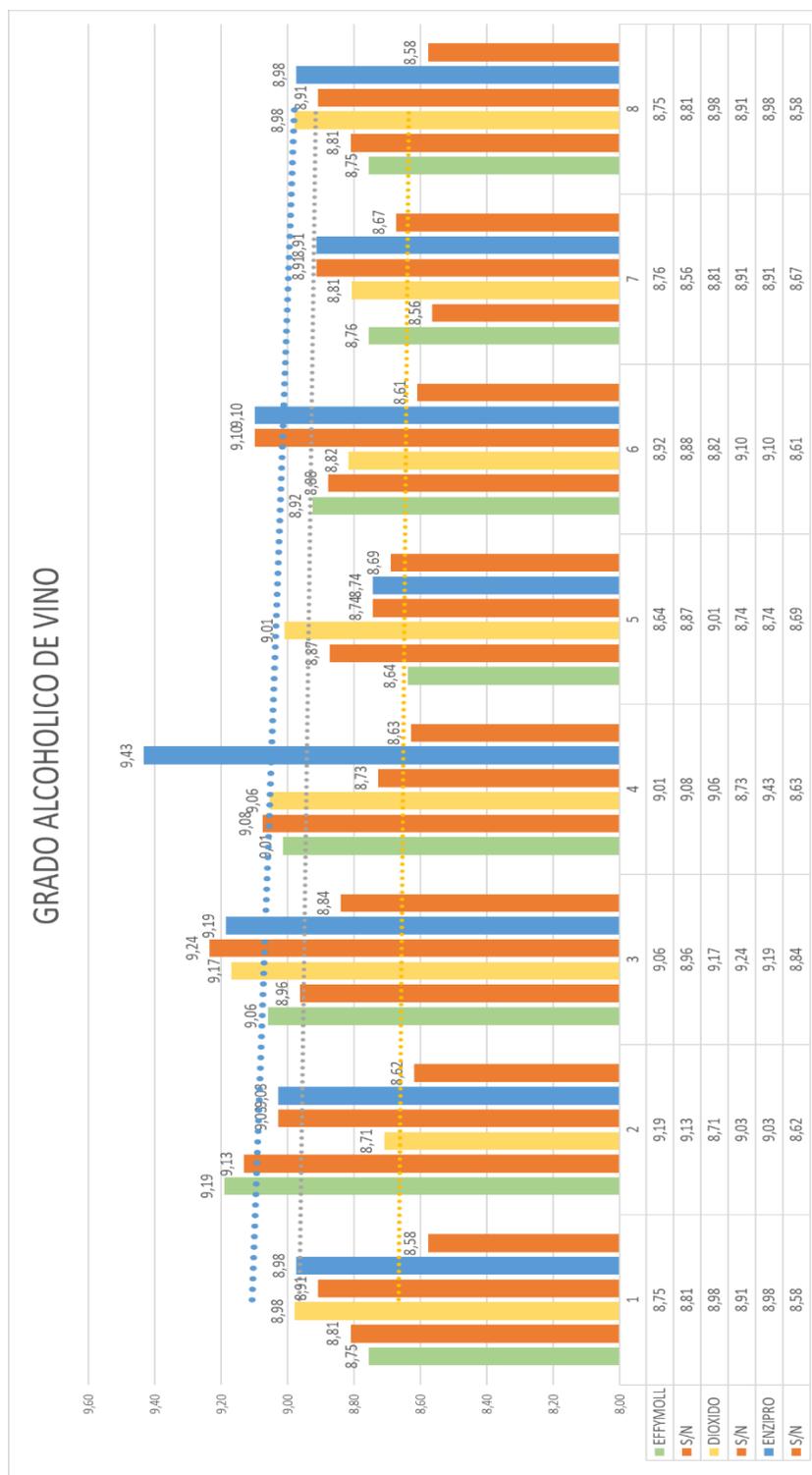
Y por otra parte y a nivel económico también afecta un día o un turno de producción con caudales inferiores de alcohol obtenidos a los planificados.

Otro factor que afecta a la eficiencia del consumo energético son los grados alcohólicos, pues se puede tener niveles elevados de vino obtenidos, pero pueden verse perjudicados si estos poseen grados alcohólicos bajos.

Al tener valores bajos en el vino, lo que se debe hacer es incrementar un poco la temperatura en las columnas para poder separar con mayor facilidad los compuestos, un cambio abrupto de grado alcohólico, puede generar que los vapores alcohólicos se pasen a la flemaza, sub producto que buscamos este exento de cualquier alcohol.

A continuación, mostramos una tabla que muestra los promedios de grado alcohólicos para todas las alternativas:

Imagen IV – III comparación de grados alcohólicos de vino en cada cuba y por cada alternativa



Fuente. Elaboración propia

Como podemos observar son varios factores que entran en juego y poseen un rol importante en la producción.

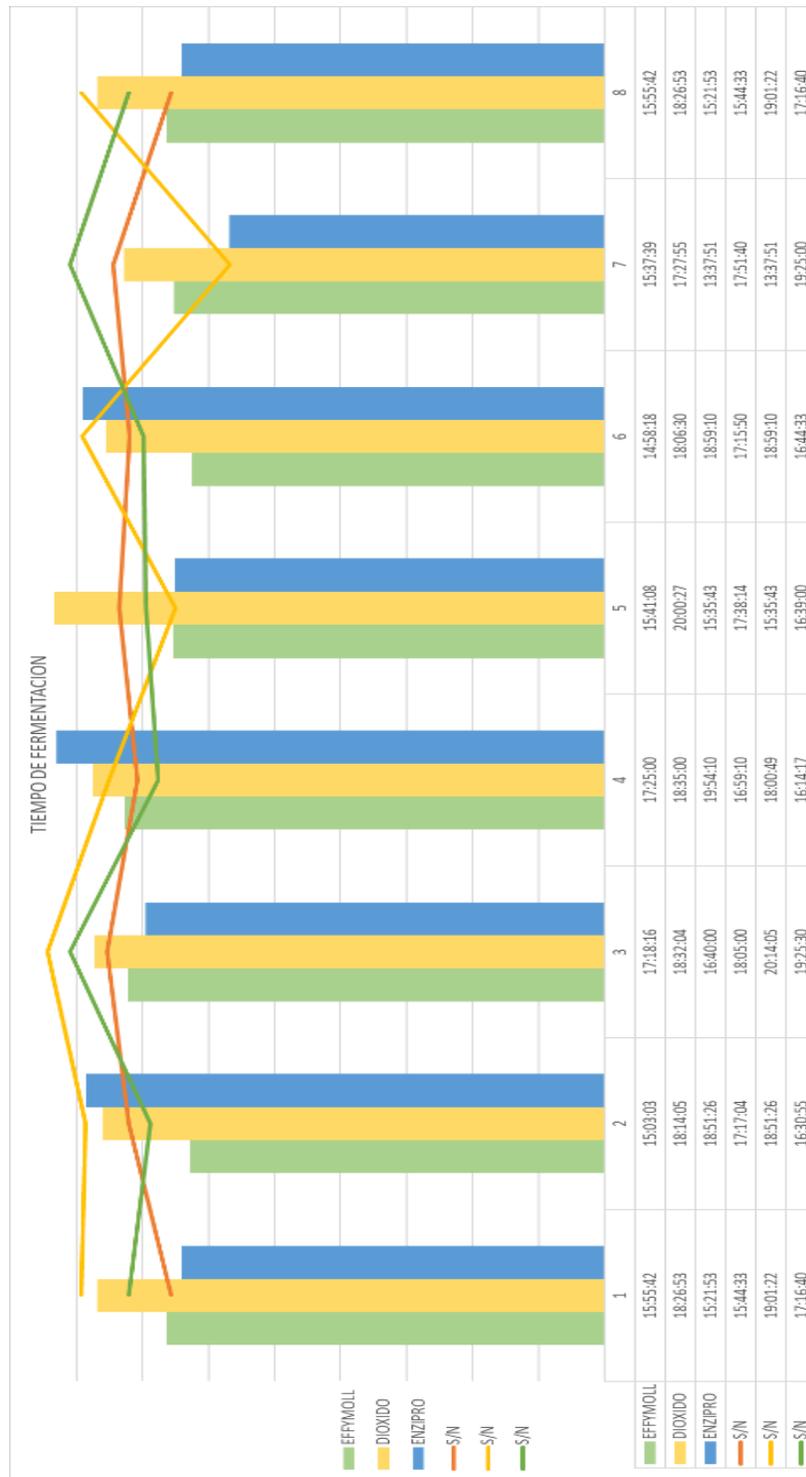
Entendido esto podemos observar la variable de: tiempo de fermentación; esta nos indicara el tiempo que le toma a cada cuba llegara un brix constante mínimo, indicador de que la fermentación de todos los azúcares disponibles ha sido finalizada, también nos indicara la calidad del trabajo microbiano por parte de las levaduras relacionándolo con la concentración celular y la viabilidad. Y por último nos permitirá comparar frente a frente que alternativa de trabajo nos ofrece una mayor velocidad en la atenuación de brix.

Al analizar a fondo esta variable podemos deducir como afecta al proceso productivo desde otras maneras; por ejemplo si el tiempo de fermentación es muy elevado y no se logran los volúmenes de vino previstos dentro de lo estimado, se deberá controlar los volúmenes de vino almacenados y ver si es necesario disminuir los caudales de alimentación, y por ende reducir la energía que entra a las columnas, y como vimos se producirían volúmenes inferiores de alcohol producidos a los esperados, de igual manera los cambios de temperatura en las columnas de destilación no son aconsejables pues puede ocasionar el paso de componentes buscados a sub productos que se usan para otros fines.

Si también analizamos la situación la variación de temperatura será en disminución y luego en aumento, pues un retraso de trabajo de cuba solo es eso, un retraso, lo que producirá que luego de estabilizarse los volúmenes de el alcohol acumulado deba incrementarse y regularse el caudal y volver a las temperaturas iniciales.

A continuación, se tiene una grafica con los valores de tiempo de fermentación y como estos varían en la aplicación de las diferentes alternativas de trabajo.

Imagen IV – IV comparación de tiempos de fermentación en cada cuba y por cada alternativa



Fuente. Elaboración propia

4.5 CONCLUSIONES

Tras realizar este estudio en diferentes niveles, se evidenciaron los cambios generados en el proceso productivo gracias a las ventajas que presentan las alternativas planteadas. Estos cambios se reflejan en las diversas variables seleccionadas y agrupadas para su análisis. Además, se realizó una recopilación diaria de datos, permitiendo un análisis a distintos niveles y abarcando con mayor precisión el amplio espectro de datos que conforman la producción de esta y la gestión anterior, con la finalidad de ver el comportamiento de los rendimientos en los procesos de fermentación y mejorar la rentabilidad del sector destilería del Ingenio Azucarero Roberto Barbery Paz y cualquier otra planta Surco alcoholera que busque plantear estas alternativas.

4.5.1 Análisis de pérdidas

Como se pudo observar, las cantidades en pérdidas de levadura por depuración en centrifugas tuvo una mejora considerable por ciclo planteando cualquier alternativa, lo que contribuye al aprovechamiento de la levadura como uno de los insumos principales y no solo afectando a los volúmenes de levadura existente, sino afecta a la degradación de la misma ya que al existir mayor cantidad de levaduras, se necesitan menos levaduras multiplicándose para poder llegar a los niveles requeridos para que trabajen en la conversión de azúcares en etanol.

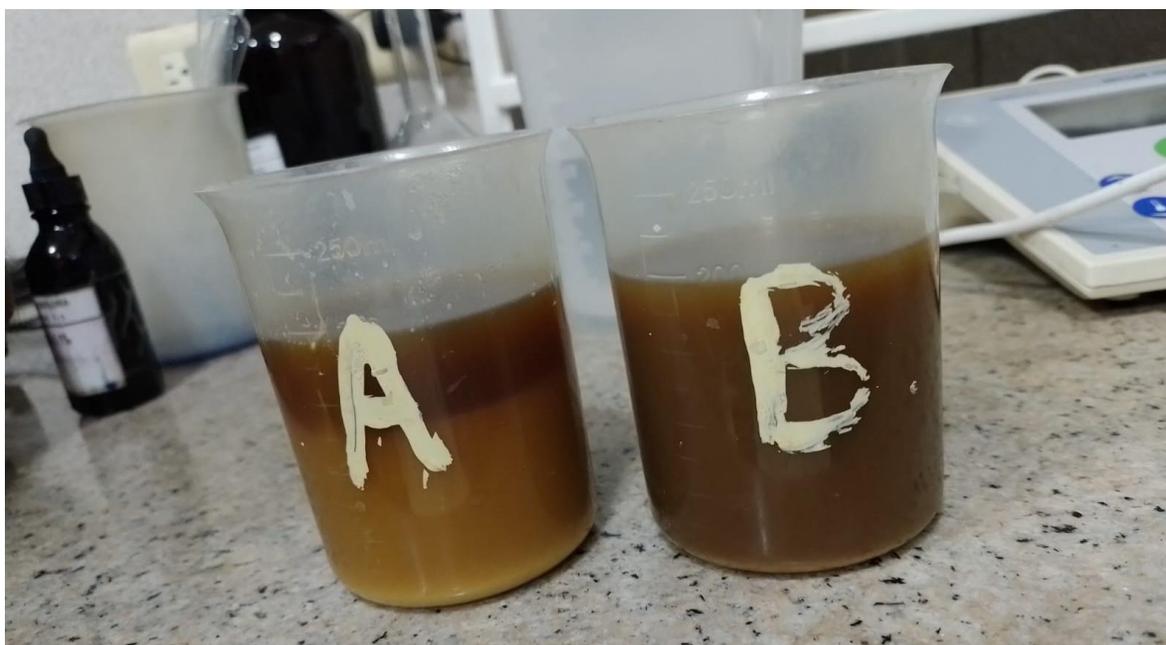
Tabla V - 1 promedio de pérdida monetaria en levadura depurada

perdida monetaria en levadura depurada	diferencia frente a las enzimas sin aditivos	diferencias frente a las enzimas sin aditivos en fase de descanso	diferencias frente al dióxido sin aditivos	diferencias frente al dióxido sin aditivos en fase de descanso	promedio
cubas chicas	15122	16096	13518	14464	14800
cubas grandes	26464	28120	23656	25312	25888

Fuente. Elaboración propia

Como se puede observar, en promedio se pierden entre 14800 y 25888 dólares ahorrados en crema depurada, ya sean con el uso de las enzimas o del dióxido de cloro; demostrando de manera cuantitativa el impacto económico que genera la aplicación de un buen aditivo en el proceso de fermentación.

Imagen V – 1 comparación de muestra de mosto con y sin aditivos

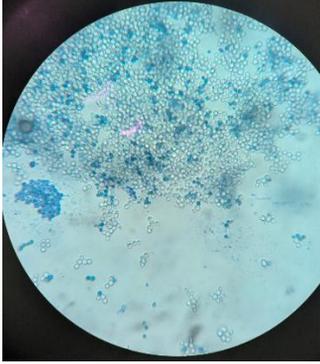
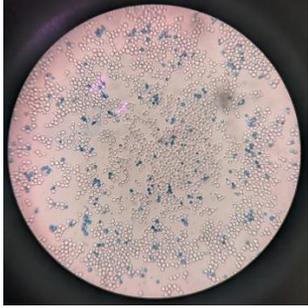
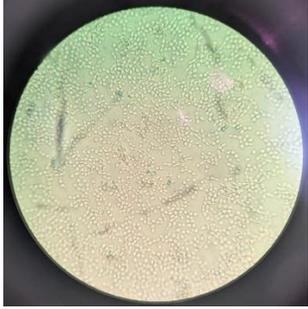
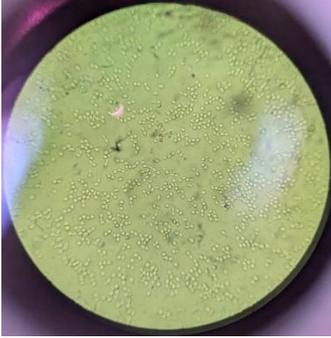


Fuente. Elaboración propia

Como podemos observar en la imagen; tenemos al frasco A con una decantación considerable, el cual corresponde a una cuba donde no se utilizó ningún aditivo planteado entre las alternativas de este estudio.

La cantidad de crema depurada va muy de la mano con la viabilidad y concentración celular de la misma, al trabajar con todas las alternativas y hacer el seguimiento diario de todas las variables podemos evidenciar las diferencias existentes de los microorganismos con cada tipo de aditivo en el proceso.

Cuadro V – 1 muestras de levadura para cada alternativa

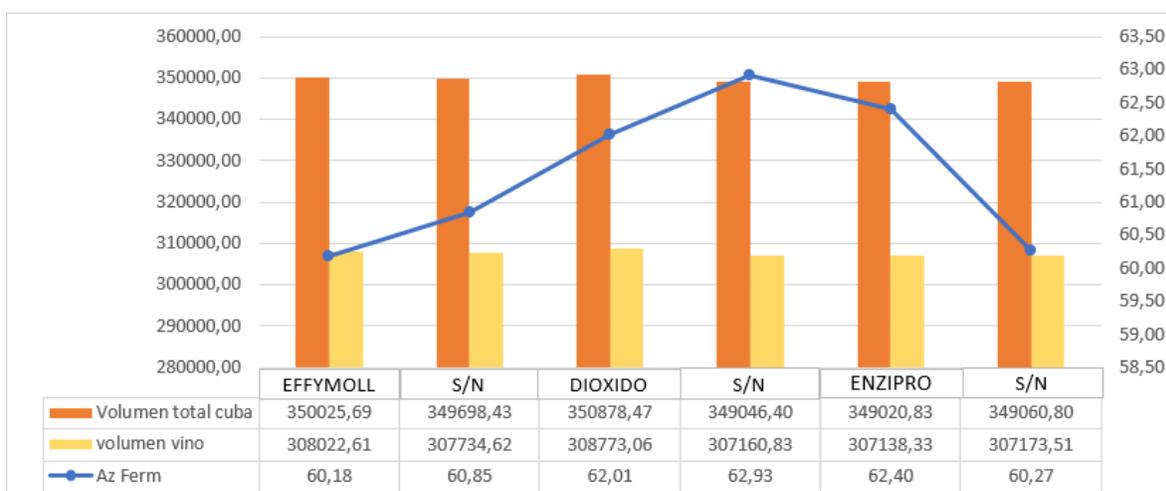
Muestra De Levaduras Sin Aditivos	
Muestra De Levaduras Con Effymoll	
Muestra De Levaduras Con Dióxido	
Muestra De Levaduras Con Enzipro	

Fuente. Elaboración propia

Las pérdidas no solo se hallan en la crema depurada, sino también en la materia prima no utilizada; partiendo de que al tener una mejor calidad de levadura le será más fácil ganar la competencia microbiológica frente a otros microorganismos que pueden aparecer por contaminación y no solo perjudican a las levaduras, sino que también al aprovechamiento de la materia prima transformando el sustrato en subproductos que no buscamos en este proceso.

A continuación, se muestra un cuadro comparativo de valores entre las diferentes alternativas de trabajo, tomando como variables de referencia los azúcares presentes en el sustrato, el volumen total de cubas y el volumen de vino obtenido.

Tabla V – 2 comparativo de azúcares fermentescibles, volumen total de cuba y volumen de vino obtenido para cada alternativa



Fuente. Elaboración propia

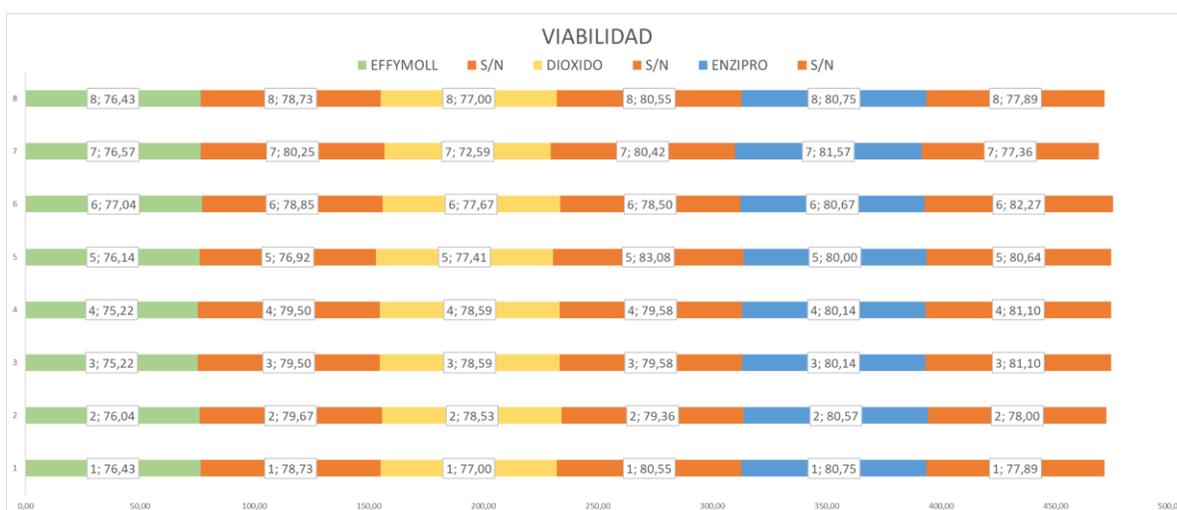
Donde podemos observar una mejora en los valores de vino obtenido y a su vez el aprovechamiento de los azúcares en materia prima por parte de las levaduras presentes.

También podemos observar que cualquiera de las alternativas muestra mejoras en los tiempos de fermentación y en los valores de atenuación de Brix por hora, lo que resulta en una mayor eficiencia energética de la destilería. Esto permite optimizar los tiempos y centrifugar más cubas de fermentación por turno, generando mayores volúmenes de vino disponibles para la destilación y rectificación.

4.5.2 Selección de la alternativa planteada

Después de evaluar las diferentes alternativas planteadas tanto de forma técnica como de manera económica; podemos depurar al Effymoll como opción de trabajo dentro de la planta, ya que nos arrojó los valores más bajos de viabilidad y concentración de levaduras, de igual manera demostró no ser tan eficiente a nivel químico y que no aprovecha bien los azúcares disponibles para la conversión a etanol frente a las demás alternativas.

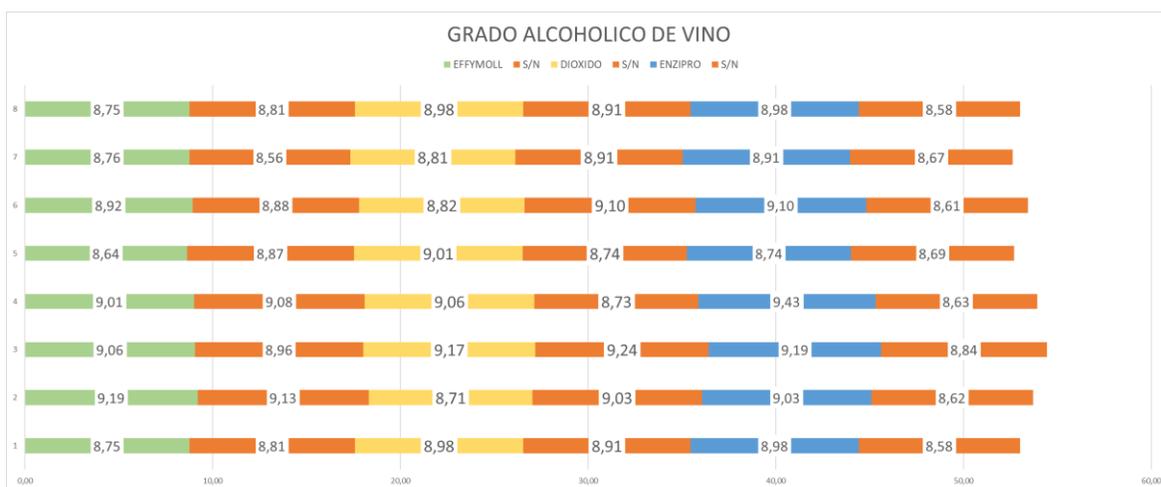
Tabla V – 3 comparativo de viabilidad



Fuente. Elaboración propia

Sin embargo, al evaluar las demás variables, observamos mejoras notorias, aunque con un comportamiento distinto en cada una de ellas. El dióxido de cloro no solo buscó mejorar los valores, sino también mantener su linealidad, de modo que la mejora no se reflejara solo en picos altos, sino en valores consistentes a lo largo del tiempo. Además, demostró una capacidad de estabilización en 2 o 3 ciclos fermentativos tras descensos debidos a factores externos.

Tabla V – 4 comparativo de grado alcohólico



Fuente. Elaboración propia

Por otro lado, el Enzipro mostró una mejora con picos sobresalientes, aunque acompañados de caídas que generaron una media inferior a la esperada. Si bien mejoró los tiempos de fermentación, tuvo resultados considerablemente bajos debido a factores externos, tardando hasta 4 ciclos fermentativos en alcanzar valores aceptables de operación, aunque sin ser sobresalientes.

Además, consideremos que a nivel industrial el comportamiento de los procesos está sujetos a muchos factores y situaciones que logran variar los resultados que buscamos obtener, así que una alternativa que busque resolver con mayor velocidad estos problemas y además tenga una tendencia más lineal frente a las demás alternativas, sería lo más adecuado para poder trabajar con mayor seguridad de que nuestras variables no sufran cambios drásticos durante el proceso en general.

Por ello y con el estudio realizado hasta ahora se elige el dióxido de cloro y el Enzipro como las opciones más acertadas para trabajar frente a las demás alternativas, no solo gracias a las mejoras que presento en el proceso sino también a las características que se presentaron en el proceso fermentativo durante su fase de aplicación.

Y si se eligió ambas alternativas para que trabajen en sinergia debido a las bondades que ofrecen cada una por separado, pero que a su vez logran trabajar de manera mu eficaz y sin ser contraproducentes él una con la otra.

De igual manera el trabajo con ambas alternativas se llevara a cabo por periodos de tiempo intercalados, dando un espacio de tiempo entre ellas para la adecuación y estudio de las levaduras, y se trabajara de manera paralela en todas las cubas y no así intercaladas como se hizo durante el tiempo de estudio y seguimiento de alternativas.

4.5.3 Cuantificación de la mejora al aplicar la alternativa seleccionada

Como vimos en el estudio de cantidad de crema de levadura depurada; se estima un ahorro de entre 13000 a 25000 USD por cuba aproximadamente, obviamente estos valores pueden variar ya que la multiplicación generada por la crema y el apoyo que se puede dar por cultivo nuevo amortizan los índices de pérdida de levadura, pero recordemos que la multiplicación también desgasta a la levadura a pasar el tiempo, ya que es propensa a volverse la denominada levadura salvaje donde las características de estas difieren de las levaduras nuevas.

"Las levaduras salvajes, como *Candida*, *Pichia*, y otras especies de *Saccharomyces*, pueden colonizar el sustrato de melaza en condiciones de fermentación. Estas levaduras compiten con las cepas de levadura de cultivo, afectando la eficiencia del proceso y la calidad del producto final, ya que suelen tener menor tolerancia al etanol y producen compuestos indeseables." Pretorius, I.S., & Bauer, F.F. (2002). "Meeting the demand for low-ethanol wine production in an era of global warming."

Asimismo, podemos verificar que los volúmenes de vino producido por ciclo fermentativo son mayores, lo cual no solo permite mantener los caudales de alimentación a los equipos de destilación sin riesgo de disminuirlos, sino que facilita trabajar con caudales más altos, aumentando la producción de alcohol durante la fase operativa. Esto también permite aprovechar de manera óptima la energía disponible durante la zafra.

Dichas mejoras se pueden ver en un incremento de hasta 20000 m³/hora de caudal de producción de alcohol siendo valores significativos ya que solo se habla de agregar un aditivo que desencadena en la mejora global de la fermentación y desencadena mejoras de rendimiento a niveles globales dentro del área de destilería.

Estas mejoras de caudales de producción de alcohol aplican tanto para alcohol 96° como para alcohol 95° que es materia prima para la producción de etanol 99,5°

4.6 RECOMENDACIONES

Como recomendaciones podemos enfatizar en el continuo muestreo y seguimiento de las variables en cada fase del proceso productivo, agregando nuevas variables e indicadores del desarrollo eficiencia y rendimiento del mismo.

Así también se recomienda dar seguimiento a las mejoras o cambios que pueden presentar los insumos ya que pueden provocar cambios ya sean positivos o negativos en su aplicación.

También se recomienda una constante capacitación sobre estos y otros insumos o alternativas de trabajo, que pueden ofrecernos una mejoría frente a los cambios que estudiamos en este documento.

Otra recomendación va dirigida a otras empresas que se guían de este documento para poder aplicar las alternativas planteadas; y es la de verificar las condiciones de trabajo que se tienen y comparar con las de UNAGRO, de esta manera poder minimizar los errores a la hora de poner en marcha la aplicación de cualquier alternativa.

De igual manera, se aconseja el uso de ácido sulfúrico como regulador de pH para la aplicación de cualquier alternativa, principalmente como medida preventiva que garantiza las condiciones óptimas recomendadas por los fabricantes de insumos. Además, se considera el bajo costo del ácido a nivel industrial, lo que lo convierte en una opción económica y efectiva.

Socializar las diferentes opiniones de los químicos involucrados en el seguimiento de las variables y las condiciones operacionales; nos da una mayor veracidad en los resultados obtenidos.