



**MONITOREO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE CONDENSADO
RECUPERADO DE PROCESO EN UNA UNIDAD DE AGUA CRUDA EN UNA
REFINERÍA**

HERNANDO ANDRES RODRIGUEZ RUGELES

**UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

Cartagena de Indias, Colombia
2023

MONITOREO DE PARÁMETROS DE CALIDAD DE CONDENSADO
RECUPERADO DE PROCESO EN UNA UNIDAD DE AGUA CRUDA EN UNA
REFINERÍA

HERNANDO ANDRES RODRIGUEZ RUGELES

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

Línea de Investigación:
Procesos Industriales

DANIEL ENRIQUE YABRUDY MERCADO, MSC
DIRECTOR (A)

ASESOR (A)

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA, ELECTRÓNICA Y BIOMÉDICA
INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

Cartagena de Indias, Colombia
2023

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Cartagena de Indias, 14 de abril de 2023

A DIOS

A MIS PADRES

A MI ESPOSA

A MI HIJA

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, doy gracias a Dios por darme la salud necesaria y a mi familia, a todas las personas que comparto directa e indirectamente laboralmente y amigos para permitirme en seguir afrontando cada día diversas situaciones positivas y de mejora, compartiendo experiencias y conocimientos para el enriquecimiento profesional y como persona.

Agradezco a mi esposa y mi hija por ser mi motor de seguir cada día con amor y logrando los proyectos en familia. Agradezco a mi madre y padre los valores necesarios para afrontar las circunstancias de la vida.

El desarrollo de la tesis se basó en la experiencia del día a día laboralmente y de la oportunidad en optimización y sostenibilidad de un proceso, durante la investigación concluí que todo problema se tiene una solución y lo que se necesita son las herramientas y análisis para llegar a su objetivo.

Agradezco a mis tutores que me guiaron para la culminación y profesionalización, al Ing. Daniel Enrique Yabrudy por su motivación y carisma en la tutoría e investigación.

Agradezco a la universidad Antoni Nariño por todos las herramientas digitales y laboratorios para el desarrollo del programa de ingeniería electromecánica.

RESUMEN

El presente proyecto enmarca el diseño de un sistema que permite monitorear los parámetros de calidad de condensado recuperado del proceso en una unidad de agua cruda de una refinería de crudo a fin de optimizar sus procesos, teniendo en cuenta que los elevados precios del petróleo representan un déficit financiero para la misma, donde la implementación del sistema propuesto, implica un ahorro económico significativo y un aumento en la eficiencia en el uso del agua a través de la recuperación del vapor utilizado en dichos procesos.

La metodología implementada se dividió en cuatro etapas; la primera etapa consta de la búsqueda bibliográfica y otra documentación técnica y de proceso pertinentes, para identificar los parámetros de calidad críticos para el condensado recuperado en la unidad de agua cruda de la refinería. La segunda etapa consiste en seleccionar los elementos mecánicos y electrónicos adecuados para medir los parámetros de calidad identificados, y que sirvan para construcción de prototipo de sistema de monitoreo en línea. En la tercera etapa se pretende implementar un prototipo del sistema de monitoreo de agua. La cuarta y última etapa, es la realización de pruebas de validación del prototipo desarrollado, con agua cruda de la unidad de la refinería para evaluar su eficacia en detección de desviaciones de los parámetros de calidad del condensado recuperado.

Palabras claves: agua cruda, condensado, crudo, petróleo, refinería, monitoreo en línea.

ABSTRACT

This project entails the design of a system that enables the monitoring of the quality parameters of recovered condensate from the process in the raw water unit of a crude oil refinery to optimize its processes. Considering that the high prices of crude oil represent a financial deficit for the refinery, the implementation of the proposed system implies significant economic savings and an increase in water use efficiency through the recovery of the vapor used in these processes.

The methodology implemented was divided into four stages. The first stage consists of searching relevant bibliographic and technical documentation to identify the critical quality parameters for the condensate recovered in the raw water unit of the refinery. The second stage involves selecting suitable mechanical and electronic components to measure the identified quality parameters and to build an online monitoring system prototype. The third stage aims to implement a prototype of the water monitoring system. The fourth and final stage is the validation testing of the developed prototype using raw water from the refinery unit to evaluate its effectiveness in detecting deviations in the quality parameters of the recovered condensate.

Keywords: raw water, condensate, raw, oil, refinery, online monitoring.

CONTENIDO

1.	Capítulo 1 – Introducción, planteamiento del problema, justificación, objetivos y alcance	12
1.1	Introducción	12
1.2	Planteamiento del problema	12
1.3	Justificación.....	13
1.4	Objetivos	13
1.4.1	Objetivo general	13
1.4.1	Objetivos específicos	13
1.5	Alcance.....	13
2.	Capítulo 2 – Marco referencial	15
2.1	Marco teórico	15
2.1.1	Refinería	15
2.1.2	Refinería de Cartagena	16
2.1.3	Agua Cruda.....	21
2.1.4	Vapor de Agua.....	25
2.1.5	Sistemas de Vapor	29
2.1.6	Conductividad	33
2.2	Estado del arte	33
3.	Capítulo 3 – Metodología.....	42
3.1	Documentación técnica	42
3.1.1	Sistemas de monitoreo de calidad de fluidos	42
3.1.2	Los microcontroladores PIC16CX.....	42
3.2	Ingeniería de control.....	46
3.2.1	Declaración de variables a implementar:	47
3.2.2	Comando para visualización de datos y declaración de Pines del microcontrolador:	47
3.2.3	Lazo cíclico del sistema programado, declaración de nivel de voltaje máximo del sensor y cantidad de datos:	47
3.2.4	Condicional para establecer contaminación del condensado y activación de válvulas de desvío:	47
3.2.5	Condicional para establecer fluido en calidad y estado normal de válvulas de desvío de contaminación:	48
3.3	Análisis de costos	49
3.4	Implementación del sistema	49
3.4.1	Aspectos requeridos para el diseño.....	49
3.4.2	Instrumentación implementada.....	51
4.	Capítulo 4 – Resultados y discusión.....	56

4.1	Estructura de soporte del prototipo.....	56
4.1.1	Estructura base del Prototipo	56
4.1.2	Soporte de tuberías	56
4.1.3	Válvulas de salida y recirculación	57
4.1.4	Válvulas de salida de condensado contaminado	57
4.1.5	Sistema de monitoreo de condensado de refineras.....	58
4.1.6	Resultados del monitoreo de condensado:	58
4.1.7	Medición de conductividad.....	62
5.	Conclusiones y Recomendaciones.....	66
5.1	Conclusiones	66
5.2	Recomendaciones	66
6.	Referencias.....	67
7.	Anexos	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 2-1 Unidades de Operación por Departamento Refinería de Cartagena.....	19
Tabla 2-2. Características agua cruda y productos de la unidad.....	22
Tabla 2-3. Áreas de vapor y energía de la refinería de Barrancabermeja.....	37
Tabla 3-1 Mandos de la biblioteca Arduino.....	43
Tabla 3-2. Especificaciones Técnicas de Arduino MEGA 2560.....	45
Tabla 3-3. Presupuesto para el desarrollo de la propuesta.....	49
Tabla 4-1. Medición del sensor VS Tiempo.....	58
Tabla 4-2 Presencia de contaminación VS Flujo.....	60

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1. Proceso de Refino.....	15
Figura 2-2. Procesos de Refinación.....	16
Figura 2-3. La Refinería de Cartagena.....	16
Figura 2-4. Ubicación Refinería de Cartagena.....	17
Figura 2-5. Unidades de Operación Refinería de Cartagena.....	17
Figura 2-6. U-131: Unidad de tratamiento de agua Cruda.....	22
Figura 2-7. Balance de material en U-131.....	25
Figura 2-8. Balance de material en U-131.....	25
Figura 2-9. Sistema de Vapor por Presión Positiva.....	26
Figura 2-10. Sistema de Vapor al Vacío.....	26
Figura 2-11. Generador de turbinas	27
Figura 2-12. Sistema de Vapor como Fluido Motriz	27
Figura 2-13. Quemador asistido por Vapor.....	28
Figura 2-14. Proceso de limpieza en la tubería de una caldera.....	28
Figura 2-15. Sistema de Inyección de Vapor.....	29
Figura 2-16. Esquema del sistema de vapor típico.....	29
Figura 2-17 Partes de una Caldera Típica.....	30
Figura 2-18. Proceso de Recuperación de Condensado.....	31
Figura 2-19 Esquema de Recuperación de Condensado.....	32
Figura 2-20. Conductímetro.....	33
Figura 2-21. Esquema convencional de una central termoeléctrica.....	34
Figura 3-1. Configuración interna de un PIC Microcontrolador.....	43
Figura 3-2. Tarjeta Arduino Mega 2560	45
Figura 3-3 Conexionado del Sistema de control.....	48
Figura 3-4. Sistema de Detección de Contaminación en Condensado.....	50
Figura 3-5. Sensor de Turbidez.....	51
Figura 3-6. Electro-válvula 12 V.....	52
Figura 3-7. Electro-válvula 12 V Normalmente Abierta.....	53
Figura 3-8. Mini Bomba Acuario R385 12v.....	54

Figura 3-9 Curvas teóricas de una bomba de doble diafragma.....	54
Figura 3-10. Microcontrolador Arduino MEGA.....	55
Figura 4-1. Estructura mecánica.....	56
Figura 4-2. Base del sistema.....	56
Figura 4-3. Válvula solenoide N.A.....	57
Figura 4-4. Válvula solenoide N.C.....	57
Figura 4-5 Sistema de monitoreo de condensado.....	58
Figura 4-6. Prueba funcional	59
Figura 4-7 Medición del sensor VS Tiempo.....	59
Figura 4-8. Representación Contaminación VS Flujo de Agua.....	60
Figura 4-9. Salida del sensor VS Contaminación.....	61
Figura 4-10. Desvío de contaminación del agua.....	61
Figura 4-11. Medidor de conductividad portal con sensor sin producto.....	62
Figura 4-12. Muestras para medición.....	62
Figura 4-13. Medición de conductividad en agua desmineralizada.....	62
Figura 4-14. Medición de conductividad en condensado recuperado del proceso.....	63
Figura 4-15. Medición de conductividad en agua de enfriamiento TAE, contaminante N°1.....	64
Figura 4-16. Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2.....	64
Figura 4-17. Medición de conductividad, mezcla de 400ml de la muestra de condensado recuperado con 200ml de muestra de agua de enfriamiento contaminante N°165.....	65
Figura 4-18. Medición de conductividad, mezcla de 400ml de la muestra de condensado recuperado con 100ml de muestra de Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2.....	65

GLOSARIO

Aguas Agrias: aguas generadas dentro de los procesos de una refinería.

Alquilación: procedimiento químico donde se combinan oleofinas con parafinas para obtener como resultado isoparafinas.

API: American Petroleum Institute

Butano: gas licuado obtenido a través de destilación de petróleo.

Coquización: proceso mediante el cual se produce la carbonización del carbón llegando a temperaturas de hasta 1300 ° C, originando un carbono de alta calidad, duro y resistente al desgaste.

Condensado: líquido que pasa de estado gaseoso a estado líquido.

Coque: combustible sólido obtenido a través de la destilación de carbón.

Cracking: entendido como agrietamiento, se define como un proceso químico donde quiebran moléculas de los compuestos, a fin de obtener otros muchos más simples.

Desaireador: es un dispositivo utilizado que busca eliminar el oxígeno y los gases disueltos en el agua de alimentación de los generadores de vapor.

Grados API: se define como el grado de densidad que determina cuán pesado o cuán liviano es el petróleo.

Hidrocarburo: compuesto orgánico compuesto principalmente por átomos de carbono e hidrogeno.

Hidrocrqueo: proceso mediante el cual se rompen las cadenas largas de hidrocarburo para obtener moléculas más cortas, a través de la adición de hidrogeno.

Isomerización: es el proceso químico en el que las moléculas se transforman en otra que tiene los mismos átomos, aun cuando se encuentran en la misma forma.

Kerosene: líquido inflamable que se obtiene a través de la destilación de petróleo.

Naftas: compuesto líquido inflamable derivado de la refinación del petróleo.

Petróleo: liquido constituido por una mezcla de hidrocarburos de forma natural que se encuentra en formaciones geológicas.

Refinación: es conocido como aquel proceso donde se purifica una sustancia química muchas veces hasta obtener una sustancia limpia.

1. Capítulo 1 – Introducción, planteamiento del problema, justificación, objetivos y alcance

1.1 Introducción

Debido a los costos del crudo de petróleo, las refinerías alrededor del mundo se han centrado en realizar ahorros en muchos de sus procesos industriales¹. Una de las estrategias para el ahorro consiste en la recuperación del vapor utilizado en los procesos, pues aumenta la eficiencia en el uso del agua y genera ahorros económicos². El vapor es recuperado en forma de condensado en la unidad de tratamiento de agua cruda. En esta unidad de agua generalmente se recuperan las corrientes de condensado de proceso provenientes de unidades tales como: unidad de Coquización Retardada, unidad de Alquilación, Unidad de Gas Saturado e Isomerización de Butanos, bloque de azufre y condensado de turbinas de vapor, entre otras. Estas corrientes de condensado recuperado, llegan a representar, en volumen, cerca del 45 % de la demanda de agua de alimentación a calderas de la Refinería en estudio, lo cual constituye un ahorro importante del recurso hídrico.

No obstante, aunque esta estrategia representa un gran ahorro, el condensado de las industrias petroquímicas arrastra consigo altos contenidos de contaminación². Así que, para lograr los beneficios económicos y ambientales buscados a través de la estrategia, es necesario implementar un sistema de monitoreo que permita identificar las desviaciones en los parámetros del condensado recuperado oportunamente³.

1.2 Planteamiento del problema

En diciembre de 2019, se detectó contaminación en tanques de almacenamiento de condensado recuperado, tanque de agua de alimentación a desaireadores, calderas recuperadoras de calor, y demás generadores de vapor en las diferentes unidades de proceso. Dicha contaminación consistió en la desviación de parámetros de conductividad y dureza del agua, por un periodo de tiempo de 5 días.

Para el proceso de recuperación de condensado en estudio, el monitoreo de la calidad de los parámetros es nulo, por lo que no es posible detectar la calidad del condensado recuperado sino hasta que este llega a las unidades de proceso, donde se realizan las respectivas mediciones para garantizar la integridad de los procesos.

¹ G. McKay y C. R. Holland, «Energy savings from steam losses on an oil refinery», *Eng. Costs Prod. Econ.*, vol. 5, n.º 3-4, pp. 193-203, feb. 1981, doi: 10.1016/0167-188X(81)90004-5.

² A. A. Filimonova, N. D. Chichirova, A. A. Chichirov, y A. G. Filimonov, «Technologies for monitoring and cleaning the return manufacturing condensate in the energy-technological complex of heat power plant – petrochemical facility», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1565, n.º 1, p. 012027, jun. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1565/1/012027.

³ E. J. Viola, «Comprehensive Savings in Condensate Return Systems», may 1999, Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/91114>

1.3 Justificación

El agua cruda trae consigo calcio, el cual genera incrustaciones indeseadas. Estas incrustaciones disminuyen la eficiencia energética de las calderas y equipos térmicos que funcionan con vapor, pues se incrusta en las paredes, generando aislamiento térmico y disminuyendo el proceso de transferencia de calor⁴. Lo anterior implica un aumento en los costos de mantenimiento, disminución en la producción y aumento del lucro cesante.

Durante el evento presentado en diciembre de 2019, fue necesario drenar todos los tanques que recibieron el condensado fuera de especificaciones hasta que este retornara a los parámetros de calidad aceptados. Lo anterior afectó significativamente la continuidad en el proceso de producción de vapor de la refinería, impactando en el proceso productivo de todas las unidades que utilizan vapor.

En general, no tener un sistema de monitoreo del condensado recuperado impacta significativamente en el margen de ganancia y continuidad del proceso productivo de la refinería.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Proponer un sistema de monitoreo en línea de la conductividad del condensado recuperado de proceso que sirva para la unidad de agua cruda de una refinería, para mitigar el efecto negativo del condensado fuera de parámetros sobre las unidades de proceso que lo utilizan, aprovechando los recursos existentes que puedan ser modificados/reutilizados para tal fin.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Identificar los parámetros de calidad críticos para el condensado recuperado en la unidad de agua cruda de la refinería, mediante investigación bibliográfica y de documentos técnicos.
- Seleccionar elementos mecánicos y electrónicos adecuados para medir los parámetros de calidad identificados, que sirvan para construcción de prototipo de sistema de monitoreo en línea.
- Implementar prototipo para el monitoreo de los parámetros de calidad del condensado recuperado en la unidad de agua cruda.
- Realizar pruebas de validación del prototipo desarrollado, con agua cruda de la unidad de la refinería para evaluar su eficacia en detección de desviaciones de los parámetros de calidad del condensado recuperado.

⁴ C. Gálvez-Vidaurre, «Uso del desincrustante magnético (DM) para mejorar la calidad del agua en la industria», *Ing. Ind.*, vol. 0, n.º 028, p. 139, mar. 2015, doi: 10.26439/ing.ind2010.n028.244.

1.5 Alcance

Este proyecto está limitado a una propuesta de monitoreo en línea de la conductividad del condensado recuperado de las unidades de proceso que es transportado hacia la unidad de tratamiento de agua cruda, con el fin de monitorear la variable y detectar a tiempo una posible contaminación en la corriente e impacte la calidad de los tanques de almacenamiento de la Refinería.

El presupuesto aquí presentado corresponde solo a los costos del sistema propuesto, los costos de implementación pueden variar según las condiciones en que se encuentre la planta y las modificaciones que se requieran.

En caso de que sea posible para el autor de este proyecto, por factores de económicos y de tiempo, se implementara la propuesta.

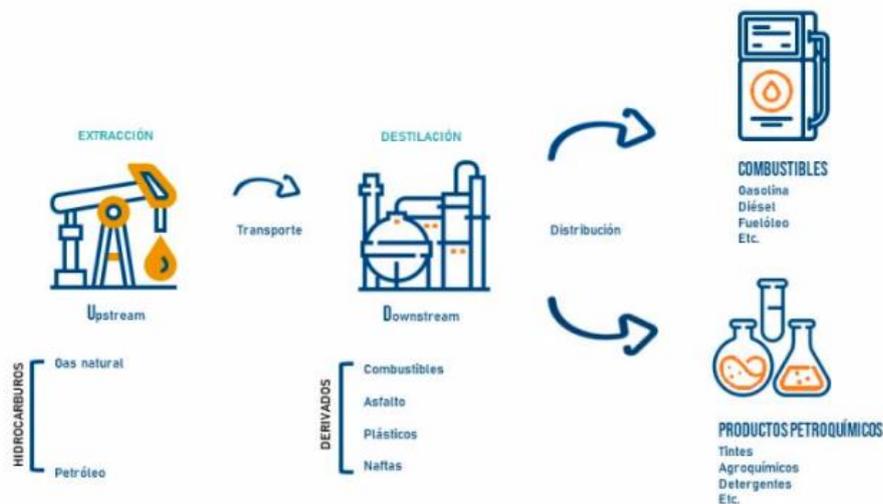
2. Capítulo 2 – Marco referencial

2.1 Marco teórico

2.1.1 Refinería

Las refinerías son instalaciones industriales en la que se transforma el petróleo crudo extraído de los yacimientos, en productos que sí son efectivamente útiles para las personas, debido que en ese estado no es apto para ningún tipo de uso. A ese conjunto de operaciones que se realizan para conseguir productos como gasolina, kerosene, aceites, grasas, gases, gasóleo y otros, se les denomina “procesos de refino”⁵ (ver fig 2-1-1).

Figura 2-1. Proceso de Refino



Fuente: (AOP , s.f.)

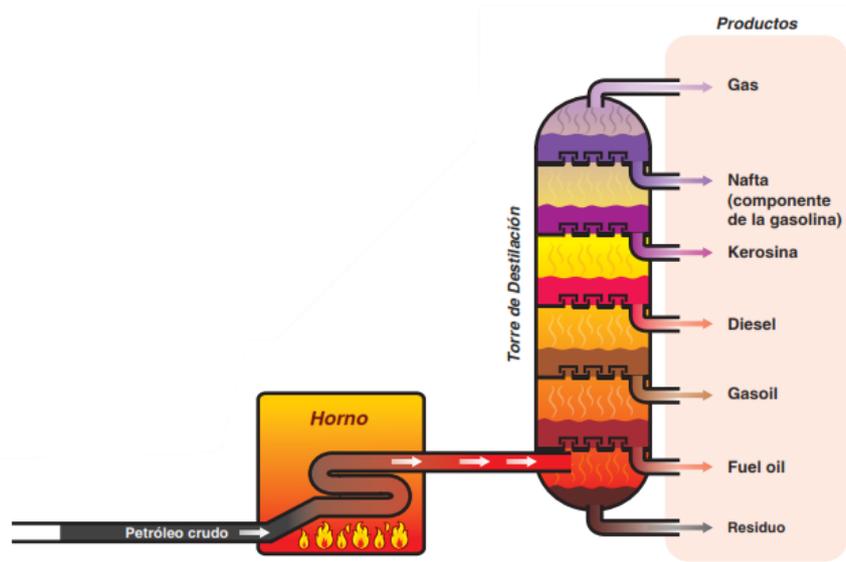
Estas están constituidas por un horno, a donde llega el petróleo crudo desde los pozos; una torre de destilación, en la cual se distribuyen los vapores del crudo procesado; unas bandejas, las cuales funcionan a temperaturas diferentes y sirven para separar y procesar los componentes del petróleo; y unos ductos, que sirven para recoger las distintas corrientes separadas en las bandejas⁶.

El primer paso dentro del proceso se da en un horno, aquí se calienta y se convierte en vapor, posteriormente sigue a las torres de destilación haciendo que el vapor generado suba hasta las bandejas. Una vez ahí, estos vapores van perdiendo calor, es decir, van enfriándose para depositarse en las bandejas que le corresponden. El petróleo que queda en la base, es el que no llega a evaporarse (ver fig. 2-2).

⁵ « El Refino del Petróleo ». AOP ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE OPERADORES DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS. Obtenido desde <https://www.aop.es/blog/2020/02/25/como-es-una-refineria-de-petroleo/>

⁶ «La Refinería». PDVSA Gas. Obtenido desde <http://www.pdvs.com/images/pdf/armables/Refineria.pdf>

Figura 2-2. Procesos de Refinación



Fuente (PDVSA)

2.1.2 Refinería de Cartagena

Las Refinerías son grandes complejos industriales, vitales para la industria. Esta es indispensable no solo para la seguridad energética del país, sino para la economía y para la producción limpia de combustibles (ver Figura 2-1-1).

Figura 2-3. La Refinería de Cartagena



Fuente: FOTO CORTESIA REFICAR

Refina los combustibles más limpios que se hayan producido en Colombia, diésel de menos de 10 partes por millón de azufre (ppm) y gasolinas de menos de 50 ppm; además, aporta al PIB y desarrollo de Colombia.

También es símbolo y activo estratégico de la nación para la autonomía energética. En 2021 produjo el 19% del diésel que se consumió en el país y el 21% de las gasolinas. De las ventas totales, 70% correspondieron al mercado colombiano y 30% al mercado internacional durante el 2021⁷.

En la actualidad, cuenta con 34 unidades, una extensión cercana a las 140 hectáreas, indispensables para la producción nacional e internacional, que transforma los crudos en productos eficientes y limpios.

2.1.2.1 Ubicación

Está ubicada estratégicamente en la costa Norte de Colombia (ver figura 2-4), mas específicamente en la zona industrial de Mamonal, ubicación que facilita su acceso a los mercados principales en el mundo.

Figura 2-4. Ubicación Refinería de Cartagena



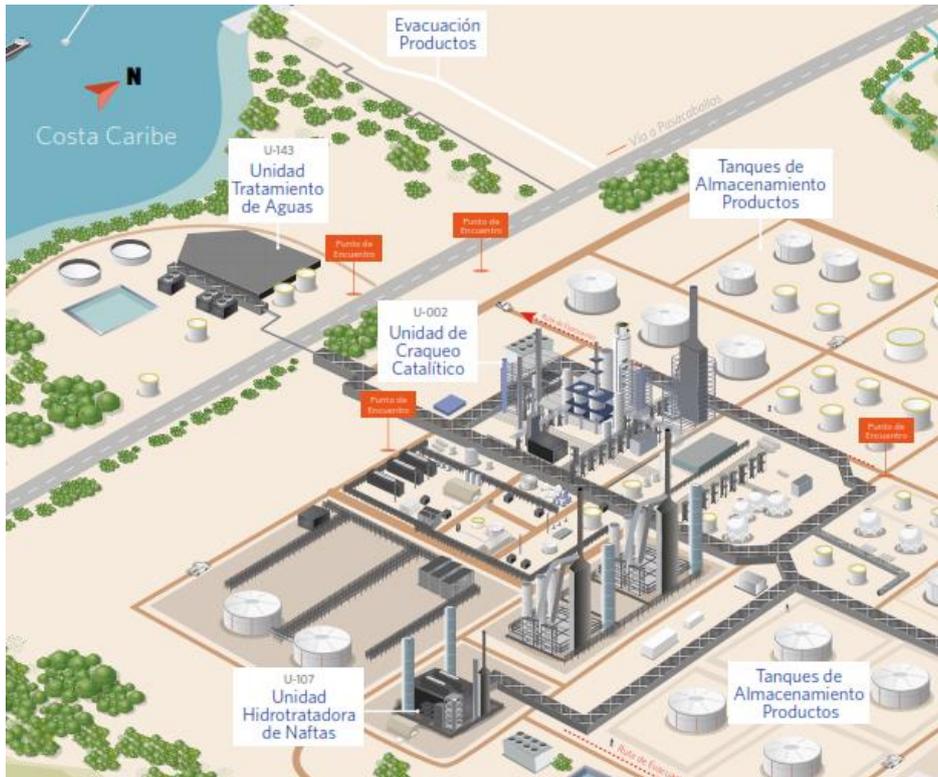
Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

2.1.2.2 Unidades de Operación

La Refinería de Cartagena cuenta en la actualidad con 34 unidades (ver fig 2-5), las cuales se encuentran divididas en 9 Departamentos (ver Tabla 2-1):

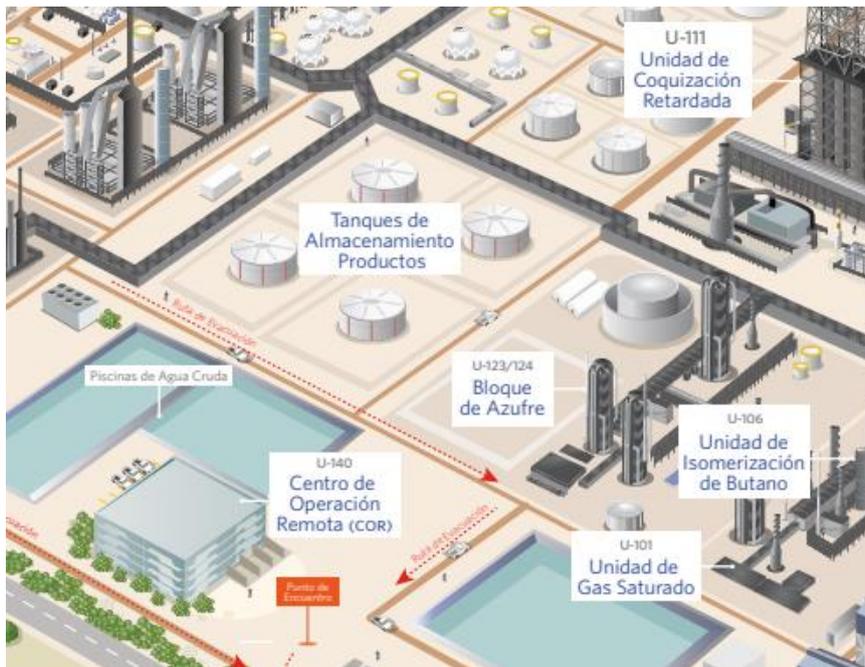
Figura 2-5. Unidades de Operación Refinería de Cartagena

⁷ «Quiénes Somos | Reficar». Obtenido desde <https://www.reficar.com.co/en/quienes-somos>



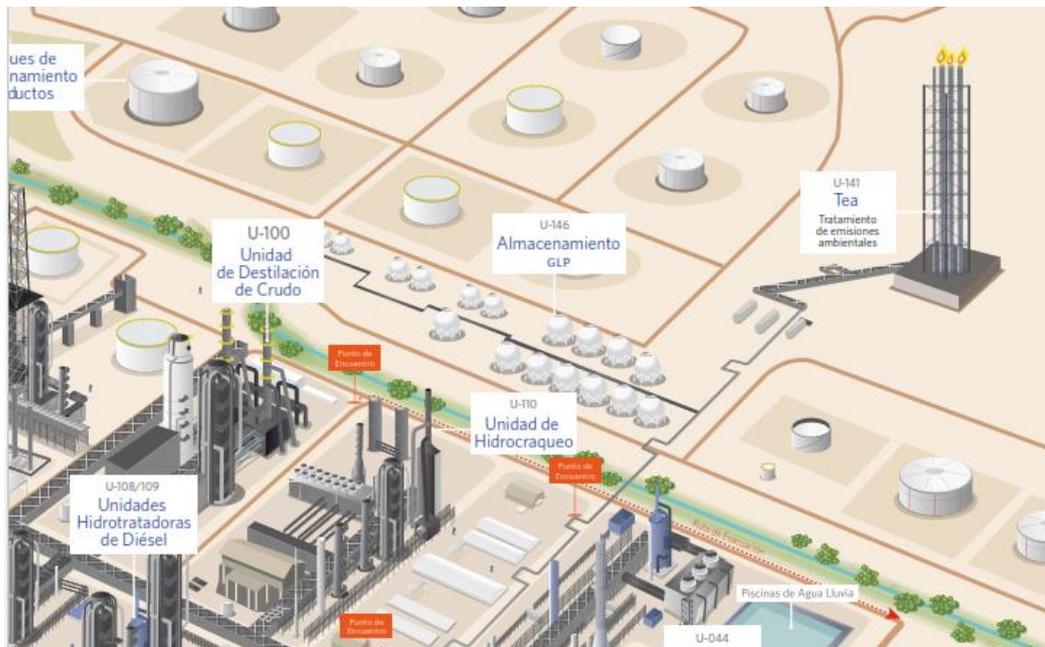
Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Figura 2-5. Unidades de Operación Refinería de Cartagena (continuación)



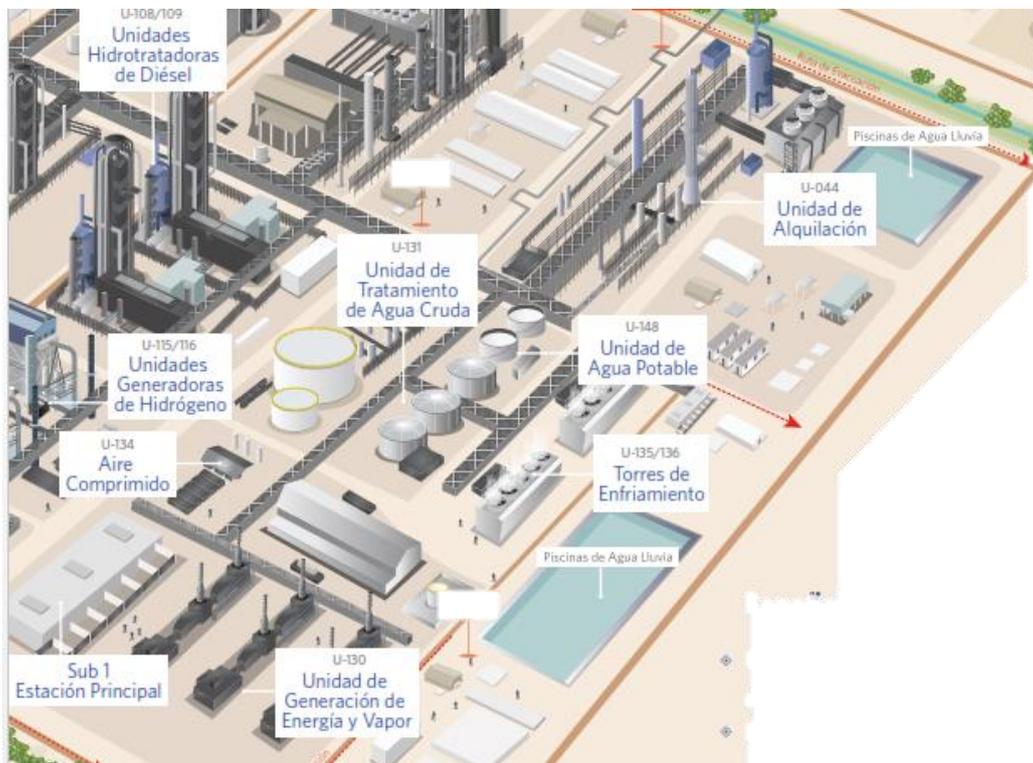
Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Figura 2-5. Unidades de Operación Refinería de Cartagena (continuación)



Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Figura 2-5. Unidades de Operación Refinería de Cartagena (continuación)



Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Tabla 2-1 Unidades de Operación por Departamento Refinería de Cartagena

Unidades de Operación por Departamento Refinería de Cartagena S.A.S
--

Departamento	Unidades
Destilación de Crudos, PDC	<ul style="list-style-type: none"> • U-001 Unidad de Destilación combinada • U-100: Unidad de Destilación de Combinada, Atmosférico y Vacío
Refinación de fondos, PFO	<ul style="list-style-type: none"> • U-111: Unidad de Coquización retardada • U-113: Unidad de manejo de sólido de Coque
Craqueo Catalítico, PCQ	<ul style="list-style-type: none"> • U-002: Unidad de Craqueo Catalítico • U-037: Unidad de Tratamiento de Aguas Agrias • U-107: Unidad de Hidrotratamiento de naftas de cracking • U-300: Unidad de Tratamiento de Sodas gastadas
Hidro craqueo, PHA	<ul style="list-style-type: none"> • U-101: Unidad de Gas Saturado • U-106: Unidad de isomerización de butano • U-111 Unidad de Hidro craqueo • U-104: Unidad de Recuperación de Hidrógeno PSA • U-133: Unidad de Gas Combustible
Alquilación, PDA	<ul style="list-style-type: none"> • U-044: Unidad de Alquilación HF y TAE
Hidrotratamiento de diésel, PHD	<ul style="list-style-type: none"> • U-108: Unidad de Hidrotratamiento de Diésel I y U-109: Unidad de Hidrotratamiento de Diésel II • U-115: Generación de hidrógeno • U-116: Generación de hidrógeno 2 • U-120: Bloque de Azufre • U-121: Bloque de Azufre • U-123: Bloque de Azufre • U-124: Bloque de Azufre

	<ul style="list-style-type: none"> • U-127: Bloque de Azufre
Servicios Industriales, PNI	<ul style="list-style-type: none"> • U-031: Unidad de servicios Industriales antigua • U-128: Sistema de suministro de soda fresca • U-130: Unidad de generación de energía y producción de vapor • U-131: Unidad de tratamiento de agua Cruda • U-134: sistema de generación de aire • U-135 Torre de agua de Enfriamiento III (TAE III) • U-136 Torre de agua de Enfriamiento IV (TAE IV) • U-148 Sistema de agua potable industrial
Materias Primas y Productos, PMU	<ul style="list-style-type: none"> • U-141: Sistema de TEA de hidrocarburo • U-146: Unidad de Materias primas y productos
Gestión Integral del Riesgo PRS	<ul style="list-style-type: none"> • U-143: Unidad de tratamiento de aguas residuales • U-147: Unidad de contraincendios

Fuente: Elaboración propia

2.1.3 Agua Cruda

2.1.3.1 Definición

El agua cruda se define como aquella que no ha recibido ningún tipo de tratamiento, aquella que se encuentra en ríos, lagos, manantiales, embalses, entre otros. Por tanto, no se encuentra dentro de la red de distribución, ya que puede contener materia orgánica, materia inorgánica y microorganismos, así como sabor, olor, color y turbidez⁸.

⁸ Zarza, L. «¿Qué es el agua cruda?». iagua. Obtenido desde <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-agua-cruda#:~:text=Por%20definici%C3%B3n%2C%20el%20agua%20cruda,%2C%20manantiales%2C%20surgencias%E2%80%A6>.

En la Refinería de Cartagena la unidad de tratamiento de agua cruda es la U-131 (Figura 2-6. U-131). El objetivo de esta unidad es complementar aquellas necesidades de la Refinería de Cartagena en lo que respecta a agua filtrada, desmineralizada, potable y enfriamiento que va a las torres enfriadoras.

Figura 2-6. U-131: Unidad de tratamiento de agua Cruda



Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Dentro de la unidad, encontramos las siguientes especificaciones:

- Agua cruda: es suministrada por el acueducto de la ciudad de Cartagena, la empresa ACUECAR o Aguas de Cartagena.
- Insumos: para el tratamiento del agua cruda, la unidad utiliza, coagulantes, floculantes, ácido sulfúrico, cloro gaseoso, inhibidor de corrosión, soda caustica, entre otros.
- Condensado: en su mayoría, el condensado que recibe esta unidad es el proveniente de la unidad de generación de vapor y energía, y de los procesos de generación eléctrica de la U-130.

Tabla 2-2. Características agua cruda y productos de la unidad

U-131				
Especificaciones del Agua Cruda U-131				
Parámetros	Unidades	Mínimo	Promedio	Máximo
pH		6,5	6,9	7,5

U-131				
Especificaciones del Agua Cruda U-131				
Parámetros	Unidades	Mínimo	Promedio	Máximo
Color	CU	18	38	82
Turbiedad	NTU	1	3,2	10
Cloruros	mg/L	28	41	67
Sílice	mg/L as SiO ₂	6	14	20
Sulfatos	mg/L	2	10	24
Dureza Total	mg/L (CaCO ₃)	69	88	104
Dureza al Calcio	mg/L (CaCO ₃)	54	62	70
Alcalinidad Total	mg/L (CaCO ₃)	52	73	95
Materia Orgánica	mg/L	4,1	6,3	30
Amoníaco	mg/L	0,01	0,12	0,56
Nitritos	mg/L	0,02	0,03	0,05
Nitratos	mg/L	1,1	2,6	5,3
Fluoruro	mg/L	0,23	0,23	0,23
Hierro	mg/L	0,02	0,09	0,31
Manganeso	mg/L	0,03	0,06	0,12
Sodio	mg/L	19	23	23
Potasio	mg/L	2,7	3	3,2
Sólidos Suspendidos	mg/L	25	25	25
Sólidos Totales (Disueltos y Suspendidos)	mg/L	114	215	385
Conductividad	mg/L	244	306	553
Coliformes Totales	mg/L	23	358	1700
E-Coli	mg/L	1	14	99

Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Tabla 2-2. Características agua cruda y productos de la unidad (continuación)

U-131		
Productos de la Unidad de Tratamientos de Aguas y Torres de Aguas de Enfriamiento U-131		
Producto	Parámetro	
Agua Filtrada	Flujo (GPM)	240
	Temperatura (F)	86
	Presión (psig)	68
Agua Potable	Flujo (GPM)	55
	Temperatura (F)	86
	Presión (psig)	55
Agua de Alimentación a Desaireadores	Flujo (GPM)	2396
	Temperatura (F)	176
	Presión (psig)	110
Agua de Enfriamiento (MakeUp)	Flujo (GPM)	202
	Temperatura (F)	86
	Presión (psig)	25
Soda Caustica al 20%	Flujo (GPM)	2
	Temperatura (F)	110
	Presión (psig)	60

Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Tabla 2-2. Características agua cruda y productos de la unidad (continuación)

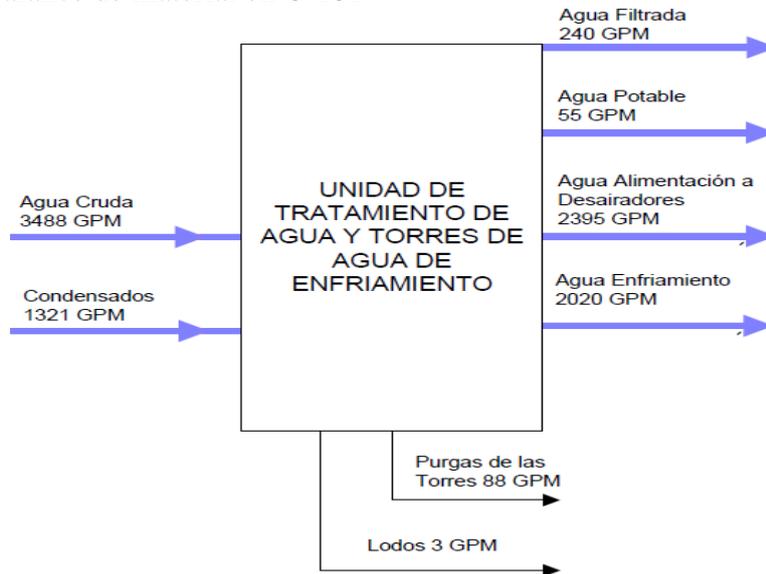
U-131	
Parámetro	Consumos/ Volúmenes
Agua Industrial hacia el proceso	3500 Gpm
Agua Potable (Consumo Humano)	65 Gpm

Agua de Contraincendios (Volumen de contingencias)	5.000.000 de Galones
---	----------------------

Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

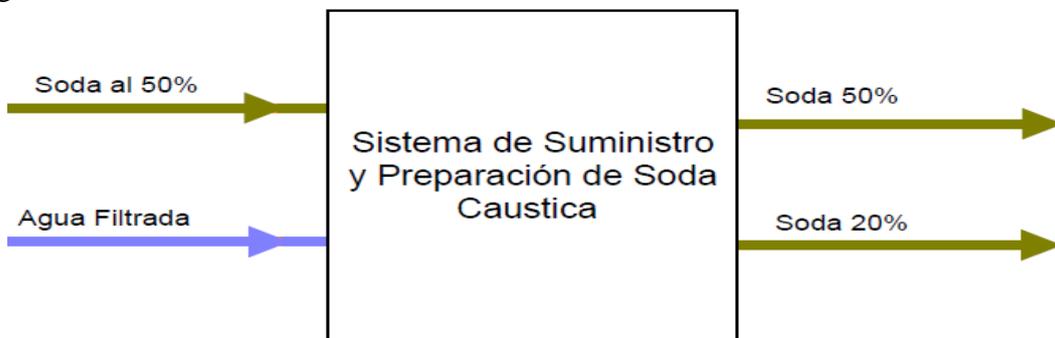
Las Figura 2-7 y Figura 2-8, son la representación del balance del material en lo que respecta a la unidad de tratamiento de aguas residuales y enfriamiento.

Figura 2-7. Balance de material en U-131



Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

Figura 2-8. Balance de material en U-131



Fuente: (Refinería de Cartagena S.A.S, 2018)

2.1.4 Vapor de Agua

El vapor de agua es el proceso mediante el cual, el agua cambia de estado, cambia de estado líquido a estado gaseoso. En términos técnicos, el hidrogeno se libera de las uniones formadas de las moléculas de agua (H₂O).

Este fenómeno sucede una vez se calientan las moléculas de agua (H_2O), ocasionando una separación constante entre ellas, donde el gas es formado por aquellas que quedaron libres.

En la industria se manejan dos tipos de vapor, vapor seco y vapor húmedo. El vapor seco es donde las moléculas se mantienen en estado gaseoso; por su parte, para el vapor húmedo las moléculas han cedido su energía, y ocurre lo que conocemos como calor latente, produciendo a su vez pequeñas gotas de agua, lo que conocemos como condensado.

2.1.4.1 Aplicaciones del Vapor de Agua

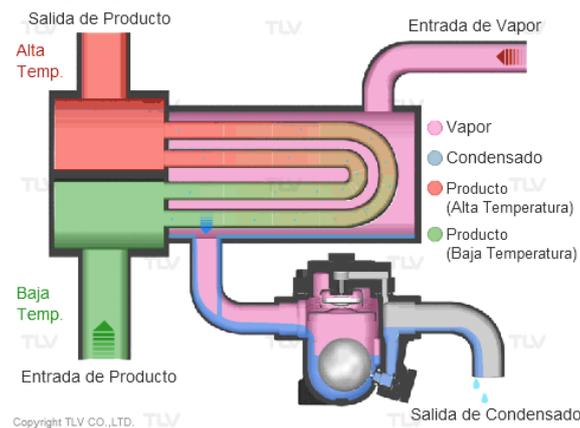
El vapor es un recurso ampliamente utilizado en las industrias. Entre sus aplicaciones más comunes encontramos los procesos calentados en plantas y fabricas a base de este, al igual que plantas eléctricas y turbinas impulsadas por vapor.

Aunque reconociendo que su uso se extiende mucho más de los antes mencionados, dentro de las aplicaciones más utilizadas en las industrias, encontramos:

2.1.4.1.1 Vapor por Calentamiento o Presión Positiva

Por lo general es producido y distribuido en una presión positiva, es decir, suministrado a equipos con presiones mayores que 0 psig. El vapor obtenido de este proceso se utiliza como fuente de calentamiento para equipos que utilizan la transferencia de calor, generalmente este tipo de sistema se utiliza en las refinerías (fig 2-9).

Figura 2-9. Sistema de Vapor por Presión Positiva

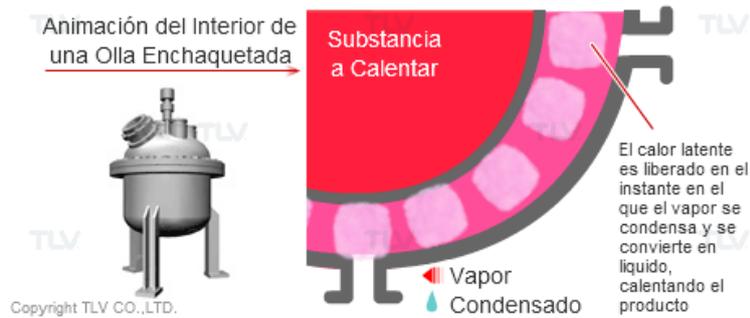


Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.2 Vapor al Vacío

El vapor al vacío se utiliza casi que de la misma forma que el vapor por presión positiva. Aquí la temperatura cambia a medida que se ajusta la presión, esto ocasiona mayor regulación de temperatura que en otros casos, como en los que se usa el agua caliente, por ejemplo. Este sistema funciona como se ilustra en la figura 2-10.

Figura 2-10. Sistema de Vapor al Vacío



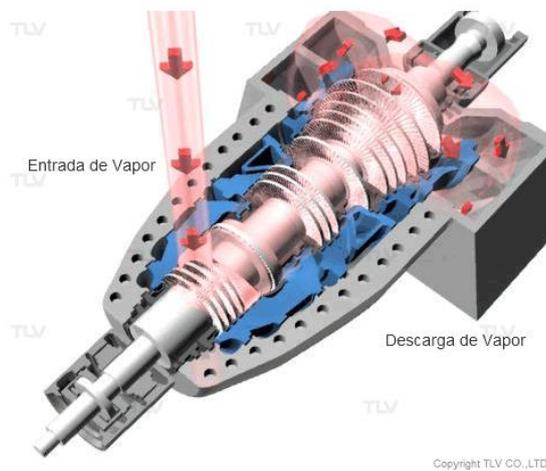
Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.3 Vapor para Impulso-Movimiento

En este caso, el vapor es utilizado como fuerza motriz, por ejemplo, en turbinas de vapor en centrales termoeléctricas, esenciales para la generación de electricidad.

Además de las turbinas de vapor, también es aplicado a bombas para torres de enfriamiento, compresores de gas, etc., es decir, es ideal para trabajar compresores, idealmente los movidos por bombas y turbinas. El sistema funciona como lo ilustra la figura 2-11.

Figura 2-11. Generador de turbinas

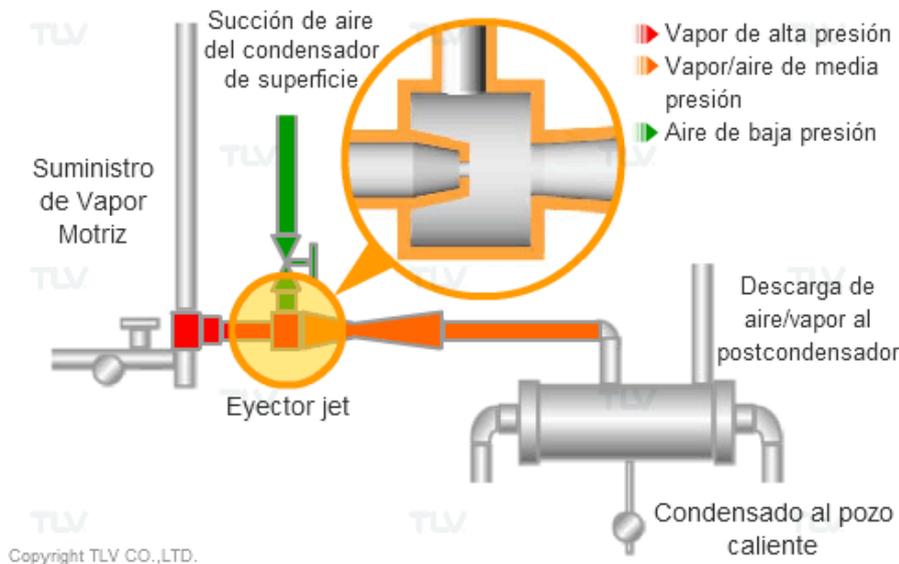


Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.4 Vapor como Fluido Motriz

Este tipo de vapor es comúnmente utilizado para mover algún líquido o gas dentro de una tubería. Este sistema funciona creando vacíos en equipos de procesos mediante los eyectores de vapor y así mantener dentro de las turbinas una presión de vacío ideal.

Figura 2-12. Sistema de Vapor como Fluido Motriz

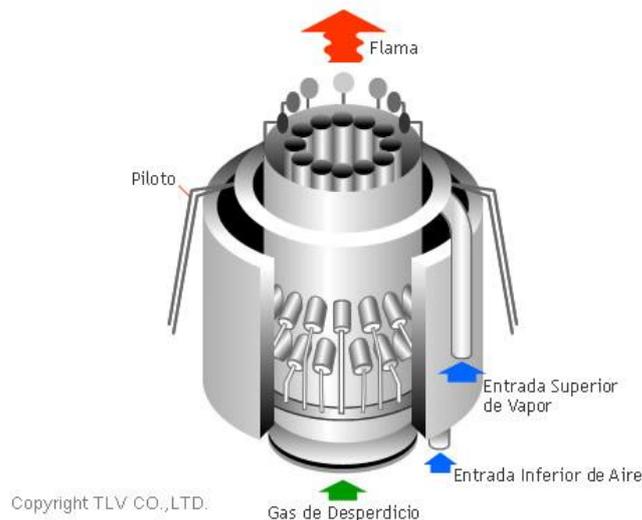


Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.5 Vapor para Atomización

Este tipo de uso que se le da al vapor es principalmente para separar fluidos de forma mecánica, normalmente se usa en generadores de vapor que implementan combustibles como el petróleo y así romper la viscosidad presente en el fluido, abriendo paso a una combustión mucho más eficiente.

Figura 2-13. Quemador asistido por Vapor

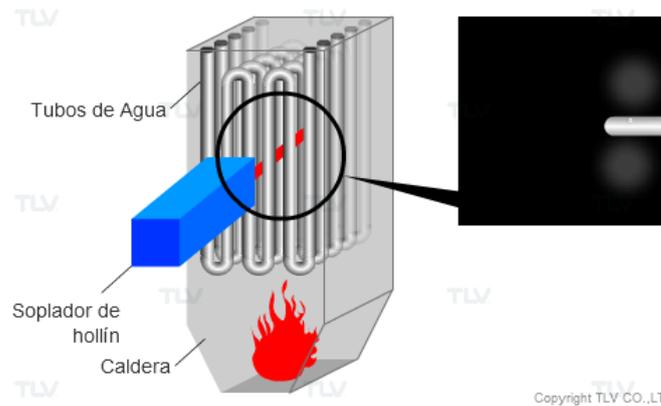


Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.6 Vapor para Limpieza

Es comúnmente utilizado en la industria petrolera y del carbón para limpiar las calderas de almacenamiento, permitiendo la remoción de depósitos indeseables, brindando la posibilidad de optimizar los procesos de las calderas, haciéndolas más confiables, capaces y eficientes.

Figura 2-14. Proceso de limpieza en la tubería de una caldera

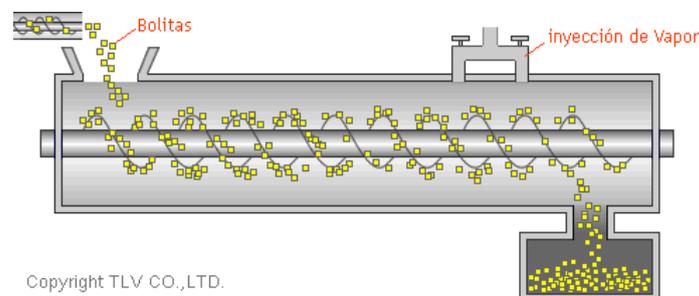


Fuente: TLV. LTD

2.1.4.1.7 Vapor para Hidratación

Es comúnmente utilizado en la industria alimenticia y textil. Consiste en suministrar vapor al proceso de generación, bien sea de alientos, papel, textiles, etc., generando hidratar el producto y evitando las rupturas microscópicas.

Figura 2-15. Sistema de Inyección de Vapor



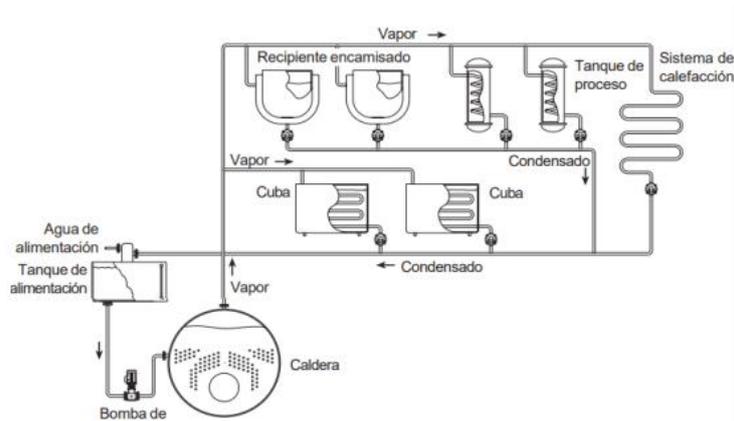
Fuente: TLV. LTD

2.1.5 Sistemas de Vapor

Los Sistemas de Vapor Típicos (Fig 2-16) están compuestos por los procesos de generación, distribución y recuperación generalmente. Es decir, el vapor se genera en unas calderas, para luego ser distribuido a través de una red de tuberías, donde durante ese proceso se originan los condensados, los cuales deben ser evacuados, idealmente recuperados para su aprovechamiento, gracias sus múltiples usos⁹.

Figura 2-16. Esquema del sistema de vapor típico

⁹ Gómez, L. (2022). «Optimización red de condensados de vapor. Migasa Aceites S.L.U». Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. Departamento. de Ingeniería Química y Ambiental. Pág. 26



Fuente: Gómez, L (2022)

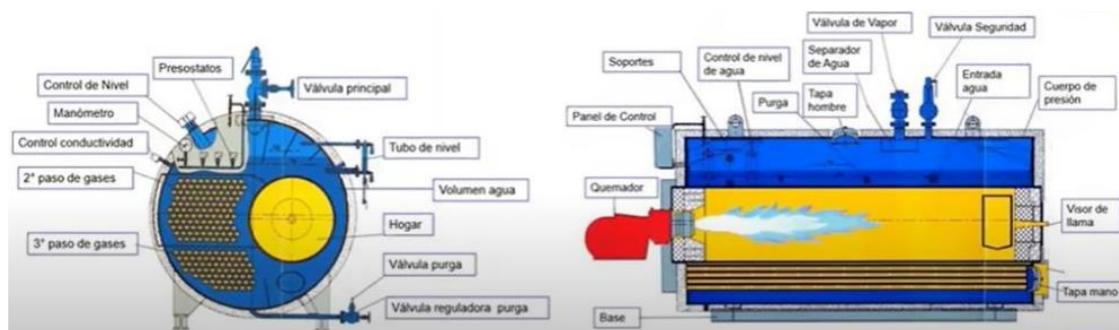
2.1.5.1 Generación de Vapor

El vapor es generado principalmente en calderas, es el equipo más común para la generación de este. El proceso consiste en calentar agua en estado líquido, generando consigo una combustión que produce el vapor.

Para que este proceso sea eficaz, se debe controlar el agua de alimentación, y algunos de sus componentes esenciales como la temperatura, dureza, pH, hierro, sílice, entre otros.

Las calderas, normalmente, se componen de las siguientes partes: el cuerpo, el hogar, los tubos, el quemador, la chimenea, el sistema de purga y los accesorios de regulación, control y seguridad (fig 2-17).

Figura 2-17 Partes de una Caldera Típica



Fuente: Gómez, L (2022)

Si bien cierto, existe una gran diversidad de calderas para producir vapor, habitualmente se dividen según la presión de trabajo, que varían desde bajas presiones, más o menos entre 0 y 4,5kg/cm², hasta supercríticas, con presiones mayores a 40 kg/cm². También pueden variar Según la circulación del agua en el interior de esta, que puede ser circulación natural, asistida o forzada.

Por último, se encuentran las calderas según la disposición de los fluidos, que puede ser de tipo pirotubulares, humotubulares, o acuotubulares.

2.1.5.2 Distribución de Vapor

El proceso de conectar el sistema de generación de vapor con los consumidores, es lo que se conoce como proceso de distribución de vapor. Esta distribución se da necesariamente a través de una red de tuberías que se interconectan entre sí, entre todos los elementos que hacen parte del sistema¹⁰.

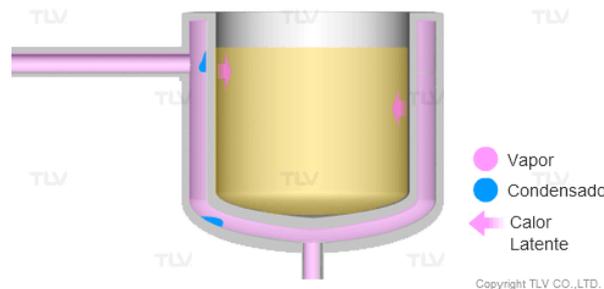
Los elementos que hacen parte del sistema de distribución de vapor ¹¹:

- Redes de tuberías principales
- Accesorios como juntas, abrazaderas, soportes, etc
- Recubrimientos térmicos
- Válvulas reductoras de presión
- Válvulas de seguridad
- Filtros de vapor
- Trampas de vapor

2.1.5.3 Recuperación de Condensados

El condensado es el producto del intercambio de energía que tiene el vapor con el medio que lo contiene, en este caso, la caldera. En términos menos coloquiales, significa que el vapor producto de la energía cedida se convierte en agua en forma de gotas a la misma temperatura (fig 2-18).

Figura 2-18. Proceso de Recuperación de Condensado



Fuente: TLV. LTD

Este condensado que se genera en el proceso de generación de vapor, es un recurso altamente aprovechable, por tal razón es muy común que las industrias le apuesten a implementar sistemas de recuperación de los mismos, ya que puede representar un ahorro significativo en la energía de producción de vapor, lo que se traduce en optimización de

¹⁰ Gómez, L. (2022). «Optimización red de condensados de vapor. Migasa Aceites S.L.U». Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. Pag 27

¹¹ Martínez, M. (2009). *Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente*. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España). Facultad de Ingeniería.

los procesos de la empresa, ahorro de costos de implementación y en la disminución del impacto ambiental al producir un ahorro en agua.

A pesar de que sea muy tentador el hecho de poder recuperar para reutilizar el condensado y todo lo que conlleva, no siempre es viable retornar el condensado a los depósitos de agua, ya que dependiendo de la actividad que desarrolle la empresa, puede existir un riesgo considerable de contaminación en el fluido, incurriendo en graves afectaciones al sistema a donde se retorne¹¹.

Por esta razón, es un proceso que debe planificarse con cuidado y al cual se le debe monitorear su calidad para darle el manejo ideal. Este proceso es de suma importancia en las industrias, debido que, además de generar un ahorro considerable de agua y energía, reduce la huella de carbono (sobre todo en refinerías), y por supuesto, mejora las condiciones de trabajo.

2.1.5.3.1 Retorno de Condensado

En los sistemas de vapor siempre existirá el condensado, gracias al intercambio de energía que se da en el proceso de generación de vapor, pero para dar paso al proceso del retorno es indispensable la instalación de trampas de vapor, con la finalidad de eliminar el condensado, los gases no condensados y el aire, evitando que el condensado se acumule en el fondo de las líneas de distribución, porque esa acumulación puede generar choques térmicos y corrosión en el sistema de vapor.

Una vez recuperado el condensado, se dispone a ser retornado a tanques de almacenamiento para su posterior aprovechamiento.

Figura 2-19 Esquema de Recuperación de Condensado



Fuente: TLV. LTD

Para el caso de Recuperación de Condensado por Retorno Elevado, la trampa de vapor drena hacia una tubería elevada. La trampa de vapor debe tener la capacidad de manejar la carga del condensado, teniendo en cuenta que la presión de la entrada pueda trabajar a contrapresión y con la caída de tensión en la tubería.

Para este tipo de sistemas, por lo general, implementa una bomba para vencer la contrapresión, porque la presión en la entrada de la trampa suele ser muy baja. Algunos de los casos que pueden requerir el uso de una bomba para vencer presión diferencial negativa debido a alta TDH/contrapresión son:

- Contrapresión por columna de agua cuando el tanque colector esta elevado

- Fricción en la tubería producto del flujo del condensado
- Tanque colector o Tanque Flash Presurizados
- Condensado retornado directamente desde la caldera

2.1.6 Conductividad

La conductividad está definida como aquella capacidad que tienen las sustancias de transportar electricidad, o bien sean, electrones. En cuanto sustancias como el agua, la conductividad está condicionada por la concentración de sales disueltas, y, por supuesto, por la temperatura. Esto quiere decir que, la conductividad es directamente proporcional a la cantidad de sales que contenga la muestra de agua, por lo que, a mayor concentración de sales, mayor conductividad, y viceversa, con un rango entre 0 para aguas ultra puras y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens por centímetro) para aguas con alto grado de contaminantes.

Gracias a la tecnología existen equipos que permiten medir de manera fácil, rápida y segura, tanto la conductividad como la temperatura en una muestra de agua. Uno de los equipos que puede usarse para realizar esta medición es el conductímetro (Figura 2-20).

Figura 2-20. Conductímetro



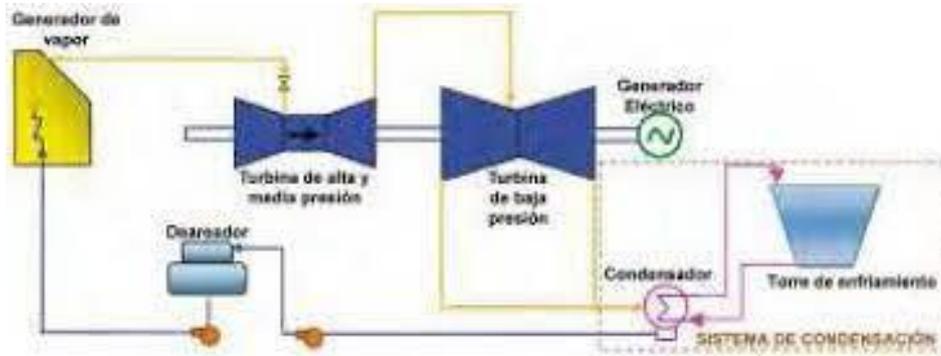
Fuente: Elaboración propia

2.2 Estado del arte

En la investigación realizada por (Rodríguez, H; Sánchez, R, 2009) con base en estudios previos (Figuroa, 2004; Rodríguez, 2006) realizados por personal de la Gerencia de Procesos Térmicos (GPT) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (HE), donde se determinó que las mayores ineficiencias de las unidades termoeléctricas en México ocurrían, frecuentemente, en el sistema de condensación. Las ineficiencias encontradas provocaban pérdidas de potencia entre 1-15 MW. A raíz de estas, se hizo necesario la implementación de sistemas informáticos que permitieran monitorear y diagnosticar en

tiempo real el estado del sistema de recuperación de condensado, permitiendo la detección de posibles anomalías y poder realizar las acciones correctivas oportunamente. Generalmente el esquema convencional de una central termoeléctrica está constituido por varios elementos¹², como observamos en la figura 2-21.

Figura 2-21. Esquema convencional de una central termoeléctrica



Fuente: (Rodriguez & Sanchez, 2009)

Los investigadores se plantearon la siguiente metodología:

- Evaluación del sistema de condensación: la evaluación previa del sistema de condensación a través de indicadores que fueron calculados por el sistema, arrojó que ese sistema solo aplicaban para condensadores de tipo de una sola presión de coraza, que usaban como medio de enfriamiento agua de mar o agua dulce.
- Calculo de indicadores de desempeño y diagnóstico de equipos del sistema: los indicadores tanto de comportamiento para el diseño y los actuales estaban dados por:
 - Presión absoluta del condensador (Pa)
 - Carga térmica en el condensador (Q)
 - Coefficiente de transferencia de calor (U)
 - Caída de presión entre cajas de agua (APc)
 - Grado de subenfriamiento (GSUB)
 - Diferencia terminal de temperatura (DTT)
 - Incremento de temperatura de agua de circulación (At)
 - Diferencia de temperaturas media logarítmicas (AJT)
 - Factor de Limpieza (FL)
- Evaluación de equipos mediante comparación de indicadores actuales y esperados: se utilizaron los resultados obtenidos a través del cálculo de los

¹² Rodríguez, H; Sánchez, R (2009). «Monitoreo y Diagnostico de sistemas de Condensación en Centrales Termoeléctricas». Boletín IIE. Artículos Técnicos. Pág. 162-167.

indicadores, comparando los resultados del sistema actual vs el propuesto, los cuales fueron procesados a través de herramientas computacionales con la herramienta comercial Induce-It, la cual permitía emitir un diagnóstico y recomendaciones pertinentes para la toma de acciones (Espinoza, 2006).

- Evaluación e implementación del sistema de monitoreo en línea y diagnóstico: este sistema fue diseñado de manera modular, integrado con los módulos para monitorear en tiempo real, validar y comparar los datos, cálculo de indicadores de comportamiento para el condensador, torre de enfriamiento, bombas de agua de circulación y diagnóstico del funcionamiento de equipos.

Dicho sistema cuenta con un Sistema de Adquisición de Datos (SAD) que se interconecta con dos equipos concentradores de señales (CC-1 y CC-2), ubicados en la torre de enfriamiento y en el condensador, y con el sistema de control distribuido (SICODI) de la unidad monitoreada, para adquirir las señales requeridas para el cálculo de indicadores. Estas señales se muestran en las pantallas de monitoreo en tiempo real del sistema de enfriamiento en general y de cada equipo en particular

De la metodología implementada se obtuvo como resultado que el sistema de diagnóstico y monitoreo en línea, permite la toma de decisiones acertadas respecto a la operación y debido mantenimiento del sistema en el momento oportuno, permitiéndose contribuir en el ahorro económico de la producción y reduciendo las emisiones de gases altamente contaminantes.

En la investigación realizada por (Umaña, C.; 2011) dentro del marco de su proyecto de grado “*OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VAPOR DEL PLANTEL DE REFINERÍA, RECOPE S.A., MOIN-LIMÓN*”, teniendo en cuenta que esta refinería es la encargada importar, refinar y posteriormente distribuir el petróleo crudo y todos sus derivados en toda Costa Rica.

Debido que el condensado generalmente tiene una temperatura que se acerca a los 100°C, además de aditivos químicos que son producto de su tratamiento, es posible que su carácter oxidante recorra el medio con el que entra en contacto, generando graves afectaciones en el sistema. A pesar de ello, el no aprovechamiento del condensado generado, existe un alto consumo de agua, específicamente una cifra aproximada a los 17.000 m³ mensuales, extraído del Río Bartolo, además de la gran cantidad de combustible que requiere la producción de vapor, que según datos reales, emplean un aproximado de 1000m³ de bunker mensual, como consecuente, ocurre una sobreexplotación de los recursos naturales, grandes emisiones contaminantes que afectan al calentamiento global¹³.

¹³ Umaña, C. (2011). «*OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VAPOR DEL PLANTEL DE REFINERÍA, RECOPE S.A., MOIN-LIMÓN*». Instituto Tecnológico de Costa Rica. Pág. 2-23

Sumado al grave impacto ambiental, también se encuentra sobre la mesa el aspecto económico, gracias al uso inadecuado del vapor, las fugas que se presentan y la ineficiente transferencia del calor, generando pérdidas millonarias. Por el contrario, la reutilización del condensado al sistema de generación de vapor trae consigo grandes beneficios; el primero, la gran disminución del combustible necesario en calderas para generar el vapor, ya que el aumento de la temperatura de entrada del agua al generador hace que el calor necesario para la evaporación disminuya; y en segundo lugar, el ahorro significativo en cuanto a los aditivos químicos que se requieren para el tratamiento de agua para calderas.

Razón por la cual, la investigadora planteó la siguiente metodología:

- Instauración de indicadores de consumo energético para el área de generación de vapor: para desarrollar el uso de los indicadores, fue necesario realizar un estudio bibliográfico exhaustivo para determinar cuáles serían los indicadores más representativos para la empresa y el proceso que requería, para evaluarlos en el periodo comprendido entre el mes de julio de 2010 y el mes agosto de 2011, con el fin de determinar falencias y proponer mejoras en el sistema.
- Preparación del manual de inspección y mantenimiento para el área de vapor: mediante revisión bibliográfica se evaluaron programas de mantenimiento en sistemas de vapor, inspeccionando el más adecuado para implementar en la empresa según sus necesidades, para posteriormente identificar las variables que inspeccionarían el sistema. Por último, se desarrolló un instructivo de inspección, este contiene los períodos y frecuencias de cada inspección; los responsables de realizar ese proceso; la lista de chequeo de los rubros a inspeccionar, y, por supuesto, la información técnica de los equipos.
- Realización de inventarios de las trampas de vapor en área producto: este proceso de llevo a cabo a través de visitas de campo, revisión exhaustiva de la cantidad, ubicación, características y el estado aparente de las trampas, específicamente las ubicadas en las áreas de asfaltos, bunker, crudo pesado e IFO 380.
- Reestructuración del sistema de condensado: este proceso se llevó a cabo luego del análisis de los puntos anteriores, delimitando el área de trabajo y los equipos, estimando la porción condensados que recibirá ese sistema, la selección del área recomendable para la instalación de los nuevos equipos en caso de ser necesario, y, por último, la elaboración de una memoria de cálculo para el sistema propuesto, los diagramas del sistema, y el informe de las necesidades de los equipos para la instalación de dicho sistema.
- Evaluación financiera con las mejoras propuestas: se procedió a estimar el ahorro generado por la instalación del sistema, tomando en cuenta el abastecimiento y tratamiento de aguas, el ahorro de combustible para el funcionamiento de las calderas, la inversión para la instalación del sistema,

considerando los costos de compra e instalación de equipos, costos de operación y mantenimiento del sistema propuesto.

La investigación realizada por (Mejía, A; Sánchez, J; 2005) “ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADO EN LAS ÁREAS DE VAPOR Y ENERGÍA DEL COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA” tenía como objetivo principal reconocer las deficiencias que causaban un aumento considerable en el consumo de agua requerida para operar las calderas, y, posteriormente plantear alternativas de mejora para el sistema de recuperación del condensado, a través de la inspección de las trampas de vapor, líneas principales e internas, equipos, de las condiciones de operación; y mediante análisis de los parámetros fisicoquímicos del condensado, agua de calderas y agua de alimentación a calderas¹⁴.

Para el desarrollo de esta investigación, los autores se plantearon la siguiente metodología:

- Evaluación del estado inicial del sistema de recuperación del condensado: esta evaluación se llevó a cabo mediante inspección de las calderas, líneas, equipos e instrumentos donde se genera condensado.

Los servicios industriales de esta refinería se dividen en dos áreas, como se describe en la tabla 2-3.

Tabla 2-3. Áreas de vapor y energía de la refinería de Barrancabermeja

Área	Unidad de proceso	Calderas	Turbo generadores	Sistemas de calentamiento de combustóleo	Líneas principales de retorno
Sur	U-900	4	3	_____	2
	U-950	5	2	_____	
Norte	U-2400	5	3	_____	1
	U-14	_____	_____	1	

Fuente: (Mejía, A; Sánchez, J; 2005)

- Diagnóstico de las trampas de vapor: gracias a la evaluación del estado inicial del sistema, se lograron identificar los tipos de trampas de vapor de cada una de las áreas, permitiendo estimar las descargas típicas de condensado a los sistemas de retorno. La determinación del porcentaje de falla en cada una de las trampas fue necesario el uso del medidor ultrasónico ULTRA PROBE UE SYSTEMS, que gracias a su funcionamiento, permite percibir el funcionamiento del mecanismo interno de cada trampa.
- La evaluación de las condiciones de operación, se revisó a través de la caída de presión a través de las líneas principales (>100 gpm); usando instrumentos de medición de presión y así poder para determinar si el flujo de condensado retorna

¹⁴ Mejía, A; Sánchez, J. (2005). «ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADO EN LAS ÁREAS DE VAPOR Y ENERGÍA DEL COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA». Universidad Industrial de Santander. Pág. 2-60

a desaireadores y tanques de almacenamiento de agua de alimentación o se regresa a las calderas. También fue posible la revisión de la temperatura de las líneas de condensado en las plantas de proceso que presentan altas temperaturas, a través de un monitoreo constante, que permitirá identificar fallas en el sistema (Mejía, A; Sánchez, J; 2005).

- La evaluación de las condiciones de diseño de las líneas de retorno, se llevó a cabo mediante la revisión de los diámetros actuales, basándose en los flujos y el perfil de presiones a lo largo de las líneas principales. Tanto la presión inicial, como la final de cada línea principal, fueron consideradas de acuerdo a cada perfil observado en la descarga de cada uno de los sistemas hacia las líneas principales, y en la entrada a cada uno de los sistemas de retorno y almacenamiento de condensado (manifold, tanques, desaireadores) (Mejía, A; Sánchez, J; 2005).

El sistema de recuperación de condensado es un tema que ha ido tomando fuerza en la industria, gracias a sus incontables beneficios económicos y ambientales. En la investigación realizada por (Martínez, M., 2009) como trabajo de grado para optar al título de Master en seguridad industrial y medio ambiente, titulado “SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS DE UNA LÍNEA DE DECAPADO DE BOBINAS LAMINADAS EN CALIENTE” buscaba optimizar el consumo energético en la industria siderúrgica, la cual tiene como finalidad tratar el mineral de hierro para obtener otro tipo de materiales a base de este.

La actividad principal de la empresa en la cual se realizó la investigación es la laminación de bobinas en frío, una vez ya han sido laminadas en caliente con anterioridad. Las fases de este proceso están dadas por el decapado, en primer lugar; luego, el proceso de laminación en frío, el tratamiento térmico (también conocido como recocido), la laminación en temple, y, por último, el acabo final. Todo este proceso implica el uso de energías (tanto eléctrica, de vapor y de gas natural), alto consumo de agua, aceite, ácidos, inhibidores de corrosión, agentes desengrasantes, entre otros; produciendo gran cantidad de residuos altamente contaminantes, por lo que la empresa se ha planteado una política medioambiental, que enmarca los puntos de desarrollo sostenible, cumplimiento de legislación y reglamentación ambiental, prevención y desarrollo de prácticas sostenibles, optimización de los procesos industriales con buenas prácticas de explotación, utilización e implementación de recursos naturales, etc.

Es por ello que, la investigación se encamino directamente en el consumo energético de la empresa y en el proceso de decapado, a fin de proponer mejoras en su sistema de producción a través de prácticas que permitieran reducir el consumo energético y optimizar el proceso de eliminación de las capas de óxidos en el metal, que puede realizarse física o químicamente, involucrando el alto uso de ácidos, debido a que la banda pasa por cuatro tanques llenos de este, para posteriormente pasar a los tanques de lavado,

en el cual se usa agua desmineralizada, generando consigo aguas residuales, residuos ácidos, gases de combustión, nieblas acidas, etc.

Los estudios previos mostraron que ya existía una línea que realiza el proceso del ácido utilizado y un calentamiento en los intercambiadores de calor alimentados por vapor, aun así, no es suficiente, por lo que se plantea reutilizar el agua del condensado de los intercambiadores de calor de los baños de ácido para la realización del proceso de lavado final de la banda.

Para ello, la autora se propuso la siguiente metodología:

- Estudio de las energías consumidas en la línea de decapado: durante el proceso de decapado es indispensable del uso de energías, destacan la energía de vapor y el agua desmineralizada, por lo que las mejoras en el proceso van encaminadas hacia estas dos, en lo que respecta a nuestro interés, principalmente a la energía de vapor.
- Estudio del sistema de vapor: el sistema de vapor de la empresa funciona con gas natural, y está compuesto por tres calderas: la primera, que funciona de forma continua, la segunda que funciona como apoyo en caso de que la demanda de vapor aumente y, la tercera esta parada, en caso de alguna de las anteriores no esté en funcionamiento.
- Instalación de trampas de vapor en la línea de decapado: para el proceso de los baños de ácido para la eliminación de las capas de óxidos en el metal se dispone la instalación de intercambiadores de calor para el proceso de calentar dichos baños sumergidos en los tanques. Estos intercambiadores deberán contar a la salida con 3 elementos: un filtro para eliminar impurezas, trampas de vapor que permitan la evacuación del condensado del sistema, y una válvula de anti retorno que impida que el condensado recuperado se devuelva a los tanques.
- Instalación del sistema de condensado: una vez almacenado el condensado en las trampas de vapor, este se dispone a ser evacuado hacia tanques dispuestos para el almacenamiento del mismo desde los tanques de ácido, donde se comprueba su conductividad para saber si puede ser o no reutilizado.
- Sistema de reutilización de condensado: para comprobar si el condensado recuperado puede ser o no útil, se mide su conductividad. Si se encuentra una conductividad superior a los 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ se vierte en el sistema de las cadenas que utilizan agua desmineralizada, incurriendo en la disminución del consumo de agua y costos en los procesos que requieren de esta. En caso de que la conductividad sea menor a los 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$, condensado recuperado debe ir directamente al tanque 3, dispuesto para el lavado de los tanques de ácido, por lo que no puede superar una conductividad de 80 $\mu\text{S}/\text{cm}$.
- Instalación de un conductrímetro en línea: es indispensable controlar la conductividad en los tanques de almacenamiento de condensado, para poder enviar el condensado recuperado a las líneas dispuestas según su conductividad.

Esta implementación permite la reducción del consumo del agua desmineralizada en los lavados de los tanques de ácido, debido que el condensado recuperado con una conductividad menor a los 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ tiene este uso. Además de una reducción del consumo de vapor, incurre en una gran disminución en la producción de aguas residuales, porque el condensado recuperado ya tiene un uso eficiente, ayudando a optimizar todos los procesos de la empresa, haciéndolo más eficiente, aportando al medio ambiente y ahorrando costos en la producción.

En torno al proceso de recuperación de condensados en la industria, también encontramos una investigación realizada por (Yepes, J., 2018) para optar al título de Ingeniero Electromecánico, titulada “EVALUACIÓN DE LA RECUPERACIÓN DE CONDENSADOS EN UNA PLANTA DUAL DE PRODUCCIÓN PARA LA EMPRESA HOJALATA Y LAMINADOS S.A. HOLASA”, una empresa dedicada a la fabricación y comercialización de hojalata y laminados, donde se utiliza una gran cantidad de vapor saturado durante el proceso de calentamiento de varios tipos de soluciones químicas para la elaboración de dichos productos.

Debido al uso de vapor y el calentamiento de estas soluciones químicas se genera alto contenido de condensados, los cuales no están siendo reutilizados y por tanto aprovechados, si no desechados a las aguas residuales, por lo que esta investigación sugiere su utilización para optimizar otros procesos dentro de la empresa por la alta calidad del mismo al no haber entrado en contacto antes con algún químico.

La investigación se enfocó en el diseño de un sistema de recolección de recuperación de condensados para aprovecharlo en el sistema de alimentación de calderas, produciendo una disminución en los gastos económicos y energéticos que conlleva el consumo de combustibles, gastos de agua y ser menos agresivos con el medio ambiente. Para lograr su objetivo, el investigador se propuso la siguiente metodología:

- Evaluación de la demanda de vapor de la empresa: un estudio realizado por Azimut consultores, arrojó que la empresa Holasa demanda en promedio 1886,5 Kg/h de vapor anual, lo que genera un alto costo en la producción.
- Evaluación del sistema de vapor de la empresa: el agua que se utiliza para la generación de vapor es proveniente de la empresa EPM, la cual va directamente a las unidades suavizadoras, que a través del uso de resina retiene los iones de magnesio y calcio para posteriormente enviar el agua a los tanques de alimentación de las calderas, donde se eliminan los residuos de resina obtenidos del proceso anterior y el oxígeno. Se encontró que la empresa cuenta con dos calderas, una principal y una en caso de avería.
- Reconocimiento del sistema de condensados: el condensado se genera primero en el tanque de limpieza a través de un intercambiador de calor cerrado, este se dispone hacia el tanque de agua caliente y a las aguas residuales. El tanque de decapado también genera condensado mediante la inyección de vapor directo, este

cuenta con dos secadores que retiran la humedad a la lámina por medio de aire caliente, generando condensado completamente limpio gracias a que poseen una bomba de aire y un intercambiador de calor de fluidos de flujo cruzado y no mezclado.

- Sistema de recuperación de condensado: se propone separar el agua condensada del vapor y recolectarla para transferirla nuevamente a las calderas. Para este proceso se implementan trampas de vapor, tubería de condensado, tanque para almacenamiento del mismo, una bomba, y un tanque de alimentación de agua para la caldera.
- Análisis del sistema propuesto: el sistema propuesto proporciona un medio de recolección y alimentación de agua de alta calidad, que al reutilizarla permite generar vapor, ahorrando costos de implementación reduciendo el consumo de agua.
- Análisis de viabilidad de reutilización de condensados: la implementación del sistema de recuperación y recirculación del condensado es de fácil instalación, además, no requiere de energía eléctrica para su funcionamiento, además del ahorro considerable en costos de producción, una disminución en el uso del agua, una disminución considerable en las emisiones de dióxido de carbono y un incremento en la producción.

La implementación del sistema de recuperación de vapor incurrió en beneficios ambientales y económicos para Holasa, debido que al disminuir costos en su producción reduciendo el uso del agua y produciendo parte del vapor que generaba, también hubo una disminución de insumos, como la resina, que se utilizaba para retener iones de magnesio y calcio presentes en el agua. Además de los beneficios ambientales que se consiguen a través de estos sistemas tan eficientes, pues la empresa logró disminuir considerablemente las emisiones de dióxido de carbono que producía anualmente.

3. Capítulo 3 – Metodología

3.1 Documentación técnica

Se desarrolla la siguiente metodología para el diseño inicial de un sistema que permita monitorear la calidad del condensado de refinería y desviar inmediatamente en caso de detectar desviación de parámetros de calidad.

Implementación del sistema de desvío de condensado contaminado: Se investigó sobre los diferentes métodos de monitoreo automáticos seleccionando la opción de medición más adecuada para las características de coloración que presenta el agua al estar en contacto con hidrocarburo, se estableció tiempos de respuesta automática opcionales para el accionamiento de las válvulas de corte.

Construcción de la estructura mecánica del prototipo de monitoreo: En esta fase se ha empleado materiales livianos y plásticos para construir una estructura consistente, desarmable que sostenga las principales partes estáticas del prototipo, se garantiza que la estructura sea de fácil manejo, mantenimiento e instalación.

Elaboración del sistema de control del prototipo: Se ha seleccionado los elementos tales como: Actuadores, sensores y tarjetas electrónicas con base a sus características técnicas que se adapten a nuestro requerimiento.

Pruebas funcionales del sistema: En este proceso, fue importante registrar los tiempos de respuesta y niveles de tensión en relación a la variabilidad de parámetros del condensado, dejando registro de los valores observados y determinando la mejor respuesta del sistema de monitoreo. También se realizó caracterización de los elementos a implementar, detallando aspectos económicos. En esta fase se consideró que el diseño optara por una estructura simple de fácil manejo y poco tamaño. Para el análisis económico del sistema fue necesaria información de costo comercial de equipos, materiales y operación.

3.1.1 Sistemas de monitoreo de calidad de fluidos

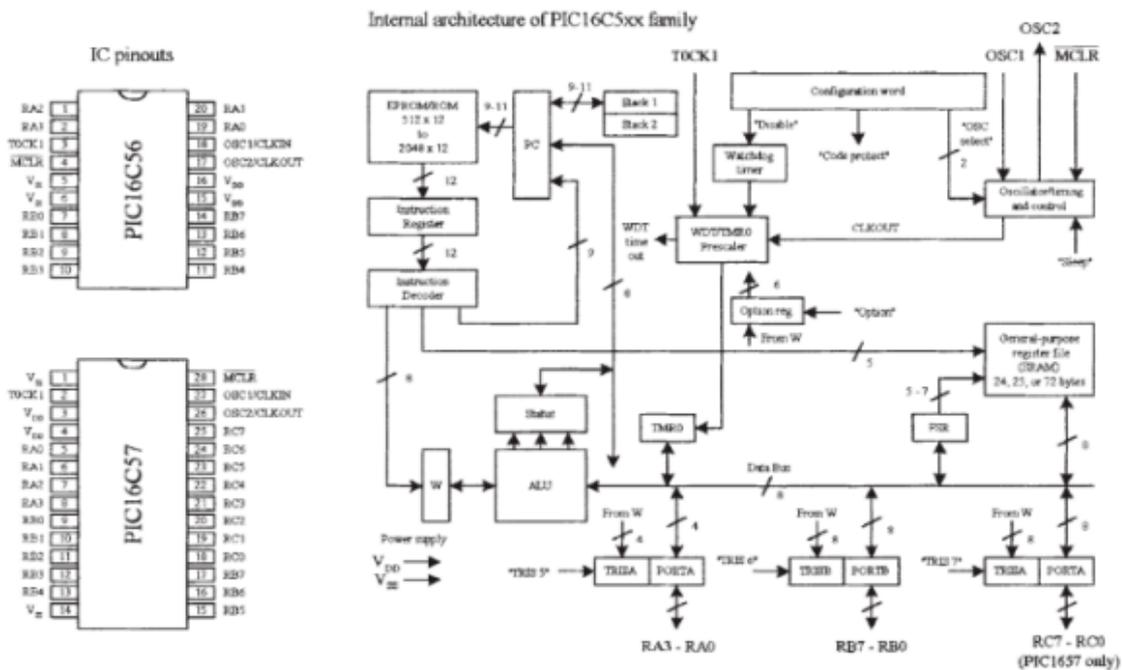
A nivel de refinerías encontraremos diversos tipos de sistemas de monitoreo de sustancias o líquidos con diferentes características físicas, químicas y variedad de parámetros de calidad, monitoreados de acuerdo a la necesidad, entre ellos los destinados a monitorear la eficiencia de los procesos y de calidad de los derivados. Cada sistema de monitoreo posee sus propias características según el grado de automatismo, diferenciándose principalmente por los componentes mecánicos, capacidades y nivel tecnológico. Por lo tanto, al seleccionar la clase de sensor se debe considerar las propiedades del fluido porque cada tecnología garantiza su efectividad siempre y cuando se emplee para el líquido correcto o sustancia para la cual fue diseñada.

3.1.2 Los microcontroladores PIC16CX

Los microcontroladores son microchip con un número de bits determinado que en su interior contienen EPROM, CPU, RAM. Su diseño se basa en archivos de registros que

emplean buses y memorias aisladas para programas ejecutables y procesamiento de información, lo que resulta en una de las grandes ventajas que ofrecen estos microcontroladores al poder ejecutar comandos paralelamente¹⁵. En la figura 3-1 se observa su configuración interna.

Figura 3-1. Configuración interna de un PIC Microcontrolador.



Fuente: Electrónica practica para inventores, cuarta edición.

El lenguaje de programación bastante antiguo, pero por fortuna su biblioteca contiene un numero de funciones básicas considerables que se pueden usar. La Tabla 3-1 resume alguno de los mandos más utilizados:

Tabla 3-1 Mandos de la biblioteca Arduino

¹⁵ Scherz, P., & Monk, S. (2016). *Electronica Practica para Inventores*. McGraw Hill TAB. 4ta Edicion.

COMMAND	EXAMPLE	DESCRIPTION
Digital I/O		
pinMode	pinMode(8, OUTPUT);	Sets pin 8 to be an output. The alternative is to set it to INPUT.
digitalWrite	digitalWrite(8, HIGH);	Sets pin 8 high. To set it low, use the constant LOW instead of HIGH.
digitalRead	int i; i = digitalRead(8);	Sets the value of i to HIGH or LOW depending on the voltage at the pin specified (in this case, pin 8).
pulseIn	i = pulseIn(8, HIGH)	Returns the duration in microseconds of the next HIGH pulse on pin 8.
tone	tone(8, 440, 1000);	Makes pin 8 oscillate at 440 Hz for 1000 ms.
noTone	noTone();	Cuts short the playing of any tone that was in progress.
Analog I/O		
analogRead	int r; r = analogRead(0);	Assigns a value to r of between 0 and 1023. 0 for 0 V 1023 if pin 0 is 5 V (3.3 V for a 3 V board).
analogWrite	analogWrite(9, 127);	Outputs a PWM signal (see Sec. 13.5). The duty cycle is a number between 0 and 255, 255 being 100%. This must be used by one of the pins marked as PWM on the Arduino board (3, 5, 6, 9, 10, and 11).
Time Commands		
millis	unsigned long i; i = millis();	The variable type long in Arduino is represented in 32 bits. The value returned by millis() will be the number of milliseconds since the last reset. The number will wrap around after approximately 50 days.

Fuente: (Scherz & Monk, 2016)

3.1.2.1 Arduino

Arduino es una plataforma de código abierto que ha ganado gran popularidad por su bajo costo, su diseño es simple y de fácil manejo, destaca su disponibilidad de escudos y de fácil implementación en la programación. Actualmente es uno de los más utilizados en lo que concierne a prácticas educativas, sin embargo, no cuenta con la certificación de operación en términos industriales. Cabe destacar que es una plataforma ampliamente variable, ya que permite acceder a un sinnúmero de apps que pueden ir dirigidas a tareas de control, como lo desarrolla un sistema de control lógico programable.

Su lenguaje de programación utiliza un código abierto C y C++ para ejercer control sobre sus salidas y entradas, que además de contar con salidas y entradas digitales, también adicional posee entradas análogas que facilitan la recepción de una amplia variedad de dispositivos de gran utilidad para su procesamiento.

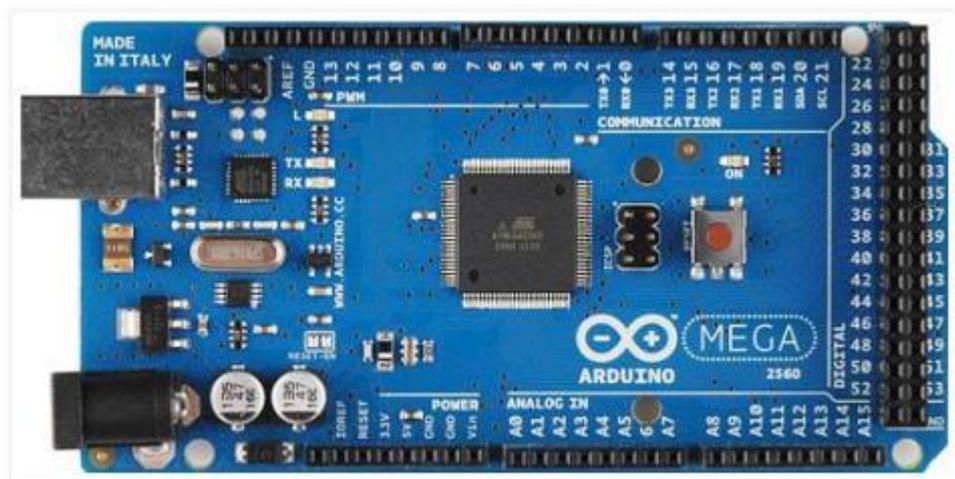
Cabe mencionar que él no cuenta con sistema operativo, y esta limitado en su memoria, por le contrario a un de un computador, que además cuenta con teclado, mouse y una interfaz HMI.

Respecto a su programación, este cuenta con un software llamado Arduino Integrated Development Environment (IDE), entre sus principales modelos de placas disponibles encontramos:

- Uno R3 - Uno – Leonardo
- Duemilanove
- Lilypad
- Mega2560
- Mini - Nano
- Fio
- Etherne

Físicamente podemos identificar la arquitectura electrónica de Arduino en la siguiente Figura 3-2.

Figura 3-2. Tarjeta Arduino Mega 2560



Fuente: (Arduino en Español , 2016)

En cuanto a las especificaciones técnicas podemos observar el detalle en la siguiente tabla 3-2:

Tabla 3-2. Especificaciones Técnicas de Arduino MEGA 2560

Microcontrolador	ATmega2560
Tensión de trabajo	5V
Tensión de entrada (recomendada)	7-12V
Tensión de entrada (límite)	6-20V
Pines Digitales I/O	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entradas Analógicas	16
DC Corriente por Pin I/O	20 mA
DC Corriente por Pin 3.3V	50 mA
Memoria Flash	256 KB de los cuales 8 KB se usan por el bootloader
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB
Velocidad del reloj	16 MHz
Largo	101.52 mm
Ancho	53.3 mm
Peso	37 g

Fuente: (Arduino en Español , 2016)

3.2 Ingeniería de control

Para establecer la lógica de control, determinamos el tiempo o velocidad de respuesta del sistema, este parámetro es fijo sin embargo puede ser ajustado durante la calibración del sistema de monitoreo de calidad del condensado, mediante la modificación de delay de muestreo del sensor. Determinaremos el tiempo exacto para la medición y respuesta del sistema de desvío de contaminación con el fin de proteger la calidad del fluido recuperado y almacenado en calidad, este tiempo calculado en mili-segundos es nuestro delay para la activación de la señal que suministra energía a las solenoides o válvulas de corte. Es indispensable garantizar la alineación correcta de las válvulas del sistema para su correcto funcionamiento.

La lógica de control requiere las siguientes precondiciones:

- 1- Dispositivo de bombeo en servicio
- 2- Presencia de flujo en línea de recuperación de condensado
- 3- Sistema de control en servicio
- 4- Válvulas solenoides energizadas
- 5- Sensor de monitoreo de calidad en servicio
- 6- Alarma sonora instalada y disponible
- 7- Cumplir permisos y ejecutar comandos para funcionamiento

La secuencia lógica del control se describe en las siguientes acciones:

- 1- Encendido del sistema de monitoreo
- 2- Detección de desviación de calidad del fluido

- 3- Accionamiento de alarma sonora
- 4- Accionamiento de válvula de corte para mantener calidad del condensado recuperado
- 5- Accionamiento de válvula de corte para desviar contaminación

La programación del microcontrolador se realizó en C++ y a continuación se describen los comandos y código desarrollado:

3.2.1 Declaración de variables a implementar:

```
int VALVULA1 = 51;
int VALVULA2 = 49;
int alarma1 = 10;
int alarma2 = 11;
```

3.2.2 Comando para visualización de datos y declaración de Pines del microcontrolador:

```
void setup () {
  Serial.begin (9600);
  pinMode(VALVULA1, OUTPUT);
  pinMode(VALVULA2, OUTPUT);
  pinMode(alarma1, OUTPUT);
  pinMode(alarma2, OUTPUT);
}
```

3.2.3 Lazo cíclico del sistema programado, declaración de nivel de voltaje máximo del sensor y cantidad de datos:

```
void loop () {
  int sensorValue = analogRead (A0);
  float voltaje = sensorValue * (5.0 / 1024.0);
  //double calc_NTU;
  //calc_NTU = - (1120,4*voltaje*voltaje)+(5742,3*voltaje)-4352,9;
  Serial.print(voltaje);
  Serial.println(" NTU");
  delay (100);
}
```

3.2.4 Condicional para establecer contaminación del condensado y activación de válvulas de desvío:

```
if (voltaje <2)
{
  digitalWrite (VALVULA1, LOW);
  digitalWrite (VALVULA2, HIGH);
}
```

```

digitalWrite (alarma2, HIGH);
delay (500);
digitalWrite (alarma2, LOW);
digitalWrite (alarma1, LOW);
Serial.print("BAJO");
}

```

3.2.5 Condicional para establecer fluido en calidad y estado normal de válvulas de desvío de contaminación:

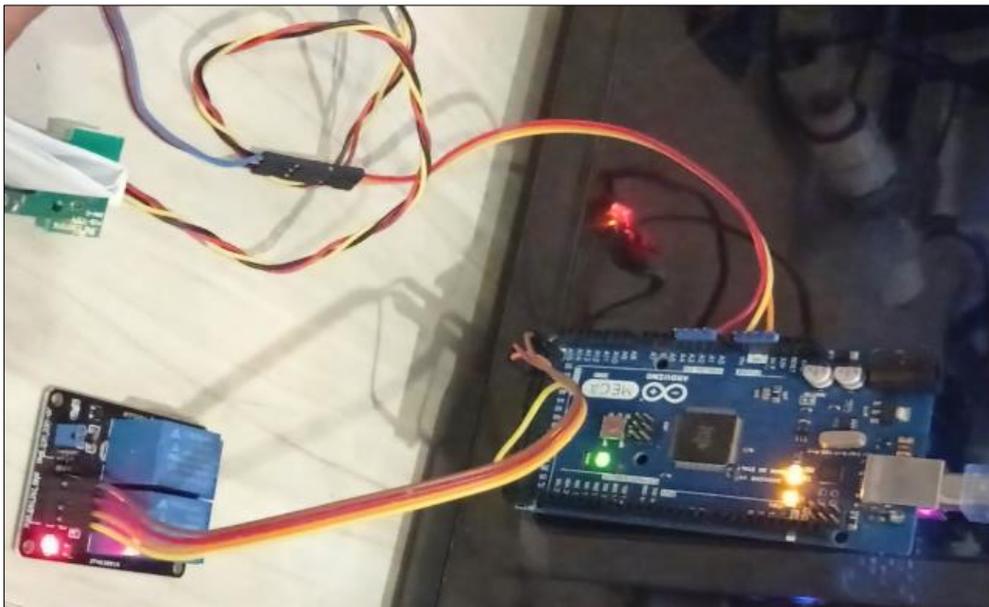
```

else{
digitalWrite(VALVULA1, HIGH); // if sensor is HIGH, then turn off the led
digitalWrite(VALVULA2, LOW);
// digitalWrite (2, LOW);
// digitalWrite (3, HIGH);
}

```

Como se puede observar en el bucle cerrado, la medición del sensor se manifiesta en un nivel de voltaje y no en un dato numérico o porcentual de contaminación, debido a que no se dispondrá de HMI o pantalla de visualización de datos más se tendrá la alerta sonora al desviar el nivel de tensión deseado. Sin embargo, el sistema contará con un puerto para visualización mediante computadora o HMI que se desee instalar a futuro como mejora.

Figura 3-3 Conexión del Sistema de control



Fuente: Elaboración propia

3.3 Análisis de costos

Tabla 3-3. Presupuesto para el desarrollo de la propuesta

Recurso	Fuente de Financiación		
	Estudiante	Universidad Antonio Nariño	Entidad Externa
Transporte	\$500.000 COP		
Equipo de cómputo y software	\$2.500.000 COP	\$720.000 COP	
Insumos para implementación			\$15.000.000 COP
Asesorías		\$720.000 COP	
Valor	\$3.000.000 COP	\$1.440.000 COP	\$15.000.000 COP
Valor Total	\$19.440.000 COP		

Fuente: Elaboración propia

3.4 Implementación del sistema

3.4.1 Aspectos requeridos para el diseño

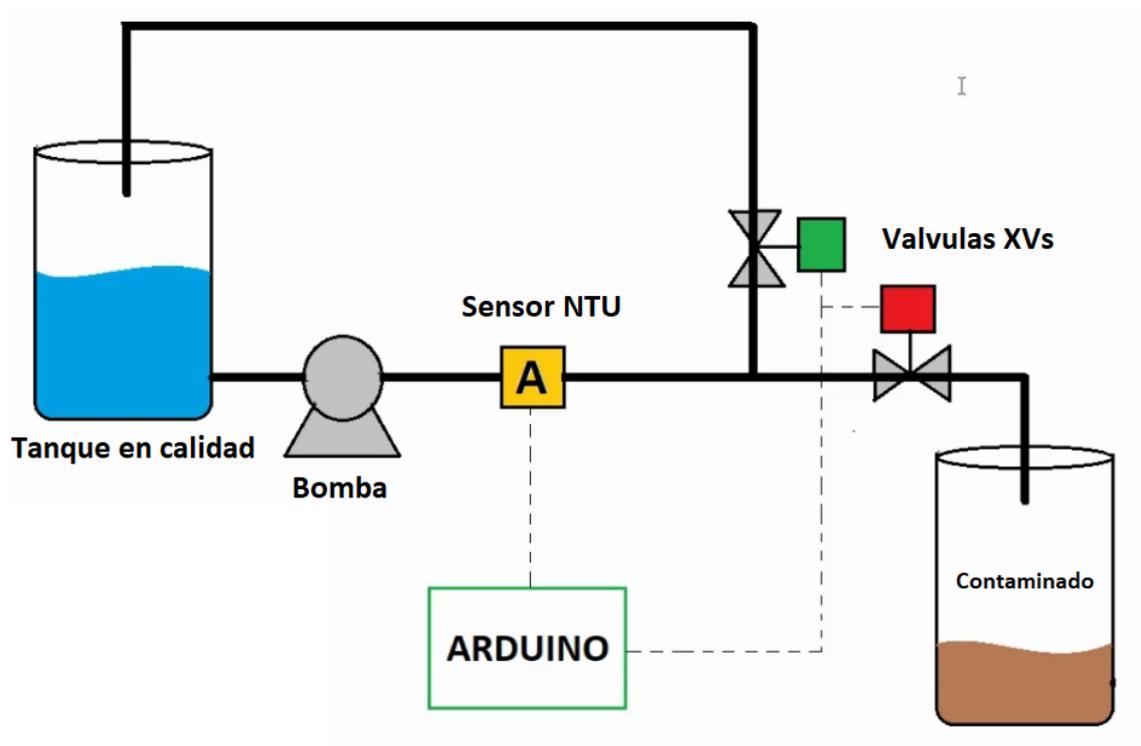
- Toda la estructura que sostiene el sistema de monitoreo de parámetros del condensado, será liviana, desarmable y de poco volumen para facilitar su instalación en espacio reducidos.
- El sistema debe garantizar que ante una contaminación detectada la respuesta de desvío del flujo se inmediata.
- La operación debe ser simple e intuitiva, que permita identificar con facilidad fallas insipientes en el sistema.
- Los materiales utilizados deben ser de bajo costo para que el proyecto sea atractivo y sostenible financieramente.
- La lógica de control debe alertar al operador si una contaminación se ha presentado incluso antes del accionamiento de las válvulas ya sea de reciclo o salida.

- Implementación de dos fuentes de alimentación distintas, una para control y suministro de energía a módulos sensores y otra para activación de válvulas, donde manejaremos voltajes superiores a 5VDC.

El siguiente diagrama contiene la estructura general del sistema a implementar, nótese que el microcontrolador se basa en la plataforma de Arduino Mega y que los elementos responsables del desvío del fluido contaminado serán dos válvulas XV o solenoides para disminuir el tiempo de respuesta ante una desviación de calidad.

La figura 3-4 se muestra una representación general de la estructura y configuración del sistema de monitoreo de calidad del condensado diseñado y construido en este proyecto:

Figura 3-4. Sistema de Detección de Contaminación en Condensado



Fuente: Elaboración propia

Premisas del diseño:

- Estructura sólida y liviana.
- Tamaño reducido.
- Desmontable-ensamblable.
- Cada mecanismo de fácil remoción.
- De bajo costo y fácil mantenimiento o reparación.

3.4.2 Instrumentación implementada

3.4.2.1 Sensor de Turbidez

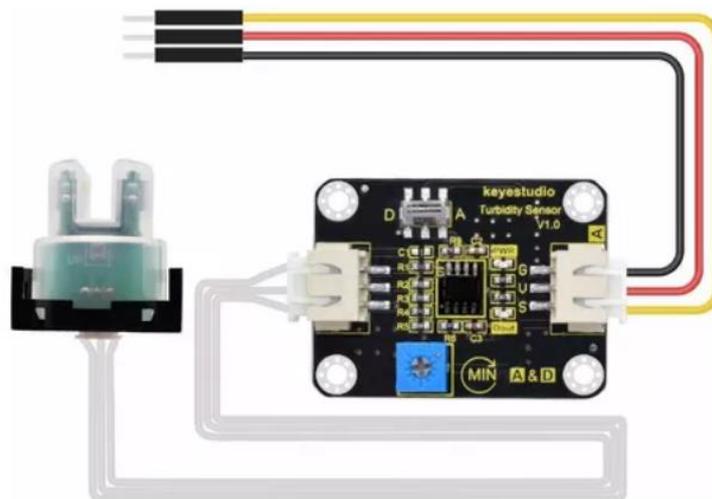
El modelo implementado es el TS-300B este tipo de sensores de turbidez emplean el uso de la óptica, a través de una solución líquida y la tasa de dispersión de partículas suspendidas en transmisión integrada para determinar el nivel de turbidez, ya que el valor de turbidez es gradual, generalmente detectada en un entorno dinámico, la necesidad de control para la conversión de AI, es indispensable para obtener la de turbidez del medio correspondiente, lo anterior hace que se requiera de un periférico adicional en el sistema como una sonda impermeable.

Parámetros:

- Voltaje de trabajo: DC5V
- Corriente: 30mA (MAX)
- Tiempo de respuesta: <500ms
- Resistencia de aislamiento: 100M [Min];
- La forma de salida: salida analógica 0-4.5V
- La forma de salida: señal alta / baja (Alta: 5V Baja: 0V)
- Temperatura de funcionamiento: -30 oC -80 oC;
- Temperatura de almacenamiento: -10-80 oC.
- Resistencia: 100M [Min]
- Peso: 55 g
- Tamaño: 30mm * 20mm * 12mm

La figura 3-5 detalla el sensor y el cableado de conexión:

Figura 3-5. Sensor de Turbidez



Fuente: Mercado Libre

3.4.2.2 Electro válvula Solenoide Normalmente Cerrada de Diámetro ½ Pulgada, 12 voltios

La válvula de solenoide seleccionada se abre por energización de su bobina de 12 V, además es abierta debido al movimiento de un émbolo operado por acción magnética de la bobina energizada eléctricamente, la principal razón de seleccionar este tipo de válvula NC es porque será instalada en la línea que disecciona el fluido contaminado, teniendo en cuenta que su frecuencia de operación será menor, obtendremos en consecuencia un ahorro energético.

Características:

- Material: PP + metal
- Voltaje: DC12V
- Potencia nominal: alrededor de 5W
- Modelo de operación: normalmente cerrado (N / C)
- Presión 0.8Mpa
- Diametro: alrededor de G3 / 4 "
- Temperatura que soporta: aproximadamente 0-100 grados Celsius
- Uso: agua y fluidos de baja viscosidad
- Caracteristicos de flujo:
- aproximadamente 0.02Mpa > 2L / min;
- aproximadamente 0,10 Mpa > 10L / min;
- aproximadamente 0,30 Mpa > 16L / min;
- aproximadamente 0.80Mpa > 28L / min

Figura 3-6. Electro-válvula 12 V



Fuente: Mercado Libre

3.4.2.3 Electro válvula Solenoide Normalmente Abierta de Diámetro ½ Pulgada, 12 voltios

La válvula de solenoide seleccionada se abre por energización de su bobina de 12 V, además es abierta debido al movimiento de un émbolo operado por acción magnética de la bobina energizada eléctricamente.

Características:

- Material: PP + metal
- Voltaje: DC12V
- Potencia nominal: alrededor de 5W
- Normalmente Abierto (N / A)
- Presión 0.8Mpa
- Diametro: alrededor de G3 / 4 "
- Temperatura que soporta: aproximadamente 0-100 grados Celsius
- Fluidos: agua y fluidos de baja viscosidad
- Características de flujo:
 - aproximadamente 0.02Mpa> 2L / min;
 - aproximadamente 0,10 Mpa> 10L / min;
 - aproximadamente 0,30 Mpa> 16L / min;
 - aproximadamente 0.80Mpa> 28L / min

Figura 3-7. Electro-válvula 12 V Normalmente Abierta



Fuente: Mercado Libre

3.4.2.4 Mini Bomba de diafragma R385 12v

Esta bomba será la encargada de enviar el fluido a través del sistema de monitoreo de calidad del agua, a continuación, sus datos técnicos:

- Modelo de dispositivo: R385
- Tensión 12V
- Diámetro de salida: interior: 6 mm / 0.24 "
- Exterior 9 mm / 0.35 " Material: Plástico
- Tensión de trabajo DC6-12V
- Potencia 5W / H
- Flujo 1.7 L/Min
- Succión 1.2Mt

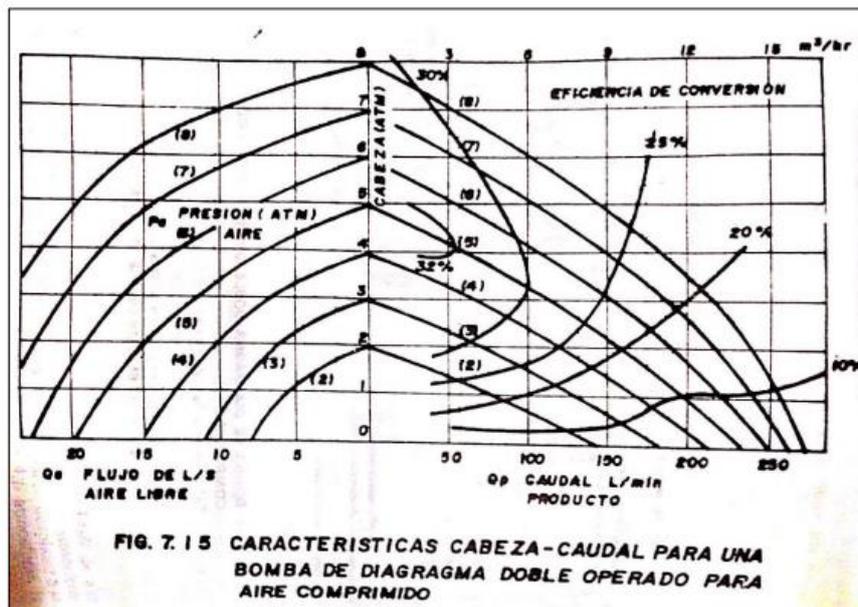
Figura 3-8. Mini Bomba Acuario R385 12v



Fuente: Mercado Libre

En cuanto a las curvas de rendimiento de bombas de doble diafragma de accionamiento neumático se presenta la siguiente grafica que relaciona la eficiencia, consumo y presión de aire, cabeza y caudal del fluido, como se muestra a continuación:

Figura 3-9 Curvas teóricas de una bomba de doble diafragma



Fuente: (Burton & Loboguerrero, 1991)

3.4.2.5 Diseño de la estructura mecánica del sistema

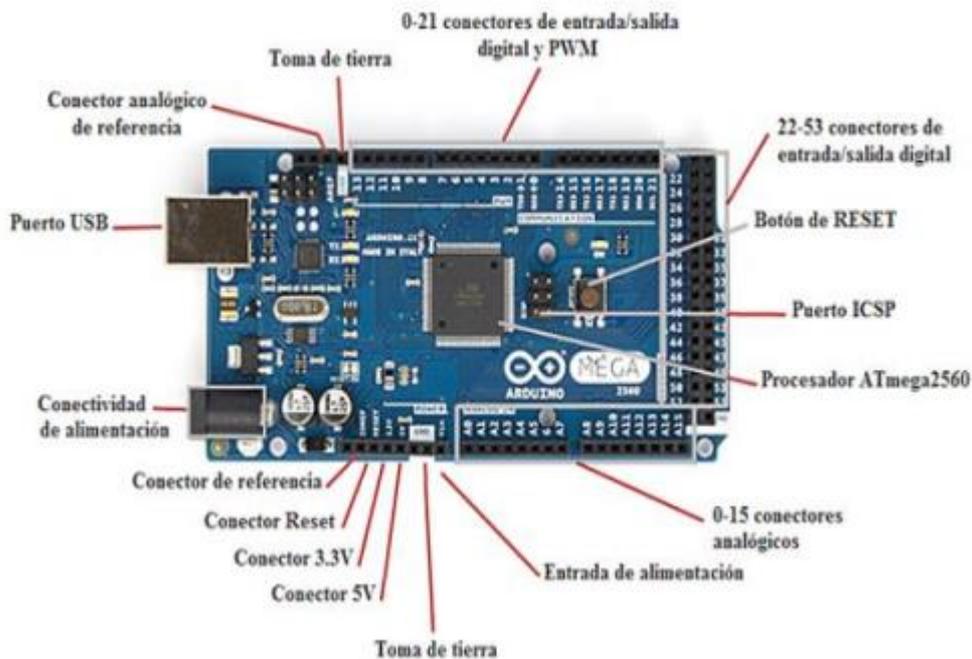
Para su construcción se adquirió una base de poliestireno expandido y soportes de plástico fijados con tornillos y silicona de calor. La base tiene las siguientes dimensiones: Ancho 37 cm, Alto 15 cm, Largo 50 cm, sobre la parte superior se apoya directamente los dos recipientes en plástico que representan los tanques de condensado en calidad y condensado contaminado, la tubería se encuentra anclada en una base plástica que eleva el tubo a 35 cm de altura, entre los principales accesorios se cuenta con reducciones de media roscada metálicas y de PVC así mismo 10 empaques de caucho para mejorar el

sellado y hermeticidad entre las conexiones roscadas de las tuberías. Por su parte en la parte central de la base se cuenta con una cavidad ideal para la instalación de las tarjetas electrónicas que conforman el sistema de monitoreo y control. La estructura también soporta la instalación de mangueras transparentes de 3/4 pulgada, instaladas en línea con la tubería PVC con el fin de ofrecer una mejor visual de la coloración del agua al momento de presentar contaminación.

3.4.2.6 Selección del microcontrolador

El microcontrolador seleccionado fue el Arduino mega 2560 su funcionamiento se basa en el integrado ATmega2560. Cuenta con 54 pines que pueden ser configurados como entradas o salidas, dependiendo su asignación en el código de programación, se debe tener en cuenta que del total de pines solo contamos con 16 entradas analógicas, un oscilador de 16MHz y 15 pines que pueden ser configurados como salidas PWM. Cuenta con un puerto de alimentación, una conexión USB, un conector ICSP y el pulsador de reset. Es decir, cuenta con todos los componentes necesarios para el funcionamiento y aprovechamiento del microcontrolador Atmega2560, el Arduino mega 2560 es una placa versátil y compatible con muchas versiones (Monk, 2017) Ver figura 3-9 microcontrolador Arduino.

Figura 3-10. Microcontrolador Arduino MEGA.



Fuente: (Arduino en Español , 2016)

4. Capítulo 4 – Resultados y discusión

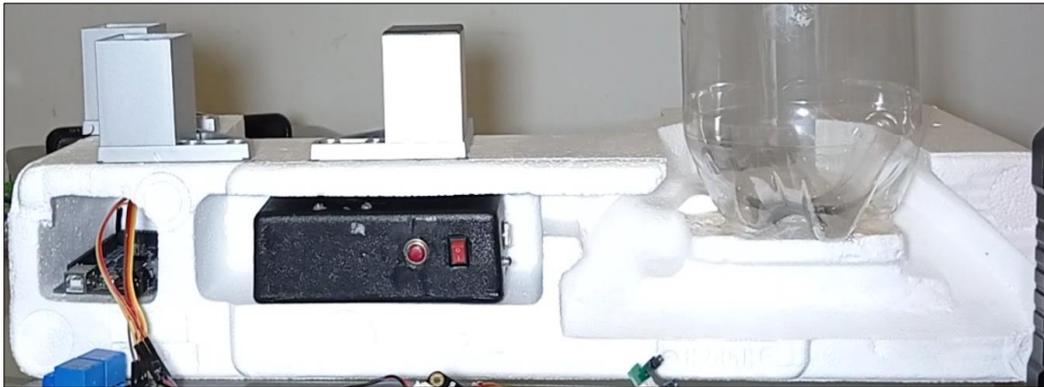
A continuación, se presenta el sistema de monitoreo de calidad del condensado de refinería, objeto de este proyecto de grado.

4.1 Estructura de soporte del prototipo

4.1.1 Estructura base del Prototipo

Para su construcción se implementó una base de poliestireno expandido y soportes de plástico fijados con tornillos y silicona de calor. La base tiene las siguientes dimensiones: Ancho 37 cm, Alto 15 cm, Largo 50 cm.

Figura 4-1. Estructura mecánica.



Fuente: Elaboración Propia

4.1.2 Soporte de tuberías

La figura 4-2 nos expone con claridad el soporte utilizado para sostener la tubería PVC y así mismo los accesorios metálicos y mangueras de recirculación y desvío.

Figura 4-2. Base del sistema.

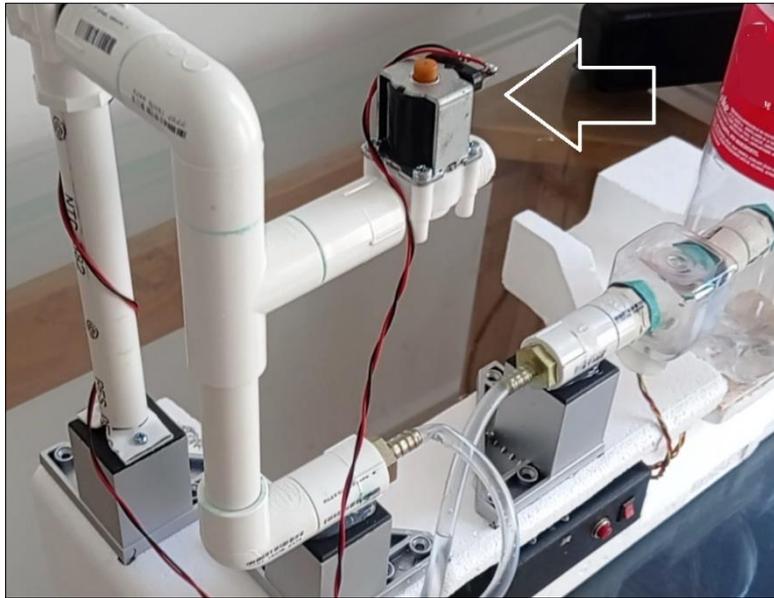


Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Válvulas de salida y recirculación

La Figura 4-3 representa la instalación de la válvula de reciclo, se muestra la válvula solenoide normalmente abierta, cuya función es simular el flujo de agua en calidad a través de las tuberías.

Figura 4-3. Válvula solenoide N.A

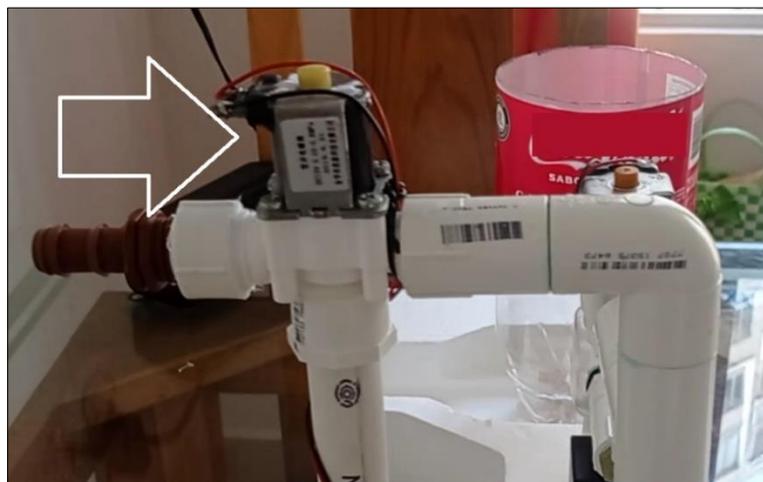


Fuente: Elaboración propia

4.1.4 Válvulas de salida de condensado contaminado

La Figura 4-4 representa la instalación de la válvula de reciclo, se muestra la válvula solenoide normalmente cerrada, cuya función es simular el flujo de agua contaminada con HC a través de las tuberías.

Figura 4-4. Válvula solenoide N.C



Fuente: Elaboración propia

4.1.5 Sistema de monitoreo de condensado de refineras

La figura 4-5 presenta la estructura, tuberías, circuitos y válvulas del sistema, se puede prear la válvula frontal la cual es la de recirculación de agua en calidad y la válvula posterior que es de desvío de condensado contaminado.

Figura 4-5 Sistema de monitoreo de condensado



Fuente: Elaboración propia

4.1.6 Resultados del monitoreo de condensado:

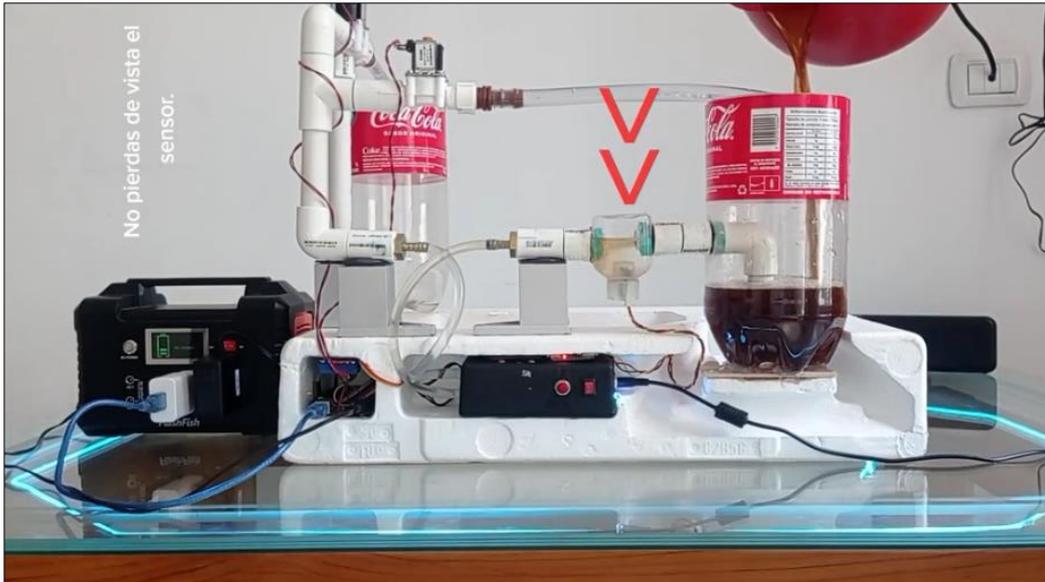
Para el desarrollo de esta prueba se adiciono 3 L de agua potable en el recipiente marcado con el nombre CONDENSADO EN CALIDAD seguido se precedió a dar arranque a la bomba y garantizar recirculación del sistema, una vez estando en funcionamiento el sistema de monitoreo de calidad, se adiciono 0,5 L de fusión de café al mismo recipiente para simular un contaminación con hidrocarburo y producir el cambio de color en el agua, durante este tiempo se registran los siguientes datos en la siguiente tabla

Tabla 4-1. Medición del sensor VS Tiempo

Sensor (V)	Tiempo
4,45	1
4,46	2
4,44	3
4,44	4
4,45	5
4,42	6
3,22	7
3,1	8
3,9	9
3,92	10
3,89	11

Fuente: Elaboración propia

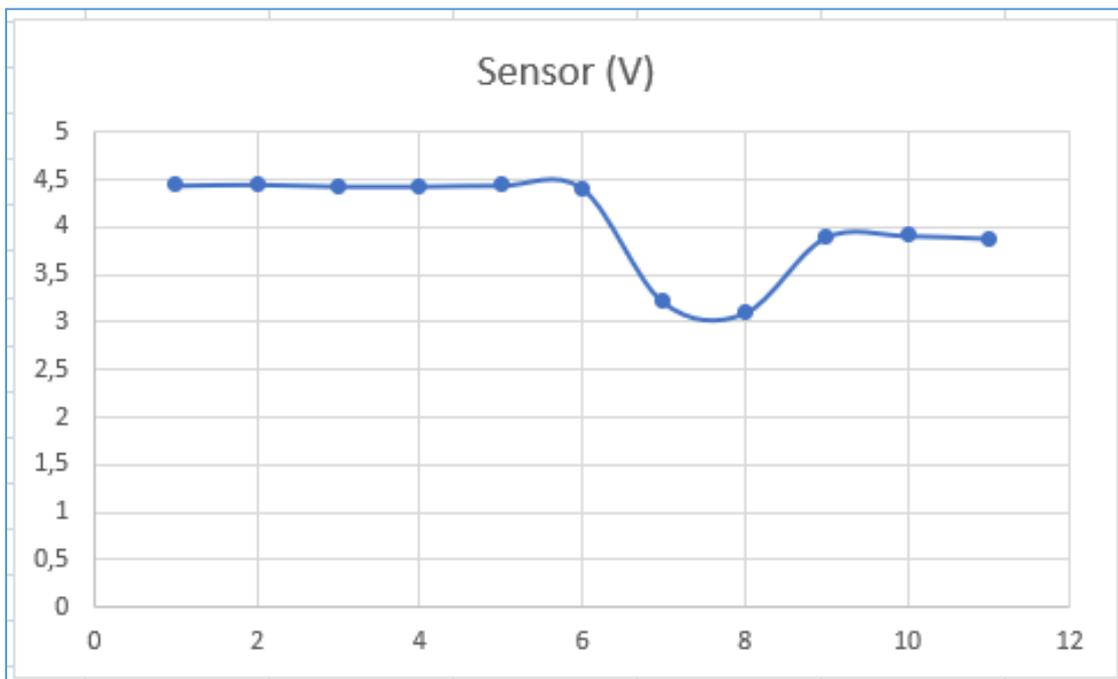
Figura 4-6. Prueba funcional



Fuente: Elaboración propia

La siguiente grafica describe el comportamiento de la salida del sensor en el tiempo al detectar cambio en el parámetro de turbidez del agua.

Figura 4-7 Medición del sensor VS Tiempo



Fuente: Elaboración propia

Tabla 4-2 Presencia de contaminación VS Flujo

Para efectos de la toma de datos se tendrá que el número cero (0) representa ausencia de flujo y el número uno (1) presencia de flujo en el sistema. En cuanto al contaminante el número cero (0) ausencia de contaminación y el número uno (1) desviación de calidad del agua.

Contaminante	Flujo
0	1
0	1
0	1
0	1
0	1
0	1
5	1
5	1
5	1
5	1
5	1

Fuente: Elaboración propia

La siguiente grafica describe el comportamiento de la presencia de contaminante manteniendo el flujo constante de agua y café.

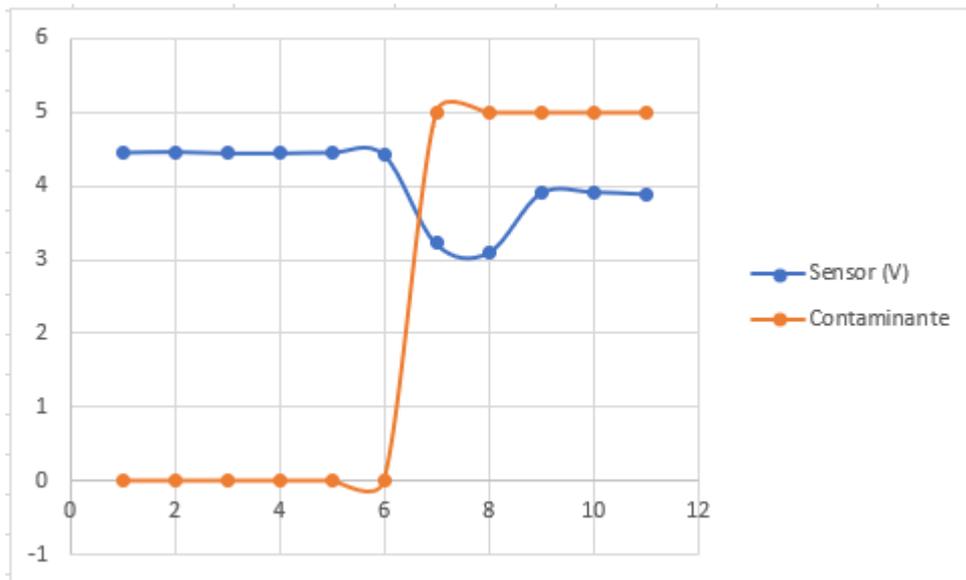
Figura 4-8. Representación Contaminación VS Flujo de Agua



Fuente: Elaboración propia

Luego de observar e interpretar el comportamiento de la salida del sensor en voltaje (V) en el tiempo y relacionando la presencia de contaminación en un momento determinado, es evidente que se logra optimizar sustancialmente el proceso, disminuyendo el tiempo requerido para desviar la contaminación de forma manual. Claramente se aprecia la intersección casi inmediata entre la salida del sensor y la presencia del contaminante en el flujo de agua, logrando una respuesta casi que inmediata del sistema de control para cambiar el sentido del flujo del condensado contaminado.

Figura 4-9. Salida del sensor VS Contaminación



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-10. Desvío de contaminación del agua



Fuente: Elaboración Propia

4.1.7 Medición de conductividad

Para el desarrollo de esta prueba fue necesario el uso de un medidor de conductividad más sensor (Figura 4-11), y 4 muestras para medición, entre estas: aguas desmineraliza, condensado recuperado del proceso, agua de enfriamiento TAE contaminante N°1, e Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2 (Figura 4-12), además de la medición de conductividad del condensado recuperado del proceso con presencia de cada uno de los contaminantes.

Figura 4-11. Medidor de conductividad portal con sensor sin producto.



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-12. Muestras para medición

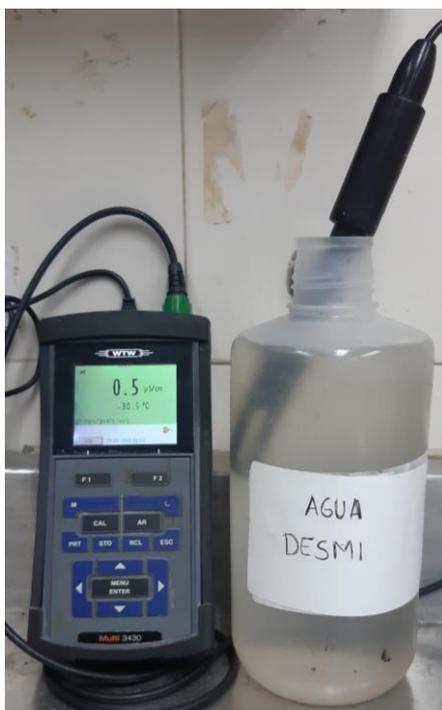


Fuente: Elaboración propia

Una vez programado el medidor de conductividad y la preparación de cada una de las muestras, se procede a realizar la respectiva medición de cada una de ellas, siguiendo el respectivo orden que se observa en la Figura 4-12.

En la primera medición realizada, correspondiente a la muestra de agua desmineralizada se obtuvo como resultado una conductividad de 0.5 µS/cm (Figura 4-13).

Figura 4-13. Medición de conductividad en agua desmineralizada



Fuente: Elaboración propia

En la segunda medición realizada, correspondiente a la muestra del condensado recuperado del proceso, obtuvimos como resultado una conductividad de 3.8 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4-14).

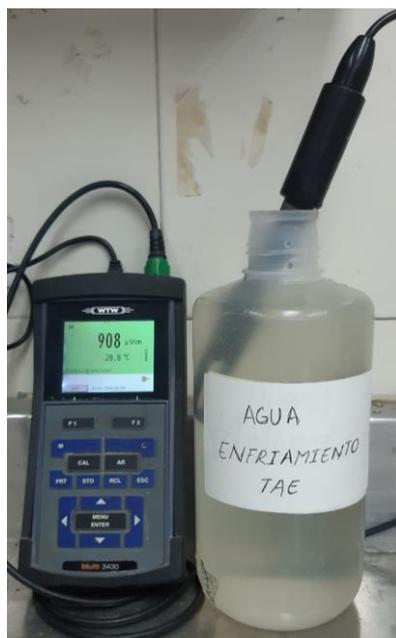
Figura 4-14. Medición de conductividad en condensado recuperado del proceso



Fuente: Elaboración propia

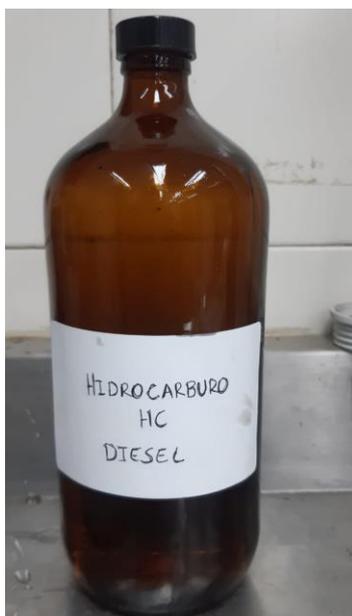
La tercera medición realizada corresponde a la de la muestra de agua de enfriamiento TAE, contaminante N°1, donde se obtuvo como resultado una conductividad de 908 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4-15), y el contaminante N°2 (Figura 4-16).

Figura 4-15. Medición de conductividad en agua de enfriamiento TAE, contaminante N°1



Fuente: Elaboración propia

Figura 4-16. Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2



Fuente: Elaboración propia

Se procede a mezclar 400ml de la muestra de condensado recuperado con 200ml de muestra de agua de enfriamiento contaminante N°1 en un recipiente, para luego medir su conductividad y encontrar como resultado una conductividad de 945 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 4-17).

Figura 4-17. Medición de conductividad, mezcla de 400ml de la muestra de condensado recuperado con 200ml de muestra de agua de enfriamiento contaminante N°1



Fuente: Elaboración propia

Se procede a mezclar 400ml de la muestra de condensado recuperado con 100ml de muestra de Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2 en un recipiente, para luego medir su conductividad y encontrar como resultado una conductividad de 18.1 $\mu\text{S/cm}$ (Figura 4-18).

Figura 4-18. Medición de conductividad, mezcla de 400ml de la muestra de condensado recuperado con 100ml de muestra de Hidrocarburo HC Diésel contaminante N°2



Fuente: Elaboración propia

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se implementó un prototipo de monitoreo de condensado recuperado, el cual consta de un sistema de control y una bomba de diafragma que simula el flujo de condensado de refinería al sistema de recuperación y almacenamiento.

El sistema desarrollado es practico y su principio de funcionamiento es simple para su implementación y operación.

El dispositivo diseñado y construido mediante este proyecto, puede ser utilizado e implementado en cualquier tipo de refinería o industria que requiera recuperar efluentes en calidad y evitar desviaciones de calidad por contaminaciones súbitas del proceso.

La programación implementada en la Tarjeta Arduino Mega 2560 ofrece una respuesta inmediata para el accionamiento de válvulas de corte que eviten contaminar el fluido recuperado y almacenado en calidad.

El sistema contiene instrumentos de medida que permiten monitorear de forma constante en diferentes momentos de operación, incrementando el grado de eficacia del proyecto.

La eficiencia del sistema de monitoreo de calidad del condensado es muy significativa en relación a la detección de contaminación y desvío de forma manual, logrando una disminución sustancial en el tiempo empleado para realizar este proceso.

La ingeniería electromecánica es una poderosa herramienta que al utilizarla correctamente facilita muchas actividades que en la actualidad requieren de gran esfuerzo físico.

La implementación de un sistema de recuperación de condensado es una herramienta poderosa, sobre todo en el siglo en que está en peligro el planeta por el cambio climático, gracias a que su correcta implementación disminuye la incidencia negativa que tienen las industria sobre el medio ambiente, esta alternativa les brinda la posibilidad de seguir realizando sus procesos de manera óptima, siendo más amigables con el medio ambiente, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero, disminuyendo el consumo de agua dulce, disminuyendo costos en su producción y aprovechando los recursos disponibles. Es por ello que, implementar esta propuesta seria de gran provecho en una refinería, teniendo en cuenta que permitirse monitorear el proceso conlleva a optimizar cada uno de los procesos que dependerían del sistema.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda la instalación de sensores adicionales en la línea de recirculación del proceso, con el fin de que el monitoreo sea multiparámetro y se pueda detectar una más amplia variedad de contaminantes.

Se recomienda la implementación de un HMI local que permita al operador visualizar con facilidad durante las rondas estructuradas el estado actual de las variables monitoreadas por el sistema.

6. Referencias

- ¹ G. McKay y C. R. Holland, «Energy savings from steam losses on an oil refinery», *Eng. Costs Prod. Econ.*, vol. 5, n.º 3-4, pp. 193-203, feb. 1981, doi: 10.1016/0167-188X(81)90004-5.
- ² A. A. Filimonova, N. D. Chichirova, A. A. Chichirov, y A. G. Filimonov, «Technologies for monitoring and cleaning the return manufacturing condensate in the energy-technological complex of heat power plant – petrochemical facility», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1565, n.º 1, p. 012027, jun. 2020, doi: 10.1088/1742-6596/1565/1/012027.
- ³ E. J. Viola, «Comprehensive Savings in Condensate Return Systems», may 1999, Accedido: 21 de agosto de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://oaktrust.library.tamu.edu/handle/1969.1/91114>
- ⁴ C. Gálvez-Vidaurre, «Uso del desincrustante magnético (DM) para mejorar la calidad del agua en la industria», *Ing. Ind.*, vol. 0, n.º 028, p. 139, mar. 2015, doi: 10.26439/ing.ind2010.n028.244..
- ⁵ «El Refino del Petróleo». AOP ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE OPERADORES DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS. Obtenido desde <https://www.aop.es/blog/2020/02/25/como-es-una-refineria-de-petroleo/>
- ⁶ «La Refinería». PDVSA Gas. Obtenido desde <http://www.pdvs.com/images/pdf/armables/Refineria.pdf>
- ⁷ «Quiénes Somos | Reficar». Obtenido desde <https://www.reficar.com.co/en/quienes-somos>
- ⁸ Zarza, L. «¿Qué es el agua cruda?». iagua. Obtenido desde <https://www.iagua.es/respuestas/que-es-agua-cruda#:~:text=Por%20definici%C3%B3n%2C%20e1%20agua%20cruda,%2C%20manantiales%2C%20surgencias%E2%80%A6>.
- ⁹ Gómez, L. (2022). «Optimización red de condensados de vapor. Migasa Aceites S.L.U». Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. Departamento. de Ingeniería Química y Ambiental. Pág. 26
- ¹⁰ Gómez, L. (2022). «Optimización red de condensados de vapor. Migasa Aceites S.L.U». Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. Departamento. de Ingeniería Química y Ambiental. Pág. 27
- ¹¹ Martínez, M. (2009). *Sistema de Recuperación de Condensados de una Línea de Decapado de Bobinas Laminadas en Caliente*. Universidad Politécnica de Valencia (Valencia, España). Facultad de Ingeniería.
- ¹² Rodríguez, H; Sánchez, R (2009). «Monitoreo y Diagnostico de sistemas de Condensación en Centrales Termoeléctricas». Boletín IIE. Artículos Técnicos. Pág. 162-167.

¹³ Umaña, C. (2011). «OPTIMIZACIÓN DEL SISTEMA DE VAPOR DEL PLANTEL DE REFINERÍA, RECOPE S.A., MOIN-LIMÓN». Instituto Tecnológico de Costa Rica. Pág. 2-23

¹⁴ Mejía, A; Sánchez, J. (2005). «ANÁLISIS DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE CONDENSADO EN LAS ÁREAS DE VAPOR Y ENERGÍA DEL COMPLEJO INDUSTRIAL DE BARRANCABERMEJA». Universidad Industrial de Santander. Pág. 2-60

¹⁵ Scherz, P., & Monk, S. (2016). *Electronica Practica para Inventores*. McGraw Hill TAB. 4ta Edicion.

Gómez, L. (2022). «Optimización red de condensados de vapor. Migasa Aceites S.L.U». Trabajo Fin de Máster en Ingeniería Química. Universidad de Sevilla. Departamento. de Ingeniería Química y Ambiental. Pág. 35

Rodríguez, H; Sánchez, R (2009). «Monitoreo y Diagnostico de sistemas de Condensación en Centrales Termoeléctricas». Boletín IIE. Artículos Técnicos. Pág. 162-167.

AOP . (s.f.). *ASOCIACIÓN ESPAÑOLA DE OPERADORES DE PRODUCTOS PETROLÍFEROS*. Obtenido de El Refino del Petroleo: <https://www.aop.es/blog/2020/02/25/como-es-una-refineria-de-petroleo/>

Arduino en Español . (29 de Marzo de 2016). Obtenido de <http://manueldelgadocrespo.blogspot.com/p/arduino-mega-2560.html>

MAPRIN. (2016). *MAPRIN*. Obtenido de <https://www.maprinhn.com/post/gravedad-api>

Monk, S. (2017). Programación de Arduino. Introducción a Sketches. En S. Monk, *Programación de Arduino. Introducción a Sketches*. ANAYA MULTIMEDIA.

PDVSA . (s.f.). *PDVSA Gas*. Obtenido de La Refineria : <http://www.pdvs.com/images/pdf/armables/Refineria.pdf>

Refineria de Cartagena S.A.S. (2018). *Informe de Sostenibilidad*. Bogota.

Refineria de Cartagena S.A.S. (2018). *Unidades que conforman la Refineria de Cartagena* . Bogota .

Rodriguez, H., & Sanchez, R. (2009). Monitoreo y diagnostico de sistemas de condensacion en centrales termoelectricas . *Boletin IIE* , 162-167.

Scherz, P., & Monk, S. (2016). *Electronica Practica para Inventores*. En P. Scherz, & S. Monk, *Electronica Practica para Inventores*. McGraw Hill TAB.

7. Anexos

Anexo 1

Código Arduino

```
1
2 int Lanzador = 13;
3 int VALVULA2 = 49;
4 int alarma1 = 10;
5 int alarma2 = 11;
6
7 void setup () {
8
9 Serial.begin (9600);
10 pinMode(VALVULA1, OUTPUT);
11 pinMode(VALVULA2, OUTPUT);
12 pinMode(alarma1, OUTPUT);
13 pinMode(alarma2, OUTPUT);
14 // pinMode (5, SALIDA);
15 }
16
17 void loop () {
18
19 int sensorValue = analogRead (A0);
20 float voltaje = sensorValue * (5.0 / 1024.0);
21 //double calc_NTU;
22 //calc_NTU = - (1120,4*voltaje*voltaje)+(5742,3*voltaje)-4352,9;
23 Serial.print(voltaje);
24 Serial.println(" NTU");
25 delay (100);
26
27 if (voltaje <2)
28 {
29 digitalWrite (VALVULA1, LOW);
30 digitalWrite (VALVULA2, HIGH);
31 digitalWrite (alarma2, HIGH);
32 delay (500);
33 digitalWrite (alarma2, LOW);
34 digitalWrite (alarma1, LOW);
35 Serial.print("BAJO");
36 }
37 else{
38 digitalWrite(VALVULA1, HIGH); // if sensor is HIGH, then turn off the led
39 digitalWrite(VALVULA2, LOW);
40 // digitalWrite (2, LOW);
41 // digitalWrite (3, HIGH);
42 }
43
```

44 }