

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO AL BAJANTE
DEL CONVERTIDOR D-1 PARA LA MEJORA DE LA CIRCULACIÓN DEL
CATALIZADOR EN LA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO
(FCC) DE LA REFINERÍA PUERTO LA CRUZ**

Realizado por:

Roberth Alfonso Fajardo Villasana

Trabajo de grado presentado ante la Universidad de Oriente como requisito
parcial para optar al Título de:

INGENIERO QUÍMICO

Puerto La Cruz, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO AL BAJANTE
DEL CONVERTIDOR D-1 PARA LA MEJORA DE LA CIRCULACIÓN DEL
CATALIZADOR EN LA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO
(FCC) DE LA REFINERÍA PUERTO LA CRUZ**

ASESORES

Ing. Quím. Yraima Salas (M. Sc.)

Asesor académico

Ing. Quím. Sofía Rivero

Asesor industrial

Puerto La Cruz, junio de 2011

UNIVERSIDAD DE ORIENTE
NÚCLEO DE ANZOÁTEGUI
ESCUELA DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



**EVALUACIÓN DEL SUMINISTRO DE AIRE COMPRIMIDO AL BAJANTE
DEL CONVERTIDOR D-1 PARA LA MEJORA DE LA CIRCULACIÓN DEL
CATALIZADOR EN LA UNIDAD DE CRAQUEO CATALÍTICO FLUIDIZADO
(FCC) DE LA REFINERÍA PUERTO LA CRUZ**

JURADO

Ing. Quím. Yraima Salas (M. Sc.)

Asesor académico

Ing. Quím. Yaneis Obando (M. Sc.)

Jurado principal

Ing. Quím. Pacual Rodríguez (M. Sc.)

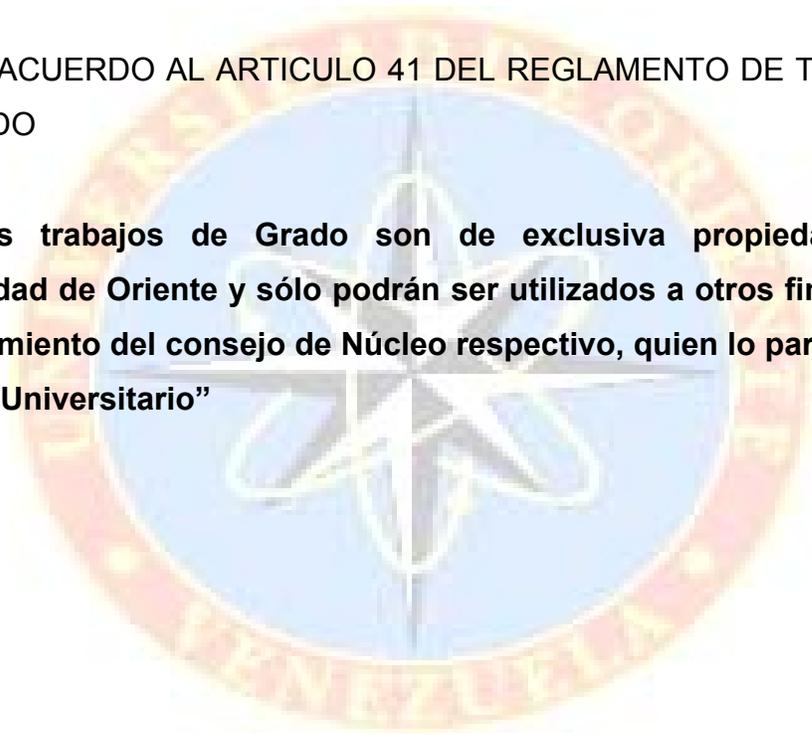
Jurado principal

Puerto La Cruz, junio de 2011

RESOLUCIÓN

DE ACUERDO AL ARTICULO 41 DEL REGLAMENTO DE TRABAJOS DE GRADO

“Los trabajos de Grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de Núcleo respectivo, quien lo participará al Consejo Universitario”



DEDICATORIA

A mi familia, quienes me han apoyado en todos los aspectos de mi vida, y a mi hermosa MADRE, Nereyda, a quien le debo este maravilloso triunfo de mi vida.

Roberth Alfonso Fajardo Villasana

AGRADECIMIENTOS

Ante todo le doy gracias a Dios, nuestro padre celestial, porque sin él no podemos lograr nada en esta vida, gracias Dios te doy desde el fondo de mi corazón.

Le agradezco a mi madre, por todos los sacrificios que realizó para ayudarme a crecer, por cuidarme, por enseñarme la importancia de prepararse académicamente para poder surgir dentro de la sociedad y por haberme llevado ayudado a recorrer este camino, hasta donde Dios le permitió; y aunque ya no está conmigo físicamente, siempre la llevo dentro de mi mente y mi corazón.

Le agradezco a mis hermanos: Kervin, Carlos y Roger; en ellos encontré el amor, cariño y apoyo para seguir adelante y llevar a cabo esta meta que estoy logrando cumplir.

A mi abuela Elida, a mi papa (Carlos), y a mis tías Mónica y Eliana, que siempre me han brindado su apoyo incondicional, y a pesar de que no estamos juntos a menudo, siempre me han ayudado con todo lo que está a su alcance, les agradezco enormemente, los amo.

A mis amigos Jesús (Jet), Antonio (el Negro), Luis (Blanco), Diego, Edgar, Pedro, Kenny, Mauricio (Mou) y Carlos; a mis amigas María Guayava, Aleysa (super), Maribeth, Fergie, Yaneska, Cariana, Ivanna, Gaby, Nahir, Mafe Kammoun, Sonia y Manuela; les doy gracias a todos por hacer que mi vida como estudiante haya sido tan llena de alegría, por brindarme su amistad incondicional y su compañía, y haber compartido tantos momentos felices, los cuales quiero que sigan repitiéndose y disfrutemos por mucho tiempo.

Le agradezco a la Sra. Magalys, Claudia A. y Claudia S., por haberme recibido como un miembro más de su familia, a la Sra. Olivia, a Karhen, a Valeria y al Sr. Jesus, por haberme aceptado en su casa y brindarme su amistad.

A mi tía Gregori y a mi tío Andy, por haberse hecho cargo de mi desde el principio de mi carrera, y desde la partida de mi mamá de este mundo, sin el apoyo de ustedes no hubiese podido lograr la culminación de mi carrera; le agradezco a mi tía Rosalba y a mi abuela Ana, por brindarme su hospitalidad, apoyo y cariño en este viaje que ha sido mi carrera universitaria.

Le doy gracias a mi nueva amiga, Caddy, aunque llevo poco tiempo conociéndola, ha traído mucha alegría a mi vida, te agradezco enormemente la ayuda que me diste para mi presentación, y gracias por brindarme tu amistad y cariño, espero que siga siendo así por mucho tiempo.

Agradezco a mis profesores de la UDO, porque gracias a ellos recibí la excelente formación académica que llevo conmigo; a mi asesora industrial, Sofía Rivero, por haberme dado la oportunidad de desarrollar este trabajo, el cual es parte fundamental para la culminación de mi carrera, y a mi asesora académica, Yraima Salas, por su paciencia y apoyo en la realización de este trabajo.

Por último le doy gracias a la Universidad De Oriente, por haber sido mi segunda casa, mi casa académica, donde me he preparado para ser un gran profesional. Gracias por hacerme Udista, de lo cual estoy muy orgulloso.

Gracias infinitas a todos
De corazón y con sinceridad, gracias.

Roberth Alfonso Fajardo Villasana

RESUMEN

Este trabajo consistió en la evaluación del suministro de aire comprimido al bajante del convertidor de la planta FCC de la refinería de Puerto La Cruz, para ello se llevó a cabo la determinación del perfil de presión y de los flujos de aire a suministrar al bajante, para este cálculo se construyó una hoja de cálculos utilizando ecuaciones empíricas, definidas por PSRI y Raymond Mott; se dimensionó una tubería, para independizar el suministro de aire al bajante, para esto se realizó una simulación con el paquete de simulación Inplant, para la cual se recogieron datos como flujo de aire que se manejaría a través de la tubería e isométricos que representan la trayectoria de la tubería, también se la instrumentación que mide el flujo de aire que va hacia el bajante, haciendo una evaluación del diseño de las placas de orificio con el simulador Pegasys, por último se propuso un sistema de secado, debido a que el aire que llega a la planta, contiene mucha humedad, para ello se determinó el caudal de aire a ser tratado y se seleccionaron los equipos del sistema de secado. Se obtuvo un flujo total de aire seco de 794,956 lb/hr, por otro lado la tubería independiente tendrá 2 tramos, el primero con diámetros de 4 y 3 pulg., y una caída de presión de 0,268 psi, y el segundo con diámetros de 3 y 2 pulg., y una caída de presión de 0,45 psi; en la evaluación de las placas de orificio, se determinó una caída de presión de 72,38 in-H₂O, y por último el caudal a tratar con el sistema de secado es de 176,256 pie³/min.

TABLA DE CONTENIDO

RESOLUCIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vi
RESUMEN.....	viii
TABLA DE CONTENIDO	ix
CAPITULO I.....	1
INTRODUCCIÓN	1
1.1 Presentación de la empresa.....	1
1.1.1 Generalidades sobre la refinería Puerto La Cruz.....	1
1.1.2 Unidades de proceso de la refinería Puerto La Cruz	5
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Objetivos	8
1.3.1 Objetivo general.....	8
1.3.2 Objetivos específicos.....	8
CAPITULO II.....	9
MARCO TEÓRICO	9
2.1 Antecedentes	9
2.2 Descripción del proceso de la unidad FCC	12
2.2.1 Zona de reacción	12
2.2.1.1 Riser (reactor elevador).....	12
2.2.1.2 Desgasificador-Despojador	13
2.2.1.3 Regenerador	13
2.2.1.4 Bajante	14
2.3 Definición de aire comprimido	15
2.4 Usos del aire comprimido en la industria.....	15

2.5 Elementos básicos de un sistema de aire comprimido.....	16
2.6 Necesidades de aire comprimido	17
2.7 Punto de rocío	18
2.7.1 Punto de rocío atmosférico y punto de rocío a presión de trabajo	19
2.8 Deshidratación del aire comprimido	19
2.8.1 Procedimientos o métodos de deshidratación del aire comprimido	21
2.8.1.1 Refrigerador posterior de agua.....	21
2.8.1.2 Refrigerador posterior de aire (aire-aire).....	22
2.8.1.3 Secadores de aire comprimido.....	24
2.8.1.3.1 Secadores frigoríficos	25
2.8.1.3.2 Secadores por adsorción	26
2.9 Tuberías	27
2.9.1 Tubería principal	28
2.9.2 Tuberías secundarias	28
2.9.3 Tuberías de servicio	28
2.10 Caída de presión	29
2.11 Caída de presión en tuberías, válvulas y accesorios.....	29
2.12 Pérdidas en contracciones y ensanchamientos	29
2.12.1 Contracciones (incluyendo pérdidas de entrada).....	30
2.12.2 Ensanchamiento (incluyendo pérdidas de salida).....	30
2.13 Flexibilidad de tuberías.....	30
2.14 Balances de materia.....	31
2.15 Teorema de Bernoulli	32
2.16 Cálculo de caídas de presión para flujo de gases en tuberías	33
2.17 Simulación de procesos	34
2.17.1 Simulador de procesos Inplant	34
2.18 Fluidización	35
2.19 Catalizador FCC.....	37

2.19.1 Zeolita	37
2.19.2 Matriz	37
2.19.3 Aglomerantes y soportes	38
2.20 Propiedades físicas para el cálculo del perfil de presión y de flujos másicos de aire comprimido	38
2.20.1 Densidad esquelética del catalizador	39
2.20.2 Densidad de la emulsión del catalizador	39
2.20.3 Flujo volumétrico de la emulsión de catalizador que fluye a través del bajante	39
2.20.4 Flujo volumétrico de aire que circula junto al catalizador	40
2.20.5 Presión en cada punto de aireación del bajante	41
2.20.6 Cambio de volumen de aire en cada punto de aireación	41
2.20.7 Flujos másicos de aire en cada punto de aireación	42
2.21 Reacciones que se llevan a cabo en el proceso de FCC	43
CAPITULO III	44
DESARROLLO DEL PROYECTO	44
3.1 Cálculo de flujos de aire comprimido y perfil de presión necesarios para una mejor operación del bajante del convertidor de FCC	44
3.1.1 Determinación de la densidad esquelética del catalizador	44
3.1.2 Determinación de la densidad de la emulsión catalizador	45
3.1.3 Determinación del volumen de emulsión de catalizador que fluye a través del bajante	47
3.1.4 Determinación de volumen total de aire que circula con el catalizador	48
3.1.5 Determinación del perfil de presión en el bajante	49
3.1.6 Cálculo de los volúmenes de aire de cada punto de aireación del bajante	51
3.1.7 Cálculo de los flujos másicos de aire en cada punto de aireación del bajante	53

3.1.8 Cálculo del porcentaje de cambio de densidad debido a la compresión dentro del bajante.....	54
3.2 Realización de balances de masa y evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire comprimido hacia el bajante del convertidor de FCC	56
3.2.1 Determinación del flujo total de aire comprimido para suministrar al bajante.....	57
3.2.2 Evaluación hidráulica de la tubería transportadora del aire comprimido que va al bajante del convertidor de FCC	58
3.3 Comprobación de la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire comprimido del bajante del convertidor de FCC.....	62
3.4 Proposición de un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad del aire aportado al catalizador dentro de FCC	63
3.4.1 Determinación del caudal de aire comprimido a tratar con el sistema de secado	64
3.4.2 Selección de las unidades que formaran el sistema de secado para FCC	68
3.4.3 Estimación de costo del sistema de secado propuesto	69
CAPITULO IV.....	71
ANÁLISIS DE RESULTADOSCONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	71
4.1 Análisis de resultados.....	71
4.1.1 Cálculo de flujos de aire comprimido y perfil de presión necesarios para una mejor operación del bajante del convertidor de FCC.....	71
4.1.2 Realización de balances de masa y evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire comprimido hacia el bajante del convertidor de FCC	77
4.1.3 Comprobación de la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire comprimido del bajante del convertidor de FCC	79

4.1.4 Proposición de un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad del aire aportado al catalizador dentro de FCC.....	80
4.2 Conclusiones.....	82
4.2 Recomendaciones.....	84
BIBLIOGRAFÍA.....	85
METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO.....	88

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 Presentación de la empresa

- Petróleos de Venezuela S.A. (PDVSA), creada en 1975, es la corporación estatal de la República Bolivariana de Venezuela que se encarga de la exploración, producción, manufactura, transporte y mercadeo de los hidrocarburos, actuando bajo los lineamientos de los Planes de Desarrollo Nacional y de acuerdo a las políticas, directrices, planes y estrategias para el sector de los hidrocarburos, dictadas por el Ministerio del Poder Popular para la Energía y Petróleo.
- A partir de Enero de 1998 la corporación PDVSA Petróleo y Gas adopta su actual estructura organizativa, dividiéndose en tres grandes empresas funcionales de negocios: PDVSA Exploración y Producción, PDVSA Manufactura y Mercadeo y PDVSA Servicios; responsables de ejecutar la actividad operativa referente a los hidrocarburos. La división de Manufactura y Mercadeo está a cargo de las actividades de refinación de crudos, así como de la manufactura de productos y gas natural, su comercialización y suministro para el mercado nacional e internacional, encontrándose dentro de esta división la refinería Puerto La Cruz.

1.1.1 Generalidades sobre la refinería Puerto La Cruz

La refinería Puerto La Cruz, está ubicada en la costa nororiental del país al este de la ciudad de Puerto La Cruz en el estado Anzoátegui, tiene facilidades de acceso desde el Mar Caribe y está conectada por oleoductos

con los campos de producción. Fue construida por la empresa Venezuela Gulf Refining (VENGREF), entro en operación en el año 1950, inicialmente con la unidad de destilación atmosférica DA-1. Es uno de los centros de procesamiento de crudo más importantes de PDVSA; está conformada por tres áreas operacionales: refinería Puerto la Cruz, El Chaure y San Roque, ubicadas al norte y al centro del estado Anzoátegui, las cuales poseen actualmente una capacidad total de procesamiento de unos 203 mil barriles diarios, de los cuales el 45 % aproximadamente corresponde a crudo pesado. (PDVSA, 2006).

A continuación se presenta una breve descripción de la cronología de la refinería Puerto La Cruz:

1948: la empresa Vengref comienza la construcción de la refinería, cuando aún la escasa población de la época vivía en una aldea de pescadores.

1950: se inicia el funcionamiento de la planta con la unidad de destilación atmosférica número uno (DA-1) para procesar 44 mil barriles diarios de crudo (MBD), en paralelo a la unidad de destilación atmosférica numero tres (DA-3) la cual procesaba 33 MBD de crudo.

1956: se instala la unidad de destilación atmosférica número dos (DA-2), con capacidad para procesar 65 MBD, y la unidad de desintegración catalítica con capacidad de 9 MBD.

1960: se modifica el patrón de refinación a un 40 % de productos blancos y un 60 % de combustible residual, con la puesta en funcionamiento de la unidad de alquilación (2,4 MBD).

1962: la unidad DA-2 comienza a procesar 90 MBD de crudo.

1964: la capacidad de la unidad de desintegración catalítica pasa de 9 a 11 MBD. Se instala la unidad de tratamiento de aminas en la planta de alquilación.

1969: aumenta la capacidad de procesamiento de la DA-1 (60 MBD).

1985: se inicia la construcción de las plantas de control ambiental, la unidad despojadora de aguas agrias, el sistema de tratamiento de gases, la unidad de neutralización de efluentes ácidos y la unidad recuperadora de azufre.

1986: se activan varias estaciones para el monitoreo de localidad del aire dentro de las zonas de influencia de la planta industrial.

1988: entra en servicio el sistema de tratamiento de gases (STG) para remover de los gases combustibles los compuestos sulfurosos que posteriormente son convertidos en azufre líquido elemental.

1993: inicia operaciones el sistema de tratamiento de efluentes de procesos (STEP) con capacidad de procesar 7 mil metros cúbicos de aguas industriales.

1995: se crea la gerencia de seguridad de lo procesos (STP), para lograr identificación, entendimiento y control oportuno de los riesgos en los procesos y evitar la ocurrencia de accidentes.

1999: se incorpora el programa de seguridad basado en la detección y corrección de conducta riesgosas a través de la observación del desempeño del trabajador en la ejecución de tareas.

2000: la capacidad instalada de procesamiento de crudo es de 200 MBD.

2001: se inicia la construcción del proyecto de valorización de corrientes (VALCOR).

2004: entran en operación la unidades de producción de reformado y diesel hidrotratado de bajo azufre (proyecto valcor).



Figura 1.1. Ubicación geográfica de la refinería Puerto la Cruz.

Por su ubicación estratégica, figura 1.1, la refinería Puerto La Cruz cumple con los siguientes roles:

- Suplir la demanda del mercado interno de la región Sur-oriental del país.
- Colocar los productos excedentes en el mercado de exportación.
- Manejar y distribuir la producción de crudos del oriente del país hasta los mercados de exportación y las otras filiales.

1.1.2 Unidades de proceso de la refinería Puerto La Cruz

La refinería de Puerto La Cruz está constituida principalmente por las siguientes unidades de proceso: (PDVSA, 2006).

- Unidades de destilación atmosférica: DA-1, DA-2 y DA-3.
- Unidades de conversión: unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) y unidad de Alquilación.
- Unidad de fraccionamiento de nafta: unidad 051 y unidad 052.
- Unidad de tratamiento Merox.
- Unidad de reformación CCR.
- Unidad de hidrotratamiento de nafta.
- Unidad de hidrotratamiento de diesel.
- Unidades ambientales, involucran 18 sistemas de servicios industriales de ámbito ambiental.

Entre los productos más importantes que se obtienen en las distintas unidades de proceso de la refinería Puerto la Cruz, se pueden nombrar los siguientes:

- 1) Unidades de destilación atmosférica: gases no condensables, naftas y gasolinas, jet, diesel pesado y liviano, gasóleo pesado, liviano y residual atmosféricos.
- 2) Unidades de conversión: nafta catalítica, olefinas y alquilatos.
- 3) Unidades de fraccionamiento de nafta: nafta liviana y nafta pesada.
- 4) Unidad tratamiento Merox: se remueven sulfuro de hidrogeno y mercaptanos contenidos en las gasolinas y el jet.
- 5) Unidad de reformación CCR: reformados con un octanaje RON en un rango de 95-102 octanos.
- 6) Unidades de hidrotratamiento de nafta y diesel: en estas se descomponen los componentes azufrados, nitrogenados y halogenados, se saturan las olefinas y se remueven los metales presentes en las corrientes de hidrocarburos tratadas en dichas plantas (nafta y diesel).

1.2 Planteamiento del problema

El suministro de aire comprimido al bajante de la unidad FCC presenta alta humedad, además de variaciones en el cabezal de presión principal. Estas deficiencias afectan la circulación del catalizador a través del convertidor; la alta humedad suele producir una aglomeración del catalizador, y este tiende a acumularse en el bajante, esto es provocado debido a que el catalizador es higroscópico y absorbe mucha de la humedad que posee el aire comprimido.

En lo que respecta a las variaciones en el cabezal de presión principal, estas variaciones introducen perturbaciones del flujo de aire que va a las boquillas, lo cual impacta la circulación del catalizador en el bajante, debido a que el catalizador de FCC tiene solo un rango estrecho de condiciones para

poder fluir bien, desde el inicio hasta el final de la operación del bajante, este debe tener un punto incipiente de burbujeo. Si se inyecta un exceso de gas (aire) al necesario en el bajante, el catalizador fluidizado tendrá tendencia a generar burbujas, al formarse dichas burbujas, estas actúan como obstáculos que el catalizador debe rodear para poder fluir a lo largo del bajante.

Por lo antes expuesto se planteó calcular los flujos y el perfil de presión necesarios que permitan una eficiente circulación del catalizador a través del bajante del convertidor, para determinar estos flujos, se tomó como base una hoja de cálculo, la cual contiene ecuaciones experimentales referidas a fluidización y transporte de sólidos, también se realizaron balances de materia y una evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire que va hacia el bajante, para dichos balances se contó con el paquete de simulación Inplant para determinar las caídas de presión, diámetro, longitud de tuberías, válvulas y accesorios que se requieran en dicha línea; también se comprobó que la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire, sea la correcta para los flujos que fueron determinados como necesarios para ser suministrados al bajante; y por último se propuso un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad contenida en el aire, para lo cual se estudiaron los equipos necesarios que conforman dicho sistema.

Todo esto conllevó a una evaluación del servicio de aire comprimido la cual permitió sugerir posibles cambios en el suministro del aire comprimido que permitan una operación confiable, segura y flexible, tanto del bajante de catalizador, así como del convertidor D-1, para evitar bajas y problemas en la producción de la planta.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar el suministro de aire comprimido al bajante del convertidor D-1, para la mejora de la circulación del catalizador en la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de la refinería Puerto la Cruz.

1.3.2 Objetivos específicos

- 1) Calcular flujos de aire comprimido y perfil de presión necesarios para una mejor operación del bajante del convertidor de FCC.
- 2) Realizar balances de masa y evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire comprimido hacia el bajante del convertidor de FCC.
- 3) Comprobar la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire comprimido al bajante del convertidor de FCC.
- 4) Proponer un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad del aire aportado al catalizador dentro de FCC.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes

Moya (2010), realizó el estudio “Determinación de los límites de operación segura en los equipos del sistema de generación de aire comprimido de la unidad de servicios industriales de la refinería San Roque”. Para la realización de este estudio se realizó una evaluación a través de observación directa, comparación del funcionamiento del sistema con la información bibliográfica, simulación del sistema y entrevistas no estructuradas, a partir de la cual se detectaron fallas como contaminación de aceite en el aire de instrumento, deficiencias en el drenaje que poseen los equipos y alta humedad del aire de instrumento con presencia de condensado aguas abajo del sistema.

De acuerdo a esta evaluación, se propuso la instalación de un sistema de filtrado, mantenimiento y revisión de lo equipos principales, así como la reactivación del secador auxiliar, para garantizar un aire de calidad libre de humedad y aceite, para un eficiente funcionamiento de los equipos que conforman el sistema de aire comprimido.

Hernández (2010), realizó el estudio “Diseño de un sistema de secado de aire comprimido del separador de cuarta etapa de la unidad FCC”; en el mencionado estudio determinó los niveles y concentraciones máximas (aceite, agua, sólidos) que debe poseer el aire comprimido que alimentará al proyecto RECA (Reducción de emisiones de catalizador a la atmósfera), dichas características se establecieron según la norma ISO 8573.1,

escogiéndose un arreglo 1:2:1 (aceite, agua, sólidos) a partir de la norma antes mencionada.

Para llevar a cabo este estudio, se realizó un balance de masa para determinar el flujo y caudal a la entrada del cabezal de aire y a la salida de la unidad de secado, además se definieron las condiciones de diseño mecánico de temperatura y presión, basado en las normas PDVSA, para realizar el estudio hidráulico de la unidad de secado y así obtener la caída de presión conveniente en dicha unidad; proponiendo 3 sistemas de secado de los cuales seleccionó un sistema de deshidratación con secador desecante regenerado por calentamiento interno.

La Rosa (2009), en su estudio “Evaluación del sistema de bombeo de agua de lavado de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de la refinería Puerto La Cruz”, determinó las mejoras necesarias para el correcto funcionamiento del sistema de bombeo bajo las condiciones actuales de operación, tomando en cuenta la adaptaciones necesarias en el sistema para el manejo del incremento de flujo deseado en el futuro.

Para lo antes mencionado, se realizó un historial de fallas recurrentes en el sistema para hacer un diagnostico inicial del mismo; luego se realizó una evaluación hidráulica a través del paquete de simulación Inplant, determinándose que las tuberías podían soportar un incremento de agua en el futuro, además se determino que la válvula de control del flujo de agua estaba sobredimensionada. A partir de los resultados obtenidos se propuso la sustitución de la válvula actual, y la colocación de una nueva bomba con recirculación que sustituyera a la actual.

Bachour (1997), en su estudio “Evaluación y mejoras de la operación y mantenimiento del sistema de aire de instrumento de la planta de fraccionamiento de Jose”, describió el funcionamiento del sistema de aire de instrumento de la planta de fraccionamiento de líquidos del gas natural (LGN), haciendo un reconocimiento de los equipos que conforman dicho sistema; determino la capacidad actual de aire que se produce en la planta así como el consumo real y el consumo de energía en exceso del mismo debido a fugas existentes en la planta.

Para la determinación de lo anterior se realizo una actualización de las condiciones de operación de los compresores, realizando además cálculos del caudal requerido y del caudal consumido de aire con un medidor de flujo del tipo placa de orificio; a partir de los análisis realizados implanto un plan de mantenimiento predictivo de los compresores fijando en este los parámetros a controlar en el sistema de aire.

En este trabajo se planteó proponer alternativas que permitan la disminución de humedad del aire, en semejanza al trabajo de Moya que propuso la reactivación de un sistema de secado para garantizar la calidad del aire en el sistema de aire de servicio e instrumentación; además se realizaron balances de masa para conocer los flujos actuales con que trabaja el bajante, para ello se tomó en cuenta los balances de masa, realizados por Hernández, para determinar el consumo de aire comprimido del separador de cuarta etapa del proyecto RECA. Por otro lado en esta evaluación se realizó una evaluación hidráulica del suministro de aire que llega al bajante del convertidor D-1, para ello se tomó en cuenta el trabajo de La Rosa quien en su estudio realizo la evaluación hidráulica del sistema de bombeo de agua de lavado de la unidad FCC.

2.2 Descripción del proceso de la unidad FCC

La unidad de FCC consta, principalmente, de 4 etapas las cuales son: tren de precalentamiento, zona de reacción, fraccionamiento y sistema de recuperación de gases. En la figura 2.1 se muestra el diagrama de proceso de la unidad FCC. (PDVSA, 2001).

2.2.1 Zona de reacción

El convertidor D-1 de la unidad FCC es un modelo de orthoflow B, con riser (reactor elevador) externo diseñado por M.W Kellog que está conformado por cuatro partes importantes en las cuales se lleva a cabo el proceso de conversión. Estas parte son: riser (reactor elevador), desgasificador-despojador, regenerador y bajante (anexo A). A continuación se explica brevemente el proceso llevado a cabo en la zona de reacción, ya que esta zona es la que comprende el estudio realizado en este proyecto:

2.2.1.1 Riser (reactor elevador)

Es un tubo elevador donde se pone en contacto el catalizador regenerado a altas temperaturas (990 °F aproximadamente) con los hidrocarburos para que ocurran las reacciones de craqueo, la mezcla catalizador-hidrocarburo asciende a través del reactor hasta llegar al desgasificador. La carga se suministra con vapor de dispersión (vapor de 190 libras) en seis boquillas igualmente espaciadas 60° alrededor de la circunferencia del riser; un poco más arriba de las boquillas de alimentación al reactor, se encuentra una boquilla ranurada que introduce el reciclo de slurry (hidrocarburo con finos de catalizador), el cual retorna los finos recuperados en el fondo de la fraccionadora.

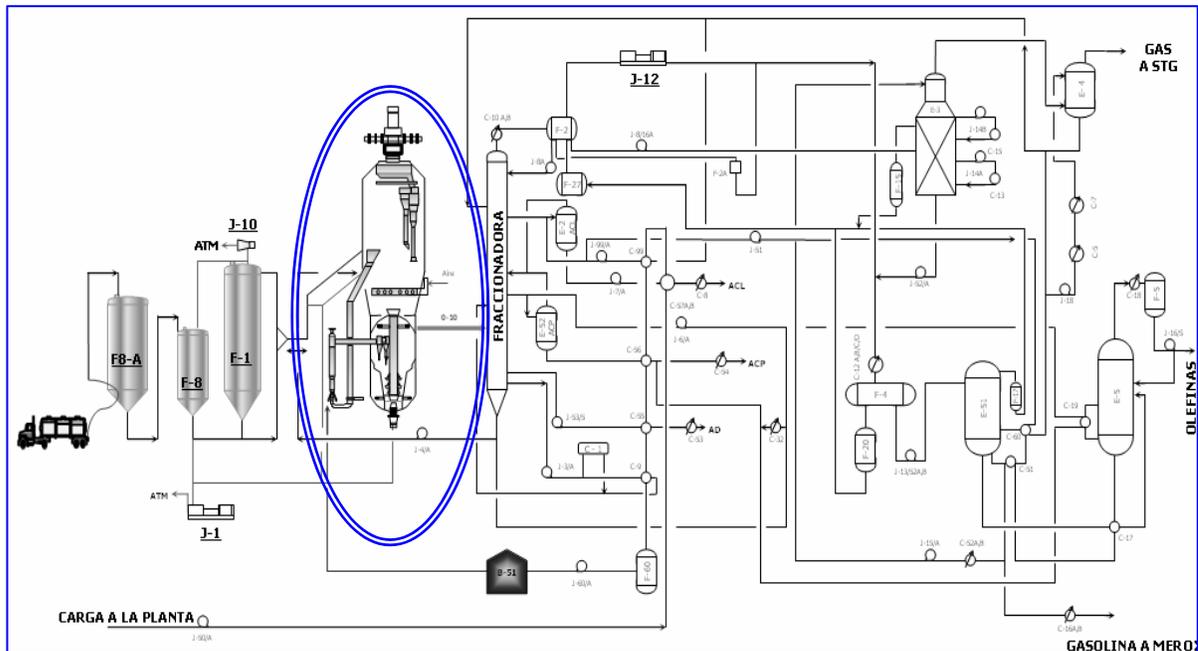


Figura 2.1. Diagrama de proceso de la unidad FCC.

2.2.1.2 Desgasificador-Despojador

Los productos de salida del reactor fluyen directamente hacia cuatro ciclones, donde se separan los vapores de reacción y el catalizador. El catalizador luego pasa a la parte baja de la sección para despojarse de los hidrocarburos entrampados con vapor de 190 libras para posteriormente ascender por un tubo, mediante aire transportador hacia el regenerador. El flujo de catalizador es controlado por una válvula de tapón identificada como PV-2. Los vapores de agua e hidrocarburos del desgasificador-despojador pasan a la fraccionadora principal a través de una línea denominada 010.

2.2.1.3 Regenerador

Es la parte posterior del convertidor en donde el catalizador coquizado se expone a un flujo de aire (suministrado por un soplador identificado como

J-1, quien también suministra el aire portador) para quemar el coque depositado en sus sitios activos y reactivarlos, convirtiéndolo en dióxido de carbono en su mayor parte, el calor de la reacción (combustión completa del coque), por ser exotérmica, calienta el lecho del regenerador hasta unos 1.300 °F aproximadamente. El aire es introducido a través de un ducto dotado de una serie de ramificaciones que poseen boquillas de inyección con el fin de distribuir el aire en toda la superficie del catalizador para facilitar la quema del coque.

Debido a la velocidad de inyección del aire y a los gases de combustión, el catalizador, por contener gran cantidad de finos, se esparce por todo el volumen del regenerador, sin embargo esta sección contiene ocho ciclones, cuatro primarios y cuatro secundarios, los cuales recolectan el 99 % del catalizador esparcido retornándolo al lecho del regenerador para fluir nuevamente a reacción. La presión en el regenerador es regulada por una válvula de doble disco (identificada como SLV-1) que se encuentra ubicada en la parte superior del regenerador, a través de esta fluyen a la chimenea los gases de combustión producidos por la quema del coque del catalizador.

2.2.1.4 Bajante

El regenerador se comunica con el reactor mediante el bajante en donde el catalizador de la fase densa pasa a través de un captador en forma embudo llamado hopper, y comienza a descender hasta llegar nuevamente al reactor riser. En la parte baja del bajante se encuentra una válvula deslizante de un solo disco, identificada como SLV-2, que controla la temperatura de reacción regulando la cantidad de catalizador que pasa al reactor. Entre el hopper del bajante y la válvula SLV-2 se inyecta aire comprimido a través de

doce boquillas (la boquilla N° 1 ubicada en el tope del bajante y la boquilla N° 12 en el fondo de es este mismo) espaciadas equidistantes a lo largo del bajante para mantener el catalizador en circulación a través del mismo; después de la válvula SLV-2 se observa una válvula no mecánica identificada como “J” del riser, en la cual se inyecta vapor de media (190 psi) para impulsar el catalizador al riser.

2.3 Definición de aire comprimido

El aire ambiente es, por así decirlo, la materia prima en los sistemas de aire comprimido. Está compuesto básicamente por nitrógeno (78 %), oxígeno (21 %), argón (0,9 %) y trazas (0,1 %) de dióxido de carbono, neón y kriptón. El aire comprimido no es otra cosa más que el mismo aire ambiente atrapado en un mecanismo donde se aumenta su presión (debido a la reducción de volumen) a través de un proceso mecánico denominado compresión. (CONAE, 2002).

2.4 Usos del aire comprimido en la industria

En la industria el aire comprimido tiene varios usos, a continuación se presenta en la tabla 2.1, algunos de los usos más importantes: (CONAE, 2002).

Tabla 2.1. Distinto uso que recibe el aire comprimido en la industria.

Usos del aire comprimido	Descripción
Transmisión de potencia	Es de vital importancia para el funcionamiento de las herramientas neumáticas.
Medio de transporte	El aire también es empleado como medio de transporte de elementos y partículas.
Reacción	El aire facilita una reacción química como el vulcanizado.
Aire de combustión	Es el aire que se provee para una combustión, como se tiene en el caso del regenerador que se encuentra en el convertidor D-1 de la FCC de la Refinería Puerto La Cruz, donde emplean el aire como elemento esencial para la quema del coque depositado en el catalizador.

2.5 Elementos básicos de un sistema de aire comprimido

Los principales elementos que componen un sistema de aire comprimido son los siguientes: (Pinaya, 2008).

a) Filtro del compresor: este dispositivo es utilizado para eliminar las impurezas del aire antes de la compresión con el fin de proteger al compresor y evitar el ingreso de contaminantes al sistema.

b) Compresor: es el encargado de convertir la energía mecánica en energía neumática comprimiendo el aire. La conexión del compresor a la red debe ser flexible para evitar la transmisión de vibraciones debidas al funcionamiento del mismo.

c) Depósito: normalmente suele ir integrado dentro del compresor como una parte más de la unidad que proporciona aire comprimido. De hecho, los compresores suelen trabajar de forma discontinua, arrancando cuando la cantidad de aire que queda almacenada en el compresor es baja. Además el depósito sirve para amortiguar las fluctuaciones de caudal que vienen del compresor y evitar que se transmitan a los puntos de consumo.

d) Postenfriador y separador de humedad: el postenfriador es el encargado de eliminar gran parte del agua que se encuentra naturalmente dentro del aire en forma de humedad, mientras el separador de humedad es el elemento encargado de retirar la condensación que ha precipitado desde el enfriador.

e) Tanque de almacenamiento: almacena energía neumática y permite el asentamiento de partículas y humedad.

f) Líneas de suministro: puesto que el compresor, el depósito y los enfriadores suelen situarse en una sala, es preciso diseñar la distribución en planta de las líneas de suministro desde el compresor a los puntos de consumo. Se procura que la distribución minimice en la medida de lo posible las longitudes de las tuberías desde el compresor al punto más alejado.

- g)** Filtros de línea: se encargan de purificar el aire hasta una calidad adecuada para el promedio de aplicaciones conectadas a la red.
- h)** Secadores: se utilizan para aplicaciones que requieren un aire supremamente seco.
- i)** Puntos de consumo en los puntos de consumo es habitual colocar un filtro final así como un regulador de presión que acondicione finalmente el suministro de aire comprimido.

2.6 Necesidades de aire comprimido

Las necesidades de aire comprimido están definidas por tres factores determinantes:

1) La calidad, 2) la cantidad y 3) el nivel de presión requerido por los usuarios finales en una planta. La calidad está determinada por la cantidad de humedad y contaminación (partículas sólidas y aceite) que permitirá la aplicación final del mismo. En la industria existen 3 niveles en función de su aplicación, estos se describen a continuación: (CONAE, 2002).

- a)** Aire de planta: aire que puedes estar relativamente sucio y húmedo, por sus características, es empleado en herramientas neumáticas, y para usos generales.
- b)** Aire para instrumentos: aire con cantidad de humedad y suciedad moderadas; por lo que es utilizado en laboratorios, sistemas de aplicación de pinturas por rocío, controles de clima, etc.
- c)** Aire de proceso: aire con muy poca humedad y casi nula suciedad, por sus características es utilizado en la industria química, alimenticia, farmacéutica, y electrónica.

La capacidad del sistema de aire comprimido se determina sumando el consumo promedio requerido por cada una de las herramientas y por la operación de cada proceso en toda la planta, tomando en cuenta factores de carga de cada uno de estos. Todo sistema puede presentar picos de demanda que se pueden satisfacer a través de tanque de almacenamiento ó tanque pulmón; estos serán más efectivos si se localizan lo más cerca posible de donde se requieran estas altas demandas. El nivel de presión del sistema debe ser definido a través de los requerimientos de presión de cada una de las herramientas, mientras que las presiones requeridas por los diferentes procesos deben ser especificadas por el ingeniero de proceso. Con ambos requerimientos se pueden definir el nivel de presión del sistema. No se debe olvidar, para la definición del nivel de presión del sistema, se deben tomar en cuenta las perdidas del sistema a través de las tuberías y accesorios de los equipos adicionales como secadores, separadores, etc.

2.7 Punto de rocío

El punto de rocío es la manera en que se señala el grado de humedad que contiene un aire comprimido; éste determina una temperatura a la cual el aire llega al punto de saturación, es decir, el aire se convierte en aire saturado.

Mientras la temperatura del aire se mantenga por encima del punto de rocío no se producirán condensaciones; en cambio si ocurre un enfriamiento por debajo del punto de rocío, el vapor contenido en el aire comenzara a condensar en forma de agua líquida. (DANTECHNIQUE, 2009)

2.7.1 Punto de rocío atmosférico y punto de rocío a presión de trabajo

El contenido de humedad del aire o de un gas comprimido se expresa normalmente por su punto de rocío (PR), en °C, esto es, la temperatura a la que tendría que enfriarse el aire o gas para que el vapor de agua residual contenido en el condense.

Los fabricantes de secadores para aire comprimido, para especificar la eficacia de un secador usan la terminología del PR alcanzado con él para describir la sequedad del aire. Pueden dar el PR a presión atmosférica (a 760 mmHg) o el referido a la presión de trabajo, denominado punto de rocío a presión (PRP). Este último es más alto y el que realmente se debe tener en cuenta, pues el aire comprimido se emplea a presión de trabajo; por lo tanto es a esta presión cuando pueden producirse condensaciones perjudiciales en las conducciones y en los sitios de consumo.

2.8 Deshidratación del aire comprimido

En los procesos de compresión, el aire atmosférico aspirado por el compresor, con su estado higrométrico correspondiente, pasará totalmente a través del ciclo de compresión e irá a condensarse, por enfriamiento ambiental, en las conducciones y puestos de utilización.

Ello es debido a que la compresión del aire supone una elevación importante de su temperatura, que es función de la relación de compresión, y un aumento de presión (paso de presión atmosférica a presión de trabajo). Por consiguiente, el aire atmosférico que va a ser comprimido no podrá saturarse en las cámaras de compresión por estar éstas a altas temperaturas

y, consecuentemente, no habrá condensación durante el proceso de compresión.

Por otro lado, como el aire comprimido sale del compresor a una presión de trabajo constante (6 / 7 bar), la cual permanece constante si se desprecian las pérdidas de carga que origina todo el sistema de distribución de aire, podemos decir que la evolución de la humedad del aire comprimido es consecuente con la variación de temperatura. Como el aire comprimido, una vez que sale del compresor, va recorriendo un camino hasta su utilización, con temperaturas que oscilan entre 125 °C y 180 °C para compresores de pistón y de unos 70 – 80 °C para compresores rotativos, hemos de pensar que hay un cambio continuo de calorías con el medio ambiente y, por lo tanto, la temperatura del aire comprimido puede descender hasta un valor próximo a la temperatura ambiente.

Es aquí, al enfriarse, donde las condensaciones se producen en forma de gotas de agua que son arrastradas por el flujo del aire en su marcha hacia los puntos de utilización, pues en una red de aire comprimido, la temperatura del aire que circula corresponde a su punto de rocío, puesto que está saturado, y una variación de esta temperatura en menos producirá condensaciones. Por el contrario, una variación de temperatura en más, recalentará el aire pero mantendrá fijo el punto de rocío. En consecuencia, para que en una instalación de aire comprimido no aparezca ninguna cantidad de agua, el aire comprimido, antes de ser distribuido a la red, debe haberse secado hasta un punto de rocío que sea inferior a la temperatura del aire ambiente en donde se utiliza. (CABESTI S.L.R., 2008).

2.8.1 Procedimientos o métodos de deshidratación del aire comprimido

Para la deshidratación del aire comprimido, industrialmente, se dispone de diversos métodos, dependiendo el empleo de cada uno de ellos de la calidad que se desea lograr en el aire comprimido, entre los principales métodos tenemos: (CABESTI S.L.R., 2008)

- Refrigerador posterior de agua.
- Refrigerador posterior de aire.
- Secadores:
 - Secador frigorífico.
 - Deshidratadores por adsorción.

2.8.1.1 Refrigerador posterior de agua

El más usual de los elementos existentes para disminuir el contenido de humedad en el aire comprimido es el refrigerador posterior, que se coloca inmediatamente después del compresor, estando preparados para condensar entre el 50/70 % de toda la humedad aspirada por el compresor. Los refrigeradores posteriores, o intercambiadores de calor, reducen la temperatura del aire hasta unos 25 °C y emplean al agua como agente refrigerante.

Los refrigeradores por agua están básicamente constituidos por un haz de tubos por cuyo interior pasa el aire comprimido, figura 2.2. El agua de enfriamiento circula a contracorriente del aire comprimido por el exterior del haz tubular. En su camino, el aire comprimido se dirige hacia el separador,

que va incorporado en el refrigerador y que tiene por finalidad eliminar el agua y el aceite condensados durante la refrigeración.

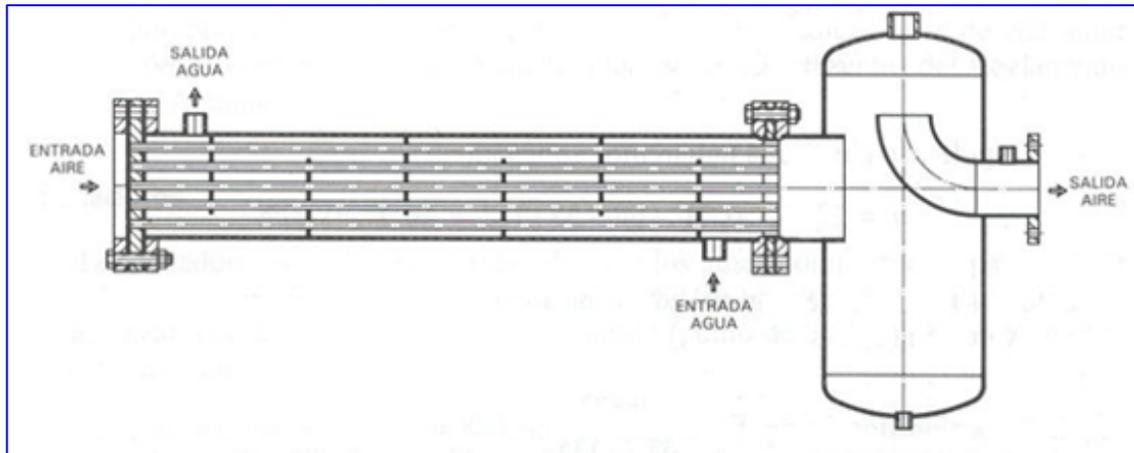


Figura 2.2. Esquema de un refrigerador posterior de agua, modelo horizontal.

2.8.1.2 Refrigerador posterior de aire (aire-aire)

El refrigerador posterior de aire es un intercambiador de batería aleteada que aprovecha el aire ambiente como fluido refrigerante, figura 2.3. Es preceptivo colocarlo a la salida del aire en el compresor, igual que los refrigerados por agua; dispone como elemento de refrigeración el aire producido por un grupo motor-ventilador. Se aplican cuando el agua es escasa o no resulta fácil llevarla hasta el mismo refrigerador, o cuando, por su precio, sería antieconómica una refrigeración por agua.

El refrigerador de aire está constituido por una batería de tubos de aletas por cuyo interior circula el aire comprimido, el cual viene obligado a efectuar un largo recorrido a través del haz tubular para conseguir el intercambio térmico aire/aire. La refrigeración forzada del radiador se logra

por la acción de un electroventilador axial que ejecuta el soplado para conseguir el barrido del aire caliente que despiden el intercambiador mediante la entrada de aire atmosférico.

Para alcanzar una buena eficacia en este sistema, es absolutamente necesario que el aire aspirado por el ventilador sea lo más frío que se pueda, siendo conveniente llevar a cabo una abertura en la sala de compresores, cerca y enfrente del refrigerador, para que reciba directamente el aire fresco del exterior.

Al igual que en los refrigeradores de agua, la temperatura de salida del aire comprimido del refrigerador es, aproximadamente, 10 °C superior a la temperatura de entrada del aire de refrigeración. Su mejor rendimiento se obtiene cuando las condiciones ambientales se acercan a los 15 °C de temperatura y la humedad relativa se mantenga entre el 50 % y 70 %, como máximo. Los refrigeradores posteriores de aire-aire están dotados de separador de condensados. Para eliminar éstos puede hacerse por medio de una purga manual o automática. El refrigerador es ambidextro, lo que permite efectuar las conexiones de entrada y salida a derecha o a izquierda del aparato indistintamente, situando el separador de condensados en la salida del aire comprimido.

El mantenimiento es muy sencillo: según las condiciones ambientales, las aletas de la batería se recubrirán progresivamente de polvo, grasas y otras impurezas, por lo que es recomendable proceder a su limpieza periódica mediante chorro de aire, puesto que la eficacia de refrigeración disminuye a medida que se ensucia la batería.



Figura 2.3. Refrigerador posterior aire-aire.

2.8.1.3 Secadores de aire comprimido

Los deshidratadores o secadores, son equipos destinados a tratar el aire y los gases comprimidos, para reducir en ellos su contenido de vapor de agua; así, si sufren un posterior enfriamiento, hasta alcanzar una determinada temperatura límite (punto de rocío), no presenten condensación alguna.

Para su correcto funcionamiento y, en general, para contribuir a una depuración efectiva del fluido comprimido, deben ir acompañados de los siguientes elementos:

- a)** Un elemento corrector de la temperatura del fluido comprimido a tratar para que éste, normalmente, no supere los 25 a 30 °C a su admisión al deshidratador. Por lo general, cubre esta misión el refrigerador posterior que se coloca a la salida del compresor. Cuando no se disponga del mismo, o fuera manifiestamente insuficiente su capacidad de enfriamiento, deberá corregirse tal deficiencia.

- b) En los secadores frigoríficos se recomienda un separador previo como elemento protector de su suciedad y posfiltros que reduzcan las partículas sólidas y el contenido de aceite.
- c) En los deshidratadores por adsorción es indispensable disponer de un prefiltro coalescente que tenga un gran poder de separación de aerosoles de aceite y agua en fase líquida para preservar la vida útil del adsorbente. Asimismo es conveniente agregar un posfiltro antipolvo cuya finalidad es la de retener las partículas sólidas que puedan desprenderse del material desecante.

Para cubrir adecuadamente todas las exigencias técnicas de utilización del aire comprimido, se han creado diversas modalidades de secadores, que conviene conocer en sus particulares características, pues si bien cada modalidad, por su concepción técnica y diseño, responde plenamente a unas determinadas condiciones de servicio, tanto funcionales como económicas, al ser empleado en circunstancias distintas, deja de ser recomendable o es francamente inadecuado.

Es importante percatarse de la diferencia entre una instalación convencional de aire comprimido (la que lleva únicamente refrigerador posterior, pulmón y filtro separador o cualquier otro equipo protector), y una instalación de aire comprimido con secador, siendo los deshidratadores por adsorción los de mayor eficacia y rendimiento.

Los secadores pueden ser frigoríficos o por adsorción.

2.8.1.3.1 Secadores frigoríficos

Estos secadores actúan a base de medios frigoríficos y tienen como meta reducir la humedad en el aire comprimido, por enfriamiento del mismo,

hasta la mínima temperatura funcionalmente posible, que oscila alrededor de +3 °C y +4 °C, a la presión de servicio (punto de rocío a presión, PRP). Figura 2.4. Son equipos que aúnan refrigerador posterior aire-aire y secador frigorífico en un solo bloque, permitiendo un salto térmico de 127 °C entre la temperatura de entrada del aire comprimido (130 °C) y la temperatura de salida del mismo (+3 °C PRP), con una temperatura ambiente de 25 °C. Están adaptados para trabajar con variaciones de caudal del 0 al 100 % del nominal.

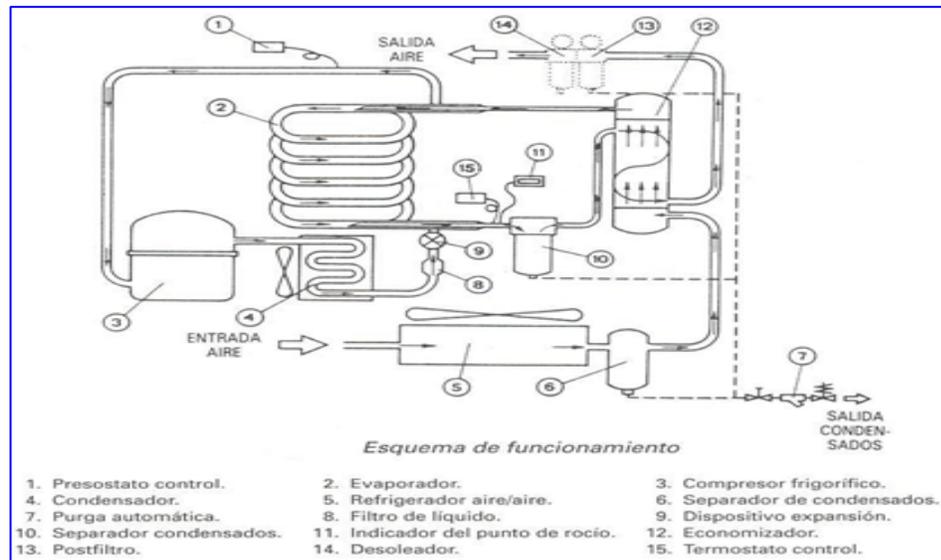


Figura 2.4. Esquema de funcionamiento de un secador frigorífico.

2.8.1.3.2 Secadores por adsorción

Responden a la denominación de deshidratadores por adsorción aquellos que realizan el secado por medio de un adsorbente sólido de naturaleza regenerable, que retiene, en un ciclo de adsorción, el vapor de agua contenido en el fluido comprimido, eliminando este vapor mediante un segundo ciclo de desadsorción, al ser sometido dicho adsorbente a un adecuado proceso de regeneración. Figura 2.5.

Los secadores por adsorción están compuestos por dos torres gemelas de adsorción las cuales se encuentran llenas del material adsorbente, el cual tiene la capacidad de retener la humedad durante la fase de operación y de liberarla durante la fase de regeneración. Mientras el gas a secar atraviesa una de las dos torres, el vapor de agua que contiene es retenido en el interno del material adsorbente. Al mismo tiempo el material adsorbente de la otra torre, que se encuentra saturado por el vapor de agua retenido en el ciclo previo, es regenerado.



Figura 2.5. Ejemplo de secadores por adsorción.

2.9 Tuberías

Son elementos de diferentes materiales que cumplen la función de permitir el transporte de los fluidos de un punto a otro, además son las conexiones entre procesos, es decir, la salida de un proceso se encadena con la entrada de otro, la cual presenta una sección transversal y una longitud determinada. Las tuberías en un sistema de aire comprimido constan de: (Quiroz, 2003).

2.9.1 Tubería principal

Para este caso en particular, donde se maneja un flujo de aire, es la línea que sale del conjunto de compresores y conduce todo el aire que consume la planta. Debe tener la mayor sección para evitar pérdidas de presión y prever futuras ampliaciones de la red con su consecuente aumento de caudal. La velocidad máxima del aire en la tubería principal debe ser aproximadamente 8 m/s.

2.9.2 Tuberías secundarias

Se derivan de la tubería principal para conectarse con las tuberías de servicio. El caudal que por allí circula es el asociado a los elementos alimentados exclusivamente por esta tubería. También en su diseño se debe prever posibles ampliaciones en el futuro. La velocidad del aire en ellas no debe superar los 8 m/s.

2.9.3 Tuberías de servicio

Son las que surten en sí a los equipos neumáticos. En sus extremos tienen conectores rápidos y sobre ellas se ubican las unidades de mantenimiento. Debe procurarse no sobrepasar de tres el número de equipos alimentados por una tubería de servicio. Con el fin de evitar obstrucciones se recomiendan diámetros mayores de ½" en la tubería. Puesto que generalmente son segmentos cortos las pérdidas son bajas y por lo tanto la velocidad del aire en las tuberías de servicio puede llegar hasta 15 m/s.

2.10 Caída de presión

Es un término utilizado para caracterizar la disminución de presión del aire desde la descarga del compresor hasta el punto final de uso. Esta ocurre cuando el aire comprimido viaja, primero, a través del equipo de acondicionamiento (secadores, filtros, etc.) y, segundo, cuando viaja a través de todo el sistema de distribución (tubería, accesorios, etc.) (CONAE, 2002).

2.11 Caída de presión en tuberías, válvulas y accesorios

En tuberías se dan las caídas de presión debido a la pérdida de energía producida por el rozamiento de las partículas del fluido entre sí, y al rozamiento con las paredes de la tubería; por otro lado, el fluido al llevar un desplazamiento uniforme a través de una tubería, la configuración de flujo indicada por la distribución de velocidad sobre el diámetro de la tubería adopta una forma característica, por lo que el fluido al encontrarse con cualquier obstáculo en la tubería, como válvulas y accesorios, se altera la configuración características del flujo provocando una pérdida de energía y por consiguiente una caída de presión adicional. (PDVSA, 1994).

2.12 Pérdidas en contracciones y ensanchamientos

Cuando la sección transversal de una tubería cambia de tamaño ocurre un cambio total de presión causado por dos defectos diferentes:

1) Un cambio de presión resulta de la aceleración o desaceleración del fluido, es decir, el resultado de un cambio en la energía cinética. Si el fluido es acelerado por una reducción en el área de flujo, se requiere una pérdida positiva de presión para suministrar la fuerza necesaria para la aceleración. Si el fluido es desacelerado debido a un ensanchamiento en el área de flujo

se experimenta una pérdida negativa de presión, es decir, un aumento de presión.

2) En las contracciones y ensanchamientos ocurre siempre un cambio adicional de presión, siempre una pérdida de presión, motivado por las pérdidas de entrada y salida respectivas debidas a la fricción dentro del fluido. (PDVSA, 1994).

2.12.1 Contracciones (incluyendo pérdidas de entrada)

En una contracción el efecto combinado de la pérdida de aceleración o cinética y la pérdida friccional de entrada siempre resulta en una caída de presión neta. (PDVSA, 1994).

2.12.2 Ensanchamiento (incluyendo pérdidas de salida)

En un ensanchamiento, el resultado neto de los efectos cinéticos y friccionales combinados puede ser una caída o ganancia de presión, dependiendo de si las pérdidas de salida friccional son mayores o menores que las fuerzas de inercia debidas a una desaceleración en la velocidad. (PDVSA, 1994).

2.13 Flexibilidad de tuberías

La mayoría de los sistemas de tubería son restringidos contra el libre movimiento térmico de los recipientes, intercambiadores, compresores, bombas y otros equipos que son interconectados por las tuberías. Este movimiento térmico debe ser absorbido dentro de este sistema a través de lazos o juntas de expansión, los cuales son usados para dar flexibilidad al sistema de tubería. El uso de las juntas de expansión lleva a incrementar las

longitudes de las tuberías y deberá ser considerado en los cálculos de flujos. La flexibilidad de la tubería, para proveer el movimiento térmico, debe ser adecuada para cumplir dos propósitos: (PDVSA, 1996).

- a) Mantener las reacciones de las tuberías conectada a equipos entro de los límites aceptables.
- b) Mantener el esfuerzo flexor en la tubería misma dentro de un rango tal que sean evitadas las fallas directas o fallas por fatigas y las fugas en uniones.

2.14 Balances de materia

Un balance de materia no es más que una contabilización de material. Para realizar estos balances en un proceso dado debemos definir las fronteras de un sistema, siendo el sistema una porción arbitraria o la totalidad del proceso establecido para su análisis. En general no es de interés los detalles internos, sino sólo el paso de materiales a través de las fronteras del volumen y el cambio global de materiales dentro del sistema. (Himmelblau, 1997). La ecuación general para los balances de masa es la siguiente:

$$\text{entrada} + \text{generacion} - \text{salida} - \text{consumo} = \text{acumulacion} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Para los procesos en estado estacionario no existe acumulación por lo que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\text{entrada} + \text{generacion} = \text{salida} + \text{consumo} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Los términos de generación y consumo se dan cuando existen reacciones químicas en el proceso, para procesos sin reacciones y en estado estacionario la ecuación de balance de materia que da así:

$$\text{entrada} = \text{salida} \quad (\text{Ec. 2.3})$$

2.15 Teorema de Bernoulli

Es una forma de expresar la aplicación de la ley de la conservación de la energía al flujo de fluidos en una tubería. La energía total en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la altura geométrica, la altura debida a la presión y la altura debida a la velocidad. A partir de esto se pueden realizar los cálculos de caídas de presión entre 2 puntos aplicando la ecuación de Bernoulli, que se muestra a continuación: (Crane, 1992).

$$\frac{P_a}{\gamma} + \frac{V_a^2}{2g} + Z_a = \frac{P_b}{\gamma} + \frac{V_b^2}{2g} + Z_b + \frac{\Delta P_f}{\gamma} \quad (\text{Ec. 2.4})$$

Donde:

P_a : presión de entrada (psi).

P_b : presión de salida (psi).

γ : peso específico del aire (N/m^3).

V_a : velocidad de entrada (pie/s).

V_b : velocidad de salida (pie/s).

Z_a : altura inicial o de entrada (m).

Z_b : altura final o de salida (m).

ΔP_f : caída de presión por fricción (psi).

g : aceleración de la gravedad ($32,2 \text{ pie/s}^2$).

2.16 Cálculo de caídas de presión para flujo de gases en tuberías

Para estos cálculos, del flujo a través de tuberías y accesorios, se deben considerar el balance de energía en estado estacionario: (PDVSA, 1996).

$$\frac{gc}{F_{17}} E + \Delta z + F_2 \frac{gc}{g} \Delta(Pv) + \frac{\Delta(v^2)}{2g} = F_{17} \frac{gc}{g} Q - \frac{gc}{g} W_s \quad (\text{Ec. 2.5})$$

Y la forma diferencial del teorema de Bernoulli:

$$dz + F_2 \frac{gc}{g} v dP + \frac{v dv}{g} = \frac{gc}{g} dF - \frac{gc}{g} W_s \quad (\text{Ec. 2.6})$$

donde:

	Unidades métricas	Unidades inglesas
E: energía interna	MJ/kg	BTU/lbm
F: pérdida de energía por fricción	kPa.m ³ /kg	pie.lbf/lbm
g: aceleración de la gravedad	m/s ²	pie/s ²
P: presión	kPa	lbf/pulg ²
Q: calor suministrado	MJ/kg	BTU/lbm
v: velocidad del fluido, promedio a lo largo de la sección transversal	m/s	pie/s
v: volumen específico	m ³ /kg	pie ³ /lbm
Ws: trabajo de eje	kPa.m ³ /kg	pie.lbf/pie.lbm
z: altura	m	pie

gc: constante dimensional	1×10^{-3} kg/kPa.m.s ²	32,174 pie.lbm/lbf.s ²
F ₁₇ : factor cuyo valor depende de las unidades usadas	1×10^3	778
F ₂ : factor cuyo valor depende de las unidades usadas	1	144

2.17 Simulación de procesos

La simulación de procesos está definida como una técnica para evaluar en forma rápida un proceso con base en una representación del mismo, mediante modelos matemáticos; la solución de estos se lleva a cabo por medio de programas de computadoras (simuladores de procesos) y permite tener un mejor conocimiento del comportamiento de dicho proceso. En los últimos años la simulación en estado estacionario ha llegado a ser una herramienta de apoyo para el diseño, caracterización, optimización y monitoreo del funcionamiento de procesos industriales. En la actualidad existen una gran variedad de simuladores de procesos comerciales, algunos de los cuales son poderosas herramientas de cálculo en procesos industriales, ya que cuentan con enormes bases de datos y un fuerte respaldos de bibliotecas para cálculos de equipos y bibliotecas de modelos para cálculos termodinámicos, teniendo así estos simuladores una gran versatilidad. (Martínez, Alonso, 2003).

2.17.1 Simulador de procesos Inplant

INPLANT es un simulador riguroso, en estado estacionario para el diseño, clasificación y análisis de sistemas de tuberías de la planta. INPLANT permite a los ingenieros identificar rápidamente la causa del bajo rendimiento

hidráulico en sistemas de tuberías de proceso y ayuda a encontrar soluciones. Además resuelve la caída de presión y las ecuaciones de balance de energía, y simultáneamente realiza cálculos rigurosos de transferencia de calor, incluso para las redes de tuberías más complicadas. Capacidades de la línea, el tamaño de línea correcto, la distribución de flujo en redes, el tamaño de bombas y compresores requerido, los efectos de transmisión de calor, los efectos de Joule-Thomson, velocidades de vapor y líquido, son variables que el simulador calcula de una manera muy exacta. (Estados Unidos, 1994).

2.18 Fluidización

Este fenómeno se aplica para catalizadores que son en forma de polvo, en este caso el catalizador usado en la unidad FCC, es un catalizador de este tipo. La fluidización básicamente consiste en la mezcla del catalizador en polvo con un gas (medio de fluidización) y este tiende a comportarse como un líquido, mostrando el mismo tipo de propiedades. La función de la fluidización es permitir la circulación del catalizador y su transferencia entre el reactor y el regenerador a través de un bajante o de codos en forma de U. Para la fluidización el gas utilizado puede ser aire, vapor o gases hidrocarburos. En la figura 2.6, se puede observar un experimento para detallar el fenómeno de fluidización:

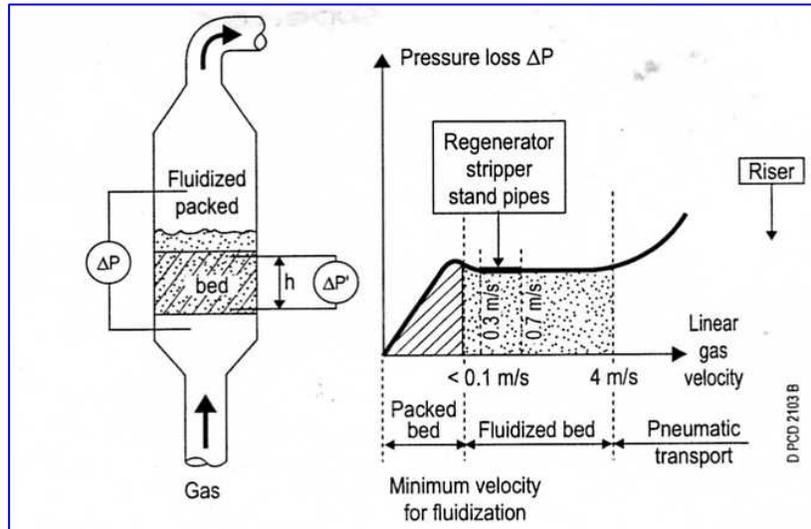


Figura 2.6. Detalles del fenómeno de fluidización.

En la figura 2.6, en la gráfica específicamente se pueden apreciar tres comportamientos de acuerdo a la cantidad de gas de fluidización que se suministra; estos comportamientos son:

- Lecho empacado a baja velocidad de gas: cuando la velocidad de gas es baja, la caída de presión en el lecho es baja. Esto corresponde a las pérdidas por fricción del gas que fluye a través de las partículas sólidas del lecho. Las partículas de polvo no se mueven, se mantienen aglomeradas unas sobre otras.
- Lecho Fluidizado: cuando la caída de presión se incrementa a un valor correspondiente, aproximadamente, al peso del polvo, las partículas pierden contacto entre sí y las mismas comienzan a moverse. En este punto se observa: expansión del polvo de catalizador, el volumen del lecho se incrementa y la densidad del lecho disminuye.
- Transporte neumático: esto ocurre cuando la velocidad del gas aumenta considerablemente, entonces las fuerzas de fricción son muy altas. Estas fuerzas son capaces de arrastrar las partículas del polvo

consigo. Este es el transporte neumático el cual transfiere progresivamente las partículas más finas, y luego las más grandes de acuerdo a la velocidad del gas.

2.19 Catalizador FCC

El catalizador de FCC se fabrica en forma de polvo fino con un diámetro promedio de partícula en el rango de 60 a 80 micrones. Un catalizador moderno de FCC tiene cuatro componentes principales: zeolita, matriz, aglomerante y soporte.

2.19.1 Zeolita

La zeolita que se utiliza en el catalizador es la faujasita, y es su ingrediente principal. Su rol es proveer el craqueo selectivo y gran parte de la actividad. El desempeño del catalizador depende en buena parte de la naturaleza y la calidad de la zeolita presente en el catalizador.

2.19.2 Matriz

La matriz confiere al catalizador los siguientes atributos:

- Provee sitios accesibles para el craqueo de las moléculas grandes de alto rango de ebullición.
- No presenta limitaciones por difusiones en el craqueo de moléculas de alto rango de ebullición.
- Los sitios ácidos de la matriz actúan como una trampa de sacrificio para los compuestos básicos presentes en la carga, protegiendo a la zeolita.

La estructura de poros grandes provee un fácil acceso a las moléculas grandes permitiendo un buen nivel de conversión en este tipo moléculas. El control de la estructura de los poros de la matriz determina la facilidad de despojamiento, propiedad muy importante en la operación de FCC.

2.19.3 Aglomerantes y soportes

El aglomerante sirve como un aglomerante para mantener la zeolita, la matriz y el soporte unidos. El aglomerante puede o no tener actividad y su importancia se hace predominante con catalizadores que contienen altas concentraciones de zeolita.

El soporte es una arcilla incorporada al catalizador para diluir su actividad y en conjunto con el aglomerante proveen de resistencia física al catalizador, sirven de medio de transferencia de calor y fluidización, sobre los cuales se dispersa el componente más valioso: la zeolita.

2.20 Propiedades físicas para el cálculo del perfil de presión y de flujos máxicos de aire comprimido

Para la determinación del perfil de presión y de los requerimientos de aireación requeridos por el bajante para que opere de manera eficiente, es necesaria la realización de una serie de cálculos que permitirán la obtención de algunas propiedades, las cuales son de vital importancia para la realización de este proyecto. En esta sección se dará a conocer cuáles son estas propiedades y las ecuaciones que serán usadas para realizar los cálculos. (Mott, 1998)(PSRI, 2009)

2.20.1 Densidad esquelética del catalizador

Esta es la densidad real del material sólido puro que forman las partículas individuales del catalizador. Para calcular esta densidad se utiliza la ecuación 2.7.

$$\rho_{sk} = \frac{1000}{\left(\frac{Al_2O_3}{3,4} + \frac{SiO_2}{2,1}\right)} \quad (\text{Ec. 2.7})$$

2.20.2 Densidad de la emulsión del catalizador

Es la densidad que posee la mezcla formada por el aire y el catalizador cuando este es fluidizado, para su determinación se hace uso de la ecuación 2.8.

$$\rho_{emul} = \frac{\Delta P}{H} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

ρ_{emul} : densidad de la emulsión, kg/m³.

ΔP : diferencial de presión, lb/pulg².

H: altura efectiva, pie.

2.20.3 Flujo volumétrico de la emulsión de catalizador que fluye a través del bajante

Es el flujo volumétrico de la mezcla formada por el aire y el catalizador al ser fluidizado, este se calcula a partir de la ecuación 2.9, la cual se muestra a continuación:

$$q = 1000 \times \left(\frac{Q_{cat}}{\rho_{emul}} \right) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

q_{emul} : flujo volumétrico de emulsión de catalizador, m³/min.

Q_{cat} : tasa de circulación de catalizador, Ton/min.

ρ_{emul} : densidad de catalizador fluidizado, kg/m³.

2.20.4 Flujo volumétrico de aire que circula junto al catalizador

Es el flujo volumétrico de aire que circula a través del bajante, es decir el que forma la emulsión con el catalizador, mediante la ecuación 2.9 se calcula este volumen:

$$V_{gas} = V_{emul} \left[1 - \left(\frac{\rho_{emul}}{\rho_{sk}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

q_{gas} : flujo volumétrico total de aire que circula con el catalizador, m³/min.

q_{emul} : flujo volumétrico de emulsión, m³/min.

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

ρ_{sk} : densidad esquelética del catalizador, kg/m³.

2.20.5 Presión en cada punto de aireación del bajante

Es la presión absoluta que se genera en cada punto de aireación del bajante, a medida que el catalizador fluye a través de este, a medida que se desplaza a través del bajante la presión aumenta debido a la altura que adquiere el catalizador, ya que este al estar Fluidizado se comporta como un líquido.

La presión en cada punto de aireación se calcula con la ecuación 2.10, la cual se muestra a continuación:

$$P_{hopper} = P_{lecho} + \left[\frac{\rho_{emul} * g * \Delta H_{lecho-sup}}{1000} \right] \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

P_{hopper} : presión en la entrada del bajante, kPa.

P_{lecho} : presión del regenerador (lecho denso de catalizador), kPa.

$\Delta H_{lecho-hopper}$: diferencia de altura entre la superficie del lecho de catalizador y el entrada del bajante, m.

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

g : aceleración de la gravedad, m/s².

2.20.6 Cambio de volumen de aire en cada punto de aireación

Es la cantidad de aire que debe inyectarse en cada punto de aireación para contrarrestar el efecto de compresión dentro del bajante que sucede

sobre el catalizador debido a las condiciones de temperatura y presión dentro de este, para evitar que el catalizador se compacte y deje de circular. La ecuación 2.11, utilizada para el cálculo de estos volúmenes de aire, se muestra a continuación:

$$\Delta V_{gas} = V_{gas} - \left(\frac{V_{gas} * P_{hopper}}{P_{tap1}} \right) \quad (\text{Ec 2.12})$$

donde:

q_{gas} : flujo volumétrico total de aire que circula con el catalizador, m³/min.

q : flujo volumétrico de emulsión, m³/min.

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

ρ_{sk} : densidad esquelética del catalizador, kg/m³.

2.20.7 Flujos máxicos de aire en cada punto de aireación

Estos son los flujos de aire, calculados a partir de los cambios de volumen de aire, a las condiciones de presión y temperatura del bajante, por tratarse de aire se calculan con la ecuación general de los gases ideales: (Himmelblau, 1997)

$$PV = \frac{m}{PM} * RT \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

P: presión en el punto de aireación, kPa.

V: volumen de aire suministrado al bajante en el punto de aireación, m³/min.

m: flujo másico de aire, lb/hr.

PM: peso molecular del aire, kg/kgmol.

R: constante universal de los gases, $8,31 \text{ m}^3 \cdot \text{kPa} / \text{mol} \cdot \text{K}$.

T: temperatura en el bajante, K.

2.21 Reacciones que se llevan a cabo en el proceso de FCC

Las principales reacciones llevadas a cabo en la unidad de FCC se muestran a continuación en la figura 2.7

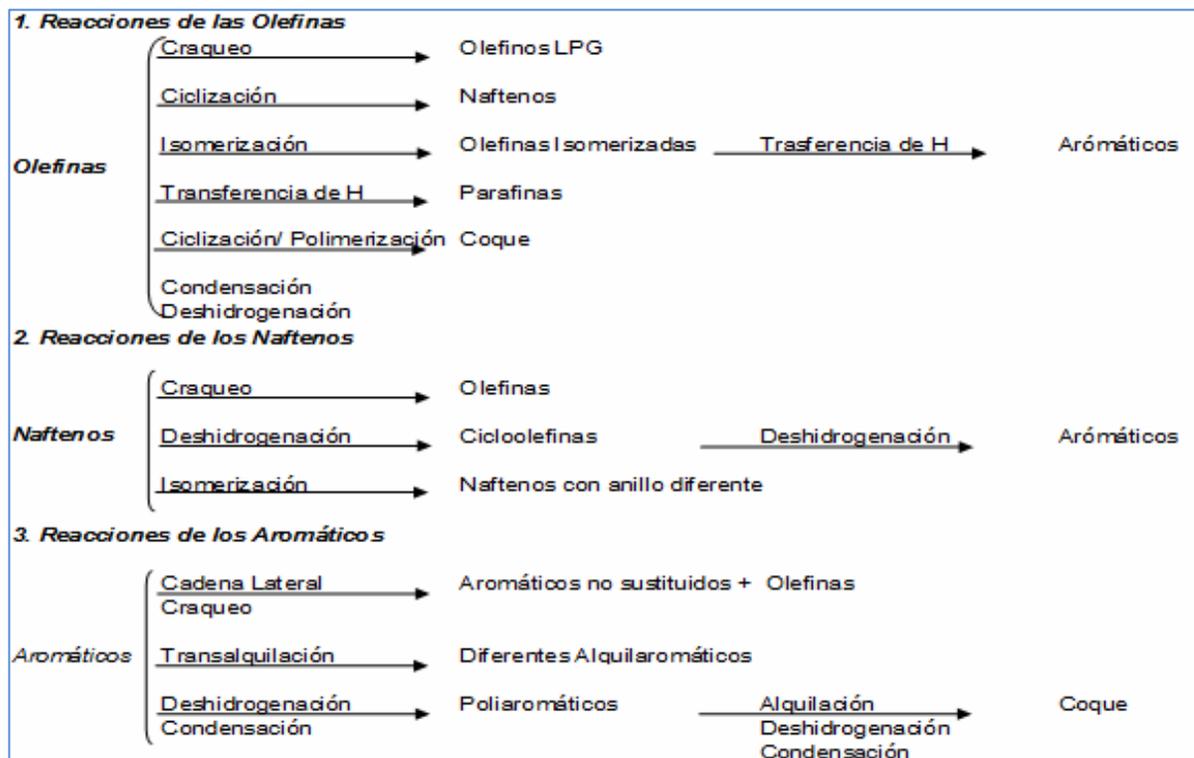


Figura 2.7. Reacciones llevadas a cabo en el proceso de FCC

CAPITULO III

DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 Cálculo de flujos de aire comprimido y perfil de presión necesarios para una mejor operación del bajante del convertidor de FCC

Para la determinación de los flujos de aire comprimido, se realizó una hoja de cálculos en la herramienta de Microsoft Office Excel, está permitió realizar el cálculo necesario con la ayuda de las ecuaciones experimentales hechas para el estudio de sólidos particulados, las cuales han sido determinadas por PSRI (Particulate Solid Research. Inc.) y por Raymond Mott.

En esta sección se muestran los cálculos, para dar a conocer el uso de las ecuaciones con la cuales se realizó la hoja de cálculo. Para el cálculo de los flujos de aireación de las boquillas, primero se determinó el perfil de presión que se tiene a lo largo del bajante; para determinar dicho perfil se requirió conocer varias propiedades, la cuales son:

1. Densidad esquelética del catalizador, kg/m^3 .
2. Densidad de emulsión del catalizador, kg/m^3 .
3. Volumen de emulsión de catalizador fluidizado, m^3/min .
4. Flujo volumétrico total de aire que circula con el catalizador, m^3/min .

3.1.1 Determinación de la densidad esquelética del catalizador

La densidad esquelética del catalizador es la densidad real del material sólido puro que forman las partículas individuales del catalizador. Para calcular esta densidad se utiliza la ecuación 2.7.

$$\rho_{sk} = \frac{1000}{\left(\frac{Al_2O_3}{3,4} + \frac{SiO_2}{2,1}\right)} \quad (\text{Ec 2.7})$$

donde:

ρ_{sk} : densidad esquelética del catalizador, kg/m^3 .

Al_2O_3 : fracción en peso de alúmina en el catalizador.

SiO_2 : fracción en peso de sílica en el catalizador.

Las fracciones en peso de alúmina y sílica en el catalizador se obtienen del registro de análisis del catalizador en equilibrio (E-cat) (anexo B), los valores para las fracciones (promedio) de alúmina y sílica en el catalizador obtenidas son respectivamente: 0,39 y 0,55.

Se sustituye los valores de las fracciones de alúmina y sílica en la ecuación 2.7 y se obtuvo lo siguiente:

$$\rho_{sk} = \frac{1000}{\left(\frac{0,39}{3,4} + \frac{0,55}{2,1}\right)}$$

$$\rho_{sk} = 2655,262 \text{ kg/m}^3$$

La densidad esquelética es $2655,262 \text{ kg/m}^3$.

3.1.2 Determinación de la densidad de la emulsión catalizador

La densidad de emulsión del catalizador es la densidad de la mezcla que el catalizador forma con el aire al ser fluidizado; para la determinación de

esta densidad se hicieron mediciones en campo, tomando datos de presión y de un diferencial de altura dentro del regenerador del convertidor D-1.

Las presiones fueron obtenidas por medio de manómetros que indican medidas de presión en dos puntos del lecho de catalizador, dentro del regenerador a diferentes alturas, esta disposición permite obtener un diferencial de altura, o altura efectiva, que permite calcular la densidad de la emulsión del catalizador.

Se utiliza la ecuación 2.8 para la determinación del valor de la densidad de emulsión:

$$\rho_{emul} = \frac{\Delta F}{H} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

donde:

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

ΔP : diferencial de presión, lb/pulg².

H: altura efectiva, pie.

Los valores de presión medidos en los dos puntos dentro del regenerador son 13,34 lb/pulg² y 12 lb/pulg² y la altura efectiva entre estos puntos es de 5,2083 pie; al sustituir estos valores en la ecuación 3.2 se obtuvo:

$$\rho_{emul} = \frac{(13,34 - 12) \frac{lb}{pulg^2} * 144 pulg^2 / pie^2}{5,2083 pie}$$

$$\rho_{emul} = 37,05 \frac{lb}{pie^3} * \frac{1kg}{2,2 lb} * \frac{35,315 pie^3}{1 m^3}$$

$$\rho_{emul} = 593,5 kg/m^3$$

La densidad determinada de la emulsión del catalizador corresponde al lecho dentro del regenerador, esta densidad se asume igual dentro del bajante, es decir es la densidad que se requiere mantener en el bajante, ya que el catalizador de FCC solo tiene un rango muy limitado de densidades en las que se mantendría fluidizado; este valor es un punto del cual se parte para determinar el perfil de presión en el bajante y consecuentemente los flujos de aire de cada boquilla de aireación.

3.1.3 Determinación del volumen de emulsión de catalizador que fluye a través del bajante

El volumen de emulsión del catalizador es el volumen formado por la mezcla de aire y catalizador que se obtiene al fluidizar el catalizador, este volumen se determina a partir de la ecuación 2.9, la cual se muestra a continuación:

$$V_{emul} = 1000 * \left(\frac{Q_{cat}}{\rho_{emul}} \right) \quad (\text{Ec. 2.9})$$

donde:

q_{emul} : flujo volumétrico de emulsión de catalizador, m³ /min.

Q_{cat} : tasa de circulación de catalizador, Ton/min.

ρ_{emul} : densidad de catalizador fluidizado, kg/m³.

La tasa de circulación típica del catalizador se obtuvo a partir del programa Aspen Process Explorer, anexo C, cuyo valor es 10 Ton/min.

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.9 se obtuvo:

$$q_{emul} = 1000 * \left(\frac{10 \text{ ton/min}}{593,5 \text{ kg/m}^3} \right)$$

$$q_{emul} = 16,849 \text{ m}^3/\text{min}$$

El volumen de emulsión es 16,849 m³/min. Los resultados obtenidos en las secciones 3.1.1, 3.1.2 y en esta sección (3.1.3) son reportados en la tabla 4.1

3.1.4 Determinación de volumen total de aire que circula con el catalizador

Este es el volumen de aire que circula con el catalizador, se puede decir que es la cantidad de aire con que se fluidiza el catalizador. Para la determinación de este volumen se usó la ecuación 2.10, mostrada a continuación:

$$q_{gas} = q_{emul} \left[1 - \left(\frac{\rho_{emul}}{\rho_{sk}} \right) \right] \quad (\text{Ec. 2.10})$$

donde:

q_{gas} : flujo volumétrico total de aire que circula con el catalizador, m³/min.

q_{emul} : flujo volumétrico de emulsión, m³/min.

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

ρ_{sk} : densidad esquelética del catalizador, kg/m³.

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 2.10 se obtuvo:

$$q_{gas} = 16,849 \text{ m}^3/\text{min} \left[1 - \left(\frac{593,5 \text{ kg/m}^3}{2655,262 \text{ kg/m}^3} \right) \right]$$

$$q_{gas} = 13,083 \text{ m}^3/\text{min}$$

El flujo volumétrico total de aire que circula a través del bajante con el catalizador es 13,083 m³/min. El resultado obtenido en esta sección es reportado en la tabla 4.1.

3.1.5 Determinación del perfil de presión en el bajante

Para determinar el perfil de presión se procedió a calcular la presión en cada uno de las boquillas de aireación del bajante, comenzando con la presión en la entrada del bajante (en el Hopper del bajante), para realizar dichos cálculos se utilizó la ecuación 2.11, que se muestra a continuación:

$$P_{hopper} = P_{lecho} + \left[\frac{\rho_{emul} * g * \Delta H_{lecho-hopper}}{1000} \right] \quad (\text{Ec. 2.11})$$

donde:

P_{hopper} : presión en la entrada del bajante, kPa.

P_{lecho} : presión del regenerador (lecho denso de catalizador), kPa.

$\Delta H_{lecho-hopper}$: diferencia de altura entre la superficie del lecho de catalizador y el hopper del bajante, m.

ρ_{emul} : densidad de emulsión, kg/m³.

g : aceleración de la gravedad, m/s².

La presión del lecho del regenerador es registrada en el programa Aspen Process Explorer (anexo D), este valor se mantiene bastante estable durante la operación del convertidor D-1, resultando una presión promedio de 78,966 kpa (11,453 psi).

Cabe destacar que las presiones calculadas son absolutas, además como se puede observar en la ecuación se hace uso de un diferencial de altura, debido a que el catalizador es fluidizado este tiene el comportamiento de un líquido, por lo que las presiones calculadas son presiones hidrostáticas.

Sustituyendo todos los valores necesarios en la ecuación 2.11 se obtuvo:

$$P_{hopper} = (78,966 + 101,325)kPa + \left[\frac{593,5 \frac{kg}{m^3} * \frac{9,81m}{s^2} * 1,32m}{1000} \right]$$

La presión manométrica del regenerador es 78,966 kPa, se lleva a absoluta, sumando la presión atmosférica (101.325 kPa).

$$P_{\text{hopper}} = 187,976 \text{ kPa}$$

La presión absoluta en el Hopper del bajante resulta 187,976 kPa. La ecuación se aplica de la misma manera para las demás boquillas de aireación, solo se intercambian los valores de la presiones y de la diferencias de altura, la presión que se coloca dentro de la ecuación como dato es la presión calculada del punto anterior y así sucesivamente con cada una de las boquillas de aireación; los resultados de las presiones en las boquillas de aireación se muestran en la tabla 4.2.

3.1.6 Cálculo de los volúmenes de aire de cada punto de aireación del bajante

En esta sección se muestra como se calcularon los flujos de aire de cada punto de aireación, la finalidad de estos flujos es contrarrestar la compresión del catalizador (evitar que el catalizador sufra un empaquetamiento) que sucede a medida que el catalizador fluye a través del bajante. Para calcular estos flujos se utilizo la siguiente ecuación:

$$\Delta q_{\text{gas}} = q_{\text{gas}} - \left(\frac{q_{\text{gas}} \cdot P_{\text{hopper}}}{P_{\text{atm}}} \right) \quad (\text{Ec. 2.12})$$

donde:

Δq_{gas} : cambio del flujo volumétrico de aire ,a la temperatura y presión del bajante, debido a la compresión, m³/min.

q_{gas} : flujo volumétrico total de aire que circula con el catalizador, m^3/min .

P_{hopper} : presión en la entrada del bajante, kPa.

P_{top1} : presión en el punto de aireación 1, kPa.

Esta ecuación se aplica para calcular todos los demás cambio de volúmenes, en la ecuación 2.12 se muestra la relación de la presión del Hopper con la presión en la boquilla de aireación 1, esta da como resultado el cambio de volumen en la boquilla de aireación 1, para las demás boquillas de aireación se realiza el cambio de la misma manera, es decir, para calcular el cambio de volumen en la boquilla de aireación 2 se relacionan las presiones de la boquilla de aireación 1 sobre la presión de la boquilla de aireación 2.

Sustituyendo los valores en la ecuación 2.12 se obtuvo:

$$\Delta q_{gas} = 13,083 \text{ m}^3/\text{min} - \left(\frac{13,083 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} * 187,976 \text{ kPa}}{201,542 \text{ kPa}} \right)$$

$$\Delta q_{gas} = 0,881 \text{ m}^3/\text{min}$$

El cambio del flujo volumétrico para la boquilla de aireación 1 es de $0,881 \text{ m}^3/\text{min}$, es decir este es el volumen de aire que debe ser aplicado por la boquilla 1 para contrarrestar la compresión en este punto el bajante. Los demás resultados para el cambio de volumen en las demás boquillas de aireación se muestran en la tabla 4.3.

3.1.7 Cálculo de los flujos máscicos de aire en cada punto de aireación del bajante

Una vez obtenido el volumen de aire que se debe suministrar en cada boquilla de aireación (estos son los cambios de volumen calculados en la sección anterior) se procedió a calcular los flujos máscicos de aire; para realizar dichos cálculos se tomo la ecuación de estado.

$$Pq = \frac{m}{PM}RT \quad (\text{Ec. 2.13})$$

donde:

P: presión en el punto de aireación, kPa.

q: flujo volumétrico de aire suministrado al bajante en el punto de aireación. m³/min.

m: flujo máscico de aire, lb/hr.

PM: peso molecular del aire, kg/kgmol.

R: constante universal de los gases, 8,31 m³*kPa/kgmol*K.

T: temperatura en el bajante, K.

La temperatura se considera constante a lo largo del bajante, y se toma el valor de la temperatura en el lecho del regenerador el cual es 977 k (1.299 °F) (anexo E). Despejando m, en la ecuación de estado se obtiene:

$$m = \frac{Pq \cdot PM}{RT} \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Al sustituir los valores respectivos a la boquilla de aireación 1 se obtuvo lo siguiente:

$$m = \left(\frac{167,976 \text{ kPa} \cdot 0,881 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} \cdot 27 \text{ kg/kgmol}}{\frac{8,314 \text{ J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kPa}}{\text{kgmol} \cdot \text{K}} \cdot 297,7 \text{ K}} \right) \cdot 60 \frac{\text{min}}{\text{hr}} \cdot 2,205 \frac{\text{lb}}{\text{kg}}$$

$$m = 78,088 \text{ lb/hr}$$

El flujo de aire en la primera boquilla de aireación es de 78,088 lb/hr. En la tabla 4.4 se observan los demás flujos de aire para las demás boquillas de aireación del bajante. El anexo F muestra la hoja de monitoreo de los flujos de aire a cada punto de aireación, obtenida del programa Aspen Process Explorer.

3.1.8 Cálculo del porcentaje de cambio de densidad debido a la compresión dentro del bajante

Como fue mencionado anteriormente (sección 3.1.2), el catalizador de FCC tiene un rango de densidades limitado dentro del cual se mantiene fluidizado, por ello se determina el porcentaje en el cambio de densidad de la emulsión del catalizador, a medida que desciende por el bajante, ya que si se tiene un cambio muy brusco en la densidad de este, el catalizador podría perder su punto de incipiente fluidización.

A continuación se muestra la ecuación 3.2, con la cual se calcula el porcentaje de cambio de la densidad de la emulsión del catalizador debido a la compresión.

$$\Delta\rho_{emul}\% = 100 * \frac{\Delta q_{gas}}{q_{emul}} \quad (\text{Ec.3.2})$$

donde:

$\Delta\rho_{emul}$: cambio porcentual de la densidad de la emulsión a medida que desciende por el bajante.

Δq_{gas} : cambio del flujo volumétrico de aire ,a la temperatura y presión del bajante, debido a la compresión, m³/min.

q_{emul} : flujo volumétrico de emulsión, m³/min.

Sustituyendo los valores necesarios en la ecuación 3.2 se obtuvo lo siguiente:

$$\Delta\rho_{emul}\% = 100 * \frac{0,881 \text{ m}^3/\text{min}}{16,849 \text{ m}^3/\text{min}}$$

$$\Delta\rho_{emul}\% = 5,226$$

En el primer punto de aireación se tiene un porcentaje de cambio de la densidad de la emulsión de 5,226 %. En la tabla 4.5 se muestra el resto de los resultados obtenidos para los demás puntos de aireación. El anexo G muestra la hoja de cálculo creada para determinar el perfil de presión y los flujos de aire que se suministrarán al bajante del convertidor D-1.

3.2 Realización de balances de masa y evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire comprimido hacia el bajante del convertidor de FCC

Actualmente se lleva a cabo la construcción del proyecto RECA, el cual formará parte de la unidad FCC, este constituirá un consumo extra de aire comprimido para la purga de los filtros del separador de la cuarta etapa del RECA, el consumo básico de este se puede observar en el anexo H.

Debido a este nuevo consumo, se plantea la independización del suministro de aire comprimido que va hacia el bajante del convertidor D-1, ya que este es de vital importancia para el funcionamiento de esta sección de la unidad FCC; por otro lado, también se observa la deficiencia en el servicio al bajante en las gráficas del registro de la tasa de circulación del catalizador (anexos C e I), donde por períodos de varios minutos esta tasa de circulación de catalizador llega a cero, lo cual repercute en perturbaciones, como variación de la temperatura de reacción, en la zona de reacción, y aguas abajo en la operación de la planta.

Por otro lado, en el anexo J, se observa la filosofía de operación del proyecto reca, donde se puede apreciar que el consumo de aire para el retrosoplado de los filtros del separador de cuarta etapa se hace de manera intermitente, funcionamiento que traería fluctuaciones en el suministro de aire hacia el bajante del convertidor D-1.

3.2.1 Determinación del flujo total de aire comprimido para suministrar al bajante

Para determinar el flujo total de aire (aire húmedo) que se transportara por la tubería independiente al bajante del convertidor se tomaron las condiciones de operación en los límites de batería de servicios industriales, estas condiciones de operación se reportan en la tabla 3.4, la cual se muestra a continuación:

Tabla 3.1. Condiciones de operación del aire comprimido a la salida de servicios industriales.

Condición de operación		Absolutas
Temperatura	105 °F	313,706 K
Presión	96 psi	110,7 psi (763,252 kPa)

Estas condiciones de presión y temperatura se ubican en la carta psicométrica (anexo K), en la cual se obtiene el valor de la cantidad de agua máxima contenida en el aire comprimido, para estas condiciones la cantidad de agua es 7×10^{-2} lb agua/lb aire, es decir por cada libra de aire húmedo hay 7×10^{-2} libras de agua, al restar esta cantidad de agua de una libra de aire húmedo, queda 0,93 libras de aire seco.

En la sección la sección 4.1 se observa el flujo total de aire seco, teniendo la relación de aire seco y aire húmedo, se calculó el flujo total de aire húmedo que se transportará por la tubería independiente que ira hacia el bajante. A partir de la ecuación 3.9 se determinó el flujo de aire húmedo como se muestra a continuación:

$$A_h = A_s * \left(\frac{1 \text{ libra } A_h}{0.93 \text{ libra } A_s} \right) \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde:

Ah: flujo de aire húmedo, lb Ah/hr.

As: flujo de aire seco, lb As/hr.

Sustituyendo los valores requeridos en la ecuación 3.9, se obtuvo lo siguiente:

$$A_h = 794,956 \text{ lb/hr} * \left(\frac{1 \text{ libra } A_h}{0.93 \text{ libra } A_s} \right)$$

$$A_h = 854,791 \text{ lb Ah/hr}$$

El flujo total de aire húmedo que transportará la tubería independiente del bajante será de 854,791 lb Ah/hr. Este resultado se reporta en la sección 4.2.

3.2.2 Evaluación hidráulica de la tubería transportadora del aire comprimido que va al bajante del convertidor de FCC

La evaluación hidráulica para el dimensionamiento de la nueva tubería se realizó con el paquete de simulación Inplant, con el cual se determina el diámetro adecuado que debe poseer la tubería, así como también la caída de presión que permita un eficiente suministro de aire, con lo cual se mejoraría la operación del bajante del convertidor de FCC.

Se utilizo como base, para la determinación de las caídas de presión la norma de dimensionamiento de tubería, denominada norma 90616.1.024 (anexo L), en ella se encontró que para tuberías que manejan flujo de gases (aire en este caso), específicamente líneas que manejan la descarga de compresores, con presiones de descarga entre 50 y 100 PSI (como es el caso de este estudio) la caída de presión recomendada esta en un rango de 0,25 a 0,5 psi/100 pies de tubería.

Para realizar la simulación, se conto con los isométricos (anexos M.1, M.2, M.3, M.4 y M.5) que representan el recorrido que hace la tubería que llevara el suministro de aire al bajante del convertidor D-1; estos datos se introdujeron en el simulador para hacer el modelo que permitió determinar la caída de presión y el diámetro más adecuado de tubería. A continuación se muestra la tabla 3.2, donde se observan algunas características que tendrá la tubería nueva.

Tabla 3.2. Características de la línea independiente de aire al bajante.

Longitud de la tubería (m)	Accesorios
Longitud total: 287,42 (942,98 pie) Tramo 1: 214,44 (703,54 pie) Tramo 2: 72,98 (239,44 pie)	Válvulas: Check: 2 Compuerta: 3 Codos: 37 (90°) 1 (45°) Reducciones: 2

Vale destacar que la línea pasara por un separador (denominado F-3, este existe en la planta), el cual tiene como función separar la mayor cantidad de agua posible que contiene el aire comprimido, este fue

representado en la simulación por un separador bifásico que ofrece el simulador.

Como se menciona anteriormente, para la simulación se utilizaron isométricos que representan el recorrido que realizara la tubería nueva, también se uso como dato el flujo másico de aire (aire húmedo) calculado en la sección 3.2.1, así como datos de presión y temperatura; todos estos datos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Datos principales en la simulación para el dimensionamiento de la tubería nueva.

Presión del cabezal de aire	Temperatura del aire comprimido	Temperatura ambiente	Flujo de aire húmedo
98 (psig)	105 (°F)	86 (°F)	854,791 lb Ah/hr

En la figura 3.1 se muestra el esquema de la simulación en el ambiente de Inplant. Como se observa en la tabla 3.2, la tubería se puede dividir en dos tramos, el tramo 1 antes del separador F-3 y el tramo 2 después del separador, una vez corrida la simulación se obtuvieron las caídas de presión de cada tramo, los resultados se observan en la figura 3.2.

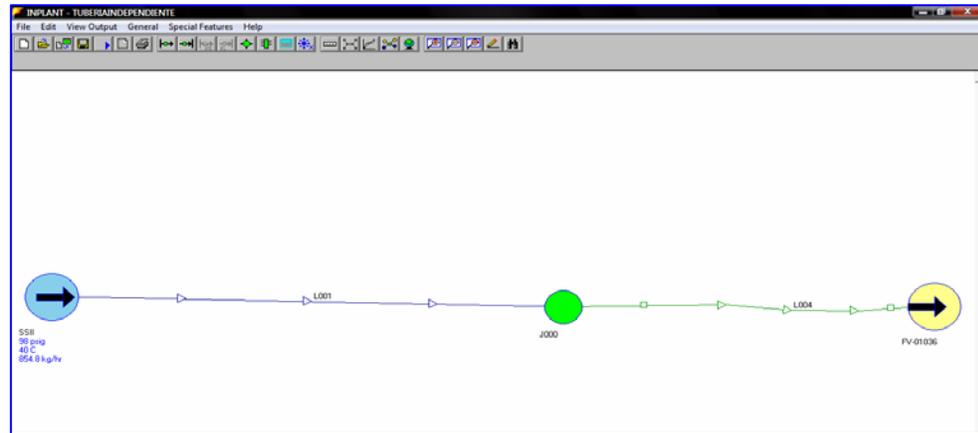


Figura 3.1. Esquema de la simulación de la tubería independiente.

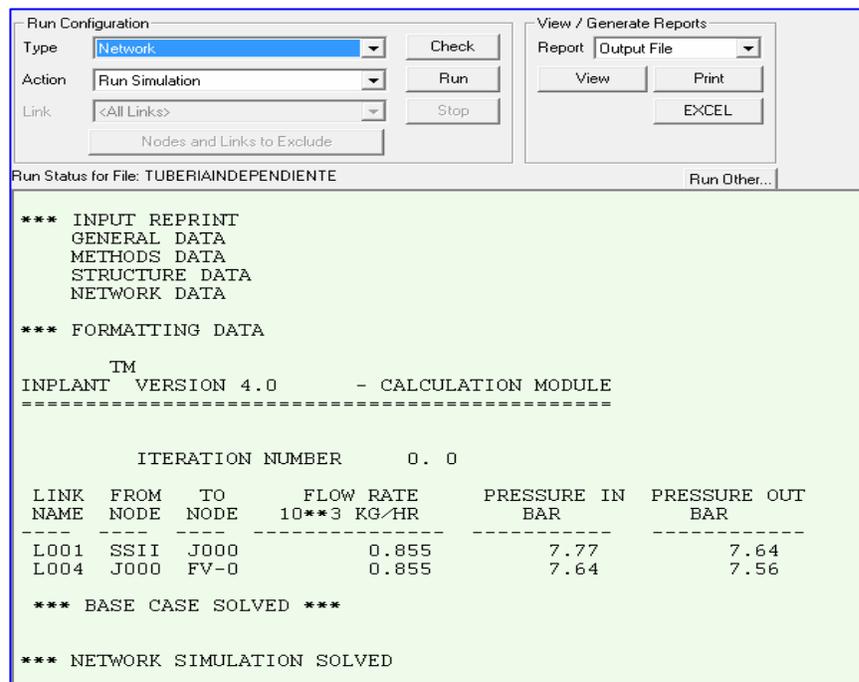


Figura 3.2. Resultados obtenidos para la caída de presión a partir de la simulación en Inplant.

Estas caídas de presión son referidas al largo total de cada tramo de la tubería, y esta expresada en bar, se realizó la conversión a psi para realizar la comparación con el rango de caída de presión establecido en la norma 90616.1.024, mencionado anteriormente; las caídas de presión en psi resultaron, 1,885 y 1,16 psi para el tramo 1 y el tramo 2 respectivamente, estos resultados fueron divididos entre la longitud de las tuberías para obtener las caídas de presión por cada 100 pie de tubería, en la tabla 3.2 se observa la longitud de los tramos de tubería expresados en pies, estas se dividieron entre 100, para obtener el coeficiente entre el cual se dividió la caída de presión de cada tramo para comparar dichos resultados con los rangos dados por la norma antes mencionada, los resultados de dicha división fueron 0,268 psi/100 pie de tubería y 0,48 psi/100 pie de tubería para el tramo 1 y tramo 2 respectivamente, estos resultados se pueden observar en la tabla 4.6.

3.3 Comprobación de la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire comprimido del bajante del convertidor de FCC

Para realizar dicha comprobación, se utilizó la hoja de datos (anexo N), donde se muestran datos de diseño de las placas de orificio (instrumento asociado a las boquillas de aireación), estas son 12 placas de orificio, ya que se tienen 12 boquillas en el bajante del convertidor, y están identificadas como Fe-010 75 hasta Fe-01086, desde la primera boquilla hasta la número 12 respectivamente. Con la información de esta hoja de datos, se realizó la simulación usando el simulador Pegasys para evaluar las placas de orificio y comprobar que el diámetro de orificio y el beta radio que se reporta en dicha hoja de datos sea la correcta.

En los anexos O.1 y O.2 se muestra los cálculos realizados con el simulador Pegasys, el primer anexo, muestra el cálculo realizado con los datos observados en el anexo N en el cual la presión aguas arriba de las placas de orificio es de 60 psig; el segundo anexo muestra el cálculo realizado con la presión de operación, utilizando los datos de diseño anexo N, con la única diferencia que en el segundo cálculo se usa la presión aguas arriba, regulada por la válvula de control FIC-01036 de las placas de orificio que es la manejada en la operación de la planta (86 psig), dicha presión se puede observar en la hoja de monitoreo de los flujos a cada boquilla de aireación de aireación (anexo F). Estas evaluaciones se hacen para corroborar el diámetro de orificio y el beta radio establecido según los datos de diseño, y a su vez verificar que la caída de presión este en el rango establecido para las placas en la operación del convertidor (0-100 in- H₂O).

3.4 Proposición de un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad del aire aportado al catalizador dentro de FCC

El catalizador utilizado en la unidad FCC es altamente higroscópico, por lo que se requiere disminuir la humedad contenida en el aire comprimido que es usado para mantenerlo en circulación a través del bajante del convertidor D-1.

Se estudio el mismo sistema de secado propuesto por Hernández (Hernández, 2010) para el separador de cuarta etapa de RECA, cabe destacar, que a pesar de que se propone un sistema semejante al propuesto por Hernández, en este estudio la diferencia radica en que son servicios diferentes, es decir en el trabajo de Hernández se busca secar el aire que se usara en el retrosoplado para la purga de los elementos filtrantes del separador de cuarta etapa del RECA, mientras que en el presente estudio se

busca secar el aire comprimido que ayude a la circulación del catalizador a través del bajante del convertidor, por lo que las demandas de aire no serán las mismas para ambos servicios.

Se cuenta con una hoja de Excel (ANEXO P), donde se reportan los puntos de rocío medidos en el cabezal de distribución de servicios industriales y la humedad reportada según dicho punto de rocío, se observa que el punto de rocío está muy por encima de $-40\text{ }^{\circ}\text{F}$ ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$), el cual es punto de rocío requerido para el servicio que presta el aire al bajante del convertidor de FCC, esto muestra la necesidad de implementar un sistema de secado planteado en este estudio.

Cabe destacar además que el servicio que se requiere en el bajante es muy crítico, y es necesario que todo el aire que llegue al bajante siempre sea un aire seco, por lo que se debe especificar un secador que se utilice únicamente para secar el aire que llega al bajante, y así independizar el sistema de la fluctuaciones de servicios industriales.

3.4.1 Determinación del caudal de aire comprimido a tratar con el sistema de secado

En la sección 3.2.1 se calculo el flujo total de aire húmedo que se suministrara al bajante del convertidor D-1, para la selección de la unidades que formaran parte del sistema de secado, el cual estará formado por tres unidades, las cuales son un pre-filtro, la unidad secadora y un post-filtro, se procedió a calcular el caudal nominal de aire que manejará el sistema, ya que los catálogos muestran las capacidades de cada unidad (filtros y unidad secadora) en función de flujo volumétrico (anexos Q.1, Q.2).

El caudal nominal se calculó a las condiciones de operación que sale el aire desde servicio industriales (tabla 3.5), dicho caudal se determino a partir de la ecuación la ecuación 3.6, la cual se muestra a continuación:

$$Q_{Ah} = \frac{A_h}{\rho_{Ah}} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

donde:

Q_{Ah} : caudal de aire húmedo a condiciones de operación, m^3/min .

A_h : flujo másico de aire húmedo, lb/hr .

ρ_{Ah} : densidad del aire húmedo a condiciones de operación, kg/m^3 .

Para calcular la densidad del aire húmedo a condiciones de operación se utilizó la ecuación 3.11, la cual se obtuvo por una combinación de la ley de los gases reales: (Himmelblau, 1997).

$$\rho_{Ah} = \frac{P_{Ah} + P_0 \cdot T_0}{P_0 \cdot T_{Ah} \cdot Z_{Ah}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

donde:

ρ_{Ah} : densidad del aire a condiciones de operación, kg/m^3 .

P_{Ah} : presión del aire a condiciones de operación, kPa .

ρ_0 : densidad del aire a condiciones atmosféricas, kg/m^3 .

T_0 : temperatura ambiente, K .

P_0 : presión atmosférica, kPa .

T_{Ah} : temperatura del aire a condiciones de operación, K .

Z_{Ah} : factor de compresibilidad a condiciones de operación, Adimensional.

El factor de compresibilidad Z, del aire a condiciones de operación se puede observar en el anexo N (hoja de datos del diseño de las placas de orificio), por otro lado en el anexo R muestra la densidad del aire a condiciones estándar (o atmosféricas; temperatura 20 °C y 101,325 kPa) la cual tiene un valor de 1,205 kg/m³, ahora al sustituir los valores correspondientes en la ecuación 3.11, se obtuvo el resultado siguiente:

$$\rho_{Ah} = \frac{763,252 \text{ kPa} * 1,205 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 293,15 \text{ K}}{101,325 \text{ kPa} * 313,706 \text{ K} * 0,9986}$$

$$\rho_{Ah} = 8,494 \text{ kg/m}^3$$

La densidad del aire a condiciones de operación es 8,494 kg/m³. Una vez calculada la densidad del aire a condiciones de operación, se introdujeron los valores necesarios para el cálculo del caudal nominal de aire en la ecuación 3.10, obteniéndose lo siguiente:

$$Q_{Ah} = \frac{854,791 \text{ lb} \frac{\text{Ah}}{\text{hr}} * \left(\frac{1 \text{ hora}}{60 \text{ min}} \right)}{8,494 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * (2,205 \text{ lb/kg})}$$

$$Q_{Ah} = 0,761 \text{ m}^3/\text{min}$$

El caudal nominal de aire a condiciones de operación es 0,761 m³/min. El caudal de aire comprimido a condiciones de de operación es llevado a las condiciones estándar (o atmosféricas), para poder realizar la selección de los equipos que serian propuestos para formar el sistema de secado; para

calcular dicho caudal se utilizo la ecuación 3.7 la cual se muestra a continuación:

$$Q_{est} = \frac{P_{Ah} \cdot Q_{Ah} \cdot T_{est}}{P_{est} \cdot T_{Ah}} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

donde:

Q_{est} : caudal nominal de aire a condiciones normales, m^3/min .

P_{Ah} presión del aire a condiciones de operación, kPa.

Q_{Ah} : caudal de aire a condiciones de operación, m^3/min .

T_{est} : temperatura del aire a condiciones normales, K.

P_{est} : presión del aire a condición normales, kPa.

T_{Ah} : temperatura del aire a condiciones de operación, K.

Sustituyendo los valores correspondientes en la ecuación 3.7 se obtuvo lo siguiente:

$$Q_{est} = \frac{763,252 \text{ kPa} \cdot 0,761 \frac{m^3}{min} \cdot 273,15 \text{ K}}{101,325 \text{ kPa} \cdot 313,706 \text{ K}}$$

$$Q_{est} = 4,991 \text{ m}^3/\text{min}$$

El caudal de aire a condiciones estándar de presión y temperatura resulto ser $4,991 \text{ m}^3/\text{min}$. El caudal es transformado de m^3/min a pie^3/min , para poder hacer la selección de los equipos en los catálogos, el caudal que manejará el sistema de secado resulta ser $176,256 \text{ pie}^3/\text{min}$.

3.4.2 Selección de las unidades que formaran el sistema de secado para FCC

A partir del caudal de aire calculado en la sección 3.4.1, se precedió a seleccionar los equipos que conformaran el sistema de secado a proponer en este estudio.

En las tablas 3.4, 3.5 y 3.6 se observan las características generales de las unidades a proponer, cabe destacar que los equipos recomendados se seleccionaron del catalogo de la empresa fabricante Kaeser Compressors.

Además se tomo en cuenta la norma ISO 8573.1 (anexo S), a partir de la cual se determinó la clase del aire que se obtendrá al tratarlo con el sistema de secado. Esta clasificación se explica en la sección 4.4.

Tabla 3.4. Características del pre-filtro para remoción de aceite.

Modelo (carcasa tipo modular)	KOR- 250
Flujo a 100 psig (cfm)	250
Presión máxima de trabajo (psig)	250
Dimensiones ancho*alto (pulgadas)	6 ^{1/2} x23
Peso (lbs)	10 ^{1/4}
Conexión (pulgadas)	1 ^{1/2"} NTPF

Tabla 3.5. Características de la unidad secadora con calentador.

Modelo	KED-300
Flujo de entrada a 100 psig y 100°F (scfm)	300
Rango de purga(scfm)	21
Aire disponible promedio (scfm)	279
Calentador (kw)	4,5
kw promedio	2,0
Largo (pulgadas)	48
Ancho (pulgadas)	59
Alto (pulgadas)	98
Peso aprox. (lbs)	1400
Conexión entrada/salida (pulgadas)	1,5 NPT

Tabla 3.6. Características del post-filtro para remoción de partículas.

Modelo (carcasa tipo modular)	KOR- 250
Flujo a 100 psig (cfm)	250
Presión máxima de trabajo (psig)	250
Dimensiones ancho*alto (pulgadas)	6 ^{1/2} x 23
Peso (lbs)	10 ^{1/4}
Conexión (pulgadas)	1 ^{1/2} " NTPF

3.4.3 Estimación de costo del sistema de secado propuesto

En esta sección se tuvo como finalidad conocer la inversión mínima para poder adquirir lo equipos que formarían parte del sistema de secado que se propone, para lo cual se consultó con la empresa que distribuye los equipos para Venezuela, para que suministrara un presupuesto de los tres (3) equipos que formaran el sistema de secado.

En el anexo T se observa el presupuesto proporcionado por la empresa distribuidora de los equipos.

La estimación del costo del sistema de secado se determinó a partir del precio base de los equipos que conformaran dicho sistema, los costos de los equipos se transformaron a la moneda local de acuerdo a la tasa oficial de cambio en actualidad.

La unidad de secado tiene un valor de 19.500 US\$, en moneda local (Bs) resulta:

$$19.500 \text{ US\$} \times 4,30 \text{ Bs/US\$} = 83.850 \text{ Bs}$$

Los filtros tienen un valor de 890 US\$ cada uno, en moneda local sería:

$$890 \text{ US\$} \times 4,30 \text{ Bs/US\$} = 3.827 \text{ Bs}$$

El precio de ambos filtros sería 7.654 Bs

El costo total de los equipos del sistema de secado sería el siguiente:

$$(83.850 + 7654) \text{ Bs} = 91.504 \text{ Bs}$$

El costo total de los equipos es de 91.504 Bs.; estos resultados se muestran en la tabla 4.8

CAPITULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Análisis de resultados

4.1.1 Cálculo de flujos de aire comprimido y perfil de presión necesarios para una mejor operación del bajante del convertidor de FCC

Los resultados de los cálculos realizados en el capítulo 3, específicamente en las secciones 3.1.1, 3.1.2 y 3.1.3 se muestran en la tabla 4.1, dichos valores se utilizaron para la estimación del flujo volumétrico de aire (q_{gas}) que fluye junto al catalizador a través del bajante, valor necesario para el cumplimiento de este objetivo, este último también es reportado en la tabla 4.1.

Tabla 4.1. Propiedades calculadas para el cálculo del perfil de presión y flujos de aire.

ρ_{sk}	2.655,262 kg/m ³	165,762 lb/pie ³
ρ_{emul}	593,5 (kg/m ³)	37,05 lb/pie ³
q_{emul}	16,849 (m ³ /min)	9,916 pie ³ /s
q_{gas}	13.083 (m ³ /min)	7,700 pie ³ /s

Estos valores reportados en la tabla 4.1, fueron la base para determinación del perfil de presión del bajante del convertidor y de los cambios del flujo volumétrico y flujos máscicos de aire que permitirán una eficiente operación del bajante, siendo el valor de la densidad de emulsión uno de los más importantes, ya que se debe mantener ese valor en la operación del bajante para evitar el empaquetamiento del catalizador; en las

tablas 4.2, 4.3 y 4.4 se muestran los resultados obtenidos para el perfil de presión, cambios de volumen y flujos másico de aire en los puntos de aireación, respectivamente.

Tabla 4.2. Perfil de presión del bajante.

Puntos de Aireación (tan #)	Presión en cada punto de aireación (kPa)	Presión en cada punto de aireación
Hopper	187,976	27,264
1	201,542	29,231
2	213,944	31,030
3	226,345	32,828
4	237,291	34,416
5	248,236	36,003
6	259,357	37,616
7	270,477	39,229
8	281,598	40,842
9	292,718	42,455
10	303,839	44,068
11	314,959	45,681
12	326,080	47,294

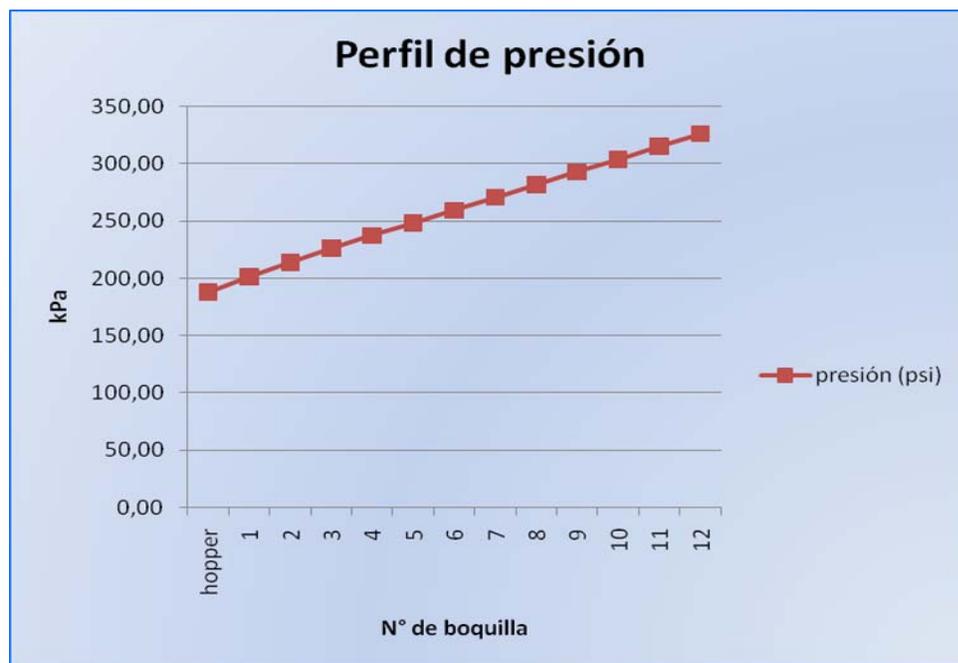


Figura 4.1. Curva que representa el perfil de presión

Como se puede observar en la tabla 4.2 y en la figura 4.1, el perfil de presión es de manera creciente a medida que se desciende a través del bajante; esto se corresponde con el comportamiento esperado, ya que como el catalizador esta fluidizado, este se comporta como un líquido y la presión aumenta a medida que la columna de líquido aumenta su altura.

Tabla 4.3. Cambios de flujo volumétrico en las boquillas de aireación.

Puntos de Aireación (tap #)	Cambio de volumen de aire entre puntos de aireación (m³/min)	Cambio de volumen de aire entre puntos de aireación (pie³/seg)
Hopper		
1	0,881	0,519
2	0,758	0,446
3	0,717	0,422
4	0,604	0,356
5	0,577	0,340
6	0,561	0,330
7	0,538	0,317
8	0,517	0,304
9	0,497	0,293
10	0,479	0,282
11	0,462	0,272
12	0,446	0,263

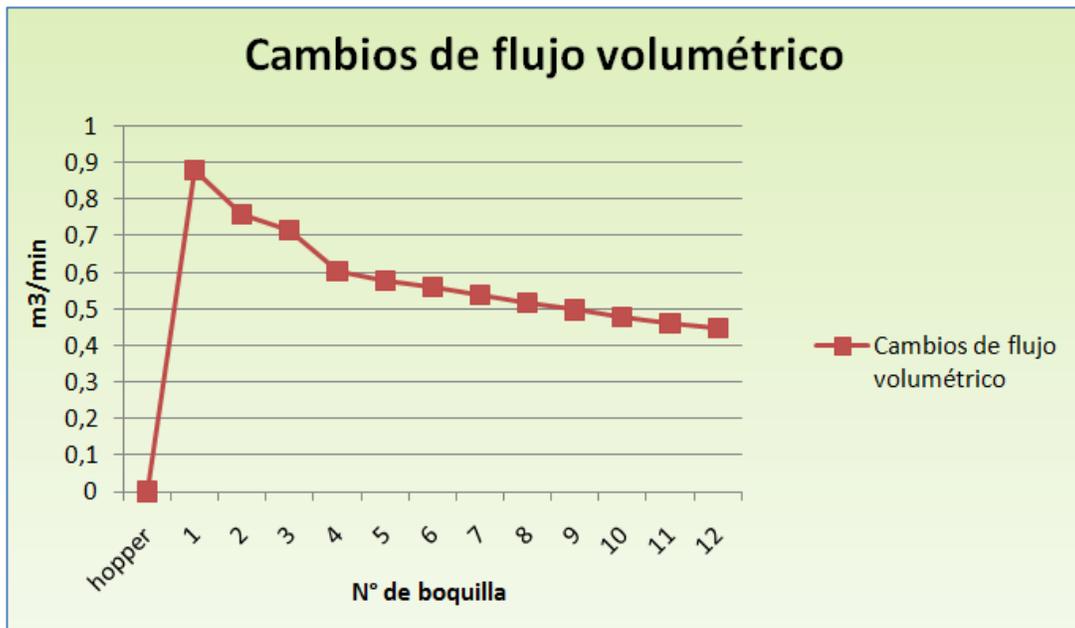


Figura 4.2. Curva que representa el cambio de flujo volumétrico

En la tabla 4.3 se observan los flujos volumétricos obtenidos para la compensación de la compresión que se da en bajante, estos son los volúmenes de aire comprimido a condiciones de presión y temperatura del bajante requeridos para mantener al catalizador en circulación, como se observa en la tabla 4.3 y en la figura 4.2, los volúmenes de aire necesarios en cada boquilla de aireación van disminuyendo de manera progresiva a medida que se desplaza a través del bajante, esto se debe a que como en cada boquilla de aireación se repone una cantidad de aire para contrarrestar la compresión, dichas cantidades de aire permiten que el volumen de aire a reponer en las boquillas de aireación subsiguientes la compresión sea menor y por ende el volumen de aire a inyectar sea cada vez menor.

En la tabla 4.4 se observan los flujos de aire para cada boquilla de aireación, sumando los flujos de todas las boquillas de aireación se tiene el flujo total de aire que se suministrara al bajante a través de las 12 boquillas,

el flujo total es 794,956 lb/hr. Cabe destacar que este flujo es de aire seco. En la sección 3.2.1 se calculo el flujo de aire húmedo, utilizando una tabla de humedad, de la cual se obtuvo un valor de humedad en el aire según sus condiciones de salida a la descarga del compresor (condiciones de operación); el valor obtenido para este flujo fue de 854,791 lb Ah/hr.

En la tabla 4.5 y en la figura 4.3, se observan los cambios porcentuales de la densidad de la emulsión del catalizador, debidos a la compresión sufrida por el catalizador dentro del bajante, como se puede observar el mayor cambio en la densidad de la emulsión se da en la primera boquilla de aireación, los cambios de densidad en las demás boquillas resultan inferiores al primero debido al mismo efecto producido por la inyección de aire en cada punto de aireación que se explico bajo la tabla 4.3 y la figura 4.2, y no afectan la operación del bajante. Este cambio en la densidad de la emulsión del catalizador debe tomarse en cuenta para que el catalizador no llegue nunca al punto de incipiente fluidización, es decir el punto en el cual la fluidización se hace mínima y comenzaría a empacarse.

Tabla 4.4. Flujos máxicos de aire en las boquillas de aireación del bajante.

Puntos de aireación (tap #)	Flujo de aire requerido en cada punto de aireación (lb/hr)
Hopper	
1	78,088
2	71,385
3	71,385
4	63,007
5	63,007
6	64,012
7	64,012

8	64,012
9	64,012
10	64,012
11	64,012
12	64,012

Tabla 4.5 Cambios porcentuales de la densidad de la emulsión a través del bajante

Puntos de aireación (tap #)	% Cambio de densidad de la emulsión
Hopper	
1	5,226
2	4,501
3	4,254
4	3,582
5	3,424
6	3,329
7	3,192
8	3,066
9	2,950
10	2,842
11	2,742
12	2,648

Se tiene por definición, que el porcentaje máximo de compresión o cambio porcentual en la emulsión del catalizador debería ser un máximo de 5 %, como podemos observar el cambio en la primera boquilla de aireación es 5,226 %, este excedente es muy pequeño, respecto al cambio porcentual máximo, que además se debe a que la entrada del Hopper del bajante es asimétrica lo cual contribuye a la entrada de una cantidad de burbujas de aire hacia el bajante, las cuales son indeseadas pues alteran el régimen fluidizado no burbujeante requerido en el bajante; pero como se menciono anteriormente, este porcentaje de cambio de la densidad en la primera

boquilla de aireación es muy pequeño, y en el resto de las boquillas el porcentaje de cambio en la densidad está por debajo del límite, lo cual permite una operación adecuada del bajante.

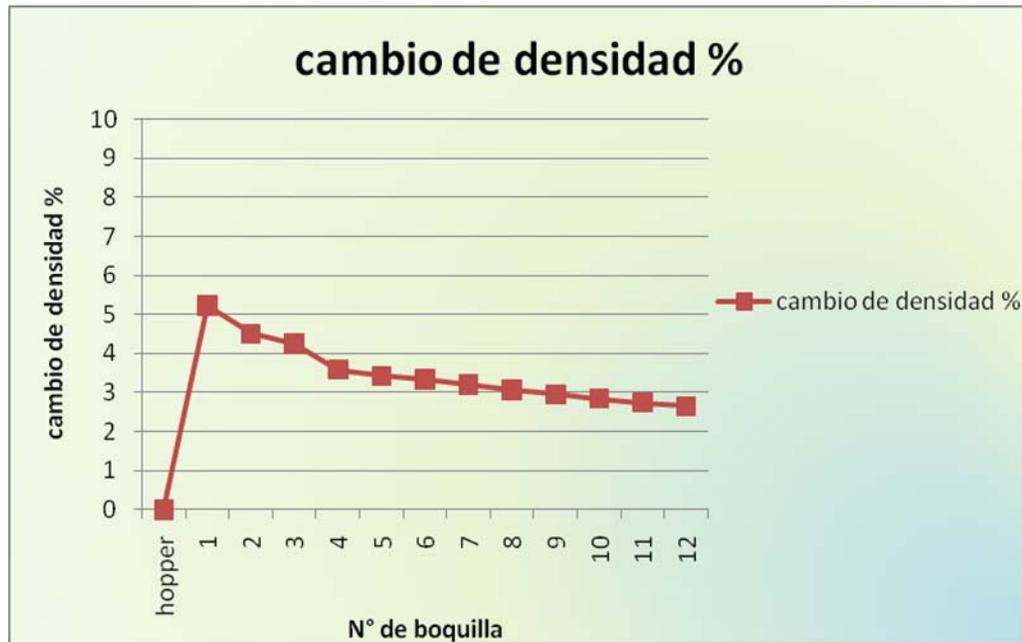


Figura 4.3. Curva que representa el cambio porcentual de densidad del catalizador

4.1.2 Realización de balances de masa y evaluación hidráulica para el dimensionamiento de una línea que independice el suministro de aire comprimido hacia el bajante del convertidor de FCC

A partir del flujo de aire seco calculado en la sección 3.2.1, se realizó el balance de masa necesario para determinar el flujo de aire húmedo total, de acuerdo a las condiciones de operación a las que se encuentra el aire a la salida de servicios industriales se determinó que el flujo de aire húmedo es de 854,791 lb Ah/hr.

El valor mencionado anteriormente, se utilizó para la evaluación hidráulica, realizada con el paquete de simulación Inplant. Para determinar las caídas de presión, lo cual es lo más resaltante para el cumplimiento de este objetivo, se tomó como consideración principal la caída de presión a través de la tubería que manejará el flujo de aire comprimido, dispuestas por las normas PDVSA, específicamente la norma de dimensionamiento de tuberías, identificada como norma 90616.1.024 (anexo L).

Como se puede observar en la figura 3.1, para el dimensionamiento de la tubería se establecieron 2 tramos, el primero hace el recorrido desde servicios industriales hasta un recipiente separador, y el segundo tramo va desde dicho recipiente hasta la válvula de control FV-01036, la cual regula el flujo de aire hacia las boquillas del bajante.

De acuerdo a la caída de presión recomendada por la norma 90616.1.024, la cual debe estar en un rango de 0,25 a 0,5 lppc/100 pie de tubería, las caídas de presión obtenidas cumplen con esta recomendación, en la figura 3.2, la cual se obtuvo del simulador Inplant, se observa la caída de presión obtenida en los tramos de la tubería en estudio.

Las caídas de presión mostradas en la figura 3.2, representan la caída total de presión en cada tramo, es decir, a lo largo de toda la tubería de cada tramo; se procedió a llevar estos valores totales en función de los 100 pies de tubería como se representa en la norma 90616.1.024; en la tabla 4.6 se muestran los resultados de las caídas de presión expresadas en función de 100 pies de tubería para cada tramo estudiado.

Tabla 4.6. Caídas de presión en los tramos de tubería en estudio.

Tramo 1 (psi/100pie de tubería)	0,268
Tramo 2 (psi/100pie de tubería)	0,48

Como se cumple con las caídas de presión, entonces los diámetros de tuberías utilizados son los más convenientes para dimensionar la tubería, en la tabla 4.7 se muestran los diámetros utilizados para tubería en estudio.

Tabla 4.7. Diámetros de tubería utilizados en cada tramo de la tubería en estudio.

Tramo 1	4 pulg.
	3 pulg.
Tramo 2	3 pulg.
	2 pulg.

Como se observa en tabla 4.7, en ambos tramos se usaron 2 diámetros, esto resulto así para poder obtener las caídas de presión que respetaran lo establecido por la norma 90616.1.024. En el segundo tramo se propuso un diámetro de 2 pulgadas debido a que ese es el diámetro nominal de la válvula que recibe y regula el flujo de aire hacia el bajante del convertidor D-1.

4.1.3 Comprobación de la instrumentación asociada a las boquillas de inyección de aire comprimido del bajante del convertidor de FCC

En la sección 3.3 se explicó el procedimiento seguido para la realización de este objetivo, en el cual lo relevante es comprobar la caída de presión del flujo de aire que fluye a través de las boquillas de aireación. En la

tabla 4.8 se muestran los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas.

Tabla 4.8. Resultados para la simulación de las placas de orificio asociadas a las boquillas de aireación.

	Comprobación de datos de diseño	Caída de presión (in-H₂O)
Diámetro de orificio (pulg)	0,316	72,38
Beta radio	0,302	

Los resultados para la comprobación de los datos de diseño concuerdan con los resultados de la hoja de datos (anexo N); en la evaluación para la determinación de la caída de presión utilizando los datos de operación (presión aguas arriba de las placas 86 psig) se obtuvo una caída de presión de 72,38 in-H₂O, la cual es aceptable en vista de que esta dentro del rango establecido para este servicio el cual es de 0-100 in-H₂O, este rango de presión se observa en el anexo U.

4.1.4 Proposición de un sistema de secado que garantice la disminución de la humedad del aire aportado al catalizador dentro de FCC

En la sección 3.4.1 se calculo el caudal nominal de aire a condiciones de operación, y luego este mismo se llevo a condiciones estándar de presión y temperatura, determinándose un caudal de 176,256 pie³/min, a partir del cual se escogió el tamaño de los filtros y de la unidad secadora para el aire comprimido.

Los flujos que manejan los equipos están por encima del flujo calculado, esto debido a que los equipos ya traen un tamaño por catalogo, pero esto es una ventaja ya que en caso de un incremento en la demanda de aire por parte del bajante del convertidor, el sistema de secado propuesto tendrá un margen para poder manejar esa cantidad extra requerida de aire.

Los equipos que se escogieron fueron:

- Como pre-filtro: filtro modelo KOR-250, para remoción de aceite.
- Como post filtro: filtro modelo KPF-250, para remoción de partículas sólidas.
- Como unidad secadora: secador de aire con desecantes regenerativos KED-300.

Vale la pena destacar que para el sistema de secado propuesto se escogió la unidad secadora con desecantes regenerativos, debido que esta es la que ofrece un punto de rocío de $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ el cual es el necesario tener en la planta.

Por otro lado cabe destacar, que el sistema de secado propuesto cumple con la norma ISO 8573.1, para un aire clase 2:1:2 (según punto de rocío, aceite y partículas contenidos en el aire).

En lo que respecta al costo mínimo de inversión por la adquisición de los equipos asociados al sistema de secado, esta inversión es positiva para la planta, ya que permitirá una operación más eficiente, manteniendo el aire dentro de un nivel de humedad adecuado para evitar los problemas de circulación del catalizador en el convertidor, debidos a la humedad tan alta

que suele tener el aire que sale de servicios industriales. Los costos pueden observarse en la tabla 4.8.

Tabla 4.8 Costos asociados a la adquisición de los equipos del sistema de secado.

Equipo	Costo de adquisición (Bs)
Filtro KOR-250	3.827
Filtro KPF-250	3.827
Secador desecante KED-300	83.850
Total	91.504

La empresa distribuidora de los equipos, hizo una observación acerca del los filtros recomendables a usar con la unidad secadora KED-300; los filtros recomendados fueron KOR-375 y KPF-375, cuyo valor (mostrado en el anexo T) en moneda local (Bs) es de 4.644 Bs cada uno, para hacer un costo total de los 3 equipos (tomando en cuenta la observación hecha por la empresa distribuidora de los equipos) de 93.138 Bs.

4.2 Conclusiones

1. La densidad de emulsión del catalizador a mantener dentro del bajante para que este mantenga una operación eficiente, es de $593,5 \text{ kg/m}^3$.
2. El perfil de presión resulto ser de manera creciente, siendo la menor presión en el punto de aireación 1, y la mayor presión en el punto de aireación 12.
3. El flujo total de aire seco que se debe suministrar al bajante es de 794,956 lb/hr.

4. El flujo de aire húmedo total, a condiciones de operación de presión y temperatura, que manejara la tubería nueva es de 854,791 lb Ah/hr.
5. Las caídas de presión obtenidas en el dimensionamiento de la tubería, por medio de la simulación, cumplen con lo establecido en la norma de dimensionamiento de tuberías, y resultaron ser de 0,268 y 0,48 psi /100 pie de tubería, para los tramos 1 y 2, respectivamente, de la tubería dimensionada.
6. Los diámetros de tuberías establecidos para la tubería dimensionada son de: 3 y 4 pulgadas para el primer tramo, y de 3 y 2 pulgadas para el segundo tramo de la tubería.
7. La caída de presión obtenida en la evaluación modo calibración de las placas de orificio fue de 72,38 in- H₂O, siendo un resultado aceptable porque está dentro del rango establecido para el diseño de placas de orificio.
8. El caudal de aire, a condiciones normales, que manejara el sistema de secado propuesto es de 176,256 pie³/min.
9. Los equipos escogidos para formar el sistema de secado proporcionan un aire, de acuerdo a la norma ISO 8573.1, de clase 2 respecto al punto de rocío (-40 °C), clase 1 respecto a la cantidad de aceite retenido (0,01 ppm) y clase 2 respecto a la cantidad de partículas retenidas (1 ppm).
10. El costo de inversión mínimo para la adquisición de los equipos seleccionados es 91.504 BsF.

4.2 Recomendaciones

1. Realizar inspecciones y limpieza, periódicamente, de las boquillas de aireación para que no se taponen y evitar que se produzcan transmisiones erróneas del flujo de aire que llega al bajante del convertidor.
2. Realizar la ingeniería para la instalación y funcionamiento del sistema de secado propuesto en este estudio.
3. Evaluar la eficiencia de los filtros recomendados por el distribuidor de los equipos que conforman el sistema de secado.

BIBLIOGRAFÍA

Bachour, A. (1997), "*Evaluación y mejoras de la operación y mantenimiento del sistema de aire de instrumento de la planta de fraccionamiento de Jose*", Trabajo de Grado, Instituto Politécnico Santiago Mariño, Departamento de Ingeniería en Mantenimiento, Barcelona.

CABESTI S.L.R. (2008), "*Informes técnicos*" artículo técnico [artículo en línea] disponible en:
http://www.cabestisrl.com.ar/CABESTIsrl/02_informestecnicos_ad.htm

CONAE (2002), "*Guía Técnica, Sistemas de Aire Comprimido*", Coordinación de Promoción y Programas Regionales [en línea]. Disponible: <http://www.conae.gob.mx/work/sites/CONAE/resources/LocalContent/2902/1/images/GUIAAIRECOMPRIMIDO01.pdf>. México.

Crane, H. (1992), "*Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías*", Primera Edición. Editorial McGraw-Hill. México.

DANTECHNIQUE. (2009), "*Punto de rocío del aire*" artículo técnico [artículo en línea] disponible en:
http://www.dan.cl/index.php/index.php?option=com_content&view=category&id=37&Itemid=79

Hernández, J. (2010), "*Diseño de un sistema de secado de aire comprimido del separador de cuarta etapa de la unidad FCC*", Trabajo de Grado,

Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Núcleo Anzoátegui.

Himmelblau, D. (1997), "*Principios básicos y cálculos en ingeniería química*", Sexta Edición. Editorial Prentice-Hall hispanoamericana, México.

La Rosa, M. (2009), "*Evaluación del sistema de bombeo de agua de lavado de la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado de la refinería Puerto la Cruz*", Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Barcelona.

Martínez, V; Alonso, P; López, J y otros. (2000), "*Simulación de procesos en ingeniería química*", Primera edición. Editorial Plaza y Valdés [libro en línea] disponible en: <http://books.google.es/books?id=yqCcMOy81JEC&pg=PA17&lp g=PA17&dq=%22%C2%BFque+es+un+simulador+de+procesos%3F%22&source=bl&ots=geP>

Mott, R. (1998), "*Trouble-shooting FCC standpipe flow problems*" artículo técnico, Davison chemical division, Baltimore, Estados Unidos.

Moya, E. (2010), "*Determinación de los límites de operación segura en los equipos del sistema de generación de aire comprimido de la unidad de servicios industriales de la refinería San Roque*", Trabajo de Grado, Departamento de Ingeniería Química, Universidad de Oriente, Puerto La Cruz.

PDVSA (1993), "*Manual de Diseño de Proceso, 90616.1.024 Dimensionamiento de tuberías de proceso*", Caracas.

PDVSA (2006), "*Libro Refinería*", Puerto la Cruz.

PDVSA (1996), “*Manual de Diseño de Proceso, MDP-02-FF-02 Principios Básicos*”, Caracas.

PDVSA (1996), “*Manual de Diseño de Proceso, MDP-02-FF-04 Flujo en fase gaseosa*”, Caracas.

PDVSA (2001), “*Manual de información de seguridad de los procesos*”, Puerto la Cruz.

Pinaya, G. (2008), “*Implementación de un sistema de aire en una industria de segunda transformación*”, CADEFOR, [artículo en línea] disponible en: <http://www.cadefor.org/es/eventos/Implementacion%20de%20un%20sistema%20de%20aire%20comprimido%20en%20una%20industria%20de%20segunda%20transformacion.pdf>. Bolivia.

PSRI (2010) “*Curso de: efecto de aireación en el perfil de presión del bajante de un convertidor de FCC*”. Particulate Solid Research. Inc. Estados Unidos.

Quiroz, H. (2003), “*Redes de Aire Comprimido*”. Departamento de Mecánica. Universidad Eafit. Colombia.

SIMSCI (1994), “*Manual del usuario Inplant*”, Estados Unidos.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

TÍTULO	“Evaluación del suministro de aire comprimido al bajante del convertidor D-1 para la mejora de la circulación del catalizador en la unidad de Craqueo Catalítico Fluidizado (FCC) de la refinería Puerto La Cruz”
SUBTÍTULO	

AUTOR (ES):

APELLIDOS Y NOMBRES	CÓDIGO CULAC / E MAIL
Roberth Alfonso Fajardo Villasana	CVLAC: 19.141.181 E MAIL: Roberth_2103@hotmail.com
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:
	CVLAC: E MAIL:

PALÁBRAS O FRASES CLAVES:

Aireación

Perfil de presión

Densidad esquelal

Catalizador

Fluidización

Sistema de secado

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ÁREA	SUBÁREA
Ingeniería y Ciencias Aplicadas	Ingeniería Química

RESUMEN (ABSTRACT):

Este trabajo consistió en la evaluación del suministro de aire comprimido al bajante del convertidor de la planta FCC de la refinería de Puerto La Cruz, para ello se llevó a cabo la determinación del perfil de presión y de los flujos de aire a suministrar al bajante, para este cálculo se construyó una hoja de cálculos utilizando ecuaciones empíricas, definidas por PSRI y Raymond Mott; se dimensionó una tubería, para independizar el suministro de aire al bajante, para esto se realizó una simulación con el paquete de simulación Inplant, para la cual se recogieron datos como flujo de aire que se manejaría a través de la tubería e isométricos que representan la trayectoria de la tubería, también se la instrumentación que mide el flujo de aire que va hacia el bajante, haciendo una evaluación del diseño de las placas de orificio con el simulador Pegasys, por último se propuso un sistema de secado, debido a que el aire que llega a la planta, contiene mucha humedad, para ello se determinó el caudal de aire a ser tratado y se seleccionaron los equipos del sistema de secado. Se obtuvo un flujo total de aire seco de 794,956 lb/hr, por otro lado la tubería independiente tendrá 2 tramos, el primero con diámetros de 4 y 3 pulg., y una caída de presión de 0,268 psi, y el segundo con diámetros de 3 y 2 pulg., y una caída de presión de 0,45 psi; en la evaluación de las placas de orificio, se determinó una caída de presión de 72,38 in-H₂O, y por último el caudal a tratar con el sistema de secado es de 176,256 pie³/min.

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

CONTRIBUIDORES:

APELLIDOS Y NOMBRES	ROL / CÓDIGO CVLAC / E_MAIL				
Sofía Rivero	ROL	CA	AS x	TU	JU
	CVLAC:	12.576.891			
	E_MAIL	riverosn@pdvsa.com			
	E_MAIL				
Yraima Salas	ROL	CA	AS	TU x	JU
	CVLAC:				
	E_MAIL	Yrasal57@hotmail.com			
	E_MAIL				
Pascual Rodríguez	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				
Yaneis Obando	ROL	CA	AS	TU	JU x
	CVLAC:				
	E_MAIL				
	E_MAIL				

FECHA DE DISCUSIÓN Y APROBACIÓN:

2011	06	13
AÑO	MES	DÍA

LENGUAJE. SPA

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

ARCHIVO (S):

NOMBRE DE ARCHIVO	TIPO MIME
Tesis_evaluación_del_suministro_de_aire.doc	

CARACTERES EN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS: A B C D E F G H I J K L M
N O P Q R S T U V W X Y Z . a b c d e f g h i j k l m n o p q r s t u v w x y z . 0 1 2 3 4 5
6 7 8 9 .

ALCANCE

ESPACIAL: _____ (OPCIONAL)

TEMPORAL: _____ (OPCIONAL)

TÍTULO O GRADO ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Ingeniero Químico

NIVEL ASOCIADO CON EL TRABAJO:

Pregrado

ÁREA DE ESTUDIO:

Departamento de Ingeniería Química

INSTITUCIÓN:

Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui

METADATOS PARA TRABAJOS DE GRADO, TESIS Y ASCENSO

DERECHOS

De acuerdo al artículo 41 del reglamento de Trabajos de Grado de la Universidad de Oriente:

“Los trabajos de grado son de exclusiva propiedad de la Universidad de Oriente y sólo podrán ser utilizados a otros fines con el consentimiento del consejo de núcleo respectivo, quien le participará al consejo universitario”.

Roberth A. Fajardo V.

AUTOR

Prof. Yraima Salas
TUTOR

Prof. Pascual Rodríguez
JURADO

Prof. Yaneis Obando
JURADO

Prof. Yraima Salas

POR LA SUBCOMISION DE TESIS