

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Propuesta de un sistema de control automático en la planta de
rectificación de etanol para un proceso de producción
comunitaria de licores.**

Daniel Efraín Ortiz Guevara

Ingeniería Química

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniero Químico

Quito, 23 de julio de 2024

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Propuesta de un sistema de control automático en la planta de rectificación
de etanol para un proceso de producción comunitaria de licores.**

Daniel Efraín Ortiz Guevara

**Nombre del profesor, Título académico
Nombre del profesor, Título académico**

**Oscar Camacho, PHD
José Álvarez, PHD**

Quito, 23 de julio de 2024

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Daniel Efraín Ortiz Guevara

Código: 00214148

Cédula de identidad: 1751413699

Lugar y fecha: Quito, 23 de julio de 2024

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En la región de Pangua, se han iniciado emprendimientos recientes enfocados en la fermentación de azúcares para la producción de bebidas alcohólicas con el objetivo de expandir el mercado local y fortalecer la economía regional. Sin embargo, la naturaleza artesanal del proceso ha resultado en productos con problemas de calidad debido a la presencia de congéneres. Este estudio se centra en el planteamiento de un sistema de control automático en la torre de destilación, basada en una simulación bi-componente de los datos teóricos con el fin de establecer un lazo de control efectivo para el sistema. La automatización del sistema es crucial para garantizar su correcto funcionamiento. En este proyecto, se proponen lazos de control utilizando la metodología HAZOP para el sistema de destilación. Además, se realizó una simulación en Aspen Hysys (Anexo F) para modelar una torre de destilación bi-componente controlada por 4 controladores PID, los cuales regulan la salida del destilado y los fondos ajustando variables tales como: la presión, el flujo de agua y etanol en ambas corrientes para mantener el equilibrio del sistema. Se incorporó un controlador adicional en la simulación para mantener el porcentaje de etanol en el destilado en un 76%, controlando la temperatura del re-hervidor mediante la gestión de la energía del equipo. Los parámetros de este controlador se determinaron mediante el método PID Empirical Gain Tuning, obteniendo valores de 1.5 para la constante de ganancia (K_p), 5000 para el tiempo integral (T_i) y 200 para el tiempo derivativo (T_d). Esta investigación no solo busca plantear el control para el proceso de destilación para mejorar la calidad del producto, sino también establecer un marco metodológico robusto para el control y la automatización en la industria de bebidas alcohólicas artesanales en la región de Pangua.

Palabras clave: Destilación, Simulación, Pangua, HAZOP, lazo de control, PID Empirical Gain Tuning.

ABSTRACT

In the region of Pangua, recent ventures have been launched focusing on sugar fermentation for the production of alcoholic beverages, aiming to expand the local market and bolster the regional economy. However, the artisanal nature of the process has led to quality issues due to the presence of congeners. This study focuses on the propose of an automatic control system in the distillation tower, based on a two-component theoretical data simulation to establish an effective control loop for the system. System automation is crucial for ensuring proper operation. This project proposes control loops using HAZOP methodology for the distillation system. Additionally, Aspen Hysys simulation is employed to model a bi-component distillation tower controlled by 4 PID controllers, which regulate distillate output and bottoms by adjusting variables such as water and ethanol flow and pressure in both streams to maintain system balance. An additional controller in the simulation maintains ethanol percentage in the distillate at 76%, controlling reboiler temperature through energy management. Controller parameters were determined using PID Empirical Gain Tuning, yielding values of 1.5 for gain (K_p), 5000 for integral time (T_i), and 200 for derivative time (T_d). This research aims not only to propose the control system for the distillation process to improve product quality but also to establish a robust methodological framework for control and automation in the artisanal alcoholic beverage industry in the Pangua region.

Keywords: Distillation, Simulation, Pangua, HAZOP, control loop, PID Empirical Gain Tuning.

TABLA DE CONTENIDO

Introducción	9
Marco teórico.....	12
Glosario de términos.....	12
Fundamento teórico.....	15
Metodología.....	16
Metodología de HAZOP.....	16
Metodología de la simulación	18
Metodología de la simulación dinámica.....	19
Metodología “Empirical PID Gain Tuning”	20
Resultados y discusión	20
Conclusiones	24
Referencias bibliográficas	25
Anexo A: Diagrama de flujo del sistema, alimentación.....	26
Anexo B: Diagrama de flujo del sistema, torre de destilación.....	27
Anexo C: Diagrama de flujo del sistema, caldera	28
Anexo D: Diagrama de flujo del sistema, embotelladora	29
Anexo E: Resultados obtenidos del análisis HAZOP.....	30
Anexo F: Simulación-base	31
Anexo G: Simulación dinámica	32
Anexo H: Parámetros de control.....	33
Anexo I: Sistema controlado por los parámetros de control obtenidos	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla #1. Resultados de HAZOP	30
-------------------------------------	----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Muestra del Excel en la realización de HAZOP	18
Figura 2. Diagrama de flujo de la planta de destilación	21

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la industria de producción artesanal de licor conocido como “puntas” en Pangua ha enfrentado desafíos significativos debido a la constante ineficiencia de sus métodos tradicionales de destilación de alcohol propios de los procesos artesanales [1]. Principalmente debido a que estas prácticas no tienen raíces profundas en la historia económica local. La mayor parte de los ingresos en la zona dependen enormemente de la industria agropecuaria como la ganadería, la pesca, la agricultura y la silvicultura [2]. La falta de control sobre variables críticas del sistema como la temperatura y la presión ha llevado a la producción de bebidas con niveles inconsistentes de calidad. Este problema no solo compromete la competitividad de los productos en el mercado, sino que también plantea serias preocupaciones para la salud pública debido a la presencia de congéneres nocivos como el butanol y el furfural, que pueden tener efectos adversos importantes sobre quienes los consumen [3]. Entre los diversos efectos adversos que puede provocar la existencia de butanol y furfural, a partir de los 50 mg/kg, producen el deterioro del hígado, ocasionando hígado graso, problemas gastrointestinales como irritación de sus paredes internas y afecciones al cerebro; por su naturaleza como sustancias depresivas sobre las neuronas, pueden causar diversas aflicciones como dolores de cabeza, migrañas y pérdida de la concentración [4], [5]. El furfural, especialmente, representa un peligro para la salud, pues una prueba DL50 (Dosis letal media) muestra que apenas 100 mg/kg es suficiente para ser mortal a diferencia del butanol con una DL50 de 769 mg/kg [4], [5]. Los esfuerzos por mejorar esta situación han sido evidentes, con intentos locales de implementar tecnologías modernas que permitan una destilación más controlada y eficiente con ayuda de la Universidad Politécnica Nacional y la tecnificación del proceso [6]. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías puede enfrentar obstáculos importantes si no son

especificadas adecuadamente, incluyendo costos adicionales y la posibilidad de aumentar el precio final del producto, lo cual podría alejar a los consumidores y afectar negativamente la economía local en su conjunto en el mediano y largo plazo. Los procesos de tecnificación son algo que se ha ido implementando cada vez con mayor fuerza en las distintas comunidades con el objetivo de mejorar los tiempos y calidad de los productos obtenidos. Por ejemplo, Mulet-Hing estudió la automatización en la destilería Santiago de Cuba, analizando las carencias que da al sistema su falta de automatización, como la falta de control en zonas de riesgo que podrían provocar accidentes o la lenta reacción a emergencias de esta [7]. Otro ejemplo que apoya la tecnificación de los procesos es la investigación de Rodríguez M. con respecto a la larga historia del licor en Antioquia y como sus procesos han ido evolucionando con el tiempo hasta su tecnificación [1]. Si se observa en Ecuador, se encontró que los procesos de tecnificación no son ajenos para el país. Según el Ministerio de Agricultura y Ganadería, en el noroccidente de Pichincha se han realizado varios esfuerzos con los cañicultores en Gualea como parte de un taller por parte del mismo ministerio para mejorar sus productos [8].

En este contexto, es crucial evaluar cuidadosamente las implicaciones teóricas de la modernización del sistema para que la aplicación del lazo de control se alinee correctamente con los intereses comunitarios, tanto económicamente como en la salud de la comunidad. Este análisis no solo debe considerar el impacto directo en los productores y consumidores locales, sino también en las comunidades dependientes de estas industrias para su sustento. La búsqueda de soluciones debe equilibrar la necesidad de mejorar la calidad y seguridad de los productos con la sostenibilidad económica y social a largo plazo de la región. El objetivo principal de este proyecto fue plantear una propuesta efectiva de control para una planta de destilación en Pangua, con el fin de mejorar la eficiencia y la calidad de los productos que se obtienen del proceso artesanal de producción de puntas. Para lograr esto, se aplicó la metodología HAZOP para identificar posibles riesgos operativos y establecer las medidas

necesarias para implementar un sistema de control seguro y eficiente en la torre de destilación con una fuerte base teórica.

Además, se desarrolló una simulación dinámica en Hysys de los dos componentes clave del sistema de destilación (agua y etanol), utilizando los datos simulados para comprender y optimizar el comportamiento del proceso (Anexo F). Paralelamente, se definieron los parámetros de control del controlador PID mediante el método Empirical PID Gain Tuning, el cual es ideal para establecimiento de parámetros en sistemas reales, asegurando así un control preciso y estable del proceso de destilación [9]. Las metas del proyecto incluyeron la recolección de datos simulados del sistema de destilación para una comprensión profunda de su comportamiento, la obtención de un sistema de control ideal que optimice la eficiencia del proceso y minimice la variabilidad en la concentración de las puntas, y el establecimiento de un lazo de control efectivo que mantenga la concentración del producto dentro de los rangos deseados evitando los congéneres, garantizando la consistencia y calidad del producto final.

Este enfoque integral busca impulsar el desarrollo de una nueva industria de puntas en Pangua, modernizando sus procesos artesanales mediante tecnologías avanzadas para mejorar tanto la viabilidad económica como la calidad del producto. Se busca que el proceso tenga una operatividad sencilla de manejar para que su implementación sea efectiva en la comunidad.

MARCO TEÓRICO

Glosario de términos

HAZOP: Análisis funcional de operatividad. Es una metodología cualitativa que analiza la operatividad del sistema con sus respectivos riesgos para aplicar un lazo de control en un proceso industrial.

Not: Simboliza la no existencia de una variable en la corriente/equipo que debería existir en el mismo.

More: Simboliza una mayor existencia de una variable en la corriente /equipo que no debería existir en el mismo.

Less: Simboliza una menor existencia de una variable en la corriente/equipo que debería existir en el mismo.

As well as: Simboliza la existencia de una variable o función extra en la corriente/equipo que no debería existir en el mismo que coexiste con la variable principal.

Part of: Simboliza la existencia de una desviación en la corriente/equipo que hace que una parte de una variable del equipo se destine a otro lugar o se pierda.

Reverse: Simboliza la existencia de una variable en la corriente/equipo que va en la dirección contraria a la que se desea (por lo general la corriente).

Other than: Simboliza la existencia de una variable extra en la corriente/equipo que no debería existir en el mismo que ha resultado como un derivado del proceso, estos pueden ser benignos o malignos.

Alimentación: Corriente que entra en la torre.

Re-hervidor: Equipo que se encarga de controlar la temperatura del líquido que ingresa, calentándolo hasta transformarlo en vapor saturado.

Condensador: Equipo que se encarga de controlar la temperatura del vapor que ingresa, enfriándolo hasta transformarlo en líquido saturado.

Destilado: Corriente que se obtiene de la parte superior de la torre de destilación, en fase de vapor.

Fondos: Corriente que se obtiene de la parte inferior de la torre de destilación, en fase de líquida.

Platos: Platinos que componen la torre de platos los cuales se encargan de mantener el equilibrio líquido-vapor en el sistema.

Válvulas de control: Válvulas que se controlan de manera automática o directa para manejar el flujo de una corriente según las necesidades del sistema.

Controlador PID: Dispositivo o algoritmo que se encarga de mantener una variable en un valor deseado utilizado en sistemas de control automático mediante el cambio de entrada de un equipo o válvula.

Lazo de control: Sistema de control que se encarga del monitoreo constante de una variable en un proceso, cuya meta es mantener la variable lo más cercana a su referencia.

SP: Punto de referencia, en control se le conoce como el punto ideal en el que se desea que se encuentre la variable medida por medio del lazo de control.

PV: La variable, en control es el valor medido por los equipos de control que lanza información sobre el estado del proceso.

OP: Operación, en control se refiere el nivel de operación de la entrada que tiene que ejercer el controlador para llevar a cabo el control deseado, en porcentaje.

Forma de velocidad PID: Forma de control que se distingue por ser preciso pero duro con el equipo.

Forma de posición PID: Forma de control que se distingue por ser menos preciso, pero más suave con el equipo.

ARW: anti reset windup, mecanismo de control que se encarga de evitar que el valor integral de un sistema crezca fuera de sus límites de saturación.

PID recarga manual: Conjunto de ecuaciones matemáticas utilizadas por los controladores PID para definir su control, Este se especializa en sistemas simples donde no existe ninguna pérdida de material porque la entrada tiene que ser igual a la salida.

Kp: Parámetro de control que define el controlador PID, este parámetro se encarga de manejar la ganancia del sistema para poder alcanzar la referencia si se produce algún cambio en la referencia.

Ki: Parámetro de control que define el controlador PID, parámetro que representa el valor integral en la ecuación de control, se encarga de reducir el error que exista entre la referencia y el valor de la variable hasta que el error sea 0.

Kd: Parámetro de control que define el controlador PID, parámetro que representa el valor derivativo en la ecuación de control, se encarga de reducir las ondulaciones en el sistema y obtener resultados más exactos, aunque el ruido afecta enormemente esta función.

Ti: Parámetro de control que define su valor integral a la inversa ($K_i=1/T_i$), es su tiempo integral que maneja la eliminación del error en el sistema.

Td: Parámetro de control que define su valor derivativo a la inversa ($K_d=1/T_d$), es su tiempo derivativo que maneja la eliminación de sobre oscilaciones en el sistema.

Step: En control, se refiere a la acción de cambiar la referencia del sistema de control tipo escalón de forma brusca.

Fundamento teórico

La destilación es un proceso esencial en la industria química y de procesos, utilizado para separar mezclas líquidas mediante la evaporación y condensación selectivas de componentes según sus volatilidades. En particular, las torres de destilación son operaciones unitarias ampliamente utilizados para la separación líquida-líquida, operando bajo principios físicos fundamentales de equilibrio de fases y transferencia de masa [10].

En una torre de destilación, los componentes de una mezcla líquida- líquida se separan a medida que ascienden y descienden a través de diferentes platos, en función a su volatilidad relativa. El control eficiente de este proceso es fundamental para garantizar la calidad del producto final y la eficiencia energética de la operación [11].

Los métodos tradicionales de control en las torres de destilación han incluido el uso de controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo), que ajustan continuamente variables como el flujo de alimentación, la temperatura de reflujo y la presión de vapor para mantener las condiciones óptimas de separación [12]. Estos sistemas son efectivos para su uso en proyectos de tecnificación por ser accesible y operables en circunstancias cuyo personal no poseen grandes conocimientos de ingeniería.

El diseño y la implementación efectiva de estrategias de control en una torre de destilación requieren un profundo conocimiento de la dinámica del proceso, así como habilidades en la

simulación computacional y la ingeniería de sistemas de control [12]. Este proyecto realizó la investigación de diversas metodologías de control aplicables a la torre de destilación que se desea crear en Pangua para su correcta aplicación. Se prevé que los resultados contribuyan al desarrollo económico de la comunidad a mediano y largo plazo, además de beneficiar enormemente la salud de los consumidores del producto.

METODOLOGÍA

Para el establecimiento del proyecto, se aplicaron diversas metodologías con el fin de obtener los parámetros de control necesarios para establecer el lazo de control. Entre las metodologías utilizadas, se empleó un análisis HAZOP para obtener una comprensión teórica sólida del sistema, se realizó una simulación dinámica en Hysys para obtener datos necesarios para la futura construcción de la torre, y se aplicó un Empirical PID Gain Tuning para establecer parámetros de control especializados, enfocados en la temperatura como variable principal [9].

Metodología de HAZOP

El HAZOP es una metodología rigurosa y teórica utilizada principalmente en plantas industriales grandes para evaluar los riesgos potenciales del sistema y para identificarlos. Este método cualitativo es ideal para sistemas complejos donde se manejan múltiples variables.

El proceso comienza con la definición y delimitación del sistema que se va a analizar. En nuestro caso, se aplicó a un diagrama de bloques contenido en los anexos A, B, C y D proporcionados por Liliana Guzmán de la Universidad Politécnica Nacional [6]. Como se puede observar en los anexos, el diagrama de flujo ya incluye etiquetados las corrientes y equipos con sus respectivos nombres, por lo que no fue necesario realizar este análisis inicial. Con la identificación de los equipos y corrientes, se procede al análisis individual de cada uno de estos, utilizando palabras clave como "not", "more/less", "as well as", "part of", "reverse", y "other than", según se detalla en el glosario de términos. Estas palabras clave ayudan a

Figura 1. Muestra del Excel utilizado para la realización del HAZOP

Como se observa en la figura 1. La tabla está dividida por cada uno de los tramos del sistema a analizar. Este se dividió según las palabras clave mencionadas anteriormente y a su vez verticalmente se dividió entre la variable que afecta, la posible causa del fallo y su respectiva consecuencia. Se utilizó esta metodología para identificar un punto ideal donde aplicar un lazo de control al sistema, aprovechando el análisis teórico aportado por el HAZOP [13].

Metodología de la simulación

Para la simulación, se empleó el propio sistema ASPEN Hysys para obtener los datos teóricos necesarios de la torre de destilación. En esta metodología, se comenzó por definir los tipos de sustancias que manejaría el sistema, en nuestro caso, agua y etanol. Posteriormente, se seleccionó un paquete termodinámico (NRTL-ideal en este caso) adecuado para el equilibrio del sistema, considerando que diferentes paquetes pueden influir en los resultados debido a sus ecuaciones específicas para reacciones químicas y variables del proceso, como en el manejo de hidrocarburos.

Con estos elementos definidos se configuró la torre, determinando el número de platos siendo 9, las presiones en el re-hervidor y el condensador que son 0,87 y 0,9604 bar respectivamente, así como el tamaño y la forma de los equipos, siendo 2 y 1.5 metros cúbicos para el re-hervidor y el condensador con una forma horizontal y vertical respectivamente. Una vez configurada la torre, se estableció la fracción de concentración en la alimentación (30-70 de etanol-agua respectivamente) junto con variables adicionales como presión y temperatura de entrada al sistema (1 atm, 25 C°). Los datos anteriormente mencionados fueron obtenidos de una simulación previa realizada por la Universidad Politécnica Nacional que se nos fue proporcionada [6].

Metodología de la simulación dinámica

Con la simulación de la torre realizada sin problemas, se procedió a convertirla en una simulación dinámica, para lo cual se implementaron válvulas de control según las especificaciones del programa. Dado el tipo de sistema, fue necesario incorporar controladores adicionales en las válvulas generadas por el programa para mantener la estabilidad. Sin estos controladores, la simulación dinámica podría generar errores rápidamente debido a fluctuaciones en presiones o flujos negativos.

Una vez establecido el sistema, se obtuvieron datos de los controladores. Para asegurar su correcto funcionamiento, se ajustaron variables específicas según el tipo de controlador utilizado, determinando si la acción sobre el sistema sería directa o inversa. También, se establecieron límites adecuados para los controladores y se definió el algoritmo de control. Entre los algoritmos disponibles (Hysys, Yokogawa, Foxboro y Honeywell), se escogió el de Hysys por su versatilidad. Por otro lado, para los sub-algoritmos, se eligió el PID en forma de posición debido a su menor impacto sobre los equipos en comparación con la forma de velocidad. Dentro de las opciones disponibles para este tipo de PID, se optó por ARW-clamp para tener un control estricto sobre el límite superior del sistema y para evitar que el término integral de la ecuación se descontrole.

El uso de esta metodología tuvo como objetivo obtener datos teóricos para aplicar la metodología Empirical PID Gain Tuning. A lo largo del proyecto, se evaluaron varias opciones para obtener estos datos y realizar el control en Matlab, aunque se encontraron limitaciones debido a la falta de métodos disponibles por lo que la idea del Matlab se dejó de lado.

Metodología “Empirical PID Gain Tuning”

Finalmente, la metodología de Empirical PID Gain Tuning se emplea en procesos en tiempo real para obtener datos basados en la respuesta del equipo [9]. El proceso comienza utilizando el lazo de control de la simulación dinámica en Hysys y aplicando un escalón en la referencia para observar la reacción del sistema. Inicialmente, el sistema no se desplazará de su posición, por lo que es necesario aplicar un término de ganancia proporcional (K_p) para que pueda alcanzar dicha referencia. Una vez que el sistema es capaz de alcanzar la referencia, se introduce el término derivativo (K_d) para reducir las oscilaciones que pudo haber generado la ganancia. Cuando las oscilaciones se han mitigado, pero aún persiste un error respecto a la referencia, se añade el término integral (K_i) para permitir que el sistema pueda eliminar automáticamente el error entre la variable medida y la referencia, logrando así un sistema con parámetros optimizados.

Es importante destacar que esta metodología se eligió por ser efectiva para establecer parámetros en procesos existentes, como en nuestro caso, una simulación que simula dicho sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos por el HAZOP se los dividió en tres categorías principales:

- Control de los intercambiadores de calor (corriente 5, 14 y 9)
- Posibles fallos en la caldera (Caldera SG-001 y corriente 18)
- Fallos en las bombas ubicadas en la salida del destilado (corriente 8 y 11).

Para una mejor contextualización del sistema general se creó una figura como se muestra en la imagen a continuación:

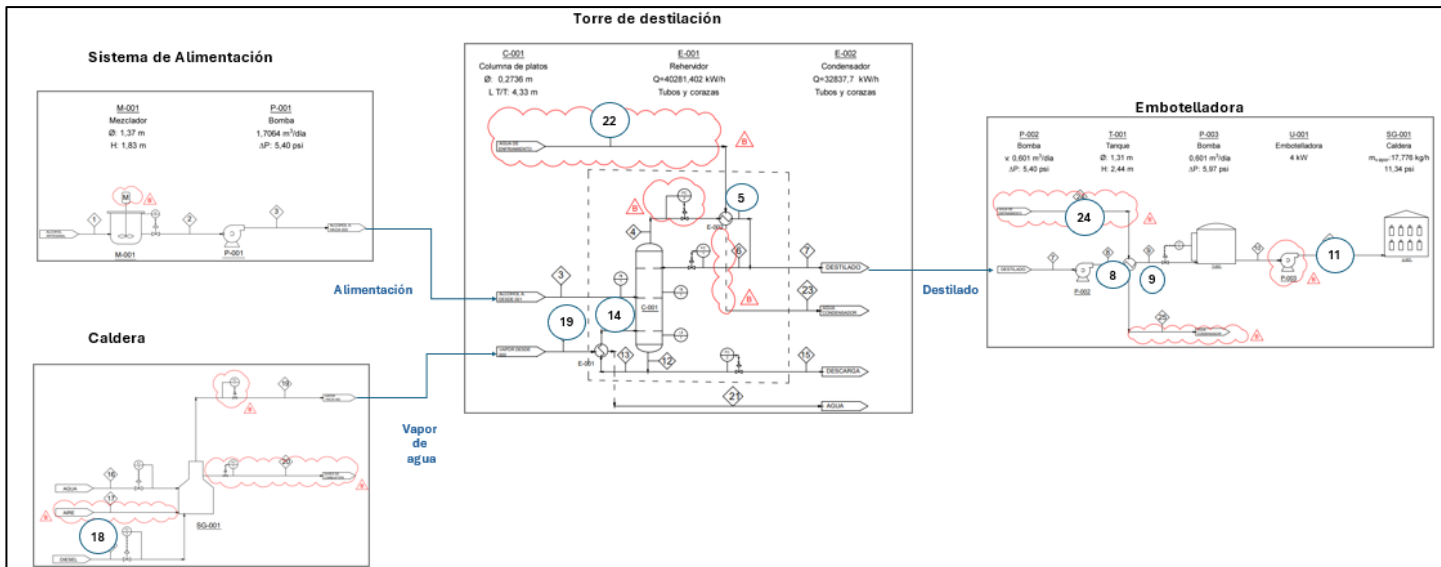


Figura 2: Diagrama de flujo de la planta de destilación.

En la figura 2, se encuentran reunidos los anexos A, B, C y D para dar una vista general al proceso mientras se marcan las corrientes que fueron observados en los resultados del HAZOP, los mismos que se detallan en el Anexo E.

Para abordar la primera categoría, es crucial implementar un control cercano de las fuentes de calor que alimentan los intercambiadores. Se recomienda la instalación de reguladores de flujo para controlar las corrientes de entrada de temperatura (corrientes 22, 19 y 24) correspondientes a los intercambiadores de las corrientes 5, 14 y 9, respectivamente. Además, se debe establecer un sistema de alarma que notifique al personal en caso de fluctuaciones significativas en el flujo, junto con válvulas que puedan cortar el suministro al intercambiador para evitar que el flujo mal calentado/enfriado continúe al siguiente proceso.

En cuanto a la segunda categoría, se deben considerar los posibles problemas en la caldera, particularmente relacionados con la entrada de componentes. Por ejemplo, la corriente 18 podría verse afectado por problemas con el suministro de diésel. Aunque el sistema de Pangua será una torre Batch y no requiere una alimentación continua, es crucial instalar un medidor de nivel en el tanque de almacenamiento de diésel para prevenir errores humanos o rupturas del

tanque. La falta de diésel podría paralizar la caldera, afectando gravemente el funcionamiento de la torre de destilación. Otra posible falla podría ocurrir en la entrada de agua; un flujo insuficiente o excesivo podría afectar negativamente el rendimiento de la caldera, resultando en vapores a temperaturas inadecuadas o incluso falta de vapor. Para mitigar este problema, se sugiere instalar una alarma en la válvula de la corriente 16, que se comunique directamente con la válvula de control de diésel para cerrarla en caso de emergencia. Este tipo de control en la caldera no ofrece muchos cambios en el interior de esta como suele hacerse con para su control como la proporción de oxígeno, combustible o la purga de los gases de combustión, sin embargo, este HAZOP fue realizado con las contemplaciones que la caldera ya tenía de fabrica un control automático interno, por lo que se concentró en la parte externa del mismo [14].

En la tercera categoría se abordan las bombas del sistema. Las bombas P-002 y P-003 podrían experimentar problemas de cavitación. En caso de que estas bombas fallen, es necesario detener el flujo para poder reemplazarlas. Por lo tanto, se recomienda instalar válvulas check en las corrientes antes de las bombas (corrientes 8 y 10), así como controladores de nivel en las corrientes de salida (corrientes 9 y 11). Si los controladores de flujo detectan un flujo inadecuado, las válvulas se cerrarán automáticamente para prevenir el aumento de presión en las tuberías y permitir el reemplazo de la bomba afectada. En el caso de las bombas, un enorme problema que existían con las bombas era la posibilidad de que el sistema obtuviera un flujo inverso cuando una bomba se dañara, sin embargo, esa posibilidad se elimina en las bombas modernas gracias a una válvula en la entrada de esta que evita el reflujo en caso de que este deje de funcionar correctamente [15].

Gracias a estos resultados, se pudo definir que, para poder obtener un lazo de control sobre la concentración, se podía realizar indirectamente por medio de la temperatura del re-hervidor. Con el control directo sobre la temperatura del sistema, podía asegurarse el control adecuado

de la temperatura general del sistema y a su vez obtener de forma solida un control efectivo sobre el destilado y su controlador. Aunque ciertamente hay varias formas de realizar este control, como el manejo directo del reflujo que ingresa en el sistema, este método se empleó por las limitaciones propias de los controladores PID que se pueden obtener desde Hysys [11]. Al no poder utilizar la torre de destilación como un controlador, cosa necesaria para el proceso del PID, fue necesario operar algo que pudiera controlarlo, por lo cual se escogió utilizar la entrada energética del re-hervidor como un controlador, como se observa en el anexo G posee el nombre de “reb” en forma de una flecha roja oscura. Al manejar esta variable energética de entrada es posible establecer un control sobre la temperatura de la torre.

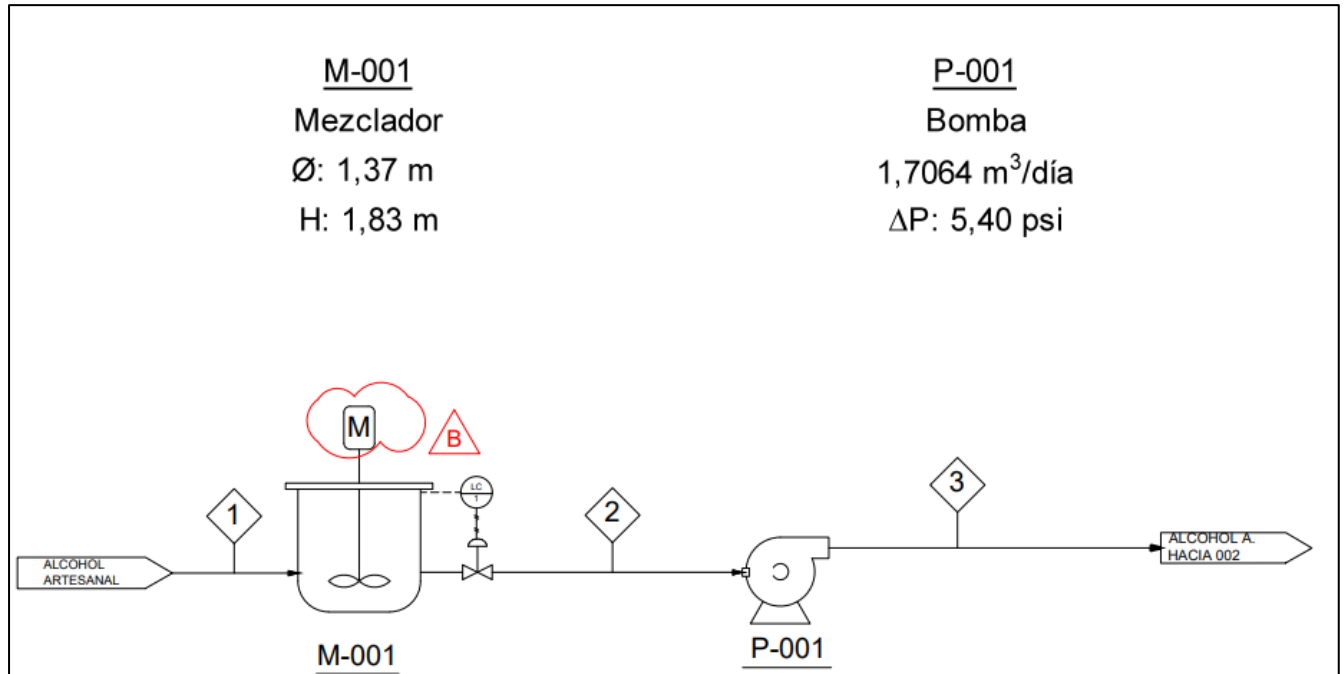
La simulación obtuvo un sistema estable que se puede observar en el Anexo G. Este sistema fue la piedra angular de la cual se tomaron los parámetros para establecer un sistema de control en tiempo real por la metodología “Empirical PID Gain Tuning”. Con la aplicación de este método, se pudo obtener los siguientes resultados: un Kd de 1.5, un Ti de 5000 y un Td de 200. Cabe destacar que los valores Ti y Td, al ser igual a $K = \frac{1}{T}$, podrían parecer anormalmente altos sin embargo los valores de K son pequeños. Se lo dejó de esta manera por el formato de los controladores de Aspen Hysys como se observa en el Anexo H. Estos valores nos dieron un sistema estable que sigue su referencia como se muestra en el Anexo I, donde después de 180 minutos de operación, a pesar de los diversos steps impuestos al sistema, fue capaz de mantener su referencia.

CONCLUSIONES

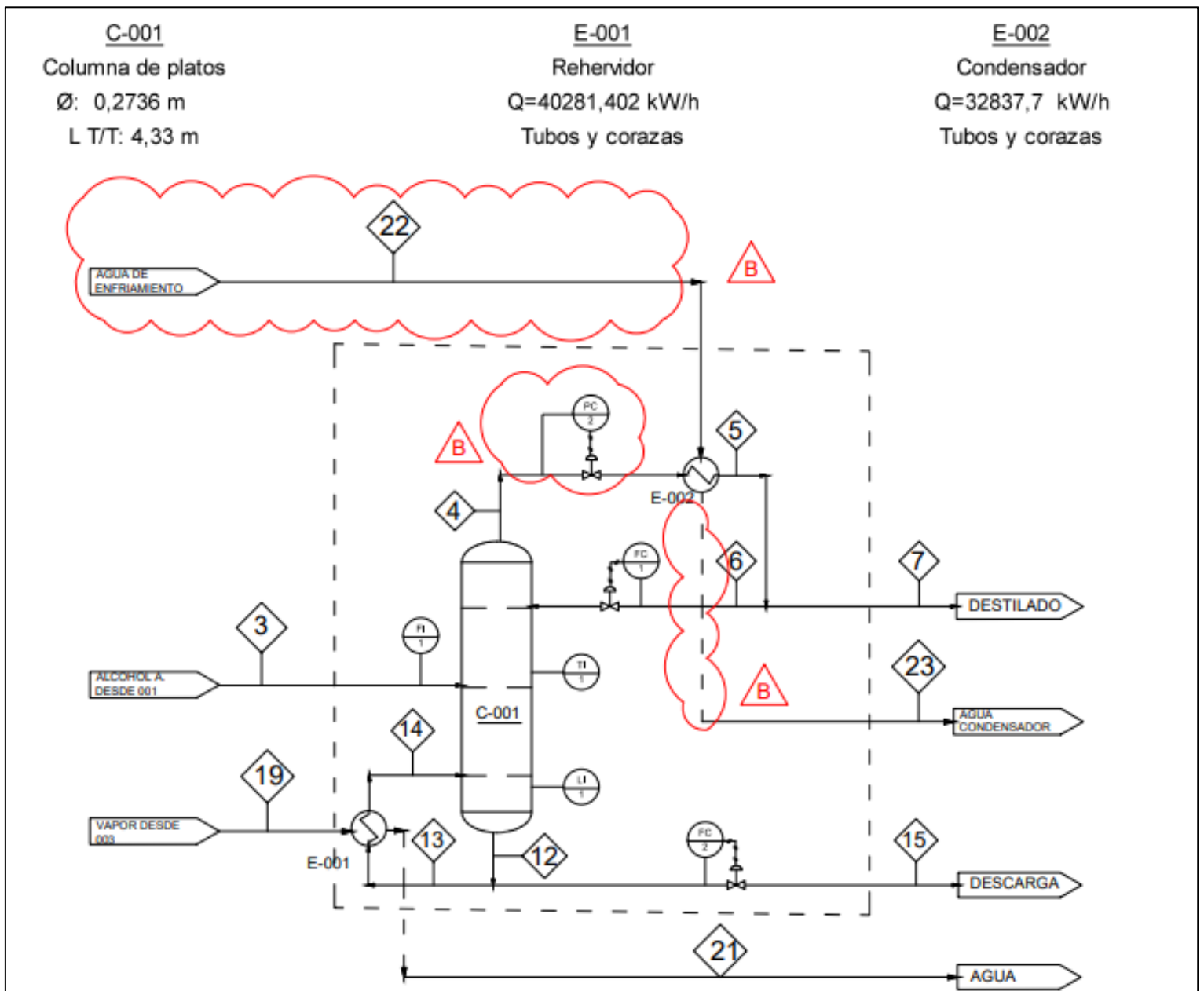
Se planteó un sistema de control que se adecua a los parámetros de Pangua para establecer un control efectivo, fácil de entender y aplicar; además se facilita la selección de equipos con los parámetros establecidos para la torre en construcción. Se concluyó que la aplicación de HAZOP fue un apoyo vital en el establecimiento del lazo de control sobre la temperatura del re-hervidor para controlar indirectamente la concentración del destilado. La simulación aportó en el progreso del proyecto con los datos sobre los cuales se trabajaría para establecer un sistema de control lo más cercano a la realidad de la torre en construcción. Finalmente, la definición de los parámetros se obtuvo a partir del Empirical PID Gain Tuning, un método que mostro ser eficaz para establecer parámetros a partir de sistemas reales o simulados como base, como se demostró a través de la metodología de esta al obtener parámetros exactos para el lazo de control establecido. Con estos parámetros fue posible definir eficazmente el equipo que se ocupara en la torre en construcción.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

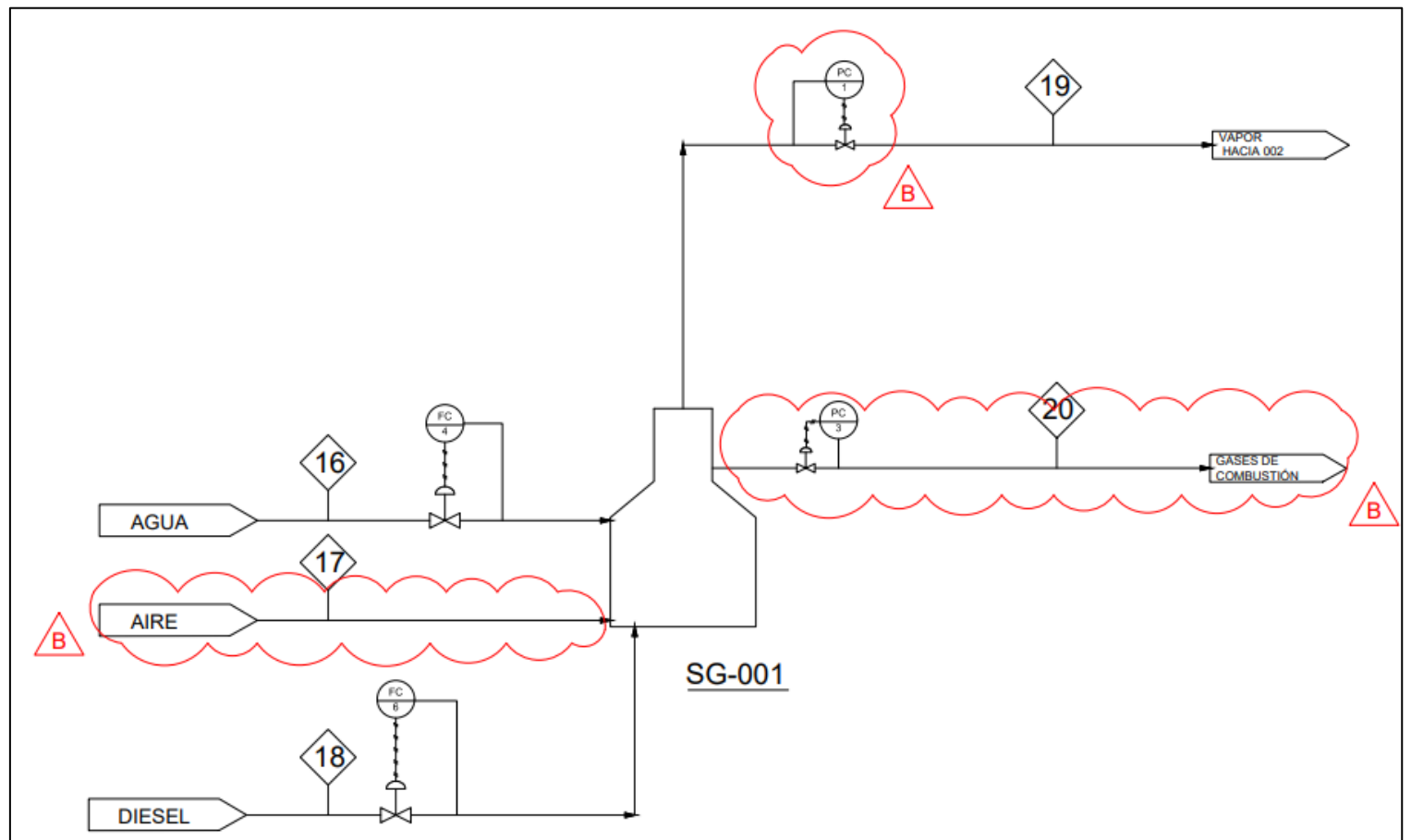
- [1] M. Rodríguez and E. Gómez, “De la destilación doméstica artesanal a la tecnificación de la producción del aguardiente: la cultura material del aguardiente en,” 2014. [Online]. Available: <http://www>.
- [2] Gobierno descentralizado de Pangua, “PLAN DE DESARROLLO Y ORDENAMIENTO TERRITORIAL DEL CANTÓN PANGUA,” Pangua, 2019.
- [3] Guzmán Liliana, “Los congéneres en las bebidas alcohólicas de Pangua.,” Jul. 2023.
- [4] “Nombre común: FURFURAL (FURFURAL),” New Jersey.
- [5] “ICSC 0112 - 2-BUTANOL.” Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: https://chemicalsafety.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0112&p_version=2
- [6] López Shiry, “Fortalecimiento de los procesos de elaboración de alcohol etílico de origen agrícola en ASOEMPRAC mediante el análisis de operaciones unitarias y productos de consumo para contribuir en el desarrollo tecnológico del cantón Pangua.,” 2023.
- [7] M. Mulet-Hing, “Automatización de la destilación de alcohol de la UEB destilería de la ronera Santiago de Cuba,” *Tecnología Química*, vol. 33, no. 1, pp. 1–9, 2013, Accessed: Jun. 09, 2024. [Online]. Available: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852013000100001&lng=es&nrm=iso&tlng=es
- [8] Ministerio de Agricultura y Ganadería, “Cañicultores del noroccidente de Pichincha tecnifican su producción de alcohol,” Quito, 2020. Accessed: Jul. 16, 2024. [Online]. Available: <https://www.agricultura.gob.ec/canicultores-del-noroccidente-de-pichincha-tecnifican-sus-produccion-de-alcohol/>
- [9] Lynch Kevin, Marchuk Nicholas, and Elwin Matthew, “Embedded Computing and Mechatronics with the PIC32 Microcontroller,” 2016. [Online]. Available: www.nu32.org
- [10] A. Pérez Sánchez, E. J. Pérez Sánchez, and M. G. Bodaño Hernández, “Diseño de una columna empacada y una torre de bandejas perforadas para la absorción de etanol. 2. Diseño de la torre de bandejas perforadas,” *Revista Mutis*, vol. 10, no. 1, pp. 8–24, Jan. 2020, doi: 10.21789/22561498.1580.
- [11] Camacho Allan and Carvajal Rodrigo, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL "DISEÑO DEL CONTROLADOR PREDICTIVO MULTIVARIABLE PARA EL TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE,” 2021. Accessed: Jul. 09, 2024. [Online]. Available: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/56405/1/T-112766%20%20Camacho%20-%20Carvajal.pdf>
- [12] Katsuhiko Ogata, “Ingeniería de control moderna,” 2010.
- [13] M. A. de la O Herrera, A. S. Luna, A. C. A. da Costa, and E. M. B. Lemes, “Risk Analysis: A generalized Hazop methodology state-of-the-art, applications, and perspective in the process industry,” *Vigilância Sanitária em Debate*, vol. 6, no. 2, p. 106, May 2018, doi: 10.22239/2317-269x.00990.
- [14] Spirax-Sarco, “Sistemas de Control en Calderas,” 2019.
- [15] Alvaro Patricio, ““DISEÑO DEL SISTEMA AUTOMATIZADO DE ALIMENTACIÓN Y CONTROL DE BOMBAS PARA AGUA POTABLE EN LA CABECERA PARROQUIAL DE LIMONAL,” 2022.

ANEXO A: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA, ALIMENTACIÓN

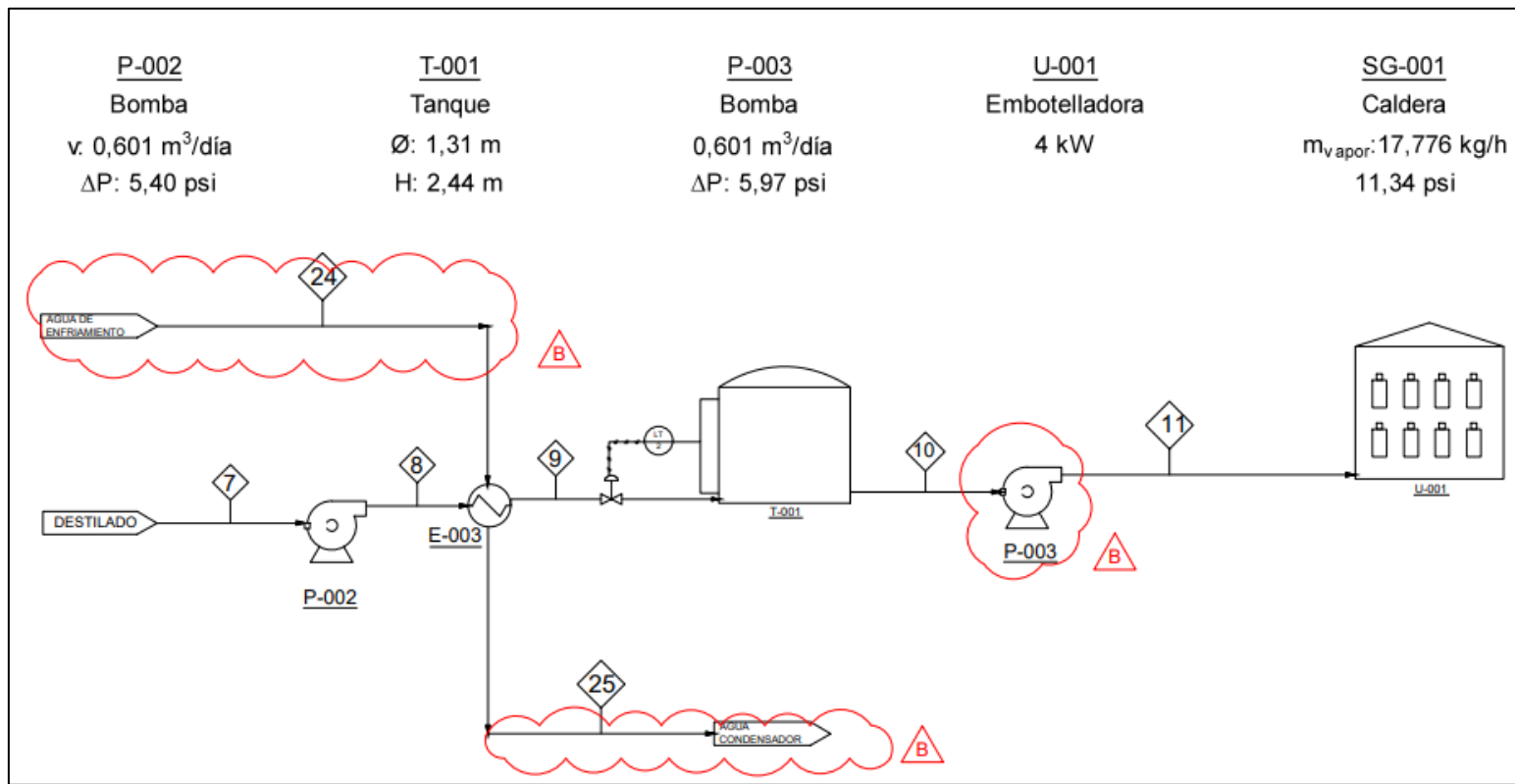
ANEXO B: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA, TORRE DE DESTILACIÓN



ANEXO C: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA, CALDERA



ANEXO D: DIAGRAMA DE FLUJO DEL SISTEMA, EMBOTELLADORA

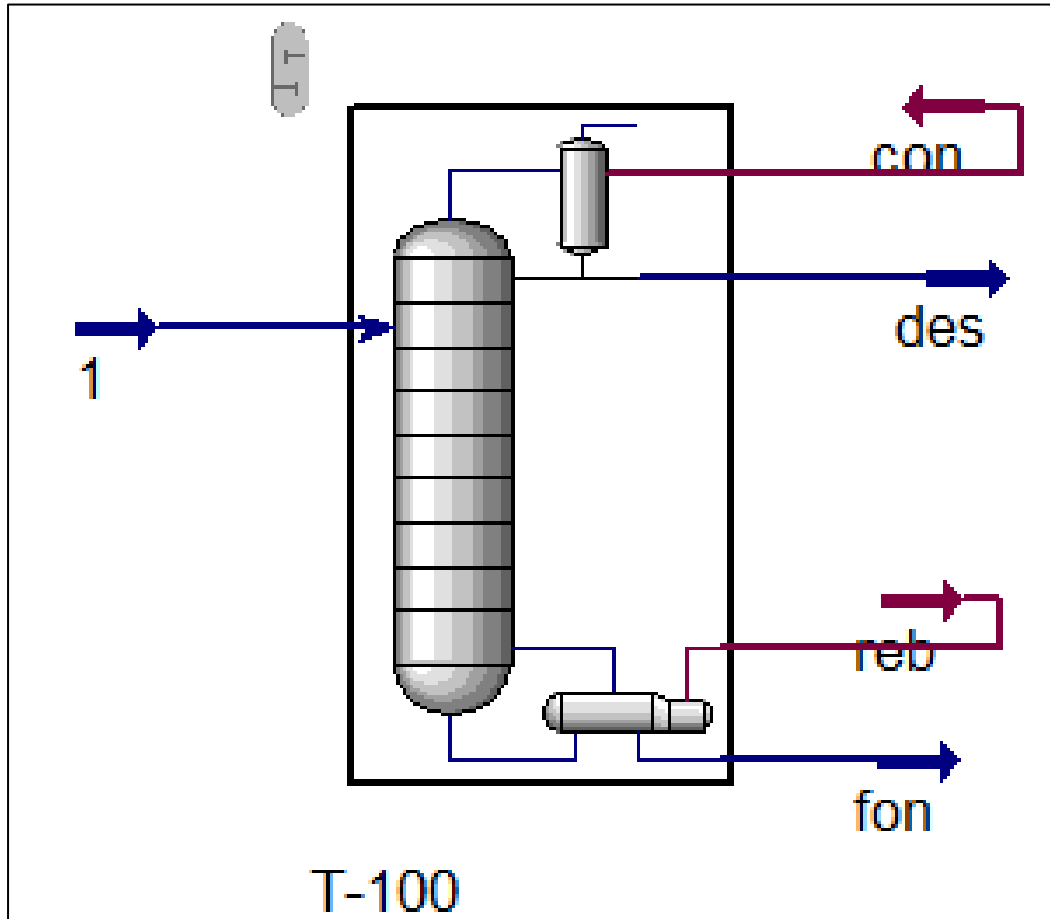


ANEXO E: RESULTADOS OBTENIDOS DEL ANÁLISIS HAZOP

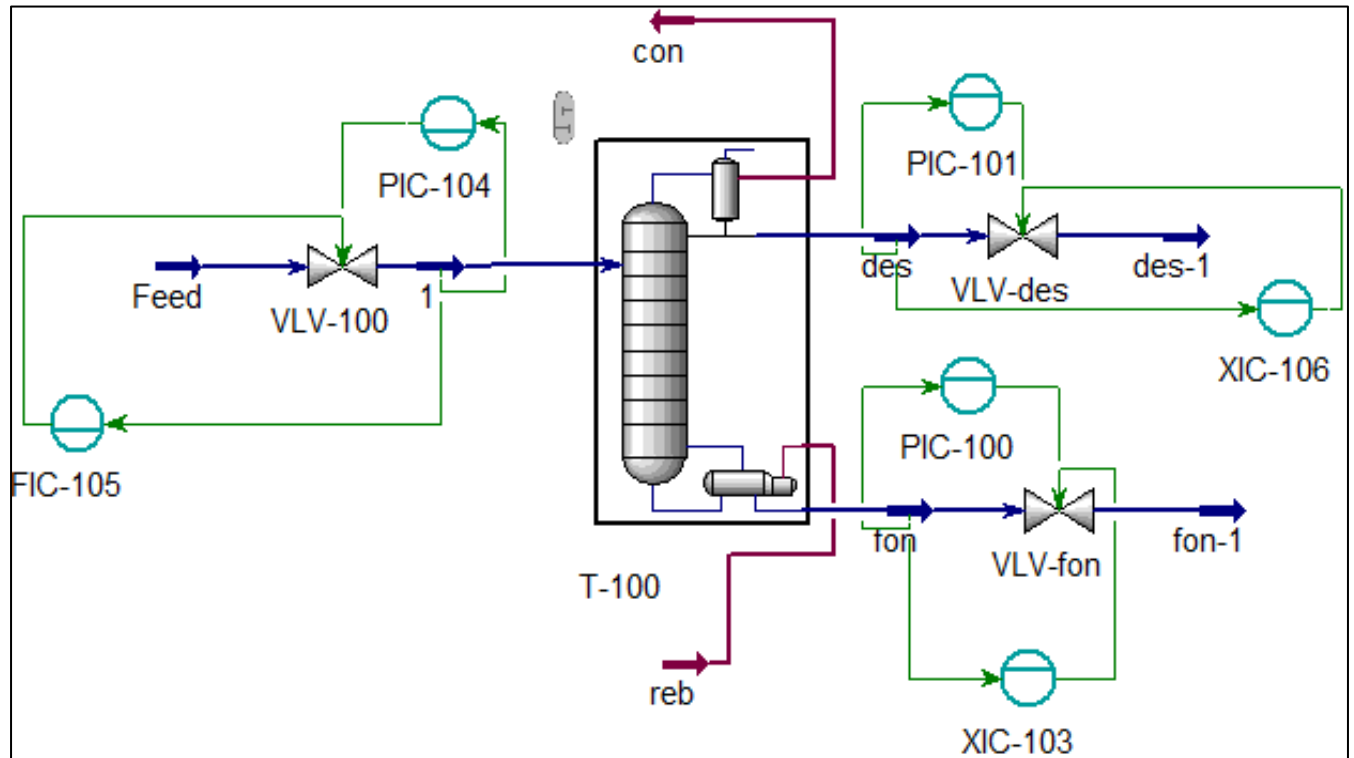
Corriente /equipo	Palabra clave	Variable	Causa	Equipo para agregar
Corriente 5	More/Less	Temperatura	Corriente de agua (22) trabajando de manera deficiente	Una Válvula controlada que asegure la cantidad de agua de la corriente 22
Corriente 14	More/Less y Not	Flujo	Flujo de gas de la corriente 19 inexistente o menor	Un control de flujo en la corriente 19
Corriente 18	More/less y Not	Flujo	Problemas con la fuente del Diesel	Un control de nivel para el tanque de dieses que alimenta la caldera
Caldera (SG-001)	More	Temperatura	Falla de la válvula de la corriente 16	Una alarma conectada al medidor de presión del sistema que apague la alimentación de Diesel
Corriente 8	Less y Not	Flujo	Avería de la bomba	Una válvula check que pare el paso del agua de la corriente 24
Corriente 24	Not	Flujo	Falta de agua de enfriamiento por un error humano	Válvula de flujo en el agua de enfriamiento que este conectada a la bomba.
Corriente 11	Less y Not	Flujo	Avería de la bomba	Una válvula check que pare el paso del destilado de la corriente 10

Tabla #1: Análisis utilizando la metodología HAZOP realizado en base al diagrama de flujo entregado por Liliana Guzmán de la universidad Politécnica Nacional.

ANEXO F: SIMULACIÓN BASE



ANEXO G: SIMULACIÓN DINÁMICA



ANEXO H: PARÁMETROS DE CONTROL

Tuning Parameters

Kc	1,50
Ti	5,00e+003
Td	200
Tt	<empty>
b	1,00
c	0,000

ANEXO I: SISTEMA CONTROLADO POR LOS PARÁMETROS DE CONTROL OBTENIDOS

