

Técnicas de control aplicadas en columnas de destilación de crudo

(febrero de 2023)

Diosa C. Rodríguez, Ingeniería Mecatrónica, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, Colombia,
diosa.rodriguez@ustabuca.edu.co

Resumen - La importancia de la industria petroquímica en el mundo lleva a que cada día se busque que los procesos de extracción y refinamiento de sus derivados sean cada vez más eficientes [1]. Entre los principales procesos esta la destilación que es un proceso de separación y purificación de componentes. Este proceso se realiza mediante columnas de destilación, las cuales son de gran interés en el área del control debido a que son no-lineales y sus modelos son difícilmente controlables alrededor de su punto de operación [2]. Por ello, existe en la literatura ciertas técnicas para controlar el comportamiento de los diferentes procesos químicos que se llevan a cabo en la industria. Estas técnicas de control tienen como finalidad mantener los procesos en las condiciones deseadas de operación, de tal manera que se puedan prevenir accidentes, manteniendo seguras tanto las plantas donde se llevan a cabo estos procesos como sus alrededores. La industria de los hidrocarburos, en especial el proceso de destilación del crudo es uno de los procesos que más técnicas de control implementan. Dentro de este trabajo son presentadas, a manera de revisión, las técnicas de control que mayormente se aplican en las columnas de destilación del crudo junto con ejemplos de cada uno de ellos, sus resultados, análisis y conclusiones.

Palabras claves: Control de procesos, columna de destilación, destilación de crudo, industria y técnicas de control.

Control techniques applied to crude oil distillation towers

Abstract - The importance of the petrochemical industry in the world means that the extraction and refining processes of its derivatives are becoming more efficient every day [1]. Among the main processes is distillation, which is a process of separation and purification of components. This process is

Artículo científico presentado como opción de grado para optar por el título de ingeniería mecatrónica

Diosa Caryna Rodríguez Yaruro, ingeniería mecatrónica, universidad Santo Tomás. Correo electrónico: diosa.rodriguez@ustabuca.edu.co

carried out by means of distillation towers, which are of great interest in control because they are nonlinear, and their models are difficult to control around their operating parameters [2]. Therefore, there exist in the literature certain techniques to control the behavior of the different chemical processes carried out in the industry. The purpose of these control techniques is to maintain the processes in the desired operating conditions, in such a way that accidents can be prevented, keeping safe both the plants where these processes are carried out and their surroundings. The hydrocarbon industry, especially the crude oil distillation process is one of the processes that implement more control techniques. In this work are presented, as a review, the control techniques that are mostly applied in the crude oil distillation columns along with examples of each of them, their results, analysis, and conclusions.

Keywords: Process control, distillation column, crude distillation, industry, and control techniques.

I. INTRODUCCIÓN

El control de procesos es un área que comprende otras áreas del conocimiento como son la ingeniería y la termodinámica, y que aborda el estudio de las diferentes maneras de controlar procesos mediante ciertos mecanismos, arquitecturas, algoritmos, etc. El fin del control de procesos es poder obtener como resultado producciones eficientes y confiables, además de un producto final que no varíe demasiado respecto al producto deseado. La implementación de un sistema de control busca que los costos de producción y el impacto ambiental sean mínimos. El control de procesos es una herramienta de gran importancia dentro de los procesos industriales que involucran el manejo de cierta cantidad de variables para la producción de un producto específico [3].

Aunque nos encontramos en una era de transición a energías renovables, la industria de los hidrocarburos sigue siendo una de las mayores proveedoras de recursos energéticos. Dentro de esta industria se llevan a cabo procesos que requieren de mucho control como es el proceso de destilación del crudo [4]. La destilación del crudo es un método aplicado para la obtención de

productos derivados de los hidrocarburos, dentro de la cual se lleva el crudo a distintos puntos de ebullición mediante el control de la temperatura. A los procesos involucrados dentro de esta técnica se les conoce como fraccionamiento y transformaciones químicas, los cuales permiten obtener otros productos diferentes a los combustibles, tales como materias primas para la industria del plástico, la industria farmacéutica, química y agrícola. En la industria de los hidrocarburos se busca principalmente la optimización de la manera en cómo son llevados a cabo algunos procesos, es por eso por lo que se hacen grandes inversiones de dinero en estrategias y personal del área de control de procesos [4].

Dentro de una columna de destilación ocurren procesos que son complejos y no lineales, en las interacciones entre las reacciones químicas que ocurren y el equilibrio entre los vapores y los líquidos presentes. Por tal motivo, llevar a cabo procesos de control para columnas de destilación puede llegar a ser una tarea bastante compleja en la cual se requiere experiencia [5]. Para llevar a cabo de manera efectiva el control de los parámetros de operación dentro de los procesos que ocurren en una columna de destilación es necesario escoger un método de control apropiado. Existen distintos tipos de métodos de control, entre los cuales se encuentra el método de control ON-OFF, el cual es el más primitivo, el método de control proporcional (P), el método de control integral (I), el método de control derivativo (D) y los métodos conformados por cualquier combinación de los métodos P, I y D [6], [7]. El método tradicional para el control de variables es el PID [8], cuyos controladores están basados en modelos de procesos lineales que se obtienen mediante experimentación. Los procesos que ocurren dentro de las columnas de destilación, en su mayoría, son procesos no lineales, por lo que la aplicación de métodos PID conlleva a un rendimiento algunas veces ineficiente del proceso. Por lo tanto, existen otras estrategias o técnicas más avanzadas de control como es el método de control predictivo y sus derivados como, por ejemplo, el control predictivo por modelo (MPC) [9], el método por matriz dinámica (DMC) [10], la tecnología de control predictivo multivariable robusto (RMPCT) [11], [12], el método de control predictivo generalizado (GPC) [13], [14], [15], entre otras.

El objetivo de este trabajo es identificar que modelos de columnas de destilación de crudo son utilizados, cuáles son los controladores que se aplican a estos modelos y que respuesta se obtiene. Además de evaluar el uso de técnicas tanto clásicas como adaptativas para las labores de control automático.

II. CONCEPTOS BÁSICOS

A. Destilación.

La destilación es un procedimiento natural de los compuestos, donde se separa en dos o más componentes una mezcla y estos tienen puntos de ebullición diferentes. Consiste en variar la temperatura para separar los elementos que se

encuentran juntos [16]. La destilación se lleva a cabo por medio de dos elementos principales, los cuales son el condensador y hervidor. En este proceso se aprovecha la tendencia que presentan las mezclas inestables en un compuesto líquido para enfocarse en la fase gaseosa y, como a su vez de manera simultánea los compuestos más pesados de la mezcla se inclinan a potenciar la fase líquida que se encuentra en equilibrio termodinámico con la fase gaseosa. Es un proceso altamente implementado en las industrias que refinan petróleo con el fin de producir en masa productos químicos para el uso en hogares y fábricas [17].

B. Tipos de destilación.

Destilación Simple. Se utiliza con mezclas de productos donde existe únicamente un componente volátil, o bien, el punto de hervor del líquido es más volátil que el de los demás elementos en por lo menos 80 °C. Cuyo resultado termina siendo la evaporación de un solo componente. Otras formas en las que este tipo de destilación puede ser implementada es utilizando la presión atmosférica y la presión reducida.

Destilación fraccionada. Se usa para separar mezclas de sustancias volátiles donde los puntos de ebullición varían, pero su diferencia es menor a 80 °C. Con el fin de enriquecer el vapor en los Componentes más volátiles y, así poder utilizar esta propiedad para separar los componentes líquidos, se calientan mezclas con diferentes presiones de vapor [17]. Su rasgo más característico es que requiere de una columna de fraccionamiento.

Destilación por arrastre de vapor. Si se requiere trabajar con sustancias con puntos de ebullición mayores a 100°C y que se descomponen al alcanzar este punto, se sugiere este tipo de destilación, ya que permite purificar o aislar los componentes con punto de ebullición elevado por medio de una destilación a baja temperatura (inferior a 100°C) [18]. Se usa para sustancias insolubles en agua.

Existen diferentes tipos de columnas de destilación. Sin embargo, las más usadas a nivel industrial son carcasas de metal que en su interior contienen bandejas de platos unas sobre otras, como se observa en la figura 1. Estas son las más implementadas en los procesos industriales de separación. Principalmente los intercambiadores de calor buscan destilar y concentrar el flujo de alimentación que ingresa en los platos por medio de un canal. El fluido se desplaza de los platos superiores a los inferiores en la parte interna de la columna. Del mismo modo se tiene un contraflujo en la dirección del líquido, que da como resultado la destilación del elemento más ligero y la concentración del más pesado, a esto se le denomina transferencia de materia [17].

Figura 1. Columna de destilación.



Las columnas de destilación tienen una etapa de calentamiento o abastecimiento energético que tiene como objetivo producir el vapor que asciende a través de la columna. El vapor es la principal fuente energética implementada. El líquido que se encuentra en el fondo de la columna puede ser calentado con vapor si el proceso permite el contacto entre el vapor y el fluido de operación. De no ser así, el vapor se utiliza indirectamente a través de un intercambiador o mejor conocido como rehervidor. Por otro lado, el sistema de refrigeración es utilizado para la condensación de los gases que se encuentran en la cima de la columna. La fase líquida que se retorna en muchos casos se extrae como producto de cúspide [17]. El hervidor al ser un intercambiador de calor aporta la carga energética suficiente para separar los elementos del compuesto de alimentación, pues genera una etapa de vapor usando el líquido que se encuentra en la parte inferior de la columna [17]. El condensador es otro intercambiador de calor. Este permite separar la energía condensada en el vapor que se escapa por la parte superior de la columna, que luego es condensado para generar un líquido que será dividido, ya que una parte de este retornará a la columna como reflujo y la otra será destilada [17].

III. Objetivos y control de variables

El objetivo de las estrategias de control en estos sistemas es obtener una operación segura y estable además de tener una operación óptima. Para lograr esto se debe cumplir el balance de materia en la columna, por lo que las cantidades de las corrientes de productos deben ser igual a la de la corriente de alimentación en estado estacionario. Controlar los niveles de líquido en el tanque de reflujo y el fondo de la columna hacen parte esencial del proceso. Además, se debe garantizar la graduación de los caudales para no modificar abruptamente el comportamiento de la columna como el de los equipos aguas abajo. Cumpliendo las limitaciones establecidas por la operación de la columna (límites de presión, temperaturas) [19].

Los procesos de control tienen como objetivo ahorrar costos en el gasto energético y aumentar la recuperación de los productos principales sin afectar los requerimientos anteriores, ya que estos son fundamentales en la operación [19]. En la figura 2 se presenta una columna de destilación junto con las variables que serán controladas y manipuladas, así mismo en la tabla 1 y 2 se podrá evidenciar la información acerca de cada una de las variables mencionadas en la figura.

Figura 2: Variables controladas y manipuladas en una columna de destilación [19].

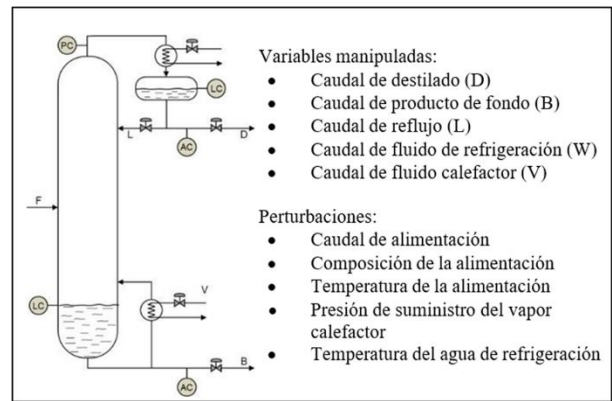


Tabla 1. Variables Manipuladas.

Variable Manipulada	Descripción
Caudal de destilación	Líquido que se devuelve como reflujo y el que se extrae como destilado
Caudal de Productos de Fondo	Es el caudal de salida de los productos que quedan al fondo de la columna.
Caudal de reflujo	Es el flujo de destilado que regresa a la columna y ayuda al correcto funcionamiento
Caudal de fluidos de refrigeración	Son las variables utilizadas para controlar la temperatura
Caudal fluido de calefactor	

Tabla 2. *Perturbaciones del sistema.*

Perturbaciones	Descripción
Caudal de alimentación	Es la cantidad de sustancia a la entrada del sistema, si es muy grande o pequeño afecta la producción de productos
Composición de alimentación	Es la composición química de la alimentación del sistema. Afecta la producción de productos
Temperatura de alimentación	Afecta el control de temperatura del sistema
Presión de vapor del calefactor	Dependiendo de estos valores realizar el control de temperatura es más complejo
Temp. Agua refrigeración	

Como se pudo evidenciar en la figura 2, las principales Variables para controlar generalmente en las torres de destilación son [19]:

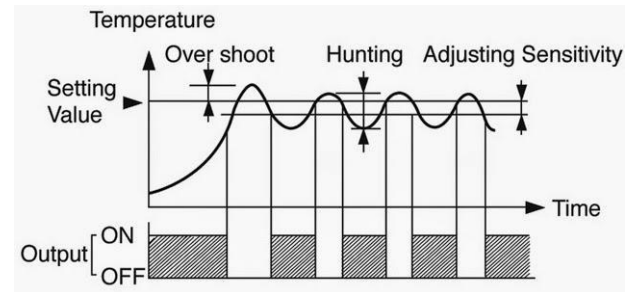
- Presión de la columna de destilación
- Nivel del líquido en el tambor de reflujo
- Nivel del líquido de fondo en la columna
- Temperatura aplicada

IV. Estrategias de control

A. Control clásico

1) Control on/off

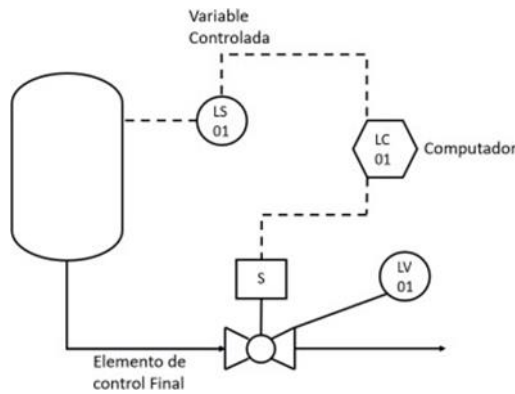
Este tipo es el método más simple que hay para realizar un control. La salida del regulador está encendida o apagada, no posee puntos medios. Y el estado del controlador solo cambia cuando la salida atraviesa el punto de ajuste o setting Value como se observa en la figura 3, donde adjusting sensitivity es la histéresis del sistema, hunting define el rango de oscilación de la señal y overshoot el pico que alcanza el controlador.

Figura 3. *Curva de funcionamiento del control On/Off (Extraído de ceisa) [20].*

Para el calentamiento, la salida se activa o pone en alto cuando la temperatura está por debajo del setpoint, y cambia de estado cuando está por encima del mismo. Los cambios se realizan cada que se cruza el punto de ajuste, lo que genera oscilaciones continuas entre este.

En los casos donde este ciclo se genera rápidamente, y para evitar daños a los contactores y válvulas, añaden histéresis (diferencial ON/OFF) al controlador de temperatura. El diferencial necesita que el punto de ajuste sea superado por la temperatura por cierta cantidad antes de ser activado o desactivado nuevamente,[21] como se observa en la figura 3. Un claro ejemplo de esto es el control ON/OFF realizado a una columna de destilación en la escuela técnica superior de ingeniería Sevilla – España [31], donde los armarios de control de las columnas de destilación poseen bornes que permiten su funcionamiento en 4 modos de trabajo (manual, ON/OFF, Input Socket y I/O port). A través de los conectores se implementó el control mediante un PLC. Para este proyecto se llevó a cabo un sistema de control en tiempo real, donde las variables a controlar fueron: la válvula de reflujo (Válvula que recibe las ordenes de control, cuya función es dirigir el condensado al recipiente o de vuelta a la columna como reflujo), la potencia de reboiler (recipiente cilíndrico que incluye un elemento calefactor y un sensor de nivel) y la velocidad del motor de la bomba. Se concluyó que para futuras mejoras de la columna de destilación se debe ejecutar e implementar controladores a la planta y técnicas más avanzadas de control, ya que la implementada es una de las técnicas más sencillas, pues en este caso el estudio se realizó con el objetivo de buscar la funcionalidad de la columna por medio de un método de control que permitiera a los futuros estudiantes implementar otros métodos [31].

Figura 4. Implementación Control On-Off

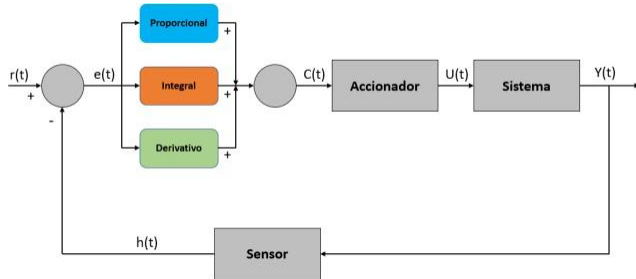


Sumado al ejemplo anteriormente nombrado se puede mencionar otro trabajo, donde diseñan e implementan un control de nivel para una columna de destilación binaria [34]. En el cual se realizó un control ON-OFF, como se observa en la Figura 4, en el cual se utiliza un sensor de proximidad capacitivo, donde la información que produce este se acondiciona para utilizarla en el lenguaje de programación LabVIEW. Luego esta información procesada se utiliza para controlar una válvula ON-OFF normalmente cerrada que se activa por electricidad utilizando LabVIEW. Esto se hizo debido a los vapores generados y turbulencia que no permitían la instalación de un sensor análogo.

2) Control PID

Un controlador PID es un mecanismo que permite controlar un sistema de lazo cerrado para lograr una salida deseada. Este consta de tres componentes que suministran operación proporcional, integral y derivativa. Estas tres funciones dan el nombre del controlador PID [22] como se observa en la figura 5.

Figura 5. Esquema de bloques de un controlador PID

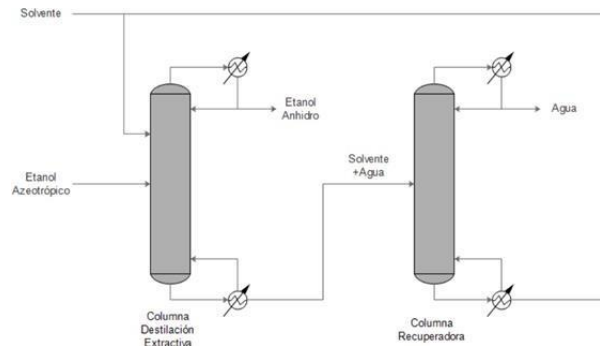


Un ejemplo de esto es el controlador clásico PID como el que se observa en la figura 5. Este tipo de controlador es de lazo sencillo realimentado. Sus principales ventajas son su simplicidad y robustez; El algoritmo es sencillo de implementar y se ejecuta ampliamente en lazos de temperatura, nivel, presión y caudal. Sin embargo, sus resultados no siempre son los mejores [2].

Entre sus principales ventajas se encuentra una rápida

respuesta al error, la corrección que se aplica es independiente de la perturbación aplicada, y tiene gran versatilidad y robustez. Aun así, posee desventajas como que no se anticipa a las perturbaciones sino hasta que ocurren. Lo que limita la respuesta del control y no la hace preventiva aun ante variables de error mediables. Su dinámica no es aceptable en sistemas con tiempos muertos grandes. Este controlador puede ser aplicado en procesos de destilación extractiva usando columnas de destilación y recuperación. Dicho proceso consiste en ingresar una mezcla azeotrópica (mezcla de dos o más componentes que tiene un único punto de ebullición y que al cambiar a estado gaseoso, su composición es la misma que en estado líquido) junto con el solvente, el cual genera que el punto de ebullición de uno de los componentes cambie, así luego al pasar a la columna de recuperación se pueden separar y reutilizar el solvente [2].

Figura 6. Destilación extractiva mediante columna de extracción y recuperación (Galindo, J.P)



En este proceso se busca disminuir el gasto de energía que se requiere para quitar parte del azeótropo positivo (aquel que hierve a una temperatura máxima) cuando el negativo (aquel que hierve a una temperatura mínima) tiene una condensación que no supera el 90%. Además, se utiliza una columna de preconcentración que genera una pureza entre 90% y 95% del azeótropo negativo [2]. Los controladores PID son los más utilizados en la industria. Y las columnas de destilación no son la excepción. Un ejemplo de ello es presentado en el caso de una columna piloto con una mezcla etanol-agua, donde se controla el caudal de reflujo y el caudal de vapor rehervido para regular la concentración de etanol en el destilado, y la composición de productos en el fondo [35].

Las ecuaciones 1 y 2 representan las funciones de transferencia linealizadas para un sistema con múltiples entradas y salidas, donde G_{12} está relacionada con G_{21} y G_{11} con G_{22} que luego dan como resultado la ecuación 3, la cual son los controladores obtenidos pues se consideró la planta como dos sistemas SISO (una entrada, una salida) separados, a esto se le denomina control descentralizado.

$$G_{11}(s) = \frac{0,66e^{-2,6s}}{6,75s+1} \quad G_{12}(s) = \frac{-0,49e^{-s}}{9,06s+1} \quad (1)$$

$$G_{21}(s) = \frac{-3,047e^{-9,25s}}{8,15s+1} \quad G_{22}(s) = \frac{0,87(11,6s+1)e^{-s}}{(3,89s+1)(18,8s+1)} \quad (2)$$

$$c_1(s) = 1 + \frac{0,25}{s} \quad c_2(s) = 1 + \frac{0,15}{s}$$

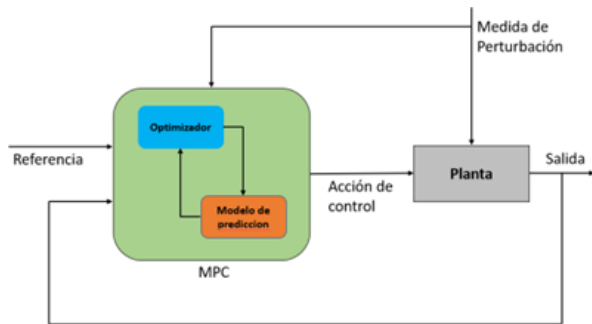
Esto satisface los objetivos del control en columnas de destilación.

Una actividad predictiva es la forma de producir una acción que pueda adelantarse a una determinada perturbación y así poderla evitar o si se es posible disminuir. En resumen, el regulador actúa en el momento, teniendo como base predicciones del comportamiento que tendrá el proceso [24]. En la figura 8 se puede observar el lazo de control MPC.

Características:

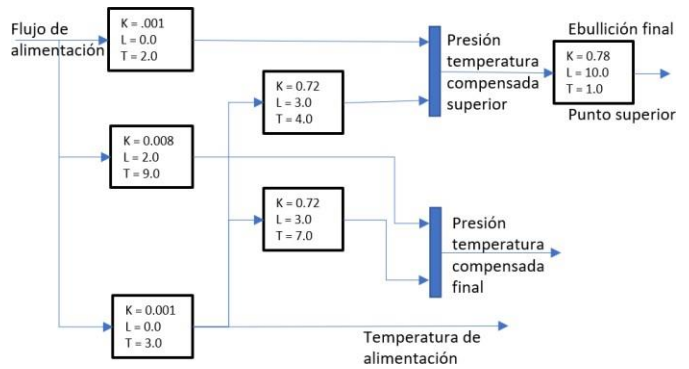
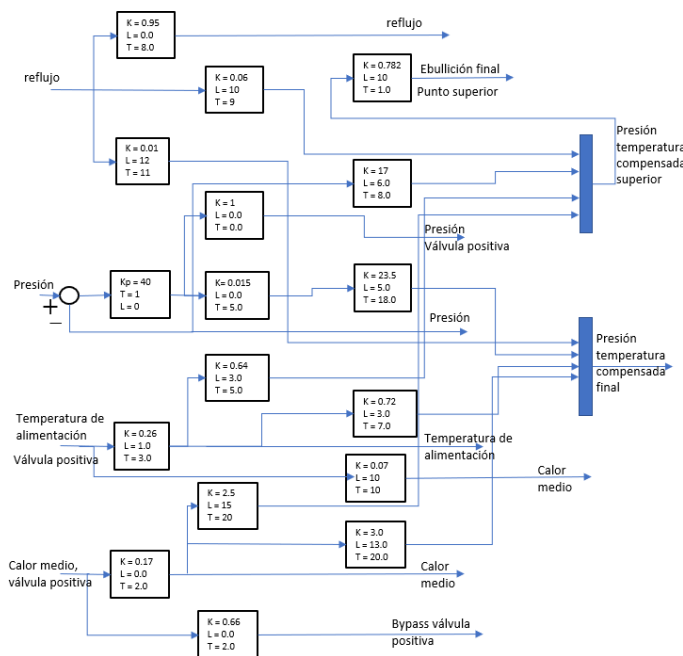
- Usa un modelo explícito
- Se busca minimizar el objetivo
- Se poseen modelos de posibles perturbaciones

Figura 8. Lazo de control MPC.



A continuación, se muestra la figura 9 en la cual muestra un ejemplo de un modelo utilizado para un control MPC. En esta investigación se realiza un modelo lineal de primer orden el cual se compone de una ganancia estática (K), un tiempo de retardo de transporte (L) y una constante de tiempo (T) con el tiempo manejado en minutos [25].

Figura 9. Modelo de la Planta de refinamiento (Kniese, D.W. 2003)



Los principales objetivos de control de este caso son mantener las variables dentro de un rango establecido y la consideración de las restricciones. Las cuales son mantener por debajo de 2.5% la concentración de la gasolina pesada en la parte superior, 2. En lugar de una concentración de producto de fondo, minimizar el consumo de energía de calefacción y mantener un flujo mínimo de circulación en el horno. Estos requisitos se pueden cumplir mediante un control predictivo multivariable con restricciones y alimentación de perturbaciones del flujo de alimentación. La función de optimización o costo del control predictivo se observa en la ecuación 4. El método de optimización fue realizado por SMOC (Shell Multivariable Optimizing Controller) [25].

$$J = \sum_{i=1}^{N_u} \sum_{n_e=i}^{N_y} \lambda_{yi}^* [Y_i(k+d+n_e) - \hat{Y}_i(k+d+n_e|k)]^2 + \sum_{j=1}^{N_u} \sum_{n_u} \lambda_{uj}^* \Delta u_j^2(k+j-1) \Rightarrow \text{MIN } \Delta u_i \quad (4)$$

Tabla 3. Variables usadas en la función de costo para lapredicción.

$\Delta u_i(k)$	Es una variable que cambia n veces
$\hat{Y}(k+d+n_e k)$	Es una predicción de la señal de control
$Y_n(k+d+n_e)$	Es una señal de referencia
d_i	Es el tiempo usado para discretizar el control
n_e	Paso de predicción
N_y	Numero de señales decontrol
N_u	Variables manipuladas en el control
$n_e2 - n_e1$	Tamaño del horizonte de predicción
n_u	Horizonte de

control	
λ^*_{yi}	Factor de escalamiento de la señal de control
λ^*_{ui}	Factor de escalamiento de la señal manipulada
λ_{yi}	Factor de peso de la señal de control
λ_{ui}	Factor de peso de la variable manipulada

En este estudio plantean una sección de beneficios económicos de la optimización donde se manifiesta que, si se disminuye la varianza del punto de ebullición de los productos superiores, el valor de referencia de la temperatura puede ser mayor y, se puede tener una mejor separación de los componentes más pesados en los productos superiores. Permitiendo vender los componentes más eficientes y a un mayor costo.

Tabla 4. A) Calidad de los productos con diferentes técnicas de control. B) Cantidades de productos con diferentes técnicas de control (Kniese, D.W. 2003)

Control	Productos superiores [t/día]	Productos inferiores [t/día]	A
PI	263.4	2873	
Predictivo	267.2	2869.2	

Punto final de ebullición			B
Control	Valor promedio [°C]	Desviación estándar [°C]	
PI	60.857	1.959	
Predictivo	60.89	0.9795	

Seguidamente se agrega una investigación donde presentan un controlador predictivo que se basa en modelo para el control de la mezcla en la cima y fondo de una columna de destilación binaria en el proceso de producción de etanol [37]. Para esta investigación utilizaron en el diseño del controlador un modelo de primer orden, con retardo de transporte que define el funcionamiento de la columna de destilación. El sistema de control predictivo implementado en este caso se utiliza para mejorar la producción de etanol dando como resultado un sistema con una respuesta transitoria adecuada y que es capaz de rechazar. Lo que los llevó a la conclusión de que esta técnica y diseño son una herramienta para mejorar la confiabilidad y eficiencia en una columna de destilación binaria [37]. Por último, se menciona un controlador NMPC el cual es un control predictivo no lineal (NMPC). En el NMPC, el algoritmo utilizado usa un modelo del proceso que simplifica las características principales del proceso [38].

2) Control inteligente

Este tipo de control es la integración del control automático, la inteligencia artificial y los sistemas distribuidos en tiempo real. Las principales técnicas utilizadas son:

- Sistemas expertos: Este es basado en la experiencia y conocimiento de expertos. Ya que se recoge información mediante reglas que determinan la actuación [26].
- Redes Neuronales: Son estructuras que se encuentran interconectadas entre sí para transmitir señales. Según investigaciones es un método computacional evolucionado donde se procesa la información imitando la forma en la que el cerebro humano lo hace [26].
- Algoritmos Genéticos: Es una técnica que depura de forma automática las reglas que forman la base de conocimiento.

Es comparable con los seres vivos, quienes evolucionan y se adaptan al entorno en el que se encuentren. [26]. El diagrama de un lazo de control inteligente se puede observar en la figura 10, mientras que en la figura 11 se evidencia la implementación de un controlador inteligente dentro de un control PID.

Figura 10. Lazo de controlador inteligente

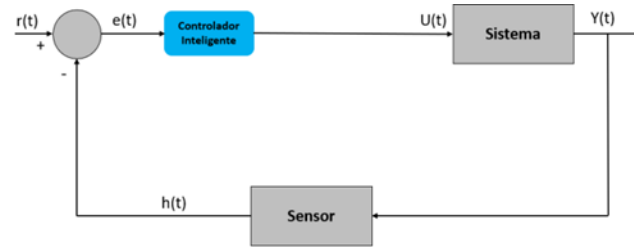
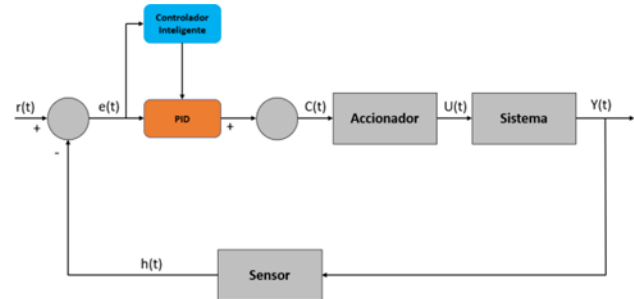


Figura 11: Control PID modificado con un controlador inteligente



La optimización de la distribución en un sistema de control en una refinería de crudo aplicando técnicas de Machine learning híbrido fue usada en una planta en Al Doura (Irak). La predicción de los cortes de crudo se obtiene a partir de la primera etapa del proceso de refinación, aplicando la teoría de conjuntos aproximados o RST (rough set theory) basada en el sistema de inferencia neuro difusa adaptativa o ANFIS (adaptative neuro-fuzzy inference system) con la cual se diseña un modelo de sensor suave para mejorar el rendimiento del proceso de refinería de crudo. La aplicación de esta técnica

busca reducir los conjuntos de reglas difusas del modelo ANFIS a partir del modelo RST, aplicando también métodos para optimizar los datos continuos, lo cual ayuda a predecir las variables: RVP (reid vapor pressure) presión de vapor reid y API (american petroleum institute) instituto americano de petróleo, quienes detectan disminución de la calidad. Examinando los procesos en tiempo real obtienen resultados que mantienen la pureza del producto destilado conforme al control de calidad, también se encuentra que el modelo ANFIS no tiene sobre impulsos, y el tiempo de subida mejora en un 26% mientras que el tiempo de establecimiento mejora en un 84% [25].

3) PID descentralizado

Son sistemas con múltiples entradas y salidas (Ecuaciones 5 y 6), en los que una entrada influye a diversas salidas y viceversa [27].

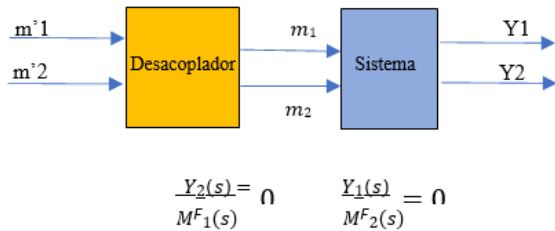
$$Y_1(s) = G_{11}(s) * U_1(s) + \dots + G_{1m}(s)U_m(s) \quad (5)$$

$$Y_p(s) = G_{p1}(s) * U_1(s) + \dots + G_{pm}(s)U_m(s) \quad (6)$$

Ecuación 5 y 6: Representación sistema MIMO.

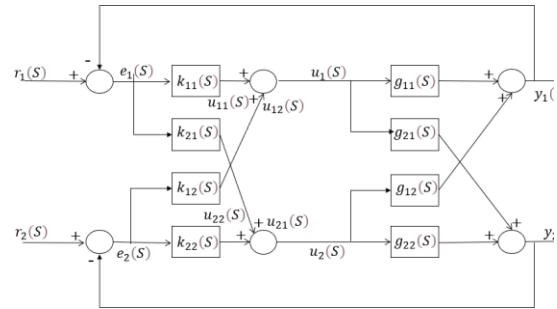
En este tipo de controles los controladores no pueden conectarse independientemente. Debido a que un lazo de control siempre va a tener incidencia sobre el otro gracias al efecto de interacción que existe entre ambos. La función de transferencia entre cada salida y cada entrada varía junto con el resto de los lazos de control [27]. En estos sistemas se puede tratar de eliminar o reducir las interacciones de las variables de entrada con las de salida diferente de las que controla. Por lo que se agrega un Desacoplador como se ve en la figura 12.

Figura 12. Esquema Desacoplador



En las columnas de destilación los lazos de control se acoplan fuertemente. Lo que vuelve necesario diseñar un controlador que desacople. Para este diseño se debe eliminar las interacciones del flujo de reflujo con la composición base, por lo cual se busca un controlador con una red de desacoplamiento, donde se pueda obtener una función de transferencia en lazo cerrado cuyos componentes que no se encuentran en la diagonal sean iguales a cero [40]. Una aplicación del controlador es aplicada a una columna de destilación, donde los lazos de control poseen un fuerte acoplamiento entre sí. Por lo que se debe diseñar un controlador que sirva como Desacoplador en el lazo de composición inferior y superior. (Figura 13). Esto se logra implementado un controlador con red de desacoplo que permita obtener los elementos que se encuentran fuera de la diagonal en su función de transferencia iguales a cero [28].

Figura 13. Controlador Kinv. (28)



El controlador utilizado en este caso que es capaz de lograr el desacoplamiento dinámico fue uno Kinv descentralizado 2x2. Este controlador es basado en modelo, el cual se diseña en base a la función de transferencia de la planta (Ecuación 7), la cual es una aproximación a un sistema de primer orden mediante el método conocido como “stepping technique”, y la ecuación de diseño del controlador se puede observar en la ecuación 8. Donde l(s) = k/s corresponde a la ganancia del controlador. Este posee integrador puro, el cual asegura que el error en estado estacionario sea cero. G⁻¹(s) es la inversa de la función de transferencia de la planta en lazo abierto [28].

Ecuación 7: Función de transferencia de la planta. Ecuación 8: Función de transferencia del controlador [28].

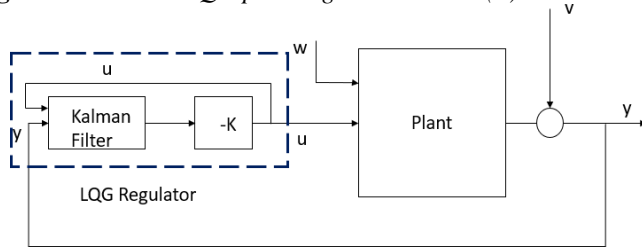
$$G^{uv}(s) = \frac{1}{45s+1} \begin{vmatrix} 15.0 & -14.8 \\ 85.0 & -85.3 \end{vmatrix} \quad (7)$$

$$K_{inv}(s) = l(s) * G^{-1}(s) \quad (8)$$

El controlador Kinv es un regulador que ayuda a eliminar problemas de inestabilidad suprimiendo los polos que se encuentren en el semiplano derecho del plano. Adicionalmente, este controlador permite implementar el modelo del proceso de una forma más clara. Por otro lado, como todos los controladores este también posee desventajas, entre las cuales se encuentran la sensibilidad a incertidumbres en la entrada y que no se modela rechazo ante las perturbaciones.

4) Controlador LQG (lineal cuadrático gaussiano)

Este controlador es la combinación de un filtro de Kalman con un controlador lineal cuadrático regular o LQR, que asume que no hay ruido de proceso y que el estado completo está disponible para control. Esta técnica permite monitorear el rendimiento del sistema y medir el esfuerzo de control que se presenta a raíz de las perturbaciones y ruido del proceso [29].

Figura 14. Modelo LQG para regular la salida (Y) en cero.

Un ejemplo de esto es el artículo “Distillation column control using genetic algorithms for LQR design” en el cual se utilizan algoritmos genéticos para determinar las matrices de ponderación óptimas para un LQR. Se utiliza una función de 'costo' definida como la suma de las desviaciones de las mediciones de los valores buscados [41]. El regulador cuadrático lineal (LQR) utiliza la configuración del controlador que minimiza las desviaciones no deseadas. Las pruebas se realizan en una columna de destilación binaria que posee características multivariantes y no lineales. La conclusión del artículo es que la aplicación de este método es eficaz.

V. Conclusiones

1. La industria petroquímica es de las principales en el mundo. Y por ende la fiabilidad de los controladores sobre todo para tareas de control y temperatura tiene que ser alta. Los controladores tienen que ser rápidos y tener pocas oscilaciones ante perturbaciones.
2. Las técnicas clásicas son las más utilizadas en la industria debido a su fiabilidad. Pero, las técnicas robustas y adaptativas están ganando terreno. Y a futuro con mejores computadores y algoritmos de sintonización pueden llegar a ser las técnicas más usadas.
3. Los modelos multivariable y en espacio de estados describen de mejor manera las dinámicas reales de estos sistemas. Y aunque se pueden linealizar, los controladores que permiten trabajar con las dinámicas no lineales pueden ser más confiables.
4. La aplicación de técnicas cada vez más rápidas y fiables también significan beneficios económicos importantes. Ya que, se optimizan los productos y se disminuye el gasto energético, esto es importante en una industria como la petroquímica porque se aumentan los dividendos y eso es beneficioso para los países productores.
5. A medida que las técnicas adaptativas aprendan más rápido y requieran menos recursos para aprender van a ganar más importancia en este mercado.
6. Los controladores predictivos son estrategias prometedoras, pero no siempre son la mejor opción debido que el proceso de predicción puede tomar un tiempo importante.
7. Desacoplar las entradas y salidas de un sistema hace que la respuesta de este sea más adecuada y eficaz.

8. Diseñar adecuadamente el modelo de la planta permite que en los casos donde se debe minimizar la función de coste se tenga un mejor resultado.
9. Dependiendo del controlador y la eficiencia de este se puede obtener mayor calidad en los productos y mayor eficiencia en la producción.

REFERENCES

- [1] Ministerio de Comercio de Colombia. (2021). CONTEXTO MACROECONÓMICO DE COLOMBIA. Extraído de: <https://www.mincit.gov.co/getattachment/1c8db89b-efed-46ec-b2a1-56513399bd09/Colombia.aspx>
- [2] Galindo, J.P. (2020). Técnicas de control avanzado para aumentar la eficiencia energética de una columna de destilación extractiva. Extraído de: https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/77734/80.101.520.2_020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] Hernández, J. A. M., & Hernández, L. A. M. (2015). Dinámica y control de procesos químicos. Universidad del Tolima.
- [4] Raimondi, A. (2010). Análisis, modelación y control adaptativo predictivo de una columna de destilación atmosférica de crudo.
- [5] Sharma, N., & Singh, K. (2010). Control of reactive distillation column: a review. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*, 8(1).
- [6] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2006). PID control. *IEEE Control Systems Magazine*, 1066.
- [7] Åström, K. J., & Hägglund, T. (2001). The future of PID control. *Control engineering practice*, 9(11), 1163-1175.
- [8] Minorsky, N. (1922). Directional stability of automatically steered bodies. *Journal of the American Society for Naval Engineers*, 34(2), 280-309.
- [9] Garcia, C. E., Prett, D. M., & Morari, M. (1989). Model predictive control: Theory and practice— A survey. *Automatica*, 25(3), 335-348.
- [10] Cutler, C. R. (1983). Dynamic matrix control: an optimal multivariable control algorithm with constraints (Doctoral dissertation, University of Houston).
- [11] Lu, Z. J., MacArthur, J. W., & Horn, B. C. (1994). U.S. Patent No. 5,351,184. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [12] Qin, S. J., & Badgwell, T. A. (1997, June). An overview of industrial model predictive control technology. In *AIChE symposium series* (Vol. 93, No. 316, pp. 232-256). New York, NY: American Institute of Chemical Engineers, 1971-c2002.
- [13] Clarke, D. W., Mohtadi, C., & Tuffs, P. S. (1987). Generalized predictive control—Part I. The basic algorithm. *Automatica*, 23(2), 137-148.
- [14] Clarke, D. W., Mohtadi, C., & Tuffs, P. S. (1987). Generalized predictive control—Part II extensions and interpretations. *Automatica*, 23(2), 149-160.
- [15] Clarke, D. W., & Mohtadi, C. (1989).

- Properties of generalized predictive control. *Automatica*, 25(6), 859-875.
- [16] Rodríguez, J. (s. f.). obtención de las funciones de transferencia de las temperaturas del tope y fondo de una de destilación binaria. Dialnet. recuperado 25 de octubre de 2020, de <https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5282244.pdf>
- [17] Franco Ocampo, d. f. (2008). emulación de una columna de destilación binaria continua. univalle.
- [18] Destilación. (s. f.). Universidad de Barcelona. Recuperado 25 de octubre de 2022, de https://www.ub.edu/oblq/oblq%20castellano/destilacio_tipus.html#simple
- [19] Navas, S. J. (s. f.). Control de Columnas de destilación.
- [20] "Control todo o nada (ON-OFF)". Control e Instrumentación Industrial. <http://ceiisa.blogspot.com/2015/01/control-todo-o-nada-on-off.html> (accedido el 15 de diciembre de 2022).
- [21] "Control de temperatura | Reguladores y controladores". OMEGA. <https://es.omega.com/prodinfo/controladores-de-temperatura.html#:~:text=Un%20controlador%20N/OFF%20es,atraves%20el%20punto%20de%20ajuste>. (accedido el 15 de diciembre de 2022).
- [22] Controlador PID - Control Automático - Picuino. (s. f.). Recuperado 26 de octubre de 2022, de <https://www.picuino.com/es/control-pid.html>
- [23] Control Predictivo Basado en Modelo – DMC. (2020, 6 agosto). Control Automático Educación. <https://controlautomaticoeducacion.com/control-predictivo/dmc/>
- [24] Kniese, D.-W., Haber, R., Volk, U., Hahn, R. (2003). Optimized Multivariable Predictive Control of an Industrial Distillation Column Considering Hard and Soft Constraints. *IFAC Proceedings Volumes* 36, 239–244. [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)35790-7](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)35790-7).
- [25] Galan, R. & Jimenes, A. (1999). Control Inteligente. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*. <https://www.redalyc.org/pdf/925/92541004.pdf>
- [26] F. Cubillos, L. Henrique y J. L. Salazar. "CONTROL AVANZADO DE PROCESOS". Laboratorio de Sistemas e Informática de Procesos - Labcontrol | Universidad de Santiagode Chile |. <https://www.labcontrol.cl/sites/labcontrol/files/controlavanzado.pdf> (accedido el 15 de diciembre de 2022).
- [27] P. Campoy. "Control Multivariable". DISAM – AUTOMÁTICA (DISAM). http://www.disam.upm.es/campoy/Pascual_Campoy/teaching_files/9_control_sistemas_multivariables.ppt.pdf (accedido el 15 de diciembre de 2022).
- [28] Ospina, K. (2010). MODELO Y CONTROL DE UNA COLUMNA DE DESTILACION CONTINUA. Extraído de: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19151/u405109.pdf?sequence=1>
- [29] (Linear-Quadratic-Gaussian (LQG) Design - MATLAB & Simulink, s. f.)
- [30] colaboradores de Wikipedia. (2022b, abril 20). Control lineal cuadrático gaussiano. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Control_lineal_cuadr%C3%A1tico_gaussiano
- [31] J. A. Souto Alemán, DESARROLLO DEL SISTEMA DE CONTROL Y PUESTA EN FUNCIONAMIENTO DE UNA COLUMNA DE DESTILACIÓN. Sevilla, 2016. Accedido el 16 de diciembre de 2022. [En línea]. Disponible: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/90827/fichero/Desarrollo+del+sistema+de+control+y+puesta+en+funcionamiento+de+una+columna+de+destilaci%C3%B3n,+por+Jose+Antonio+Souto+Aleman.pdf>
- [32] Fitatá, M. M. (2018). Diseño e implementación de un control de nivel en el fondo de la primera columna de la torre de destilación continua binaria en el Centro de Investigación en procesos de ingeniería (C. I.P.I.). Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12010/4793>.
- [33] Rivas, F., Astorga, C. M., Longoria, R., Valencia, G., & López, F. R. Desarrollo de una estación de monitoreo y control en línea. Aplicación a una columna de destilación.
- [34] Manabu Kano, Morimasa Ogawa, The State of the Art in Advanced Chemical Process Control in Japan, *IFAC Proceedings Volumes, Volume 42, Issue 11, 2009, Pages 10-25, ISSN 1474-6670, ISBN 9783902661548*, (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474667015302482>)
- [35] Profesores Particulares en Madrid | Academia de Clases Particulares. <https://www.cartagena99.com/recursos/alumnos/apuntes/Tema%2011%20CPQ.pdf> (accedido el 4 de enero de 2023). https://csd.newcastle.edu.au/SpanishPages/clase_slides_download/C08.pdf
- [36] R. Pasos. "Driagrama P&ID de una columna de destilación, Explicado." Academia.edu - Share research. https://www.academia.edu/42705201/Driagrama_P_and_ID_de_una_columna_de_destilaci%C3%B3n_Explicado (accedido el 4 de enero de 2023).
- [37] "Control predictivo basado en modelo (MPC) de una columna de destilación binaria para la producción de etanol". Principal. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/1657?show=full> (accedido el 4 de enero de 2023).
- [38] S. Cristea y R. F. Almudena. "CONTROL

- PREDICTIVO NO LINEAL APLICADO A COLUMNAS DE DESTILACIÓN". EcosimPro | PROOSIS Modelling and Simulation Software. https://www.ecosimpro.com/wp-content/uploads/2015/02/C02_06_es.pdf (accedido el 4 de enero de 2023).
- [39] A. Villalobos Guillén, Simulación y control avanzado de una columna de destilación. Sevilla, 2020. [En línea]. Disponible: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/71933/fichero/TFM-1933+VILLALOBOS+GUILLEN,+ADRIAN.pdf>
- [40] K. Ospina Figueredo. "MODELO Y CONTROL DE UNA COLUMNA DE DESTILACION CONT ´ INUA". Repositorio Institucional Séneca. https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/19151/u40510_9.pdf?sequence=1 (accedido el 4 de enero de 2023).
- [41] "Distillation column control using genetic algorithms for LQR design | Proceedings of the International Conference on Computer Systems and Technologies and Workshop for PhD Students in Computing". ACM Other conferences. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/1731740.1731789> (accedido el 4 de enero de 2023).
- [42] Colaboradores de los proyectos Wikimedia. (2009, 11 de abril). Columna de fraccionamiento - Wikipedia, la enciclopedia libre. Wikipedia, la enciclopedia libre. https://es.wikipedia.org/wiki/Columna_de_fraccionamiento