

**ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE
TRANSFERENCIA DE LA PLANTA DE POLIETILENO II DE LA GRB**

DANILO BURGOS ORTEGA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

**ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE
TRANSFERENCIA DE LA PLANTA DE POLIETILENO II DE LA GRB**

DANILO BURGOS ORTEGA

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de
Ingeniero Químico**

Práctica Empresarial

Director:

Prof. GIOVANNI MORALES MEDINA

Ingeniero Químico, M.Sc., Ph. D.

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2017

DEDICATORIA

A DIOS

A Rosalba Ortega y Salomón Burgos, mis padres

A Dorangela, Helí, Dioselina, Salomón, Agustín (†), Alexis, Olga, Pastor, Joselín,
Edilia, Isaac y Calorina, mis hermanos.

A Laura, Daniela, Alexander, Iván, Javier, Alejandro, Edwin, Tatiana, Valentina y
Juan David mis sobrinos.

A Yiseth Martinez

A esta familia, que me enseñó a ser persona y a ver que el desarrollo humano
tiene sentido cuando el trabajo se hace con pasión y con amor, la tolerancia con el
otro y el dar desinteresadamente.

AGRADECIMIENTOS

El autor de este documento reconoce y agradece por su influencia en la consecución de este objetivo a:

La Universidad Industrial de Santander

Giovanni Medina Morales, Director

La Coordinación de Petroquímica, Karen Zarate, Manuel Ardila, Fabián Gómez, Jorge Bueno, Paola Mariño, Edwin Pava, Juan Neira, Elber Ruíz, Freddy Jurado y Arley Guerrero.

Ecopetrol.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. MARCO TEÓRICO	14
1.1 DEFINICIÓN DE TRANSPORTE NEUMÁTICO	14
1.2 DIAGRAMA DE ESTADO	15
1.3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS EN FASE DILUIDA	15
1.4 SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA POLIETILENO II	16
1.5 FLUJO EN FASE DILUIDA DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)	17
1.6 PROBLEMAS FRECUENTES EN TRANSPORTE NEUMÁTICO DE MATERIALES POLIMÉRICOS EN FASE DILUIDA	18
1.6.1 Variables que ocasionan la degradación del material	18
1.7 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	20
1.8 OPTIMIZACIÓN	21
2. METODOLOGÍA	22
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS	25
3.1 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS	25
3.2 VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES	25
3.3 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DE LOS SISTEMAS	28
4. CONCLUSIONES	33
5. RECOMENDACIONES	34
CITAS BIBLIOGRAFICAS	35
BIBLIOGRAFIA	38
ANEXOS	41

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de un sistema de transporte neumático a presión positiva	14
Figura 2. Datos de transporte de <i>pellets</i> de polietileno en fase diluida.	17
Figura 3. Finos de polietileno	19
Figura 4. Diagrama metodológico	22
Figura 5. Esquema del sistema de transferencia 1, en Aspen Plus®.....	26
Figura 6. Presión de descarga de la línea de proceso vs flujo de aire-sólido del sistema 1, de acuerdo a simulación.....	29
Figura 7. Velocidad del aire de salida de descarga de la línea de proceso vs flujo de aire-sólido del sistema 1, de acuerdo a simulación.....	30
Figura 8. Presión de descarga del compresor C-2254 (Sistema 1).....	44
Figura 9. BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2254 (Sistema 1) ...	45
Figura 10. Temperatura de salida del intercambiador E-2272 (Sistema 1)	45
Figura 11. BoxPlot de temperatura de salida del E-2272 (Sistema 1).....	45
Figura 12. Indicación de peso de la tolva T-2251 A/B (Sistema 1).....	46
Figura 13. BoxPlot del indicador de peso de la tolva TV-2251 A/B (Sistema 1).....	46
Figura 14. Presión de descarga del compresor C-2255 A/B (Sistema 2/3).....	46
Figura 15. BoxPlot de la presión del compresor C-2255 A/B (Sistema 2/3).....	47
Figura 16. Temperatura de descarga del intercambiador E-2273 (Sistema 2/3)....	47
Figura 17. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2273 (Sistema 2/3) ...	47
Figura 18. Presión de descarga del compresor C-2256 (Sistema 4/5/6).....	48
Figura 19. BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2256	48
Figura 20. Temperatura de descarga del intercambiador E-2274 (Sistema 4/5/6).48	48
Figura 21. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2274 (Sistema 4/5/6)48	48
Figura 22. Presión de descarga del compresor C-2257 (Sistema 7/8).....	49
Figura 23. BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2257	49

Figura 24. Temperatura de descarga del intercambiador E-2275 (Sistema 7/8)...49

Figura 25. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2275 (Sistema 7/8)...50

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Datos de entrada a los bloques <i>Pipe</i> , en Aspen Plus®	23
Tabla 2. Resumen por sistema de las principales variables de proceso y de diseño de los sistemas de transferencia.....	27
Tabla 3. Descripción modelo de optimización.	31
Tabla 4. Resultados del modelo de optimización	32

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DIAGRAMA DE ESTADO, PARA GRÁNULOS DE POLIPROPILENO (D _E =3MM) EN TUBERÍA DE 50 MM DE DI	41
ANEXO B. RESUMEN DE LAS BASES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE POLIETILENO II.	41
ANEXO C. DIAGRAMA GRANDE DE LOS SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE LA PLATNA POLIETILENO II.....	42
ANEXO D. TIPOLOGÍAS DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TRANSPORTE DE POLIETILENO	43
ANEXO E. HEURÍSTICAS DE PARA LA VELOCIDAD DE AIRE	43
ANEXO F. RESUMEN DE ESTADÍSTICOS PARA CADA VARIABLE, SIN DATOS ATÍPICOS	44
ANEXO G. GRÁFICAS DE DISPERSIÓN Y BOXPLOT DE LAS VARIABLES DE PROCESO.....	44
ANEXO H. PRESIÓN DE SALIDA VS FLUJO DE SÓLIDOS Y AIRE	50

RESUMEN

TÍTULO: ANÁLISIS DEL RÉGIMEN DE FLUJO DE LOS SISTEMAS DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA DE POLIETILENO II DE LA GRB*

AUTOR: Danilo Burgos Ortega**

PALABRAS CLAVE: Transporte neumático, Fase diluida, Simulación de procesos, Optimización.

DESCRIPCIÓN:

El sistema de transporte de la planta Polietileno II corresponde a un régimen en fase diluida, caracterizado por altas velocidades del aire de transporte que generalmente ocasionan degradación del material. Desde su instalación y puesta en marcha se ha presentado este problema, formando aglomerados tales como cabellos de ángel, streamers y finos que con frecuencia causan bloqueos en las válvulas divergentes y filtros. Parte de estos finos son eliminados por filtros, un elutriador y colectores de polvo, sin embargo, actualmente persiste el problema. La formación de este material, está asociada principalmente por los altos valores de velocidad de transporte, altas temperaturas del aire (mayores a 100°F) y codos no optimizados. Empresas como Pelletron y Lyondell de acuerdo a heurísticas recomiendan velocidades terminales comprendidas entre 100-112 ft/s y temperaturas de transporte menores a 100°F para exigencias del mercado de 50 ppm de finos.

De acuerdo a este panorama se desarrolla una simulación de 7 sistemas principales de la planta en estado estacionario y optimización en Aspen Plus®, validando resultados con la ingeniería de detalle. Se plantea casos base con las condiciones actuales y se encuentra que existe una alternativa que minimiza la velocidad terminal, la cual consiste en la derivación de aire a la atmósfera entre un 9 a un 25% para la descarga de los compresores de los sistemas de transferencia.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director. Giovanni Morales Medina, Ing. Qco

ABSTRACT

TITLE: ANALYSIS OF THE FLOW RATE OF THE TRANSFER SYSTEMS OF THE POLYETHYLENE PLANT II OF THE GRB*

AUTOR: Danilo Burgos Ortega**

KEYWORDS: Pneumatic conveying, dilute phase, process simulation, optimization

DESCRIPTION:

The conveying system of the polyethylene plant corresponds to a regime in the dilute phase, characterized by the high air velocities of conveying that generally cause degradation of material. This problem has been presented since its installation and implementation, which forms agglomerates such as angel hair, streamers and fine dusts that frequently blocks the diverter valves and filters. Some of these fine dusts are eliminated by elutriators, filters and dust collectors. However, the problem persists nowadays. The formation of this material is mainly related to the high values of conveying speed, air high temperatures (higher than 100° F) and unopened elbows. Companies such as Pelletron and Lyondell, according to heuristics, recommend terminal speeds between 100-112 ft/s and conveying temperatures lower than 100° F to market requirements of 50 ppm of fines.

According to the view provided above, a simulation of seven main systems of the plant at steady state and optimization in Aspen Plus® is developed and its results are validated with detailed engineering. Base cases are raised with current conditions and it is found an alternative to decrease terminal velocity, which consists of the derivation of air to the atmosphere from 9% to 25 % for the discharge of the compressors of the transfer systems.

* Undergraduate Project

** Physical and Chemical Engineering's Faculty. School of Chemical Engineering. Advisor. Giovanni Morales Medina, Chemical Engineer, M.Sc., Ph.D.

INTRODUCCIÓN

En la industria química es común encontrar procesos que involucran el manejo de sustancias sólidas y que para su transporte utilizan sistemas con aire presurizado, denominados sistemas neumáticos. Desde hace más de 150 años el transporte neumático se ha utilizado en la industria y hace unos 70 años, que la investigación teórica y experimental converge en un concepto aceptable en cuanto a detalle [1].

Existen dos tipos de transporte neumático: el de fase diluida que opera a altas velocidades de flujo que generalmente ocasiona desgaste erosivo en la tubería y degradación del material transportado; y el de fase densa caracterizado por baja velocidad de transporte y bajo consumo energético. En sistemas industriales instalados en fase diluida alternativas de mejora del proceso, consiste en disminuir la velocidad de transporte de la mezcla y aumentar la relación de carga sólida lo que se traduce en una reducción del consumo energético [2]. Por otro lado, investigadores han encontrado que la velocidad inicial del aire, afecta la calidad del material transportado, ocasionando degradación [3]. Esta degradación se manifiesta por el aumento en la presencia de finos en los productos entregados a los clientes; los finos se acumulan en alguna parte de los dosificadores generando obstrucción, paradas, desperdicio y grumos en la impresión de las películas de plástico, que finalmente se convierten en rechazos de los productos por defectos de calidad, por lo cual la reducción de este material particulado es una política de calidad para la satisfacción del producto comercial.

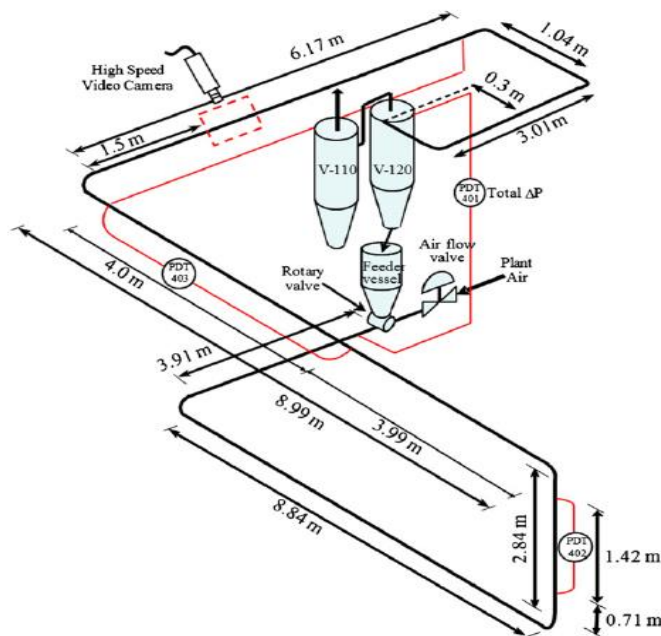
En el presente documento desarrollado durante la práctica industrial en la Gerencia Refinería de Barrancabermeja se presentan los resultados más relevantes del análisis del flujo de la planta Polietileno II mediante simulación con Aspen Plus 8.8®, direccionados a generar estrategias de mejora de la calidad de las resinas Polifen por finos, *streamers* y cabellos de ángel en el producto. La disminución en la cantidad de este material no deseado en el producto, impactará tanto en el factor de calidad de las resinas como en la salud de los trabajadores.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 DEFINICIÓN DE TRANSPORTE NEUMÁTICO

El transporte neumático es un tipo de sistema de transporte para sólidos de granulometría variada ($1\ \mu\text{m}$ - $20\ \text{mm}$) [4]. Este mecanismo funciona con capacidades de hasta $1000\ \text{ton/h}$ y tuberías de hasta $20\ \text{in}$ de diámetro, la principal ventaja de este medio es que el sólido siempre está dentro de una tubería cerrada evitando el contacto con el medio ambiente lo cual permite transportar materiales peligrosos, tóxicos, biológicos, etc. [5]. Un sistema general de transporte se muestra en la figura 1.

Figura 1. Esquema de un sistema de transporte neumático a presión positiva



Fuente: Vásquez et al (2016)

En la industria química es ampliamente utilizado en el transporte de carbonato de sodio, polietileno, PVC y polipropileno en una amplia variedad de formas, desde polvos finos a gránulos involucrando transporte a empaque o granel. [7].

1.2 DIAGRAMA DE ESTADO

Para un producto específico transportado en una tubería con un diámetro dado, los diferentes tipos de flujo gas-sólido son descritos según la velocidad del aire a una velocidad de flujo de masa de sólidos constante (ANEXO A). A altas velocidades del aire, las partículas entran en un estado de suspensión uniforme radial, lo cual se denomina flujo totalmente suspendido (fase diluida). A velocidades bajas de aire se produce la segregación de partículas y se logra un flujo tipo *strang* (dunas). Si la velocidad es menor a la anterior, la caída de presión aumentará pasando a una zona de transición donde el flujo es totalmente inestable. Si la transición es gradual hacia la izquierda de la figura del ANEXO A, se formará un lecho estacionario en el fondo de la tubería mientras que las partículas se transportan en una capa deslizante sobre este [8].

1.3 FUNDAMENTOS FÍSICOS DEL TRANSPORTE DE SÓLIDOS EN FASE DILUIDA

Los cálculos para el diseño de un sistema de transporte en fase diluida se basan en la determinación de la caída de presión que se genera en el sistema debido al flujo de gas y sólidos. Los aspectos a incluir en el análisis del transporte de sólidos en fase gaseosa son: la fricción del gas contra la pared del tubo, la fuerza necesaria para mover la masa de sólidos a través de la tubería de transporte, en tubos verticales la fuerza requerida para soportar el peso de los sólidos y el peso del gas, la fuerza requerida para acelerar los sólidos y la fricción entre la tubería y los sólidos [3] [9].

La pérdida de presión del medio de transporte (aire) puede ser predicha mediante la ecuación Darcy (1) [10] considerando que el flujo es isotérmico y que la pérdida por segmento ($P_1 - P_2$) se encuentra entre 10 y 40% de la presión de entrada P_1 .

$$\Delta P_f = \frac{fL}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (1)$$

Existen ecuaciones específicas que muestran mayor exactitud para flujo de sólidos en fase diluida. Algunas son:

- a) Zens y Othemer 1960 [11]: Modelas líneas horizontales y verticales, el primer término es la caída de presión por aceleración del gas, el segundo término por aceleración del sólido, el tercer término la fricción entre el sólido y la tubería, el cuarto término por la fricción entre el sólido y la tubería. Para línea vertical el término adicional indica el peso que debe soportar en la línea vertical

$$\Delta P_{(hor)} = \frac{v_g^2 \cdot \rho_g}{2g} + \frac{w \cdot v_p}{g} + \frac{2 \cdot f \cdot \rho_g \cdot v_g^2 \cdot L}{g \cdot D} \cdot \left(1 + \frac{f_p \cdot v_p \cdot w}{f \cdot v_g^2 \cdot \rho_g} \right) \quad (2)$$

$$\Delta P_{(ver)} = \Delta P_{(hor)} + \frac{w \cdot L}{v_p} \quad (3)$$

- b) Muschelknautz (1969) [12]: El modelo usa un factor de fricción para el material sólido similar a la ecuación de Darcy. También considera los efectos de aceleración al principio de la tubería y pérdidas por accesorios.

$$\Delta P_s = \frac{\rho_f}{2} v_f^2 \left(\frac{\Delta L}{D} \mu \delta_s + \mu \frac{c}{v} (1 + i) \right) \quad (4)$$

- c) Siegel (1991) [13]: Incluye el factor de fricción del sólido hallado experimentalmente, la pérdida ocasionada por la aceleración, la elevación de sólidos y la elevación total de los sólidos

$$\Delta P_s = -\frac{\rho_f}{2} v_f^2 \left[\left(\delta_s \frac{\Delta L}{D} + \sum \varepsilon \right) + \mu \left(\delta_s \frac{\Delta L_1}{D} \frac{\Delta L}{\Delta L_1} + 2 \frac{c}{v} + 2 \frac{2gh\Delta L}{c_* v^2} + \frac{c}{v} i \right) \right] \quad (5)$$

1.4 SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE LA PLANTA POLIETILENO II

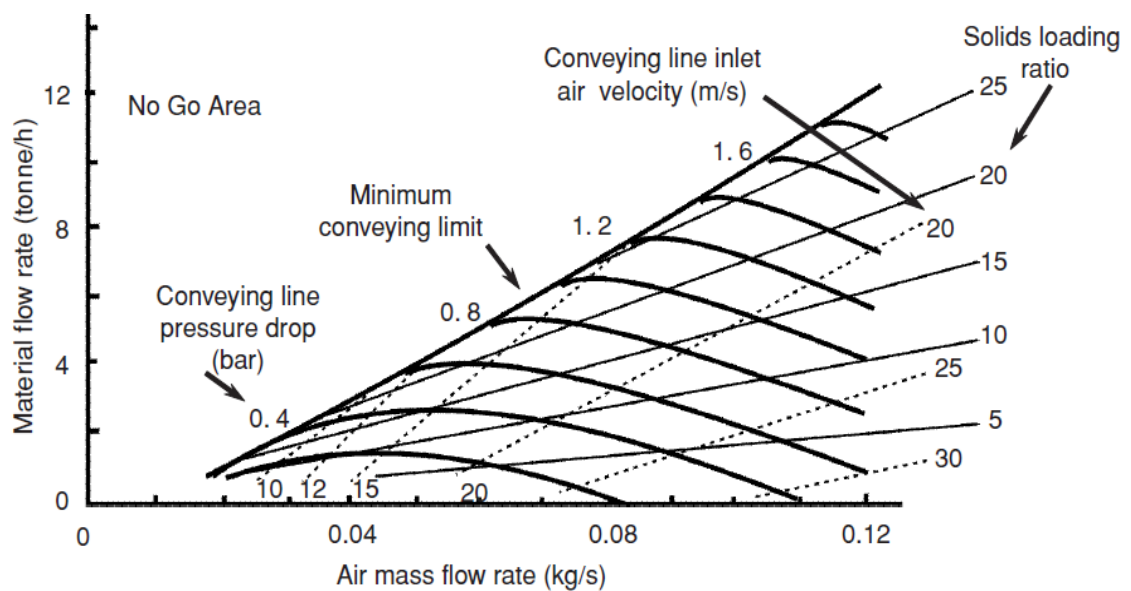
El proceso consiste en sistemas de transporte neumático a presión positiva para *pellets* de polietileno de 1/8" de diámetro. El fluido empleado para el transporte es aire comprimido y finaliza en la empacadora en sacos y/o en el silo de carga a granel. La producción de Poli II es de 12000 lb/hr. Para purgar el etileno contenido en los *pellets* y evitar la compactación del polietileno en las tolvas o silos, se tienen líneas de aire purga. Hay cabezales para tomar líneas de servicios de agua de enfriamiento, agua de lavado, nitrógeno de inertización de tolvas y aire de

instrumentos. El sistema de transporte es a presión positiva y en fase diluida. Se consideran líneas de proceso las que transportan polietileno y las líneas de suministro de aire para transporte de polietileno. Un resumen de la bases de diseño se puede consultar en el ANEXO B [14] y el diagrama grande de proceso en el ANEXO C [15].

1.5 FLUJO EN FASE DILUIDA DE POLIETILENO DE BAJA DENSIDAD (LDPE)

Las tendencias reportadas para el transporte neumático de gránulos de polietileno se presentan en la Figura 2. Según esta figura, el flujo de sólidos es posible a bajas velocidades y a su vez sensible a cambios en la caída de presión. Un valor óptimo del caudal de material se produce a una velocidad de aire de entrada cercana a los 15 m/s, que corresponde con el valor mínimo de velocidad del aire de transporte en fase diluida [3]. Las curvas paramétricas de la caída de presión indican que existe un flujo mínimo de aire como correspondencia a la curvatura, por lo cual, el análisis del flujo de polietileno en fase gaseosa puede ser asociado con un problema de optimización.

Figura 2. Datos de transporte de *pellets* de polietileno en fase diluida.



Fuente: Mills (2004)

1.6 PROBLEMAS FRECUENTES EN TRANSPORTE NEUMÁTICO DE MATERIALES POLIMÉRICOS EN FASE DILUIDA

Mills (2004) [3], menciona dos problemas típicos en transporte neumático, el primero tiene que ver con la obstrucción de las líneas de transporte ocasionado por el bajo flujo de aire o alta carga de sólidos que no corresponde a la fase diluida y el segundo a la degradación del material polimérico y la erosión en la tubería. La degradación o generación de finos¹, *streamers*², y cabellos de ángel³ se debe en gran medida a la velocidad del aire, la temperatura de los gránulos, la superficie de la tubería, el ángulo de impacto y la geometría de los codos [16]. Sin embargo, la velocidad es probablemente la variable más importante en los efectos de degradación de gránulos. [3].

1.6.1 Variables que ocasionan la degradación del material

- a) Velocidad de transporte: se debe garantizar que el sólido transportado fluya a la velocidad más baja posible, con lo cual se logra la reducción en la degradación del polietileno [7]. En materiales poliméricos esta degradación se observa cuando ocurre disminución del tamaño de la partícula traducido en la generación de finos (Figura 3), *streamers* y cabellos de ángel. (ANEXO D) [9].

¹Resultado del desgarro de los gránulos de polímero cuando entran en contacto con superficies de transporte ásperas a altas velocidades. Tamaños entre 2 μm y 1000 μm .

² Formados por la fricción y el contacto prolongado con superficies lisas. Son cintas anchas (>2mm) y una longitud aproximada de 20 mm.

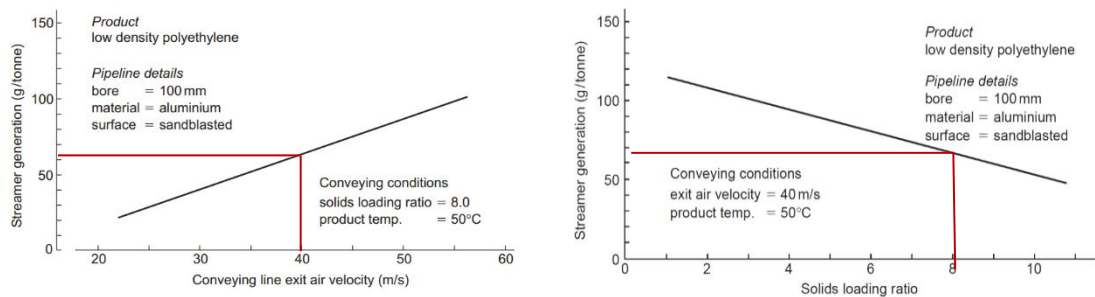
³ Hilos entre 1 a 10 cm de longitud y <2mm de grosor.

Figura 3. Finos de polietileno



Fuente: Coldeplast (2016)

Figura 4. Influencia de la velocidad de salida del aire y relación de sólidos en la generación de *streamers*.



Fuente: Mills (2004)

Según Pelletron una resina limpia sin cabellos de ángel, finos y con un contenido de *streamers* muy por debajo de 50 ppm es el requisito en el mercado actual. De acuerdo a esto, la concentración de *streamers* límite corresponde con un valor de 34 m/s (111.54 ft/s) de velocidad terminal del aire [17]. Diferentes autores describen heurísticas para velocidad terminal como se muestra en el ANEXO E

- b) Relación sólido/aire: el incremento de relación sólido/aire garantiza una generación baja de *streamers*, a una velocidad terminal de 40 m/s (figura 4). Si aumenta la cantidad de polietileno en la línea de transporte se genera mayor resistencia del aire para fluir, disminuye su velocidad y por lo tanto la

del polímero, ocasionando que el transporte se produzca en mejores condiciones [3].

- c) Temperatura del aire de transporte: El roce generado por el paso del polietileno en la pared de la tubería y altos valores de temperatura en el aire de transporte ocasionan que los *pellets* se ablanden, generando hebras en el interior de la tubería [18]. Empresas especializadas en transporte neumático como Lyondell [19] sugieren que temperaturas menores a 100°F son apropiados para evitar la formación de *streamers*.

1.7 PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Las válvulas de las tovas de los alimentadores (TV-2253 A/B/C/D y TV-2254/B/C/D), presentan taponamientos debido a la presencia de finos y *streamers* en el transporte neumático de polietileno. Lo anterior sugiere que las condiciones de operación del sistema han cambiado respecto a las condiciones de diseño del transporte. La verificación del esquema de operación actual permitirá determinar si el sistema se encuentra en una condición subóptima respecto a su diseño original.

Por otro lado, algunas empresas de plásticos como Coldeplast y Química Comercial Andina manifiestan que la presencia de este material en el producto bloquea las boquillas de las máquinas de calibre inferior a 1 y a su vez la película que se produce presenta grumos. A pesar que los sistemas de transferencia disponen de 4 colectores de polvo y un elutriador⁴ como equipos de limpieza de material, el problema persiste.

⁴Equipo de limpieza utilizado para separar el polvo unas otras partículas finas de otro material

1.8 OPTIMIZACIÓN

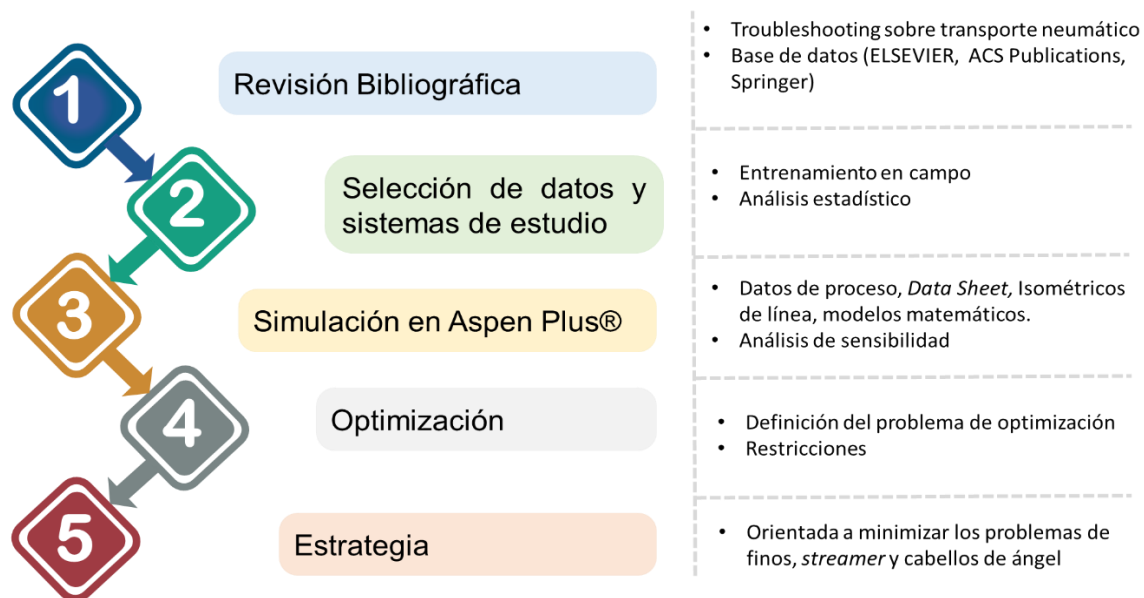
Matemáticamente, si un problema de optimización se efectúa sobre todo el dominio de la función se habla de optimización no restringida, y si se hace sobre un conjunto del dominio, llamado conjunto de restricciones, la optimización es restringida [20]. Cuando el problema está restringido generalmente se somete a a:

- Restricciones de igualdad: Se encuentran las condiciones que satisfacen los óptimos de una función $J(x)$ sobre un conjunto de la forma $\min_x J(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y un conjunto de ecuaciones de igualdad $h_1 J(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; h_2 J(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0; \dots h_m J(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0$ y $n > m$
- Restricciones de desigualdad: Se encuentran las condiciones que satisfacen los óptimos de una función $J(x)$ sobre un conjunto de la forma $\min_x J(x_1, x_2, \dots, x_n)$ y un conjunto de ecuaciones de igualdad $h_1 J(x_1, x_2, \dots, x_n) > 0; h_2 J(x_1, x_2, \dots, x_n) < 0; \dots h_m J(x_1, x_2, \dots, x_n) \geq 0$ y $n > m$

Aspen Plus 8.8®, utiliza el método SQP (*Successive Quadratic Programming*) como método de resolución del problema de optimización no lineal con restricciones. SQP resuelve las condiciones de optimalidad de Karush-Kuhn-Tucker, utilizando el método de Newton (o métodos cuasi Newton) [21]. En optimización de procesos químicos en los que se ha aplicado este método, los resultados computacionales demuestran su efectividad y eficiencia [22].

2. METODOLOGÍA

Figura 5. Diagrama metodológico



FASE I: Revisión Bibliográfica

Búsqueda de información primaria sobre transporte neumático, simulación en Aspen Plus y troubleshooting relacionado con el transporte neumático de polietileno.

FASE II: Datos y sistemas de estudio

Recopilación de datos del DCS cada 20 minutos de los sensores que funcionan de acuerdo a las guías y ventanas operativas desde el mes de Junio al mes de Agosto de 2016, de la presión de descarga de los compresores, temperatura de salida de los intercambiadores de placas, y peso de las tolvas horarias T-2251A/B. Una vez descargado los datos, se utilizó el complemento *MegaStat* de *Excell*, y se realizó el análisis estadístico.

FASE III: Simulación en Aspen Plus®

Con los datos de proceso, isométricos de línea [14], *data sheet* de intercambiadores y compresores, datos de caída de presión en accesorios, y referencias bibliográficas, se realiza el chequeo hidraulico de los sistemas de transferencia. De acuerdo a la búsqueda bibliografica, no se encontraron suficientes datos experimentales para evaluar el porcentaje de error [4, 23] algunos estudios reportan datos del montaje pero no de los datos de proceso [6, 24] y lograr predecir los datos de entrada de acuerdo a los resultados obtenidos no es posible debido a las infinitas combinaciones de flujo de solido-aire que se pueden hacer. Sin embargo, la comparación de los resultados se efectúa con relación a los datos de diseño del proceso.

En la simulación, se usa el modelo termodinámico IDEAL para el aire y SOLIDS para el polietileno [21]. En el entorno *Simulation* se utiliza el bloque Pipe, que se modela en dos partes, por un lado modelado solo con aire y el otro con sólido transportado en fase diluida. Se selecciona la correlación de Morelus (1999) [1] para determinar la velocidad de saltación. Los segmentos de tubería se especifican sin transferencia de calor y los que contienen el flujo bifásico se modelan de acuerdo a la ecuación de Darcy para el fluido de transporte y con Muschelknautz para el transporte del polietileno. En la tabla 1 se describe los demás parámetros para simular un segmento de tubería.

Tabla 1. Datos de entrada a los bloques *Pipe*, en Aspen Plus®

Parámetro	Descripción	Referencia	Parámetro	Descripción	Referencia
Velocidad de saltación	$\sqrt{\frac{M_s g}{\rho_{aire}}}$	[1]	Longitud equivalente	Isométricos de línea	Ingeniería de detalle [14]
Factor K, codo 90°	6 in=0.9 10 in= 0.84	Tabla A-24 [10]	Schedule	6 in=6.325 in 10 in = 10.42 in	Ingeniería de detalle [14]
Factor K, codo 5D	6in=0.255 10 in=0.238	Tabla A-24 [10]	Datos de proceso	ANEXO F. Tabla 1 (datos en gris)	Gerencia Refinería de Barrancabermeja

FASE IV: Optimización

De acuerdo a la curva paramétrica de la caída de presión en la Figura 3, se verificó que la velocidad del aire es una variable que puede generar una función convexa y por lo tanto un mínimo local. A partir de esta hipótesis, y la discusión de la influencia de las variables en la generación de finos, se plantea la siguiente pregunta de optimización, ¿cuál debe ser el flujo óptimo de aire que minimiza la generación de finos?

En este orden de ideas, la caída de presión para este caso de investigación es una función de las variables $\Delta P \rightarrow f(m_s, m_f, v_f^2)$, las demás variables de cualquiera de los modelos ahora se convierten en constantes que están sujetas al diseño y montaje en planta, como longitud y diámetro de tubería, rugosidad y el factor de fricción ahora varía con forma la velocidad del gas o del sólido. De esta manera al minimizar la caída de presión el flujo de aire se minimiza.

FASE V: Estrategia:

De acuerdo a los resultados obtenidos por la optimización SQP, según código ASPEN, se describe el comportamiento en general de los sistemas y se genera la estrategia orientada a minimizar la degradación del material polimérico.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 SELECCIÓN Y ANÁLISIS DE DATOS

Los datos del sistema de transferencia de la unidad U-2250, se seleccionaron desde las 00:00 h del 01/06/2016 hasta las 00:00 h del 01/09/2016. El sistema global se encuentra dividido en 7 sistemas principales y otros 4 auxiliares, el sistema 1 opera en forma continua y los demás por lotes, razón por la cual se tomaron datos cada 20 min. Para los sensores que no se encuentran comunicados al sistema DCS (Sistema de Control Distribuido) se tomaron datos en campo. En total se tiene un registro de 15404 datos para sensores de presión de descarga de los compresores, temperaturas en los intercambiadores y peso de las celdas de las tolvas TV-2251 A/B. Los datos atípicos fueron eliminados según el rango intercuartíl. En el ANEXO F, se presentan los estadísticos de la ventana operativa, del cual se obtienen errores relativos entre 5 y 53%, tanto para las variables de proceso como para la estimación de la caída de presión y la velocidad del aire. En el ANEXO G, se presentan los datos de proceso y los diagramas *BoxPlot*, utilizando el complemento *MegaStat*.

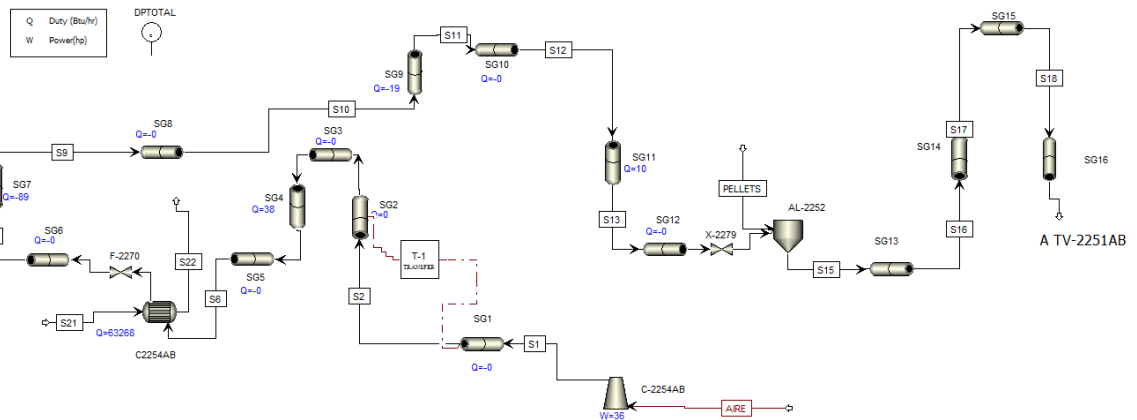
3.2 VERIFICACIÓN DE LAS CONDICIONES OPERACIONALES

En la Figura 6 se observa el sistema 1 de acuerdo a la simulación. Los resultados concuerdan con una operación en fase diluida, garantizando que el sistema opera por encima de las condiciones mínimas de fluidización siendo un indicador favorable en el desempeño de la simulación a la situación actual en planta. Con los datos obtenidos de cada sistema se verificaron las variables que se muestran en la tabla 2. De estos datos es posible mencionar inconsistencias por parte diseño que incluye errores tipográficos en datos como la presión de descarga de los compresores y el *Duty* transferido, que se comprobaron con una verificación en campo debido al poco detalle por parte del proveedor en cuanto a *data sheet*.

Figura 6. Esquema del sistema de transferencia 1, en Aspen Plus®.

SISTEMA 1

Válvula rotatoria AL-2252 a tolvas de inspección TV-2251 A/B



Los sistemas de transferencia a pesar de operar correctamente (en planta), tienen grandes desviaciones en cuanto a detalle, lo dificultó la tarea de validación de las condiciones operacionales, sumado a la escasa información en la literatura en experimentos con polietileno.

Partiendo de que el diseño de la planta establece que los sistemas 1 y 7 cuentan con un sistema de compresión independiente, mientras que las combinaciones 2-3 y 4-5-6 comparten el mismo compresor, al comparar con la ingeniería de detalle se observa errores en la presión de descarga y la predicción de la caída de presión de los sistemas 4,5,6. La longitud equivalente se hace mayor conforme el sistema aumenta en número (1, 2,3...) por lo tanto la caída presión debe tener el mismo comportamiento, situación que no se presenta en la ingeniería de detalle, por ende aumento en el error relativo.

Se puede inferir que el sistema de transferencia opera a bajas relaciones sólido-gas las cuales están comprendidas entre 2 y 4, esto ocurre por alto flujo de aire. Al ubicar el dato de operación de los sistemas en la figura 2, se observa que los puntos para cada sistema se ubican por fuera del diagrama lo cual es un indicador de que los sólidos están totalmente suspendidos, lo que ocasiona alta velocidad superficial del fluido. La velocidad inicial de sólido está por encima de los 70 ft/s (21.33 m/s) tanto en diseño como la que se predijo, para todos los casos.

Tabla 2. Resumen por sistema de las principales variables de proceso y de diseño de los sistemas de transferencia.

	Sistema 1			Sistema 2			Sistema 3			Sistema 4			Sistema 5			Sistema 6			Sistema 7		
	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error	A. Plus	ID	%Error
Relación s/a	1,9	2,4	22,4	2,2	4,9	54,5	5,4	4,2	28,4	3,5	4,0	12,2	3,5	4,0	12,2	3,5	4,0	12,2	3,5	4,2	16,3
Presión de descarga del compresor (psig)	4,3	2,9	49,3	5,5	6,4	13,6	5,5	5,5	0,4	5,4	7,3	26,3	5,4	7,3	26,3	5,4	7,3	26,3	5,4	3,4	58,2
Caída de presión total (psig)	3,2	3,3	1,5	5,1	4,8	7,7	5,4	4,2	28,4	5,5	3,8	45,1	5,6	3,3	71,8	4,8	3,3	45,7	4,5	3,8	19,2
Temperatura de descarga del compresor [°F]	149,4	156,9	4,8	163,1	152,4	7,0	131,0	120,0	9,2	161,3	218,0	26,0	161,3	156,9	2,8	161,3	156,9	2,8	154,0	218,0	29,4
Temperatura de salida del intercambiador [°F]	108,0	97,0	11,4	131,0	119,5	9,6	95,4	96,3	1,0	108,0	139,2	22,4	108,0	124,0	12,9	108,0	124,0	12,9	113,1	139,2	18,8
Velocidad inicial del aire [ft/s]	93,6	139,6	33,0	100,6	139,6	28,0	99,0	135,3	26,8	91,2	127,1	28,3	91,2	139,6	34,7	89,7	139,6	35,7	88,4	128,0	30,9
Velocidad terminal del aire [ft/s]	105,9	145,4	27,1	128,4	145,4	11,7	128,4	143,4	10,5	111,2	127,3	12,6	111,2	145,4	23,5	112,8	145,4	22,4	113,5	130,5	13,0
Duty [kBtu/h]	63,3	64,8	2,4	55,2	75,6	27,0	55,2	75,6	27,0	78,0	261,0	70,1	78,0	261,0	70,1	78,0	261,0	70,1	167,2	246,8	32,3

De acuerdo a la literatura un aumento en la relación de sólidos aumenta la generación de *streamers* así como lo es la velocidad terminal del aire. Aquí la baja relación de sólidos podría generar entre 90 a 110 g de *streamers* por tonelada producida, suponiendo una velocidad terminal de 40 m/s por ejemplo para el sistema 3, y una correspondencia similar para los demás sistemas. Asimismo, al operar a condiciones bajas de presión distintas a las que se plantean en la literatura, puede ocasionar situaciones de bloqueo. En vista que el proyecto fue terminado en el año (2007), es claro que el diseño se desvía en gran medida de la heurística correspondiente a la generación de finos y *streamers* por alta velocidad, esta hipótesis concuerda con el argumento de Mills (2004) [3], en el cual los sistemas de sobre diseñan deliberadamente con el único objetivo de garantizar la operación de la planta y minimizar el tiempo de puesta en marcha.

3.3 Análisis de sensibilidad de los sistemas

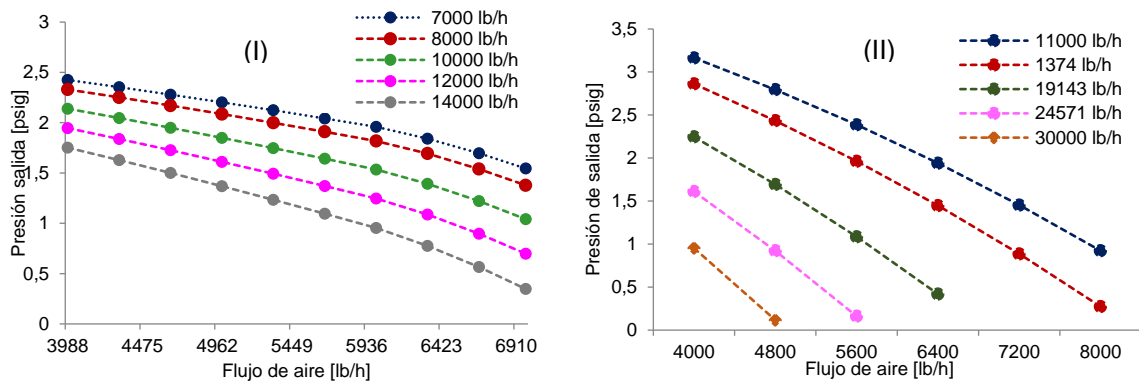
Para definir si es posible la fluidización y evitar que las líneas de proceso se obstruyan, se realizaron dos tipos de variaciones con dos variables; presión de salida de la línea justo antes de la descarga a la tolva destino y velocidad terminal a diferentes flujos máxicos de sólidos y aire, obtenidos en las figuras 6 y 7. Primero, se debe garantizar que la línea de proceso no llegue a valores inferiores que la presión local (14.7 psia), para flujos por encima entre un 10 y 20% y por debajo entre el 20 y 40% tanto para aire como para sólido respectivamente.

Por simulación, de acuerdo a la gráfica 7, existen dos tipos comportamientos para la primera variación. I) corresponde al sistema 1 y es representativo para los sistemas 3,4 y 5 (ANEXO H). Si la presión al momento del punto de mezcla es igual en todos los casos, a menor flujo de aire menor caída de presión, sin embargo, a altos flujos de aire a sólido constante la presión de salida no alcanza a ser la atmosférica, por lo tanto estos sistemas pueden arrastrar flujos más altos de sólidos a la capacidad máxima del compresor instalado. Por otro lado, los del tipo II), que

se representa con el sistema 2 y es representativo para los sistemas 7 y 8 (ANEXO H), la presión de salida es más sensible a flujos altos de sólidos.

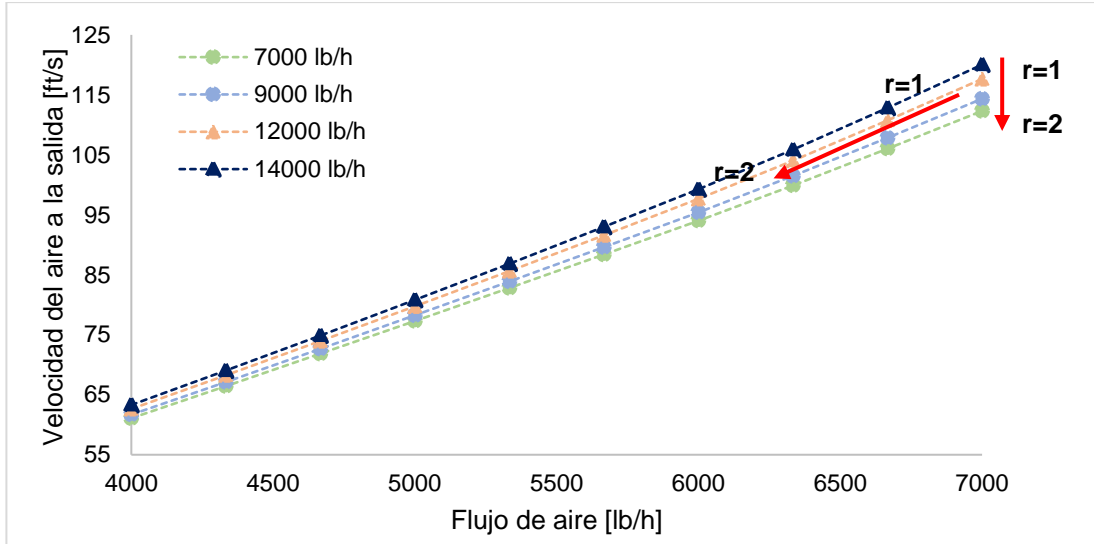
Con estos resultados es posible operar a diferentes flujos de aire y sólidos de acuerdo a las figuras 7 y el ANEXO H, sin que la línea reporte presiones negativas.

Figura 7. Presión de descarga de la línea de proceso vs flujo de aire-sólido del sistema 1, de acuerdo a simulación.



La segunda condición consiste en garantizar que el flujo de salida alcance 100 ft/s (30,48 m/s) [19]. De acuerdo con la literatura se verifica que un aumento de la relación sólido/aire disminuye la velocidad terminal con una relación de flujo de aire constante y flujo de sólido variable tal como se observa en la figura 8. De esto se infieren dos patrones que se replican para todos los sistemas. Un movimiento vertical (flujo de aire constante) expresa poca sensibilidad en la velocidad terminal, si se desea alcanzar con mayor rapidez la velocidad terminal deseada el movimiento debe ser diagonal (sólido constante y aire variable) de esta manera la sensibilidad es notoria y el efecto de la disminución de la velocidad de salida es apreciable.

Figura 8. Velocidad del aire de salida de descarga de la línea de proceso vs flujo de aire-sólido del sistema 1, de acuerdo a simulación



De la figura 8 es posible inferir que la relación sólido/aire para las condiciones instaladas no influye en la fluidización de las partículas del proceso instalado, lo cual se refleja en la presión de salida de la línea justo antes de llegar a la atmósfera; a esto se agrega que la variación de la alimentación de sólidos está limitada a la producción horaria y la capacidad de tolvas y silos por lo tanto existe poca sensibilidad. De acuerdo con este análisis, se evidencia la producción de finos, *streamers* y cabellos de ángel en los sistemas de transferencia de polietileno II y que los sistemas puedan migrar a otro estado operativo que logre alcanzar la velocidad límite para que la degradación de acuerdo a la figura 2, lo cual permite tener diferentes puntos que satisfagan los requerimientos. Dadas estas condiciones el sistema puede ser direccionado como un problema de optimización.

3.4 Resultados de la optimización

De acuerdo a la literatura, el modelo de Muschelknautz puede utilizarse para simular el comportamiento de materiales poliméricos que incluyen al polietileno de baja densidad en fase diluida. La descripción del modelo de optimización es mostrada en la siguiente tabla.

Tabla 3. Descripción modelo de optimización.

Total de variables	$\rho_f, v, f, \Delta l, D, \delta_s, \frac{c}{v}, i, \varepsilon, \Delta P, \mu$
Grados de libertad	<ul style="list-style-type: none"> • Variables ($v, \Delta P, \mu$) +3 • Ecuaciones indendientes ($\Delta P_s, \Delta P_f$) -2 <li style="text-align: right; border-top: 1px solid black;">Total +1
Sujeto a	Variación al flujo de aire $\mu f(m_f)$ de acuerdo al análisis de sensibilidad (de acuerdo a cada sistema).
Resctricciones	Velocidad inicial sea igual a $v = 21,33 \text{ m/s}$ La caída de presión sea mayo a 0 $\Delta P > 0$
Formulación	$\text{Min } (\Delta P)_{\mu, v} = \frac{\rho_f}{2} v^2 f \left(\frac{\Delta l}{D} \mu \delta_s + \mu \frac{c}{v} (1 + i) \right) + \frac{f L v^2}{D 2g} + k \frac{v^2}{2g}$

Donde ρ_f es la densidad del gas (aire), v^2 la velocidad del gas (aire), Δl delta de longitud del segmento de tubería, D , diámetro de la tubería, μ relación sólido/aire en Kg, $\frac{c}{v}$ relación velocidad del sólido/velocidad del aire que para polietileno de baja densidad corresponde a 0.8 experimental [13], i número de codos en la sección, f factor de fricción del gas (aire), g aceleación por gravedad y k factor K para pérdidas menores.

Los resultados de la optimización aplicada según el código de Aspen Plus®, (Tabla 4), disminuciones entre el 9 y 29% del flujo de aire logran minimizar la caída de presión y la velocidad inicial y terminal del fluido de transporte. De esto surge una alternativa para disminuir la generación de finos en el sistema, la cual consiste en

derivar este porcentaje de flujo a la atmósfera, instalando válvulas de control con silenciador en las líneas de 6 in y 10 in, en la descarga del compresor. Con menos flujo en la línea de proceso se reduce el trabajo de los intercambiadores lo cual favorece la operación por disminución en temperatura, esto implica que las temperaturas podrían ser menores.

En términos económicos, realizar una reposición de los compresores con el ahorro anual, es innecesario, debido a la magnitud del costo de los equipos (Ver TABLA 4). Asimismo, aplicar una disminución en la velocidad de los compresores haciendo un cambio de relación de polea, no es viable debido a que el fabricante del equipo manifiesta que una modificación mecánica puede repercutir en la disminución de la confiabilidad e integridad del mismo [16].

Tabla 4. Resultados del modelo de optimización

		Condición	Velocidad inicial aire [m/s]	Velocidad terminal aire [m/S]	Caída de presión (psig)	Potencia (Hp)	Ahorro anual (COP)
C-2254 AB	Sistema 1	Base	29	42	3	35	
		25%	21	23	2	34	\$ 3.899.023
C-2255 AB	Sistema 2	Base	31	39	5	50	
		30%	21	25	3	35	
	Sistema 3	Base	31	39	5	50	
		29%	21	25	3	35	\$ 18.128.586
C-2256	Sistema 4	Base	28	39	4	115	
		10%	21	30	4	103	
	Sistema 5	Base	28	43	4	115	
		10%	21	31	3	103	
Sistema 6	Base	27	43	5	115		
	9%	21	31	5	103	\$ 16.618.253	
C-2257	Sistema 7	Base	27	36	4	104	
		21%	21	27	4	81	\$ 10.617.217
Ahorro total							\$ 49.263.079

4. CONCLUSIONES

En el plan estratégico del departamento de petroquímica se encuentra la revisión de guías y ventanas operativas, sin embargo, para los sistemas de transferencia tanto de la Poli I como de la Poli II, existe poca información de proceso que les permita hacer monitoreo de las principales variables y por lo tanto fijar estos valores que garantizan la seguridad del proceso. Este trabajo de investigación actualiza el diagrama de flujo de proceso (PFD) y da apertura al estudio del sistema de transferencia de Polietileno.

Según los resultados del presente trabajo de grado, la alternativa de derivación de aire, es una opción de bajo costo que permite disminuir el trabajo de los colectores de polvo y por tanto aumentar la colección de finos generados por el desgaste de polietileno durante el transporte neumático. Sustentado en lo anterior, actualmente se están instalando unos codos optimizados en las líneas, que hacen de colchón en las tuberías previniendo la formación de finos y la erosión en las tuberías.

5. RECOMENDACIONES

El paso a seguir consiste en instalar medidores de presión en la línea de transporte del sistema 1, el cual tiene como ventaja la operación en continuo (facilidad de recolección de datos) y menor longitud de tubería. Así mismo se debe diseñar una facilidad en las tolvas TV-2251A/B para recolectar muestras y cuantificar la cantidad de finos, *streamers* y cabellos de ángel. Una vez registrado los hallazgos compararlos con el trabajo de simulación y estimar la desviación.

Para futuros trabajos es recomendable considerar los registros de cantidad de finos para los demás sistemas, tanto en colectores de polvo como el elutriador, seguido de reportes de *streamers* en laboratorio teniendo como referencia los requerimientos de calidad del mercado antes de hacer una ingeniería detallada para la derivación del aire.

CITAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] O. Molerus and U. Heucke. Pneumatic transport of coarse grained particles in horizontal pipes. *Powder Technology*, vol. 102, pp. 135-150, 1999.
- [2] Y. Wang, K. Williams, M. Jones and B. Chen. CFD simulation methodology for gas-solid flow in bypass pneumatic conveying-A review. *Applied Thermal Engineering*, vol. 305, pp. 185-208, 2017.
- [3] Mills, David, *Pneumatic Conveying Design Guide*, Second Edition ed., Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004, p. 650.
- [4] M. Zinchenko, *Determination of Particle Velocities in Pneumatic Conveying*, Telemark University College, 2013, p. 64.
- [5] F. Cabrejos, M. I. Jofré and J. Rojas. Biblioteca temática, Asociación Argentina de Materiales. 2004.[Consultado el 15 de Octubre del 2016]. Disponible en Internet: <http://www.materiales-sam.org.ar/sitio/biblioteca/laserena/21.pdf>.
- [6] N. Vásquez, Y. Fan and K. Jacob. Effect of material elasticity and friction on particle dynamics during dilute pneumatic conveying. *Powder Technology*, no. 303, pp. 90-99, 2016.
- [7] D. Mills , M. G. Jones and V. K. Agarwal. Types of Pneumatic Conveying in *Handbook of Pneumatic Conveying Engineering*, New York, Marcel Dekker, Inc, 2004, pp. 02-26.
- [8] I. J. M. Lecreps, *Physical mechanisms involved in the transport of slugs during horizontal pneumatic conveying*, 2011.
- [9] Centre for Industrial Bulk Solids Handling Glasgow Caledonian University, *Bulk solids handling equipment selection and operation*, vol. 1, D. McGlinchey, Ed., Glasgow: Blackwell Publishing, 2008, pp. 135-142.
- [10] CRANE, *Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*, Atlocumulco: McGraw Hill, 1992, pp. A 43 - A 53.
- [11] A. T. Agarwal. Theory and design of dilute phase pneumatic conveying systems. *Powder Handling & Processing*, vol. 17, no. 1, p. 6, 2005.
- [12] O. Morelus. Overview: Pneumatic transport of solids. *Powder Technology* , pp. 309-321, 1996.
- [13] Aspen Tech 8.8, *Conveying system* Aspen Technology, Inc., 2010.

- [14] Consorcio PCI & SPE Consulting, Consultoría para la terminación y consolidación de la ingeniería de detalle de los sistemas de transferencia de las plantas Polietileno I y II de la, Barrancabermeja, 2007.
- [15] Gerencia Refinería de Barrancabermeja, Manual de descripción de procesos de la unidad de Polietileno II, 0 ed., Barrancabermeja: RDW, 2012, p. 37.
- [16] J. D. Sierra Muñetón. Informe con las condiciones óptimas de velocidad de transporte, sistemas de sopladores o compresores y temperaturas máximas de aires para transporte neumático. Ecopetrol, Barrancabermeja, 2013.
- [17] Pelletron. Pelletron Supplies 50t/h Mobile DeDuster® to Plastic Manufacturer. Pelletron Corporatio. 2012. [Consultado el 17 de septiembre de 2016]. [En línea]. Disponible en Internet: <http://www.pelletroncorp.com/en/news-reader/pelletron-supplies-50th-mobile-deduster-to-plastic-manufacturer.html>.
- [18] H. J. Linder. Sistemas de transporte nuemático: Una recapitulación de soluciones acreditadas, incluso apra productos difíciles y problematicas complejas. CEO, 2003. [[Consultado el 19 septiembre de 2016].]. Disponible en internet: <http://www.interempresas.net/Quimica/Articulos/42046-Sistemas-de-transporte-neumatico-de-solidos.htmlV>.
- [19] Lyondellbasel. Handling and sotrage of LyondellBasell Polymers," Lyondellbasel. 2007. [Consultado el 19 de septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <https://www.lyondellbasell.com/en/products-technology/polymers/>.
- [20] A. Pecha , Optimización estática y dinámica en economía, 1 ed., Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2005, pp. 103-150.
- [21] Aspen Plus, Aspen Plus User Guide, vol. 10.2, Cambridge: Aspen Technology, Inc., 2010.
- [22] J. Aipeng, J. Zhushu, H. Jingtao and W. Jian, "Research of Large-Scale Reduced SQP Algorithm for Chemical Process System Optimization," IFAC Proceeding Volumes, vol. 41, no. 2, pp. 11034-11040, 2008.
- [23] F. Pon, K. Botros, P. Grabinski and B. Quaiattini. Experimental and plant data of pneumatic conveying characteristics of seven granular polyethylene resins in horizontal and vertical pipes. NOVA Chemicals Corporation, Austin, 2004.
- [24] N. Vásquez, K. Jacob, R. Cocco, D. Shrikant and G. E. Klinzing. Visual analysis of particle bouncing and its effect on pressure drop in dilute phase pneumatic conveying. Powder Technology, no. 179, pp. 170-175, 2008.
- [25] B. Ryan and S. Dehlinger. Minimizing the generation of fines and streamers through proper pneumatic conveying. Company, Lyondell Chemical, 2006.

- [Consultado el 19 septiembre de 2016]. Disponible en Internet: <https://www.lyondellbasell.com/en/products-technology/polymers/>.
- [26] Pelletron Corporation. Pelletron Supplies 50t/h Mobile DeDuster® to Plastic Manufacturer. 2012 [Consultado el 1 Diciembre de 2016]. Disponible en Internet: <https://www.pelletroncorp.com/es/news-reader/items/pelletron-supplies-50th-mobile-deduster-to-plastic-manufacturer-89.html>.
- [27] Shultz, Brad. How determine if your abrasive material can be pneumatically conveyed. 2007. [Consultado el 19 septiembre 2016]. Disponible en Internet: https://www.powderbulk.com/wp-content/uploads/2014/05/pbe_20081101_0054.pdf. [].
- [28] Bhatia, A. Pneumatic Conveying Systems. 2008. [Consultado el 09 octubre2016]. Disponible en Internet: <https://www.cedengineering.com/userfiles/Pneumatic%20Conveying%20Systems.pdf>.
- [29] Centre for Industrial Bulk Solids Handling Glasgow Caledonian University, Bulk Solids Handling: Equipment Selection and Operation, vol. 1, D. McGlinchey, Ed., Blackwell Publishing, 2008, p. 303.
- [30] Coldeplast, Reclamación materia prima, defecto en la Resina PEBD 640-641, Itaguí, 2016.
- [31] H. A. W.K, R. Chandana and M. Morten C. Application of the MP-PIC method for predicting pneumatic conveying characteristics of dilute phase flows. Powder Technology, vol. 310, pp. 318-328, 2017.
- [32] J. D. Sierra Muñetó. Informe de diagnóstico de la causas de contaminación y finos en las plantas de Polietileno de la GRB. Instituto Colombiano del Petróleo de Ecopetrol S.A., Barrancabermeja, 2013.
- [33] M. Zinchenko, Artist, Determination of Particle Velocities in Pneumatic Conveying. [Art]. Telemark University College, 2013.

BIBLIOGRAFÍA

AGARWAL, Amrit. Theory and desing of dilute phase pneumatic conveying systems. Powder Handling & Processing, 2005, vol.17., p. 6.

AIPENG, Jiang., ZHUSHU, Jiang., JINGTAO, Huang., & JIAN, Wang. Research of Large-Scale Reduced SQP Algorithm for Chemical Process System Optimization. IFAC Proceeding Volumes, 2008, vol. 41., p. 11034-11040.

CENTRE FOR INDUSTRIAL BULK SOLIDS HANDLING GLASGOW CALEDONIAN UNIVERSITY. Bulk solids handling equipment selection and operation. Glasgow: Blackwell Publishing, 2008. vol. 1. p. 290. ISBN: 978-1-405-15825-1.

CONSORCIO PCI & SPE CONSULTING. Consultoría para la terminación y consolidación de la ingeniería de detalle de los sistemas de transferencia de las plantas Polietileno I y II de la GRB. Barrancabermeja, 2007.

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. Atlocomulco, México: McGraw Hill, 1992. p. 230. ISBN: 968-451-846-3.

GERENCIA REFINERÍA DE BARRANCABERMEJA. Manual de descripción de procesos de la unidad de Polietileno II. Barrancabermeja: RDW. 2012.

LECREPS, Isabelle. Physical mechanisms involved in the transport of slugs during horizontal pneumatic conveying. München, 2011. Erlangung des akademischen Grades eines Doktor–Ingenieurs.

LYONDELLBASEL. "Handling and sotrage of LyondellBasell Polymers". {En línea}. {19 de septiembre de 2016} disponible en: (www.lyondellbasell.com/en/products-technology/polymers).

MILLS , David., JONES, Mark., & AGARWAL, Vijaj. Types of Pneumatic Conveying. In Hanbook of Pneumatic Conveying Engineering. New York: Marcel Dekker Inc, 2004. p. 2-26.

MILLS, David. (2004). Pneumatic Conveying Design Guide. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004. P. 645 ISBN 0-7506-5471-6.

MOLERUS, O., & HEUCKE, U. Pneumatic transport of coarse grained particles in horizontal pipes. Powder Technology, No.102, p 135-150.

MORELUS, O. Overview: Pneumatic transport of solids. Powder Technology, 1996.p. 309-321.

PAN, F., BOTROS, K., GRABINSKI, P., & QUAIATTINI, B. Experimental and plant data of pneumatic conveying characteristics of seven granular polyethylene resins in horizontal and vertical pipes. Austin: NOVA Chemicals Corporation, 2004. p. 18.

PECHA , Arsenio. Optimización estática y dinámica en economía. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2005.

PELLETRON. "Pelletron Supplies 50t/h Mobile DeDuster® to Plastic Manufacturer". (Pelletron Corporation) {En línea}. {19 de septiembre de 2016} disponible en: (www.pelletroncorp.com/en/news-reader/pelletron-supplies-50th-mobile-deduster-to-plastic-manufacturer.htm).

RYAN, B., & DEHLINGER , S. "Minimizing the generation of fines and streamers through proper pneumatic conveying". (Company, Lyondell Chemical) {En línea}. {19 de septiembre de 2016} disponible en: (www.lyondellbasell.com/en/products-technology/polymers/).

SIERRA MUÑETÓN, Juan Diego. Informe con las condiciones óptimas de velocidad de transporte, sistemas de sopladores o compresores y temperaturas máximas de aires para transporte neumático. Barrancabermeja: Instituto Colombiano del Petróleo, 2013.

SIERRA MUÑETÓN, Juan Diego. Informe de diagnóstico de la causas de contaminación y finos en las plantas de Polietileno de la GRB. Barrancabermeja: Instituto Colombiano del Petróleo, 2013.

VÁSQUEZ, N., FAN, Y., & JACOB , K. Effect of material elasticity and friction on particle dynamics during dilute pneumatic conveying. Powder Technology, 2016., No 303., p. 90-99.

VÁSQUEZ, Néstor., JACOB, Karl., COCCO, Ray., SHRIKANT , Dhodapkar., & KLINZING, George E. Visual analysis of particle bouncing and its effect on pressure drop in dilute phase pneumatic conveying. Powder Technolog,2008., No 179., p. 170-175.

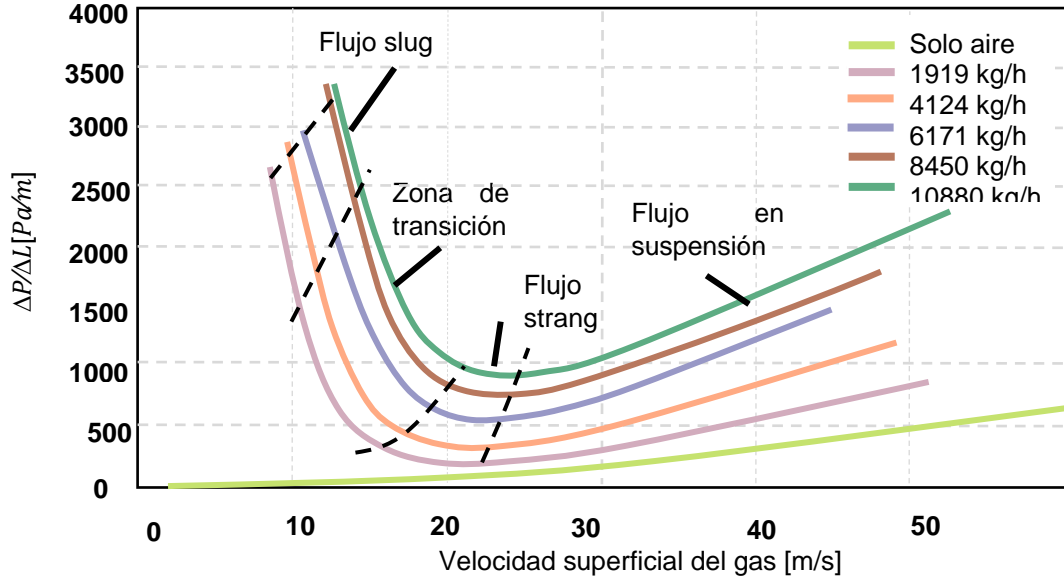
W.K, Hiromi Ariyaratne CHANDANA, Ratnayake., & MORTEN C, Melaaen. Application of the MP-PIC method for predicting pneumatic conveying characteristics of dilute phase flows. Powder Technology, 2017., No 310, p. 318-328.

WANG, Ying., WILLIAMS, Kenneth., JONES, M Mark., & CHEN , Bin. (2017). CFD simulation methodology fo gas-solid flow in bypass pneumatic conveyin-A review. Applied Thermal Engineering, No. 305, 185-208.

ZINCHENKO, Maryna. Determination of Particle Velocities in Pneumatic Conveying. Bø I Telemark, 2013, p. 64. Master's thesis. Faculty of technology.

ANEXOS

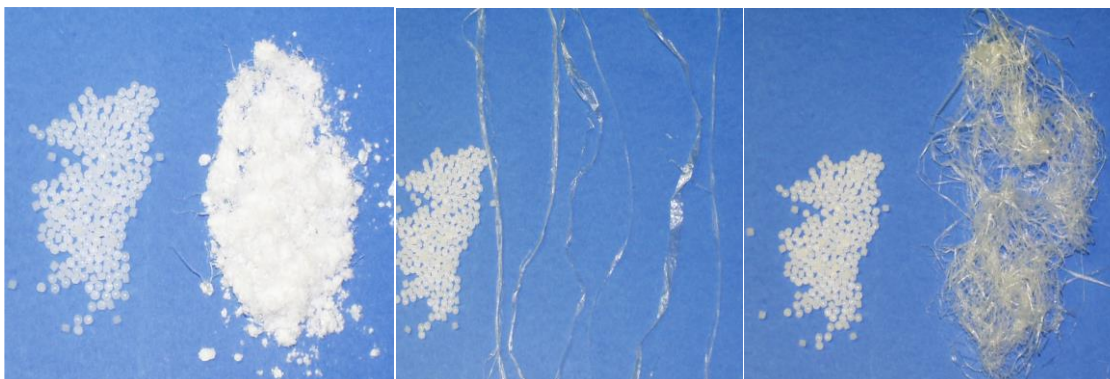
ANEXO A. DIAGRAMA DE ESTADO, PARA GRÁNULOS DE POLIPROPILENO (D_E=3MM) EN TUBERÍA DE 50 MM DE DI



ANEXO B. RESUMEN DE LAS BASES DE DISEÑO DEL SISTEMA DE TRANSFERENCIA DE POLIETILENO II.

Variable	Rango de diseño	Comentario
Presión	0 - 7 PSIG	Presión de operación
Temperatura	90 -180 °F	Temperatura de operación
DP (Aire)	1,5 PSIG por cada 100 FT lineales	Valor es el máximo permitido
ΔP (Aire- Pellets)	$\Delta P = \Delta P(\text{aire}) + \Delta P(\text{Pellet})$	Se permite la suma de la caída de presión del transporte de solo aire más el arrastre de sólidos, el cual depende del tamaño del sólido y del tipo de transporte fluidizado.
V(aire)	197 pie/s 11800 ft/min (60,04 m/s)	No debe exceder este valor o la velocidad a la cual el fluido genera ruido VGR que es: $VGR = 175 * (1/\text{paire})^{0.43}$ (para aire es 165 pies/s)
V(aire-pellet)	No se especifica	Debe ser superior a la velocidad de arrastre y sedimentación a lo largo de toda la línea de transporte.
V (pellet)	157,6 ft/s	En este caso es de $0,8 * V(\text{aire})$
Velocidad mínima de arrastre	70 pie/s 4200 ft/min (21,34 m/s)	Se determina experimentalmente y corresponde a este valor para el polietileno con diámetro de 1/8"

ANEXO D. TIPOLOGÍAS DE PROBLEMAS DE TRANSPORTE EN LÍNEAS DE TRANSPORTE DE POLIETILENO



Finos

Streamers

Cabellos de ángel

ANEXO E. HEURÍSTICAS DE PARA LA VELOCIDAD DE AIRE

Autor	Velocidad inicial del aire	Velocidad terminal del aire	Recomendaciones adicionales y otros datos operativos
Lyondell [25]	3500 ft/min (17,78 m/s) Velocidad óptima 4500 ft/min (22,86 m/s) [19]	6000 ft/min (30,48m/s)	Compresor: Controlar la velocidad del aire (ajustar rpm, instalar una purga de aire a la descarga del compresor) Alimentador rotativo: Operación entre 10-30 rpm. Trocío <math>T < 100^{\circ}\text{F}</math> Temperatura óptima 90°F
Pelletron [17]	5000 ft/min (25,4 m/s)	8000 ft/min (40,64 m/s)	Una resina sin streamers y con un contenido de polvo por debajo de 50 ppm es el requisito en el mercado de hoy [26].
CEO [18]	3000 ft/min (15 m/s)	8900(45 m/s)	Estos valores son generales (no corresponden para pellets de polietileno). Caída de presión 1,5 – 15 psig
Pneumatic conveying design guide [3]	2600 ft/min (13,2 m/s)*		Se garantiza buen flujo utilizando un 50% de caudal adicional \approx 3900 ft/min (20 m/s)
Brad Shultz [27]	4400 ft/min (22,35 m/s)	7700 ft/min (35,56 m/s)	
CED [28]	3200 ft/min (16,256 m/s)	8000 ft/min (40,64m/s)	Caída de presión 5-12 psig

* Velocidad mínima recomendada por el autor para el polietileno

ANEXO F. RESUMEN DE ESTADÍSTICOS PARA CADA VARIABLE, SIN DATOS ATÍPICOS

Descripción de la variable	Unidad	Mínimo	Máximo	Desviación estándar	1er Cuartil	Mediana	3er Cuartil	Dato diseño	Error relativo
Presión de descarga C-2254	Psig	4,0	4,4	0,1	4,2	4,3	4,3	2,9	33%
Temperatura de salida E-2272	°F	86,6	116,1	4,0	103,0	105,5	108,1	140,0	30%
Indicación de peso TV-2251A	lb	11499,3	14595,9	464,9	11718,3	11906,4	12120,5	14000,0	18%
Presión de descarga C-2255	Psig	4,6	6,9	0,5	4,7	5,0	5,5	6,4	16%
Temperatura de salida E-2273	°F	115,2	182,2	8,2	120,0	124,8	130,9	140,0	7%
Presión de descarga C-2256	Psig	3,9	5,8	0,5	4,5	4,8	5,4	5,1	5%
Temperatura de salida E-2274	°F	126,0	150,0	6,6	133,8	137,0	142,3	160,0	12%
Presión de descarga C-2257	Psig	3,8	5,3	0,4	4,1	4,5	4,8	7,3	53%
Temperatura de salida E-2275	°F	100,1	144,1	6,9	103,6	107,6	113,1	160,0	42%

ANEXO G. GRÁFICAS DE DISPERSIÓN Y BOXPLOT DE LAS VARIABLES DE PROCESO

Figura 4. Presión de descarga del compresor C-2254 (Sistema 1)

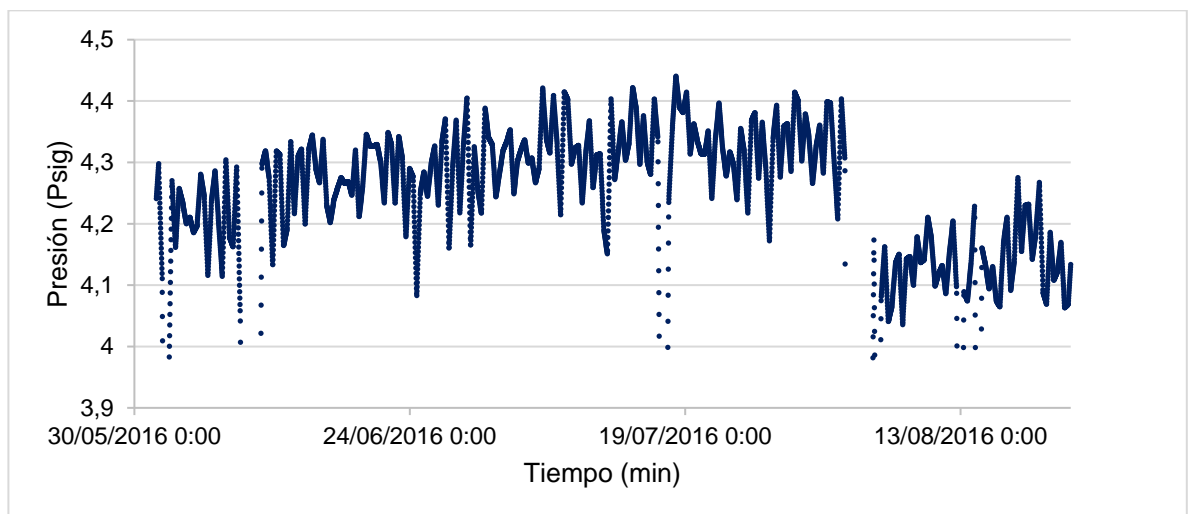


Figura 5.BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2254 (Sistema 1)

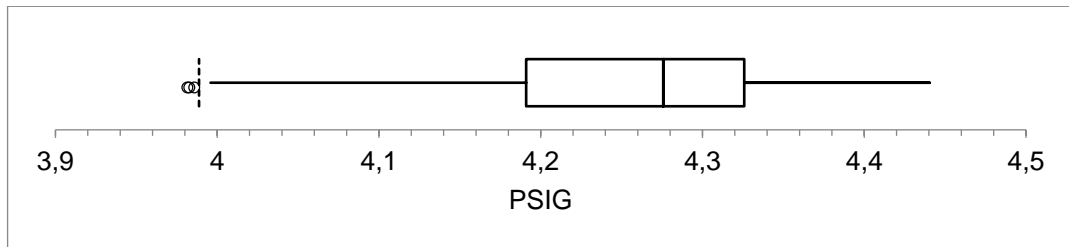


Figura 6.Temperatura de salida del intercambiador E-2272 (Sistema 1)

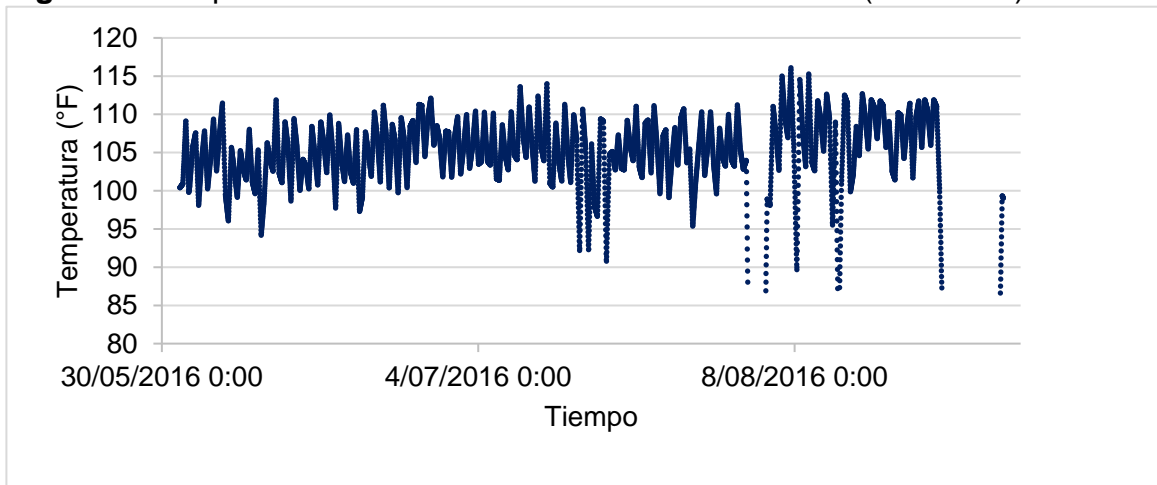


Figura 7. BoxPlot de la temperatura de salida del intercambiador E-2272 (Sistema1)

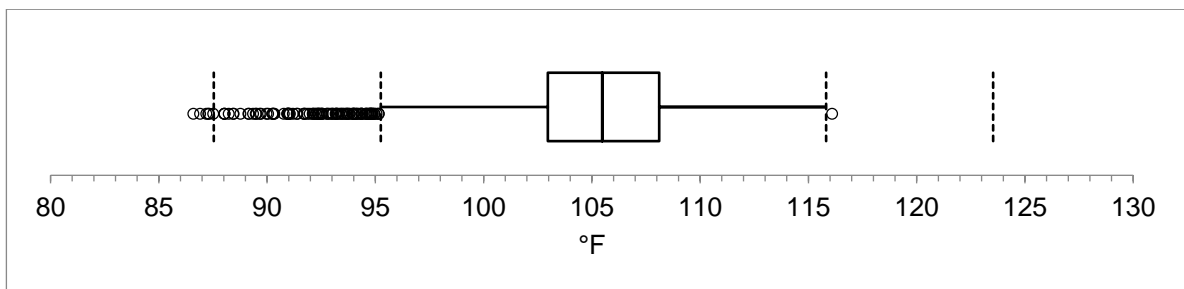


Figura 8.Indicación de peso de la tolva T-2251 A/B (Sistema 1)

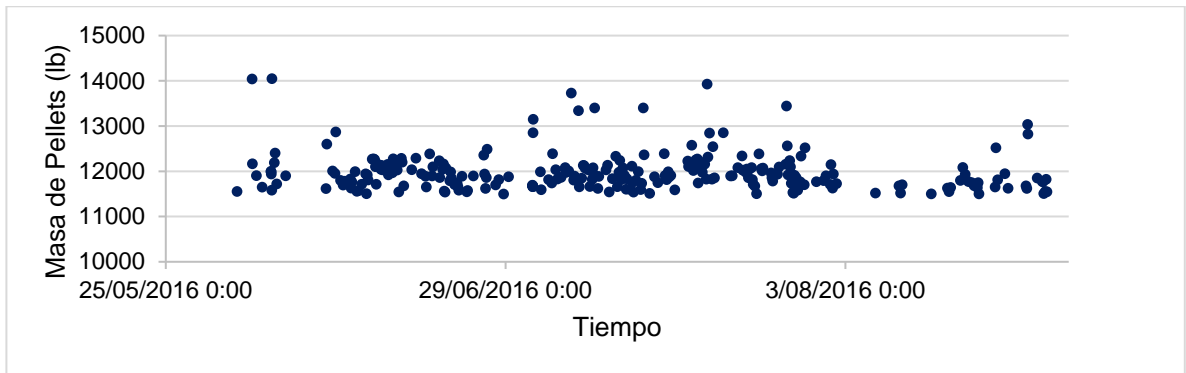


Figura 9. BoxPlot del indicador de peso de la tolva TV-2251 A/B (Sistema1)

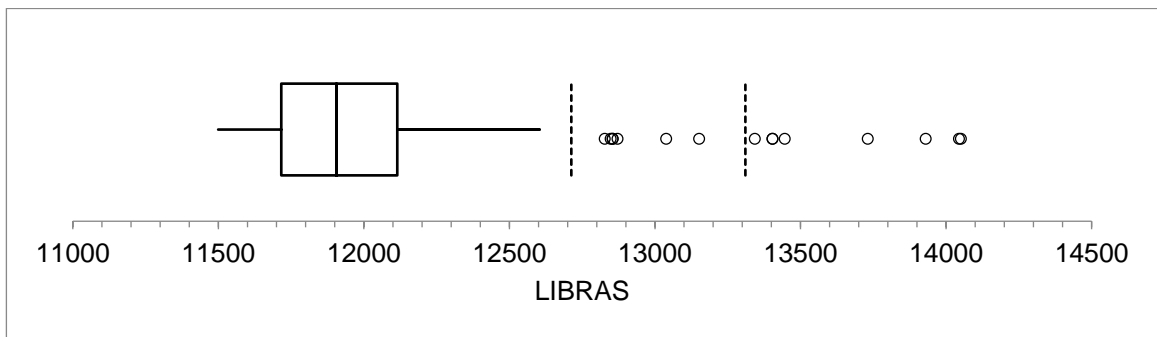


Figura 10.Presión de descarga del compresor C-2255 A/B (Sistema 2/3)

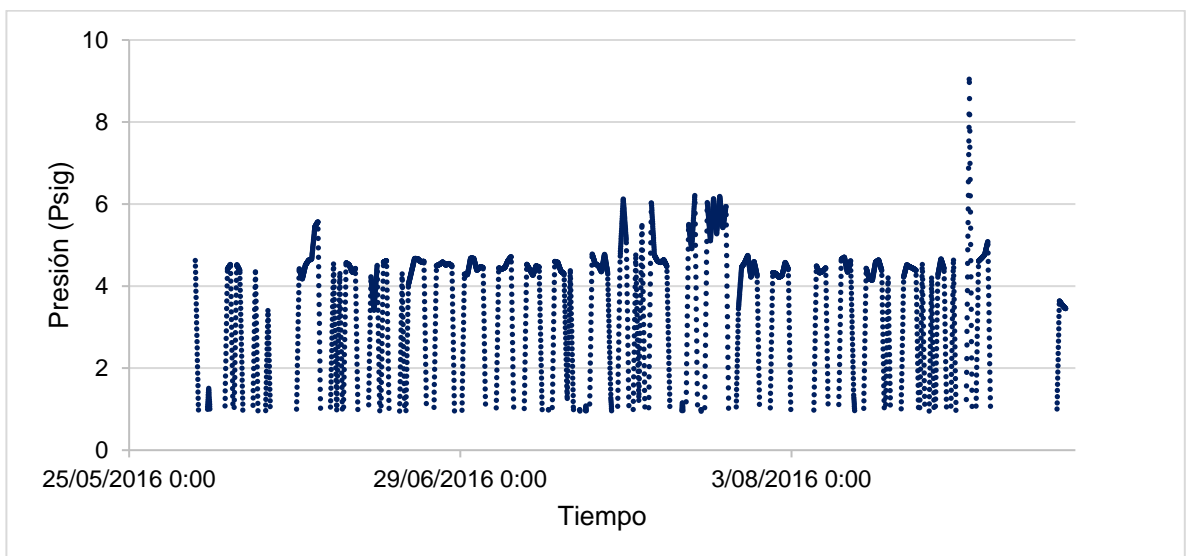


Figura 11. BoxPlot de la presión del compresor C-2255 A/B (Sistema 2/3)

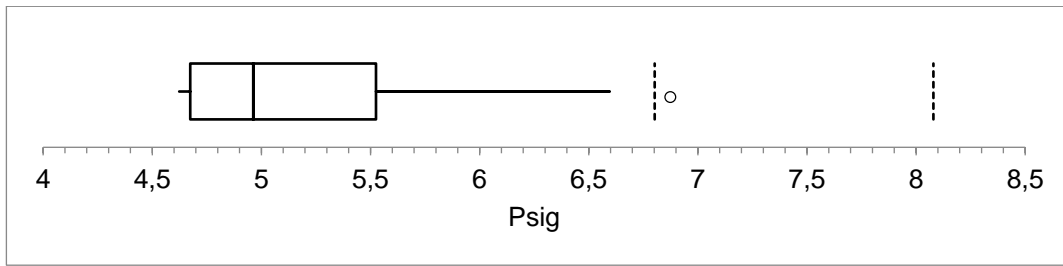


Figura 12. Temperatura de descarga del intercambiador E-2273 (Sistema 2/3)

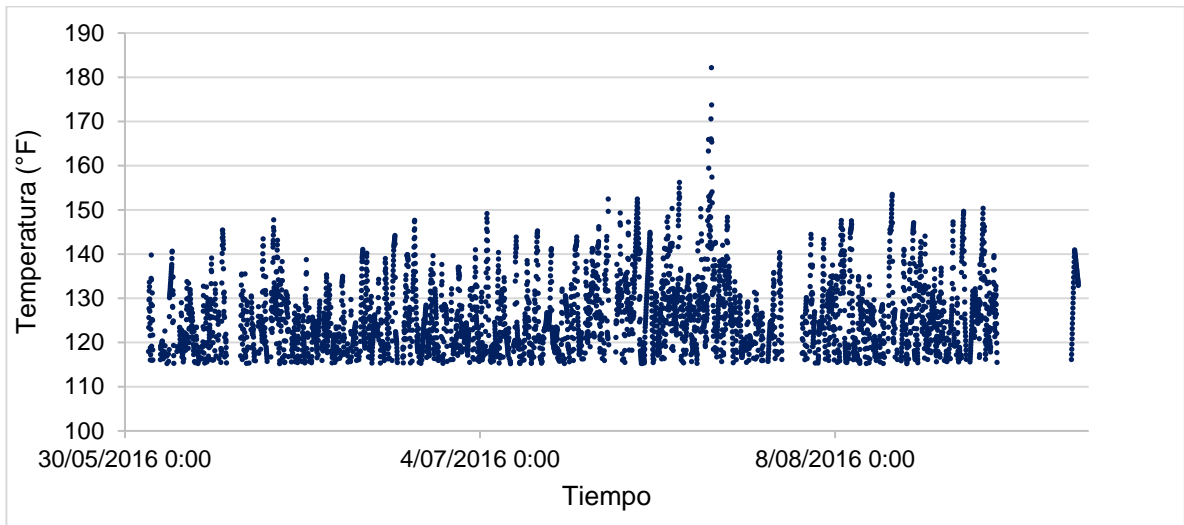


Figura 13. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2273 (Sistema 2/3)

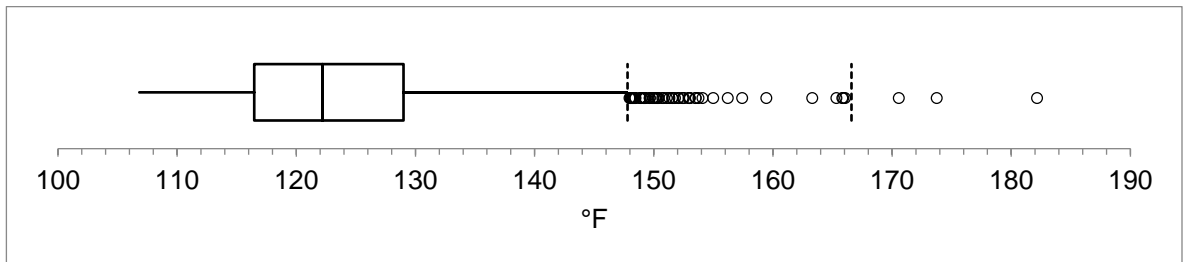


Figura 14. Presión de descarga del compresor C-2256 (Sistema 4/5/6)

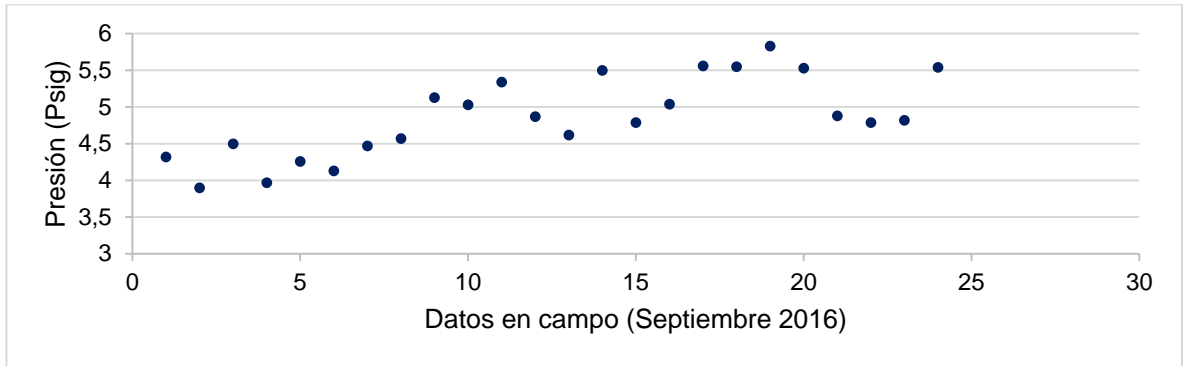


Figura 15. BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2256 (Sistema 4/5/6)

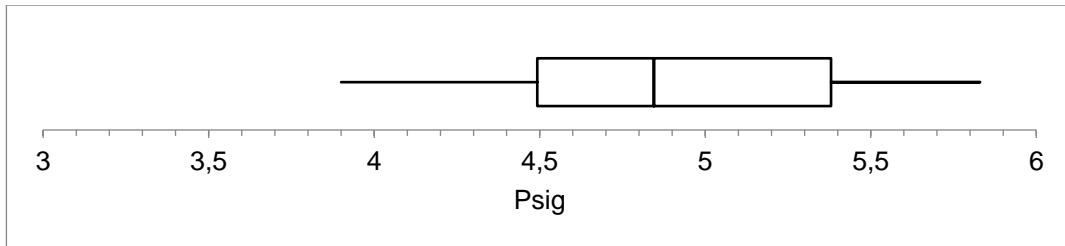


Figura 16. Temperatura de descarga del intercambiador E-2274 (Sistema 4/5/6)

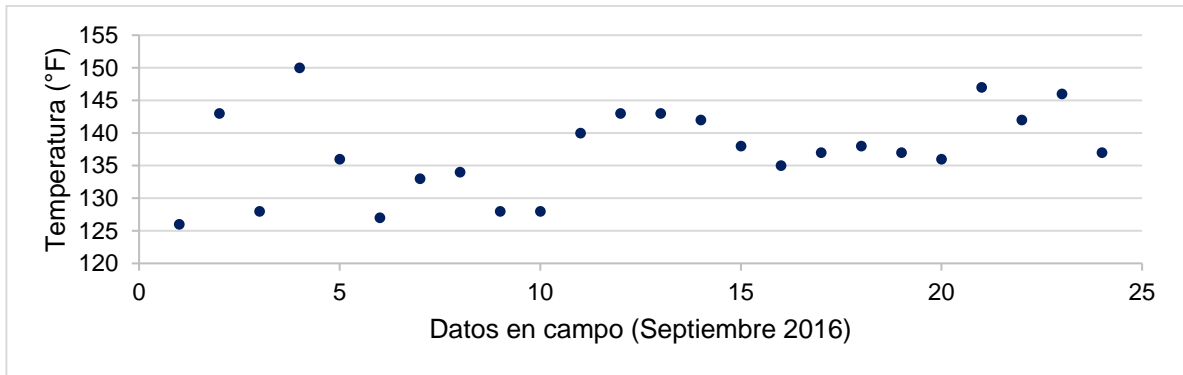


Figura 17. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2274 (Sistema 4/5/6)

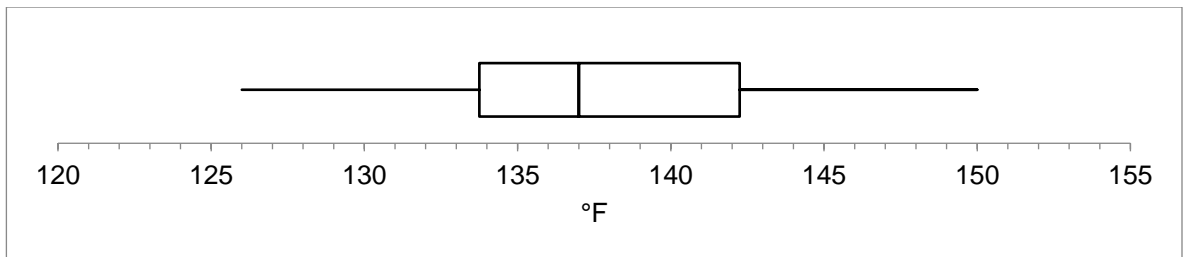


Figura 18. Presión de descarga del compresor C-2257 (Sistema 7/8)

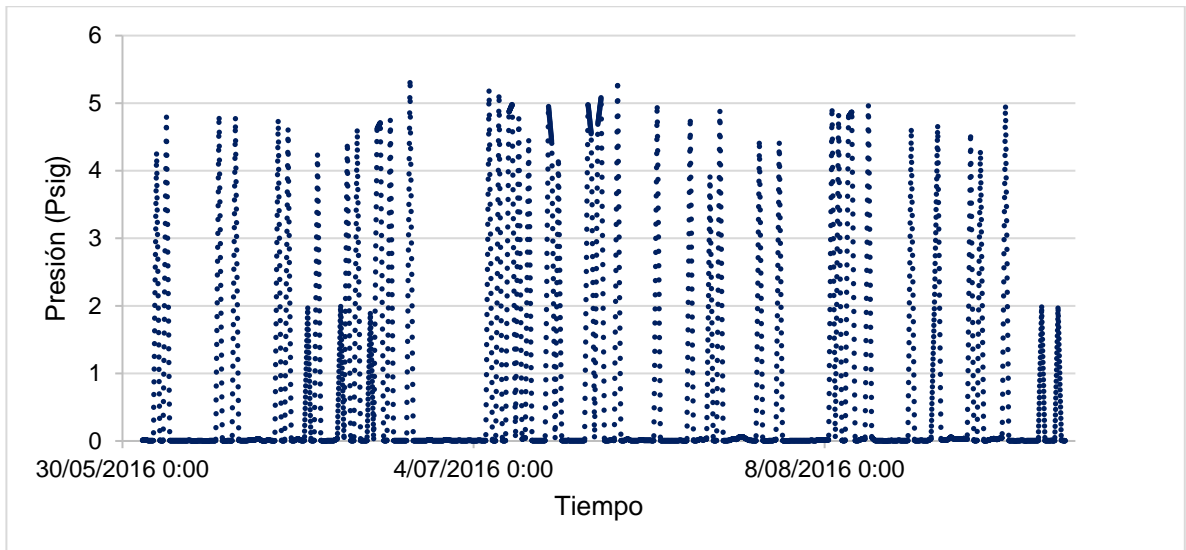


Figura 19. BoxPlot de la presión de descarga del compresor C-2257 (Sistema 7/8)

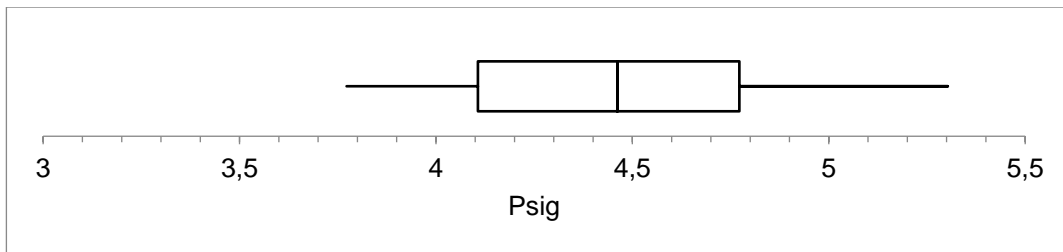


Figura 20. Temperatura de descarga del intercambiador E-2275 (Sistema 7/8)

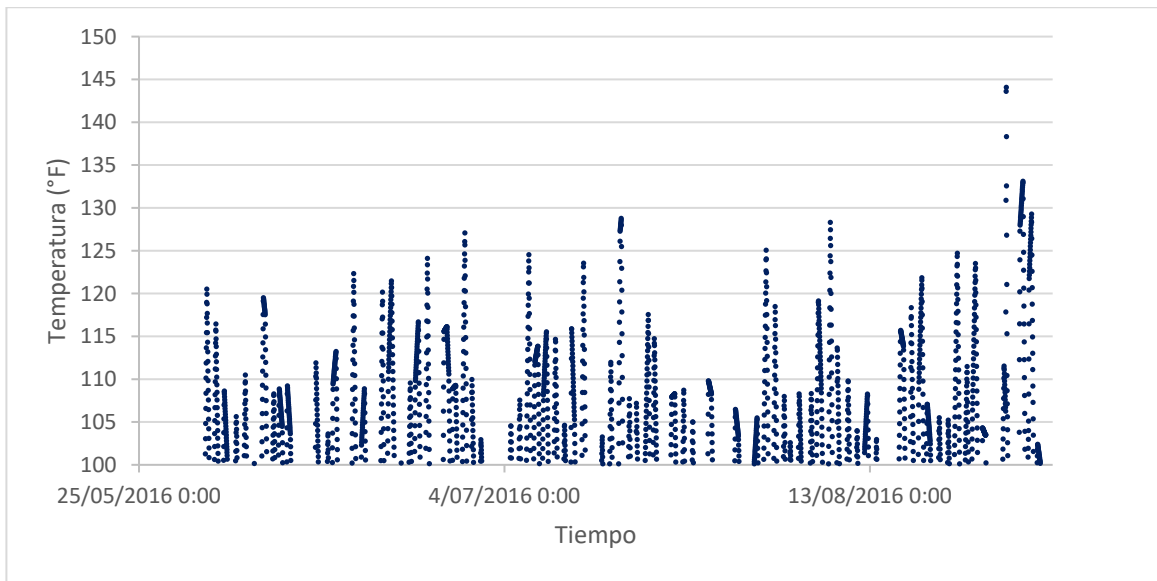
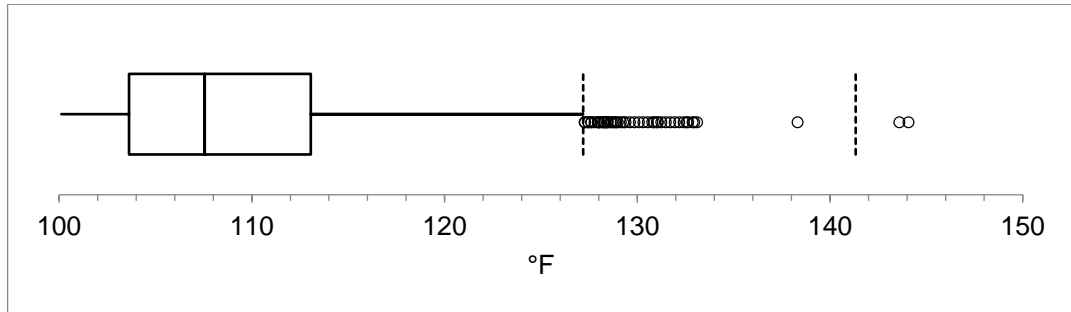
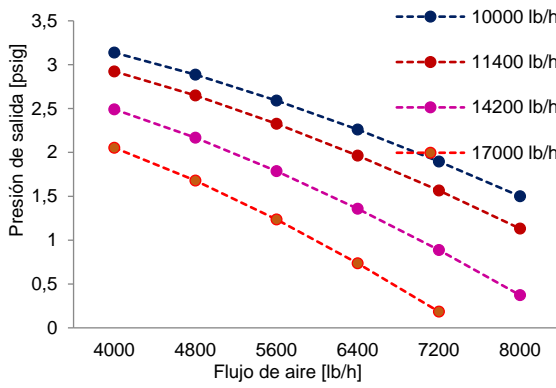


Figura 21. BoxPlot de la temperatura del intercambiador E-2275 (Sistema 7/8)

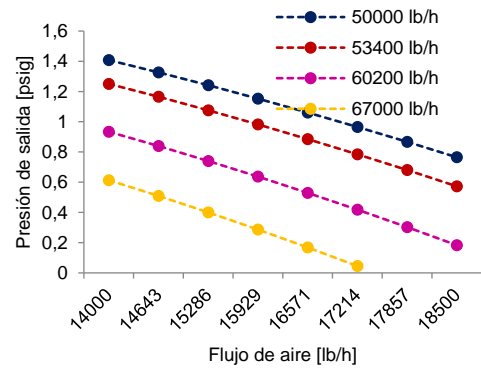


ANEXO H. PRESIÓN DE SALIDA VS FLUJO DE SÓLIDOS Y AIRE

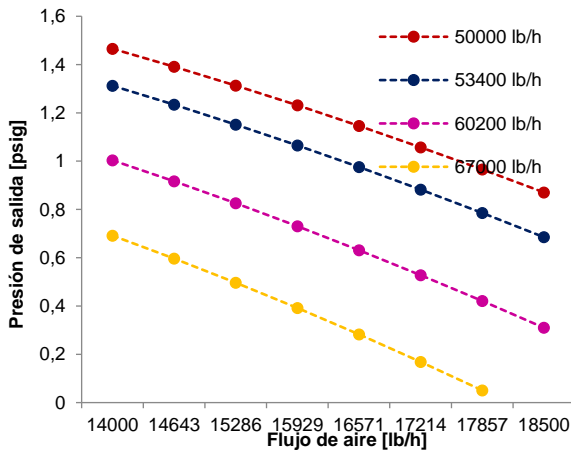
Sistema 3



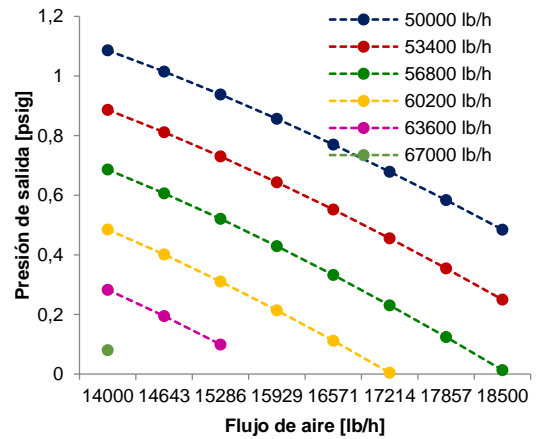
Sistema 4



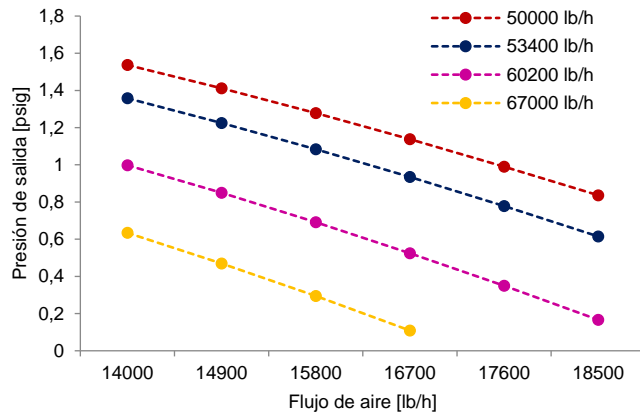
Sistema 5



Sistema 6

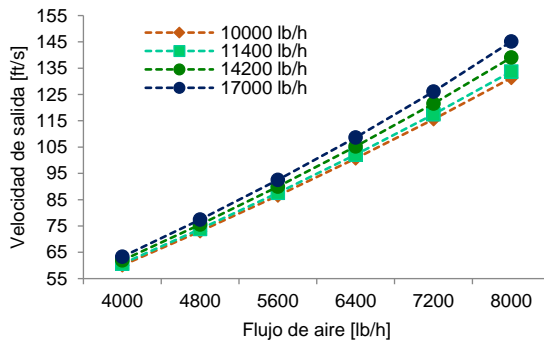


Sistema 7

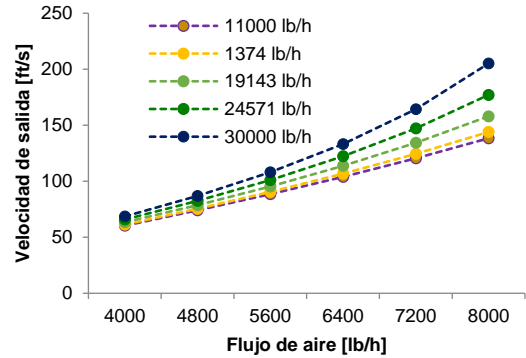


ANEXO G. VELOCIDAD DE SALIDA VS FLUJO DE SÓLIDOS Y AIRE

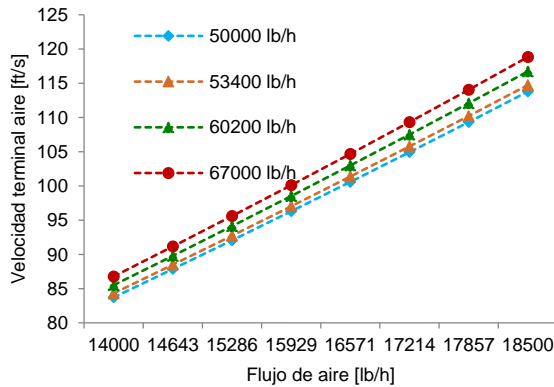
Sistema 2



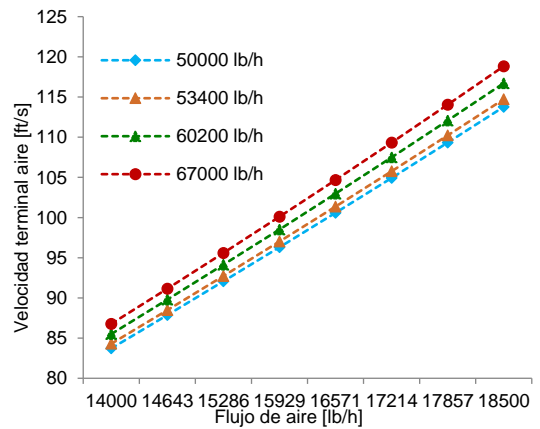
Sistema 3



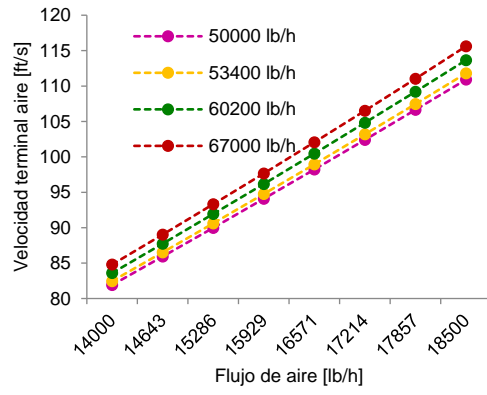
Sistema 4



Sistema 5



Sistema 6



Sistema 7

