

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE LLENADO DE PROPILENO
GRADO REFINERÍA DE LA GRB**

**KAREM TATIANA PALACIO SILVA
LAURA MELISSA ORTIZ SEPULVEDA**

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

2016

**ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE LLENADO DE PROPILENO
GRADO REFINERÍA DE LA GRB**

KAREM TATIANA PALACIO SILVA

LAURA MELISSA ORTIZ SEPULVEDA

**Documento presentado como requisito para optar el título de Ingenieras
Químicas**

Director:

GIOVANNI MORALES MEDINA

Ing. Químico, PhD.

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

2016

AGRADECIMIENTOS

Manifestamos nuestros agradecimientos a todos los que hicieron posible el desarrollo de este trabajo, en especial:

A nuestro director de proyecto Giovanni Morales Medina por su dedicación y orientación.

Al Ingeniero Genaro Ruiz por su guía y colaboración.

A la Universidad Industrial de Santander, claustro que nos permitió formarnos como Ingenieras Químicas y en especial a todos los profesores que participaron en nuestra formación académica.

DEDICATORIA

A Dios por todas sus infinitas bendiciones.

A mis padres Fanny y Guillermo, por todo su amor, dedicación y apoyo incondicional durante cada día de mi vida.

A mis hermanos Mónica y Guillermo Andrés, y mi sobrino Leonardo, por regalarme tantas alegrías y ser parte de este sueño.

A mi novio Luis Hernán, por todo su amor, apoyo y comprensión.

A mis amigos de la universidad, especialmente a Dianita y Lau quienes me regalaron una amistad incondicional y grandes experiencias de vida.

Karem Tatiana

En primer lugar, a Dios y la virgen por tantas bendiciones y por haberme permitido llegar hasta este punto.

A mis padres Cecilia y Enrique quienes han apoyado y motivado mi formación académica sin dudar ni un solo momento de mi inteligencia y capacidad.

A mis hermanas Erika, Yustin y Norma quienes me han tenido paciencia y han sido mi apoyo siempre.

A mi tía Marina por acogerme en su hogar durante estos años.

A mis amigas con quienes nos apoyamos mutuamente en nuestra formación profesional, especialmente a Karem mi compañera de tesis.

A Ricardo por darme su amor incondicional y paciencia durante toda mi carrera.

Laura Melissa

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	15
1. MARCO TEÓRICO.....	16
1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO DE PGR EN GRB.	16
1.2 ECUACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA.....	18
1.3 REGRESION LINEAL MÚLTIPLE	18
1.3.1 Creación de variables adicionales:	19
1.3.2 Transformaciones de los datos	20
1.3.3 Análisis de residuos.....	20
2. METODOLOGÍA.....	21
2.1 CÁLCULO DE LA CURVA DE CABEZA REQUERIDA	21
2.2 ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS Y SELECCIÓN DE CARGUES ESTÁNDAR	22
2.3 REGRESIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN.....	22
2.4 REGRESIÓN DE LA PRESIÓN DE LA CISTERNA	23
2.5 MODELADO DEL PROCESO DE LLENADO.....	23
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	24

3.1 CÁLCULO DE LA CURVA DE CABEZA REQUERIDA	24
3.3 REGRESIÓN PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN	29
3.4 REGRESIÓN PARA LA PRESIÓN DE LA CISTERNA.....	34
3.4.1 Regresión de la presión de la cisterna en la zona 1	34
3.4.2 Regresión de la presión de la cisterna en la zona 2:	36
3.5 SIMULACIÓN DE LOS CARGUES.....	38
4. CONCLUSIONES	48
5. RECOMENDACIONES	49
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	50
BIBLIOGRAFÍA.....	52
ANEXOS	54

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A: Cálculos para la cabeza requerida	54
Anexo B: Análisis datos históricos	57
Anexo C: Regresiones lineales multiples	59
Anexo D: Ecuación del factor de compresibilidad (z) en función de P_{cist}	71
Anexo E: Factor Alfa	73
Anexo F: Error cuadrático medio	75

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema de almacenamiento y brazos de llenado de PGR (U-3160).	17
Figura 2. Metodología	21
Figura 3. Curva de cabeza requerida por el sistema y disponible de la bomba P-3161A/B.	25
Figura 4. Flujo másico vs Tiempo	27
Figura 5. Presión Cisterna vs Tiempo.....	27
Figura 6. Presión entrada tren vs Tiempo.....	28
Figura 7. Tendencia de la caída de presión durante el proceso de llenado.	29
Figura 8. Valores predichos vs valores de referencia modelo de 7 variables.	32
Figura 9. Gráfica de residuos modelo de 7 variables.....	32

Figura 10. Valores predichos vs valores de referencia modelo de 10 variables	33
Figura 11. Gráfica de residuos modelo de 10 variables	33
Figura 12. Valores predichos vs valores de referencia zona 1	35
Figura 13. Gráfico de residuos zona 1	35
Figura 14. Valores predichos vs valores de referencia zona 2	37
Figura 15. Gráfico de residuos zona 2.	37
Figura 16. Flujo másico vs Tiempo	41
Figura 17. Presión cisterna vs Tiempo.....	41
Figura 18. Presión cisterna vs Flujo másico	42
Figura 19. Flujo másico vs Tiempo	44
Figura 20. Presión cisterna vs Tiempo.....	44
Figura 21. Presión cisterna vs Flujo másico	45

RESUMEN

TITULO: ANÁLISIS HIDRÁULICO DEL SISTEMA DE LLENADO DE PROPILENO GRADO REFINERÍA DE LA GRB_{*}

AUTORES: KAREM TATIANA PALACIO SILVA_{**}

LAURA MELISSA ORTIZ SEPULVEDA_{**}

PALABRAS CLAVE: ANÁLISIS HIDRÁULICO, RLM, PGR

DESCRIPCIÓN:

El presente trabajo aplicó un análisis hidráulico al sistema de llenado de Propileno Grado Refinería (PGR) de la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) mediante el balance de energía mecánica, el desarrollo de regresiones lineales múltiples (RLM) y el modelado matemático. La aplicación de la ecuación de energía mecánica reportó pérdidas de cabeza desconocidas, con lo cual el punto de operación encontrado no coincidió con el reportado por el diseño del sistema. El análisis estadístico de datos históricos condujo a la definición de un cargue estándar y a la identificación del flujo másico, la temperatura del cargue y la presión inicial de la cisterna como las variables más influyentes durante la operación del sistema. La caída de presión en una sección fue relacionada con las variables influyentes por medio de dos regresiones basadas en datos de 24 cargues estándar.

En forma complementaria, un modelo matemático fue propuesto para representar la variación del caudal con la presión de la cisterna durante los cargues estándar. El modelo dividió el proceso de llenado en dos zonas: la zona 1, caracterizada por un incremento monótono del caudal, y la zona 2, caracterizada por un caudal constante. El modelo matemático propuesto fue corregido por medio de la inclusión de un factor de corrección para reproducir el comportamiento mostrado por los datos históricos. Las regresiones obtenidas y el modelo matemático propuesto en el presente trabajo constituyen un aporte para el análisis semicuantitativo del sistema de llenado de PGR de la GRB; validaciones adicionales son requeridas para corroborar los resultados de las regresiones y el modelo matemático desarrollado.

_{*} Trabajo de grado.

_{**} Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
Director: Giovanni Morales Medina, I.Q., Dr.

ABSTRACT

TITLE: HYDRAULIC ANALYSIS OF THE FILLING SYSTEM OF
PROPYLENE GRADE REFINERY OF THE GRB_

AUTHORS: KAREM TATIANA PALACIO SILVA**
LAURA MELISSA ORTIZ SEPULVEDA**

KEYWORDS: HYDRAULIC ANALYSIS, MLR, PGR

DESCRIPTION:

This project applied a hydraulic analysis to the the Propylene Grade Refinery (PGR) filling system of the Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB) by a mechanical energy balance, the development of multiple lineal regressions and the mathematical modeling. The use of the mechanical energy equation reported unknown head losses, whereby the operating point found does not match with the one reported by the system design. The statistical analysis of historical data led to the definition of a standard load and the identification of the mass flow, the loading temperature and the initial pressure of the tank as the most influential variables during the operation of the system. The pressure drop in one section was related to these influential variables by two regressions based on data from 24 standard upload.

In addition, a mathematical model was proposed to represent the flow variation with the tank pressure during the standard upload. The model divided the filling process in two zones: The zone 1, characterized by a monotonic increase of the flow, and the zone 2, characterized by a constant flow. The proposed mathematical model was corrected by the inclusion of a correction factor to reproduce the behavior shown by the historical data. The regressions obtained and the mathematical model proposed in this work make a great contribution for the semiquantitative analysis of the PGR filling process of the GRB; further studies are required to validate the results of the regressions and the mathematical model developed.

* Bachelor Thesis.

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química.
Director: Giovanni Morales Medina, I.Q., Dr.

INTRODUCCIÓN

El propileno ($\text{CH}_2=\text{CHCH}_3$) es utilizado en la producción de numerosas sustancias químicas orgánicas, entre las cuales se encuentran plásticos, resinas, caucho sintético, gasolina, textiles y componentes automotrices [1]. El propileno es generado durante el craqueo catalítico de fracciones pesadas del petróleo y se separa de los productos líquidos como gasóleos, fondos desmetalizados y fondos desmetalizados hidrotratados; el propileno junto con otros gases constituyen la corriente de cima de la fraccionadora (GLP). ECOPETROL cuenta con equipos de purificación de las corrientes de Gas Licuado de Petróleo (GLP) para generar el producto denominado Propileno Grado Refinería (PGR), el cual cuenta con hasta 80% de propileno [2]. Los flujos resultantes de PGR son almacenados en la unidad U-3160 para ser despachados a la empresa Propilco en Cartagena [3].

A pesar de que ECOPETROL cumple con el despacho de cisternas, la operación del sistema de llenado de la unidad U-3160 se ha realizado en distintas ocasiones de forma subestándar generando pérdidas de PGR y aumentando los tiempos de despacho. El sistema de llenado ha presentado una serie de eventualidades que alteran la operación, incluyendo eventos de seguridad de proceso que ponen en riesgo al personal, las instalaciones y el medio ambiente. Dadas las pérdidas de material por fallas mecánicas repetitivas, el presente proyecto de grado busca analizar la operación del sistema de llenado de PGR mediante la revisión de pérdidas de energía mecánica, la proposición de regresiones para la caída de presión y el modelado del cargue de PGR en las cisternas con el objetivo de identificar que variables son más influyentes en diferentes partes de un cargue, proporcionar datos semicuantitativos para la toma de decisiones y ayudar en la predicción de valores requeridos.

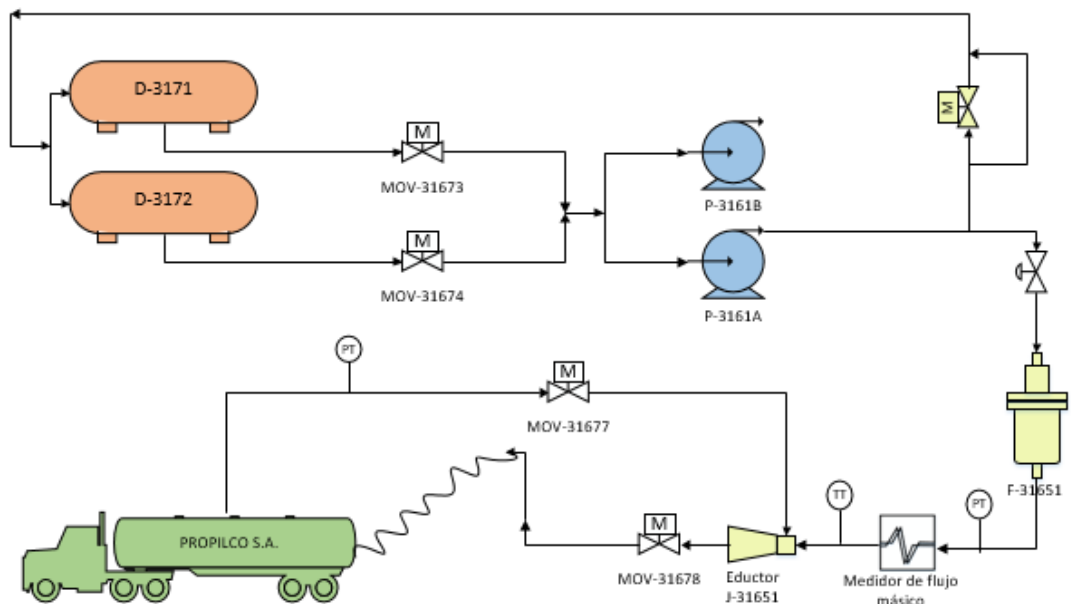
1. MARCO TEÓRICO

1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LLENADO DE PGR EN GRB.

El propileno grado refinería (PGR) que se produce en la Gerencia Refinería de Barrancabermeja (GRB), es enviado desde las plantas de craqueo catalítico UOP I, UOP II, Modelo IV y Orthoflow, hasta la estación de GLP (NEGLP U-3160) en donde se almacenan en los tanques o balas (D-3171/3172) a una presión de 225 psi y a una temperatura de 105 °F [4]. Desde las balas, el PGR es enviado a los carrotanques o cisternas por medio del sistema de tuberías que constituyen los brazos de llenado (Figura 1); la operación del sistema de llenado descarta la operación recibe-entrega, es decir que las balas de PGR estarán recibiendo o entregando, pero no se contempla que se realicen ambas tareas en forma simultánea.

El monitoreo de PGR de la U-3160 se efectúa con el sistema de control distribuido desde la sala de control de la unidad. El flujo de PGR desde las balas es controlado por medio de las válvulas MOV-31673 y MOV-31674 ubicadas en las líneas de succión de las bombas MP-3161A/B (Figura 1) [4]. Las bombas MP-3161A/B despachan un flujo máximo de 340 gpm; la línea de recirculación hacia las balas es habilitada para elevar el flujo al inicio de la operación de llenado (Figura 1). El sistema cuenta con las tuberías para la operación con dos camiones cisterna en simultáneo por medio de dos brazos de llenado. Cada brazo de llenado cuenta con dos válvulas motorizadas (en la Figura 1 se muestran las válvulas de un brazo de llenado, MOV-31677 y MOV-31678) para manipular el flujo de PGR durante el llenado de las cisternas [4]; adicionalmente, cada brazo cuenta con un transmisor de presión en la línea de retorno para la detección de sobrepresión en las cisternas.

Figura 1. Sistema de almacenamiento y brazos de llenado de PGR (U-3160).



A pesar de la instrumentación, las válvulas y los accesorios instalados y activos en el sistema de llenado, se han presentado diferentes eventos operativos que disminuyen su desempeño ocasionando retrasos en las entregas pactadas con Propilco y pérdidas de PGR. Los eventos de mayor relevancia corresponden a fallas en las válvulas controladoras de flujo en el tren de cargue, falla del sistema de recirculación, falla en las válvulas solenoides, sobre presión de los carro tanques antes de completar el volumen requerido y activación del sistema de alivio de presión hacia la tea.

Los perfiles de presión se presentan como una variable crítica durante la operación del sistema de llenado [5]. Por tal motivo, el conocimiento y el análisis de las pérdidas de presión en el sistema, así como la estimación de la presión en las cisternas por medio de una regresión y el modelado dinámico del llenado de

las mismas pueden colaborar en la detección de situaciones subestándar durante la operación de la unidad.

1.2 ECUACIÓN DE ENERGÍA MECÁNICA

La energía mecánica que lleva el flujo de un fluido en un punto cualquiera por encima de un plano horizontal arbitrario fijado como referencia, es igual a la suma de la energía potencial, cinética, de flujo, las correspondientes pérdidas por fricción en tuberías, accesorios y válvulas, y los incrementos de energía debidos a equipos de bombeo mecánico [6].

$$Z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + H = Z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_L \quad (1)$$

Donde h_L es la pérdida de carga en tuberías, válvulas, accesorios y equipos desde el punto inicial al punto final y H es la altura de energía que la bomba adiciona al sistema. La ecuación anterior se encuentra expresada en términos de longitud (m). Todas las fórmulas prácticas para el flujo de fluidos se derivan del teorema de Bernoulli, con modificaciones para considerar las pérdidas debidas al rozamiento [6].

1.3 REGRESION LINEAL MÚLTIPLE

Los modelos de regresión lineal múltiple (RLM) expresan la medida de una variable dependiente Y como una función de más de una variable de predicción o independiente (x_i), según:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_i x_i + \epsilon \quad (2)$$

Donde, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_i$ son los coeficientes de regresión, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_i$ corresponden a las variables independientes y ϵ es el error de la estimación o residuo [8,9]. Según el algoritmo de mínimos cuadrados, los coeficientes pueden ser calculados por la fórmula matricial [9,10,11]:

$$\beta = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (3)$$

Donde, X^T corresponde a la matriz transpuesta de la matriz de datos iniciales X y Y corresponde al vector de variables dependientes [8].

1.3.1 Creación de variables adicionales: El éxito en la aplicación de cualquier técnica de regresión está fuertemente asociada con la selección de las variables predictoras. La relación básica representada en la regresión múltiple es la asociación lineal entre variables dependientes e independientes. La creación de variables que complementen a las originales puede estar basada en razonamientos teóricos –sugerida por la naturaleza de los datos– o en razonamientos derivados de los datos –tendencia de los datos analizados–. En cualquier caso, la mejora de los estadísticos de las regresiones determina la forma matemática final para la misma [9].

1.3.2 Transformaciones de los datos: Las transformaciones de los datos proporcionan el medio principal de corregir la no normalidad y la heterocedasticidad obtenida en los residuos de la regresión. Las distribuciones asimétricas o heterocedásticas pueden ser corregidas utilizando modificaciones sobre las variables regresoras por medio de raíz cuadrada, logaritmos o la inversa de la variable [9].

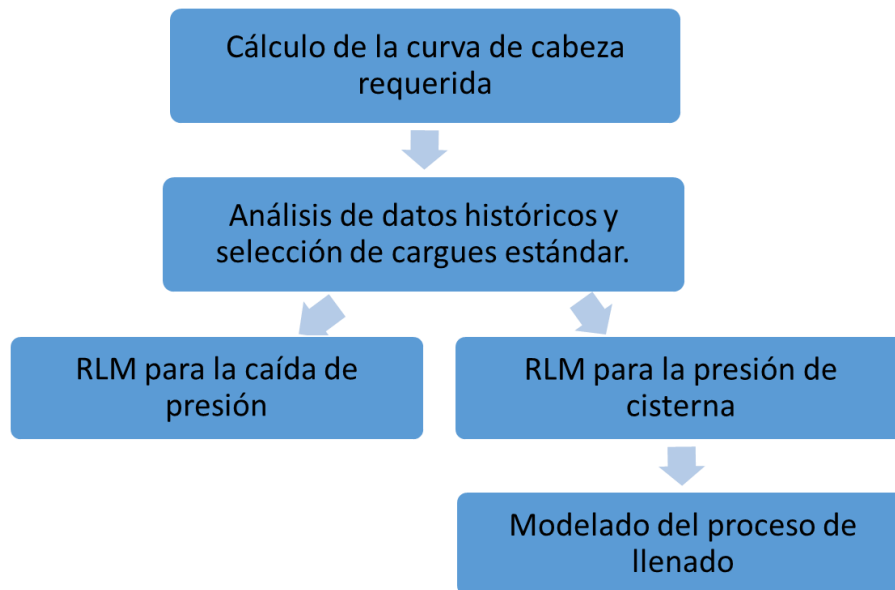
1.3.3 Análisis de residuos: La medida principal del error de predicción del valor teórico es el residuo, la diferencia entre los valores observados y las predicciones de la variable criterio. Los gráficos de residuos y de la variable independiente constituyen el método básico de identificación de incumplimientos de los supuestos para el conjunto de la relación. Cuando se examinan los residuos, se recomienda cierta forma de estandarización con el fin de hacer los residuos directamente comparables con una media de 0 y una desviación estándar de 1. El método más ampliamente utilizado es *el residuo basado en la t de student* [9].

Los residuos juegan un papel importante en la identificación de observaciones que son casos atípicos de la variable dependiente. Para un tamaño muestral bastante grande los residuos estandarizados siguen aproximadamente la distribución t, de tal forma que los residuos que excedan un umbral como el de 1,96 (el valor crítico t al nivel de confianza de 0,05) pueden ser considerados estadísticamente significativos. Las observaciones que no logran el umbral son estadísticamente significativas en su diferencia de cero y pueden ser considerados como casos atípicos. Un caso atípico es importante en la medida en que es una observación no representada por la ecuación de regresión y que puede tener efectos influyentes que requieran una solución [9].

2. METODOLOGÍA

Las etapas de la metodología empleada son descritas en el siguiente diagrama de flujo:

Figura 2. Metodología



2.1 CÁLCULO DE LA CURVA DE CABEZA REQUERIDA

Con la información de diseño (hojas de especificaciones de los accesorios y curvas de desempeño) recolectada de los archivos del centro de información técnica y considerando la ecuación de energía mecánica, las pérdidas de presión en el sistema de llenado fueron expresadas en términos del caudal de operación.

Esto permitió verificar la actualización de la información suministrada por la GRB y la comparación entre las condiciones de diseño y los modos de operación del sistema de llenado durante el año 2014 (ventana de operación).

2.2 ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS Y SELECCIÓN DE CARGUES ESTÁNDAR

En esta actividad los datos históricos de proceso del sistema de llenado fueron recolectados del sistema de gestión de datos históricos de proceso (denominado PI) de la GRB. Los datos históricos contienen información de las variables de proceso durante la ventana de operación disponible.

Los cargues estándar, los cuales cumplen con los volúmenes de llenado de los camiones cisterna en los tiempos y condiciones de diseño especificado para el sistema de PGR, fueron identificados en los datos históricos durante todo el año 2014. Las tendencias de los cargues estándar fueron analizadas para identificar patrones de referencia para cada variable medida durante la operación del sistema de llenado.

2.3 REGRESIÓN DE LA CAÍDA DE PRESIÓN

La proposición de RLM para la estimación de las caídas de presión en el sistema de llenado fue guiada por la identificación de las variables independientes, la aplicación del algoritmo de mínimos cuadrados, el análisis ANOVA y la verificación de los supuestos de normalidad. El software *TheUnscrambler*® X con licencia de

la Universidad Industrial de Santander fue utilizado para aplicar la RLM considerando los datos históricos de proceso.

2.4 REGRESIÓN DE LA PRESIÓN DE LA CISTERNA

Los pasos comprendidos en la actividad anterior fueron aplicados en la proposición de regresiones para modelar la variación de la presión de llenado de las cisternas durante la operación de la unidad.

2.5 MODELADO DEL PROCESO DE LLENADO

La RLM seleccionada para la presión de la cisterna se emplea en el desarrollo de un modelo matemático que permita la simulación del caudal y la presión de cisterna para cargues estándar.

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 CÁLCULO DE LA CURVA DE CABEZA REQUERIDA

La aplicación de la ecuación de energía mecánica en el sistema de llenado reporta la siguiente igualdad,

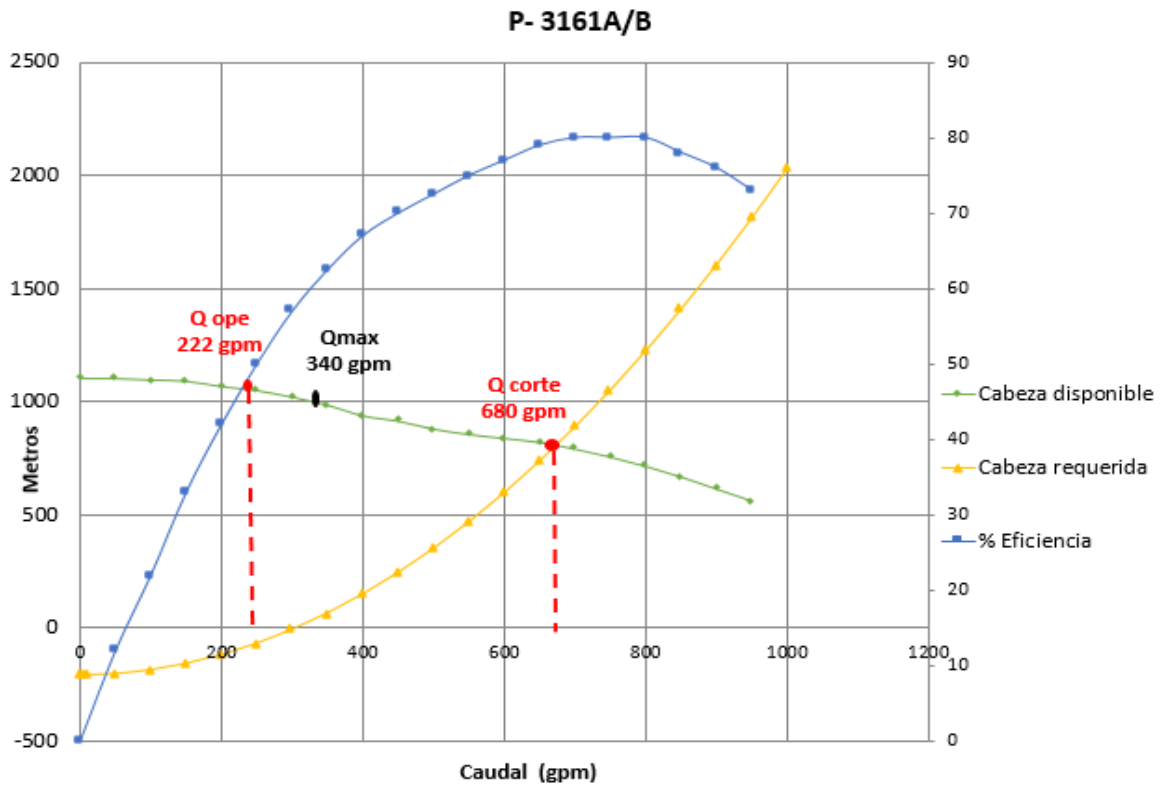
$$H = (560276,292 + k_1 + k_2 + k_3 + k_4) * Q^2 - 210,713 + 2 + 2450,763 * Q^2 \quad (4)$$

La ecuación anterior considera el sistema desde la succión en la bala por la bomba P-3161A/B hasta la sección de entrada a la cisterna. Los coeficientes de pérdida k_1 , k_2 , k_3 y k_4 hacen referencia a filtros, medidor de flujo másico, eductores y algunas válvulas de control respectivamente; Q está especificado en m^3/s . Los valores para estos coeficientes no se encuentran definidos según el caudal de operación del sistema de llenado ya que en la información suministrada por la GRB se especifican sólo los valores de diseño; además, la información que se reporta en la literatura para el cálculo de las pérdidas en estos equipos resulta escasa, en especial para los eductores. Los resultados de la curva de cabeza requerida –considerando las pérdidas definidas en el diseño del sistema–son mostrados en la Figura 3 y el Anexo A.

Comparando el punto de operación obtenido por el balance de energía mecánica (Figura 3, punto denominado Q_{corte} en rojo), con lo establecido en el diseño del sistema (Figura 3, punto denominado Q_{ope} en rojo) es posible inferir que el punto de operación que presenta el sistema en operación difiere del obtenido utilizando consideraciones mecánicas. Esta diferencia se debe a que el sistema de carga de PGR ha sufrido diferentes cambios en los últimos semestres debido a los eventos

operativos mencionados con anterioridad; estos cambios conllevan variaciones en las pérdidas de carga, las cuales no son reproducidas por lo especificado en las condiciones de diseño iniciales de la unidad. Adicionalmente, las variaciones de las pérdidas en términos de caudal son desconocidas para muchos accesorios. Lo anterior no habilita el uso del balance de energía mecánica para la proposición de una relación que estime la caída de presión en función del caudal y los diferentes parámetros característicos de cada elemento del sistema. Detalle de los cálculos realizados en Anexo A.

Figura 3. Curva de cabeza requerida por el sistema y disponible de la bomba P-3161A/B.



3.2 ANÁLISIS DE DATOS HISTÓRICOS Y SELECCIÓN DE CARGUES ESTÁNDAR

Los datos históricos constan de registros por minuto para la temperatura, el flujo másico, la presión en la entrada del brazo de llenado del tren, la presión en el brazo de retorno de vapores y la presión de tren (Anexo B). La obtención de regresiones para las caídas de presión requiere de datos con la menor cantidad de perturbaciones, para lo cual se deben definir las condiciones de los cargues denominados estándar. Para esto, las tendencias de las variables durante la operación junto con la masa cargada en las cisternas fueron consideradas para identificar patrones comunes que coincidan con las condiciones de diseño de la unidad (*i.e.* tiempo de llenado 60 min y masa de llenado 26.57 ton). Las tendencias para el flujo másico, la presión de cisterna y la presión de entrada al tren durante la ventana de operación son presentadas en las Figuras 4, 5 y 6.

El flujo másico presenta inicialmente un incremento durante 4 minutos, con un estado pseudoestacionario posterior de *ca.* 55 min y finalmente una disminución con una duración de *ca.* 2 minutos (Figura 4); de igual forma, las masas de llenado de las cisternas presentaron una desviación máxima de 5%. En la tendencia de la presión de cisterna (Figura 5) se identifican dos zonas con comportamiento lineal, pero diferente pendiente. La zona 1 se caracteriza por una pendiente mayor, puesto que una parte de la alimentación se vaporiza tan pronto ocurre la descarga, presurizando bruscamente la cisterna. La segunda zona se presenta *ca.* 15 minutos después de iniciado el cargue, con una pendiente menor cuando la cisterna llega a *ca.* 160 psi; en este punto el arreglo recirculación-educor adquiere su caudal de diseño permitiendo el alivio del sistema y el incremento en la masa cargada a la cisterna. Asimismo, para la presión de entrada del tren, el sistema cuenta con una válvula de control que estabiliza la presión en un *set point* de 310 psi (Figura 6); sin embargo, los tiempos de respuesta de esta válvula son

demasiado largos provocando un control inadecuado sobre esta variable, razón por la cual se presentan los picos iniciales y finales (Figura 6).

Las tendencias mostradas en las variables para los cargues durante el mes de diciembre de 2014 presentan en su mayoría un comportamiento similar; Con lo anterior, una buena parte de los cargues de este mes pueden ser considerados como cargues estándar (en total 24 cargues). En promedio la duración de los cargues estándar estuvo entre 60 y 63 min; los cargues fuera de este rango fueron descartados y definidos como cargues subestándar. Anexo B

Figura 4. Flujo másico vs Tiempo

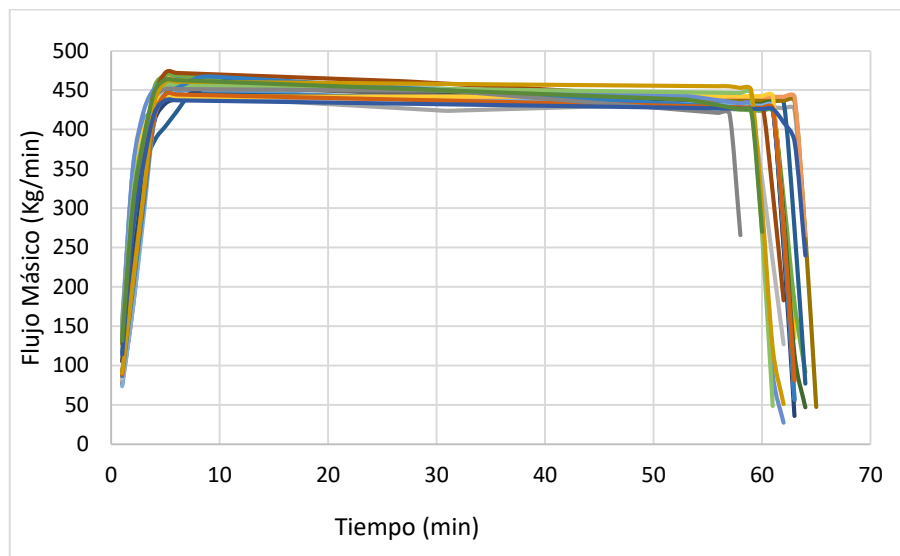


Figura 5. Presión Cisterna vs Tiempo

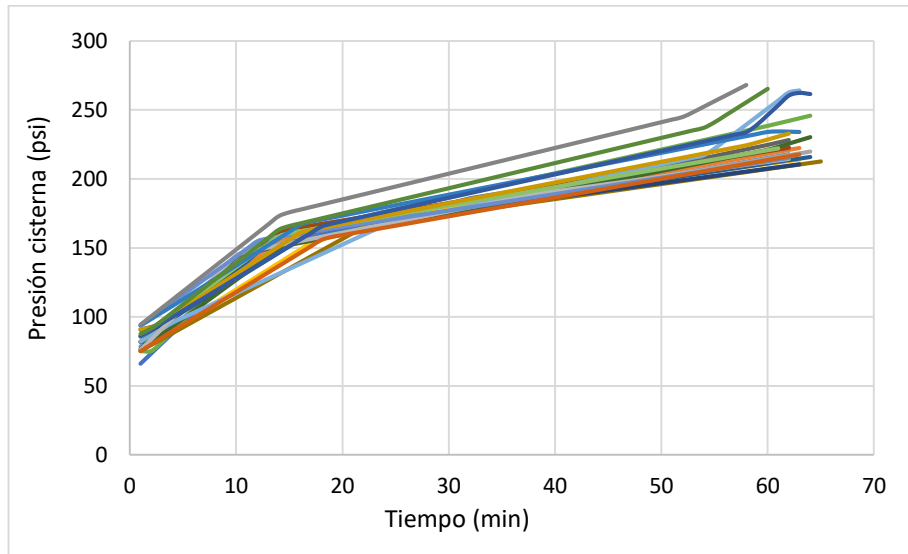
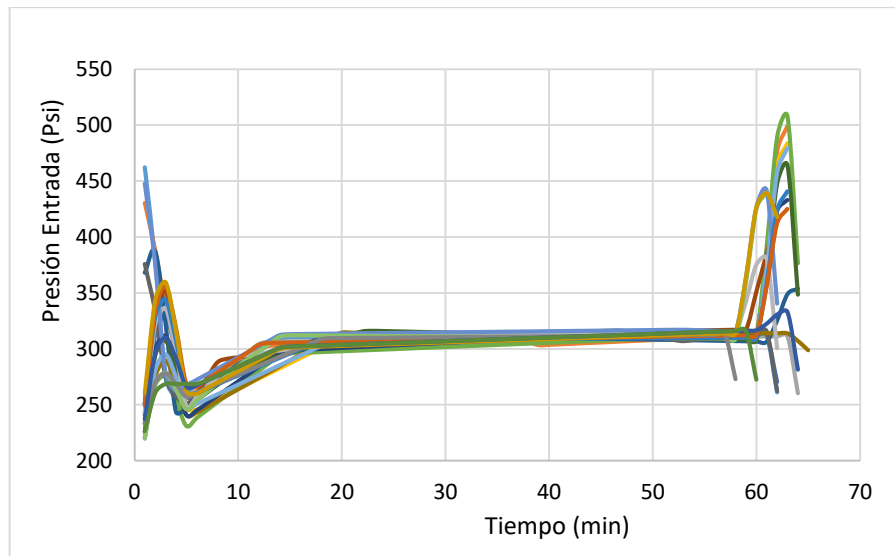


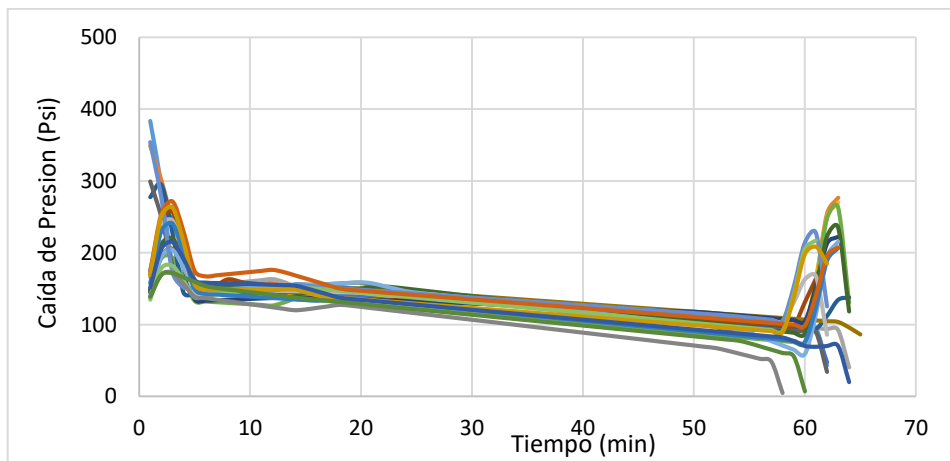
Figura 6. Presión entrada tren vs Tiempo



3.3 REGRESIÓN PARA LA CAÍDA DE PRESIÓN

Una regresión para la caída de presión entre la salida del filtro y la descarga en la cisterna (Figura 7) –tramo del sistema que según los datos históricos presenta la mayor caída de presión y en el cual se encuentran los elementos con coeficientes de pérdida desconocidos– fue aplicada considerando como variables la presión inicial de la cisterna, la temperatura y el flujo másico de operación, ya que se propuso desarrollar un modelo que no dependa de variables intermedias. La variable de tiempo de operación fue considerada tácitamente en la variación del caudal de operación.

Figura 7. Tendencia de la caída de presión durante el proceso de llenado.



El comportamiento de la caída de presión al inicio y al final de los cargues (Figura 7) se presenta como consecuencia de las constantes de tiempo apreciables de las válvulas de control del sistema. Para un mejor ajuste en las regresiones se decide solo considerar la parte pseudoestacionaria descartando las secciones iniciales y

finales. Se plantearon dos modelos, uno de 7 y otro de 10 regresores mediante combinaciones a prueba y error de las variables predictoras y adicionalmente se plantean 4 transformaciones de la variable respuesta. La Tabla 1 presenta los resultados de las diferentes regresiones ensayadas para la predicción de la caída de presión en la zona pseudoestacionaria.

Tabla 1. Resumen de resultados para los modelos propuestos de 7 y 10 variables.

VARIABLES INDEPENDIENTES	MODELO DE 7 VARIABLES		MODELO DE 10 VARIABLES	
	CASO 1: Y=DP	CASO 2: Y=1/DP	CASO 1: Y=DP	CASO 2: Y=1/DP
R ² ajustado (calibración)	0,5333	0,5379	0,5483	0,5717
R ² ajustado (validación)	0,5252	0,5247	0,5089	0,5529
VARIABLES INDEPENDIENTES	CASO 3: Y=Ln DP	CASO 4: Y=Raíz DP	CASO 3: Y=Ln DP	CASO 4: Y=Raíz DP
R ² ajustado (calibración)	0,5502	0,5448	0,5727	0,5633
R ² ajustado (validación)	0,5408	0,5364	0,5258	0,5205

El mejor de los 4 casos analizados para cada uno de los 2 modelos (7 y 10 regresores) presentados en la Tabla 1 fue escogido tomando como criterio los valores para el R^2 ajustado de calibración y el R^2 ajustado de validación cruzada (lo más altos y cercanos posible) [9]. Después, se eliminan los datos que según las gráficas de residuos superen el umbral de $\pm 1,96$, ya que estos se consideran como datos atípicos; y por último, las variables con significancia estadística inferior al 95% de confianza ($p > 0.05$) fueron eliminadas de la regresión (Anexo C). En el anexo C las Tablas 2 y 4 presentan los coeficientes de las regresiones junto con sus estadísticos p para el caso 3 y el caso 2, respectivamente.

Las Figuras 8 y 9 presentan las gráficas de los valores predichos versus los de referencia y la distribución de los residuos estudentizados, respectivamente, para el caso 3 del modelo de 7 variables. Según la Figura 8, la regresión presenta un desempeño bajo con una reproducción de la varianza de ca. 78%. Este bajo desempeño repercute en la generación de los patrones mostrados en la Figura 9; las diferentes líneas de la Figura 9 revelan la ausencia del tiempo de forma explícita en la regresión. La RLM obtenida de este modelo está representada en la Ecuación 5:

$$\begin{aligned} \ln \Delta P = & 0,2297 \dot{m} - 0,0351 T + 0,0261 P_i - 4,14 * 10^{-4} P_i^2 - 2,58 * 10^{-4} \dot{m}^2 + 1,62 \\ & * 10^{-7} P_i * \dot{m}^2 - 44,9898 \end{aligned} \quad (5)$$

Donde $\dot{m} = \frac{\text{kg}}{\text{min}}$; $T = ^\circ F$; $P_i = \text{psi}$; $\Delta P = \text{psi}$

De otro lado, las Figuras 10 y 11 presentan los valores predichos versus los de referencia y la distribución de los residuos estudentizados, respectivamente, para el caso 2 según el modelo que considera 10 regresores. Aunque la regresión obtenida con el modelo presenta un desempeño bajo con una reproducción en la varianza de ca. 75% (Figura 10), la distribución de los errores cumple el supuesto de varianza constante (Figura 11). A pesar de que el tiempo no fue incluido en forma explícita en la regresión, el modelo es estadísticamente válido para representar el comportamiento cualitativo del proceso de llenado de las cisternas. La Ecuación 6 representa la RLM obtenida del modelo de 10 regresores:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\Delta P} = & 0,000241T + 7,78 P_i - 0,0114 P_i * \dot{m} - 3,75 * 10^{-6} P_i^2 + 6,26 * 10^{-6} P_i * \dot{m}^2 + 2,2982 \\ & * \frac{1}{\dot{m}} - 2361,2 \frac{P_i}{\dot{m}} + 268781,6 \frac{P_i}{\dot{m}^2} \end{aligned} \quad (6)$$

Donde $\dot{m} = \frac{\text{kg}}{\text{min}}$; $T = ^\circ F$; $P_i = \text{psi}$; $\Delta P = \text{psi}$

Figura 8. Valores predichos vs valores de referencia modelo de 7 regresores.

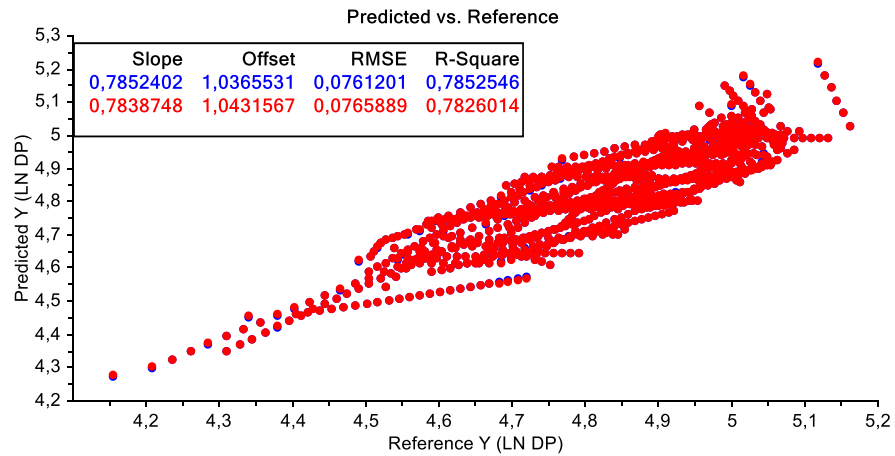


Figura 9. Gráfica de residuos modelo de 7 regresores.

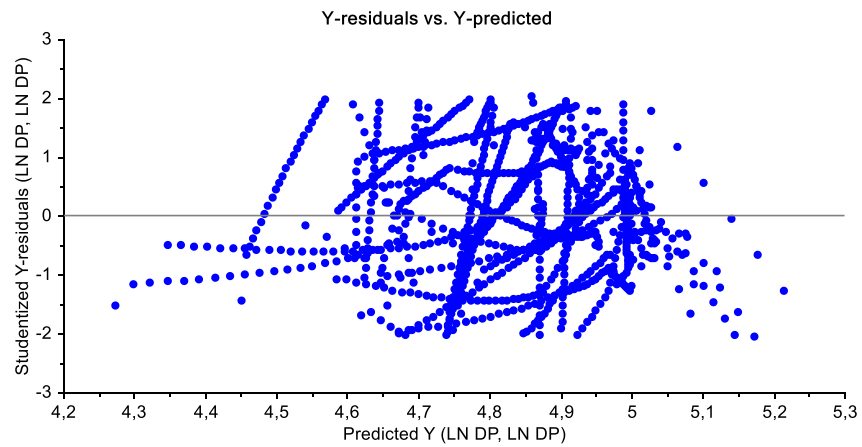


Figura 10. Valores predichos vs valores de referencia modelo de 10 regresores

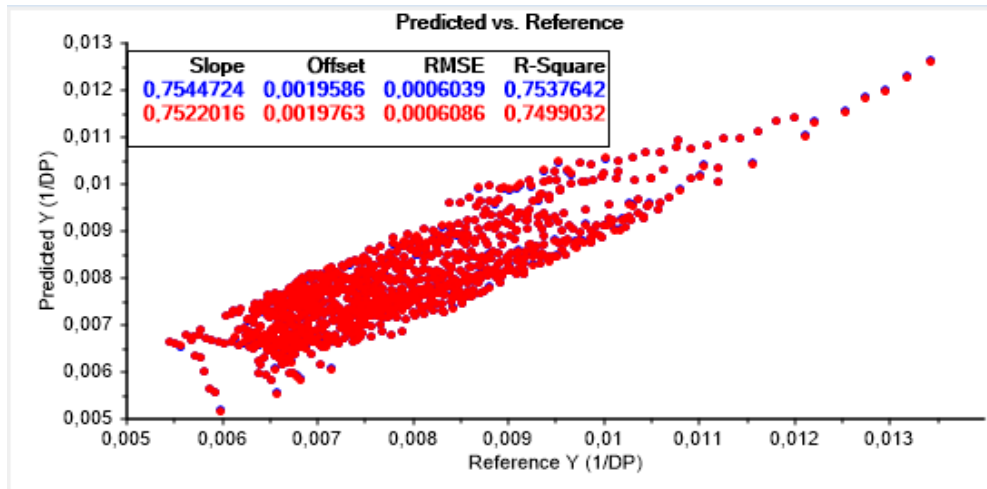
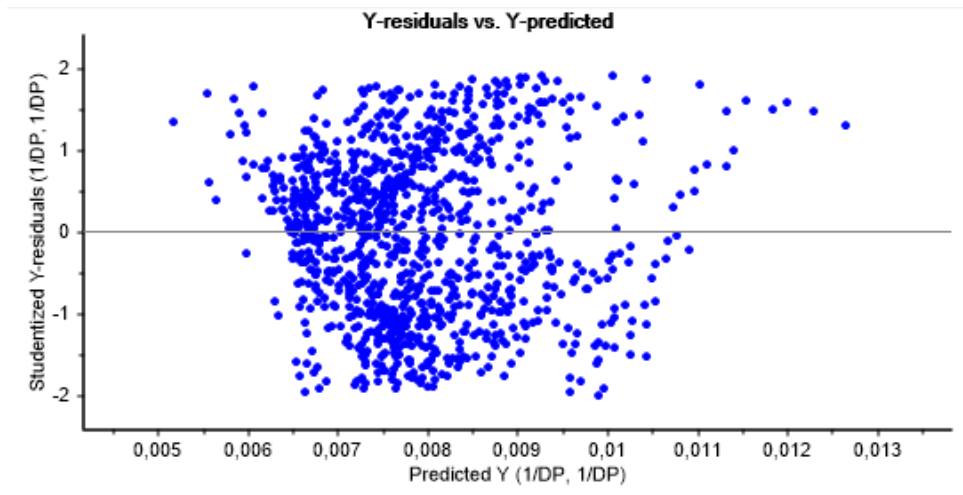


Figura 11. Gráfica de residuos modelo de 10 regresores



3.4 REGRESIÓN PARA LA PRESIÓN DE LA CISTERNA

La regresión para predecir la presión de llenado de las cisternas se efectuó considerando las mismas variables de la sección anterior. La predicción de la presión de la cisterna fue dividida en dos regresiones ya que según las gráficas de los cargues estándar el caudal presenta dos zonas de diferente comportamiento (Figura 4).

3.4.1 Regresión de la presión de la cisterna en la zona 1: La Ecuación 7 presenta la mejor regresión obtenida para la zona 1. Según los valores de R^2 ajustado para la calibración y la validación, la estructura matemática para la regresión con mejor desempeño corresponde a la obtenida después del retiro de los datos atípicos que según las gráficas de residuos estudentizados superen el umbral de $\pm 1,96$ y la reducción en el número de regresores según el valor de significancia estadística p ($p > 0,05$), (Anexo C, Tabla 5); *i.e.* la regresión propuesta para la predicción de la presión de la cisterna en la zona 1 contiene 7 regresores con una reproducción en la varianza de *ca.* 92%. Asimismo, las Figuras 12 y 13 presentan las gráficas de los valores predichos versus los de referencia y la distribución de los residuos estudentizados, respectivamente. La regresión obtenida con el modelo presenta un desempeño alto (predicción de *ca.* 92% varianza) y la distribución de los errores cumple el supuesto de varianza constante. Con lo anterior la regresión propuesta genera los valores de presión con un desempeño suficiente para su aplicación en estimaciones de tipo semicuantitativo.

$$P_{cist} = 0,3914 T + 1,34 P_i + 0,0002 \dot{m}^2 - 0,008 P_i^2 - 82,364 \frac{P_i}{\dot{m}} + 0,929 \frac{P_i^2}{\dot{m}} - 4,62 \frac{\dot{m}}{P_i} \quad (7)$$

Donde $\dot{m} = \frac{kg}{min}$; $T = ^\circ F$; $P_i = psi$; $\Delta P = psi$

Figura 12. Valores predichos vs valores de referencia zona 1. $R^2_{ajustado}=0,9205$

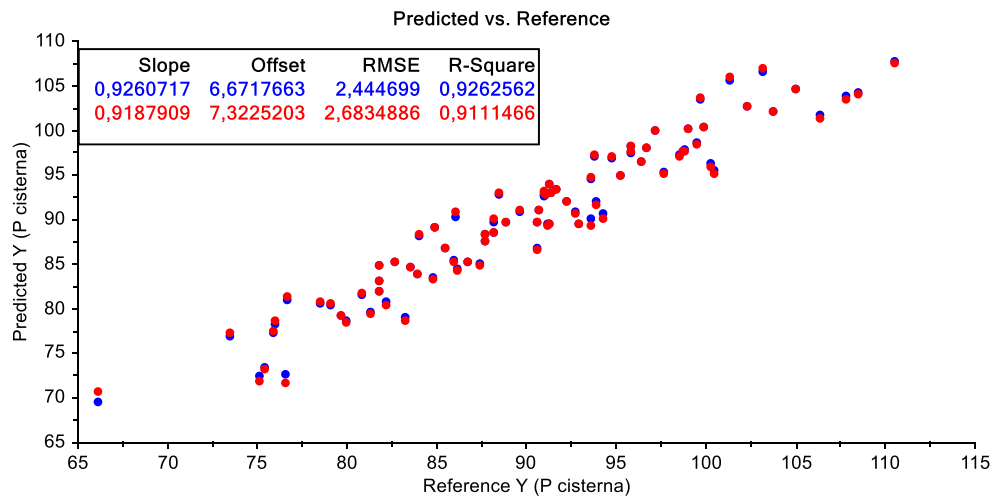
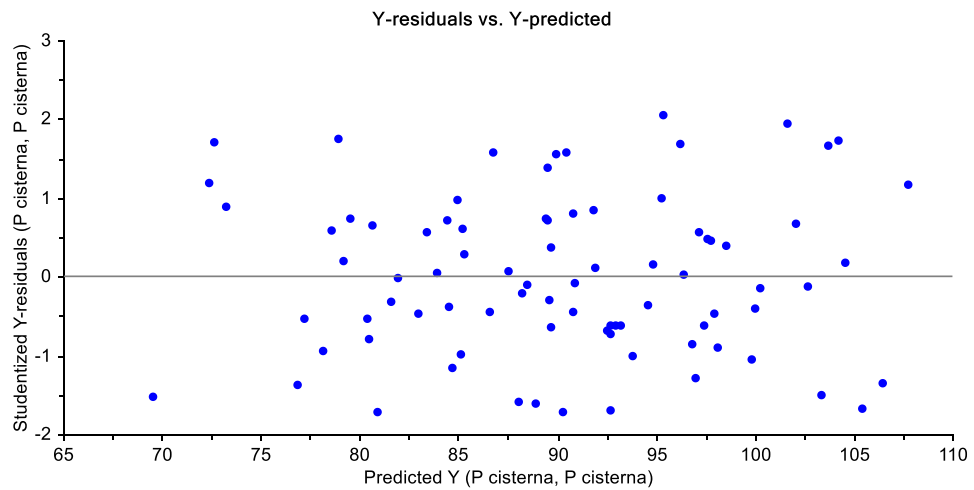


Figura 13. Gráfico de residuos zona 1



3.4.2 Regresión de la presión de la cisterna en la zona 2: La Ecuación 8 presenta la mejor regresión obtenida para la zona 2. Según los valores de R^2 ajustado de calibración y de validación, la estructura matemática para esta regresión corresponde a la obtenida después del retiro de los datos atípicos que según las gráficas de residuos estudentizados superen el umbral de $\pm 1,96$ y la reducción en el número de regresores con significancia estadística inferior al 95% de confianza (Anexo C, Tabla 6); i.e. la regresión propuesta para la predicción de la presión de la cisterna en la zona 2 contiene 8 regresores con una reproducción en la varianza de ca. 86%. Asimismo, las Figuras 14 y 15 presentan las gráficas de los valores predichos versus los de referencia y la distribución de los residuos estudentizados respectivamente. A pesar del alto valor de ajuste de los datos al modelo propuesto (alto valor de R^2), la generación de los patrones mostrados en la gráfica de residuos (Figura 15) no soporta el cumplimiento de los supuestos para la regresión obtenida.

$$P_{cisterna} = 12,326 \dot{m} + 3,4801 T - 20,2165 P_i - 0,0156 \dot{m}^2 + 0,021 \dot{m} P_i + 1364,213 \frac{P_i}{\dot{m}} - 392,109 \frac{\dot{m}}{P_i} + 23,7485 \frac{\dot{m}^2}{P_i^2} - 453,326 \quad (8)$$

Donde $\dot{m} = \frac{\text{kg}}{\text{min}}$; $T = ^\circ F$; $P_i = \text{psi}$; $\Delta P = \text{psi}$

Figura 14. Valores predichos vs valores de referencia zona 2. R^2 ajustado=0,8682

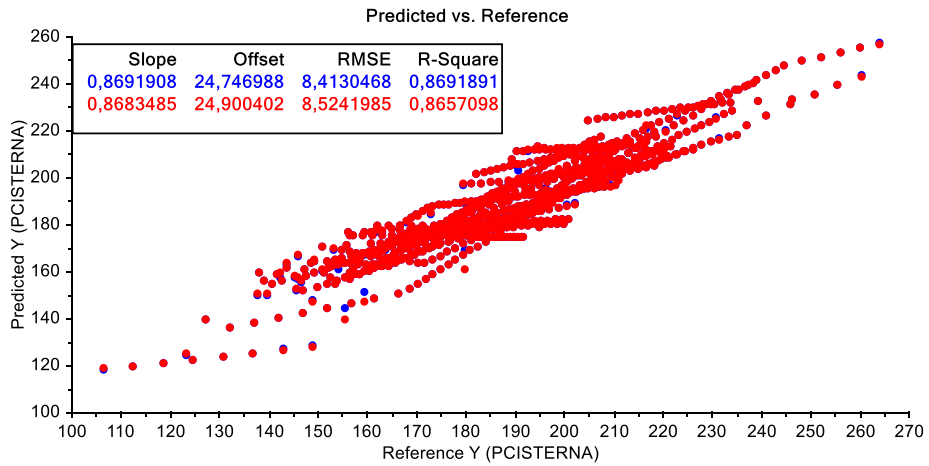
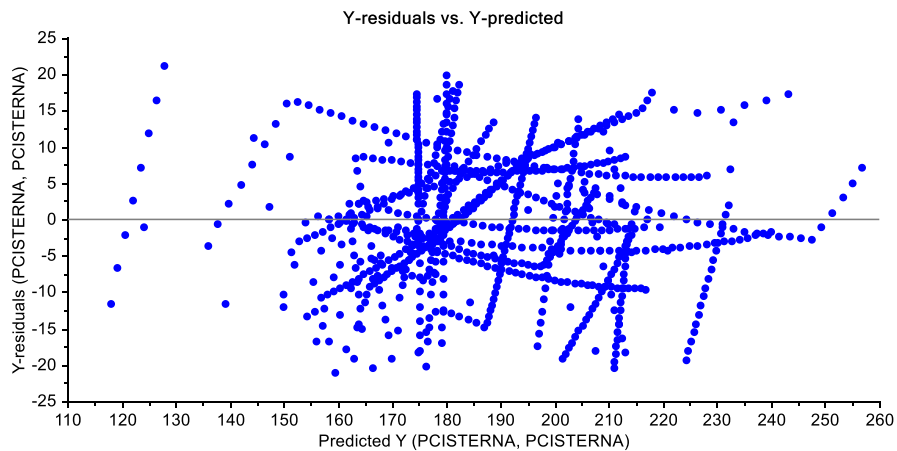


Figura 15. Gráfico de residuos zona 2.



Los modelos de regresión propuestos y desarrollados en el presente trabajo fueron adicionalmente ajustados utilizando un pretratamiento previo de los datos por medio de la normalización por autoescalado –con los casos desviación

estándar y rango. Sin embargo, los desempeños obtenidos en estas regresiones no superaron los resultados obtenidos utilizando los datos originales.

Resumiendo, el desarrollo de las regresiones para la predicción del aumento en la presión de la cisterna mostró que la adición de variables predictoras a prueba y error si permite el desarrollo de modelos estadísticamente satisfactorios y que el sistema permite modelarse únicamente con variables iniciales independientes del tiempo.

3.5 SIMULACIÓN DE LOS CARGUES

La simulación de la variación del flujo y de la presión de la cisterna con el tiempo durante un proceso de llenado con comportamiento estándar fue efectuada por medio de la solución de la ecuación diferencial resultante del balance de masa, según:

$$\dot{m} = \frac{d}{dt} \left(\frac{V}{\vartheta} \right) \quad (9)$$

Donde, V es el volumen de la cisterna, con un valor constante de 50 m^3 . El volumen específico del propileno, ϑ , cambia con el factor de compresibilidad, según:

$$Z = \frac{\vartheta}{\vartheta_{ideal}} \quad , \quad \vartheta = \frac{RTZ(P_{cist})}{P_{cist}} \quad (10,11)$$

Donde, R es la constante de los gases ideales, T es la temperatura promedio durante el cargue estándar y P_{cist} es la presión de cisterna. Reemplazando la Ecuación 11 en el balance de masa, se obtiene:

$$\dot{m} = V \frac{d}{dt} \left(\frac{P_{cist}}{RTZ(P_{cist})} \right) \quad (12)$$

El factor de compresibilidad $Z(P_{cist})$ fue estimado de acuerdo a las condiciones que presenta el sistema de llenado. Para esto, un punto inicial y un punto final fueron asumidos para la variación en la presión de la cisterna (*i.e.* 76,4 bar y 229,4 bar respectivamente). La ecuación lineal resultante corresponde a (Anexo D):

$$Z(P_{cist}) = -0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1 \quad (13)$$

Reemplazando la anterior ecuación en el balance de masa se obtiene:

$$\dot{m} = \frac{V}{RT} \left(\frac{(-0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1) + 0,001073P_{cist}}{[-0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1]^2} \right) \frac{dP_{cist}}{d\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt} \quad (14)$$

$$\dot{m} = \frac{V}{RT} \left(\frac{0,984}{[-0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1]^2} \right) \frac{dP_{cist}}{d\dot{m}} \frac{d\dot{m}}{dt} \quad (15)$$

La ecuación de regresión desarrollada para la predicción de la presión de la cisterna en la zona 1 (Ecuación 7) se utiliza para completar el balance de masa obteniendo,

$$\frac{dP_{cist}}{d\dot{m}} = \frac{0,0004\dot{m}^3 Pi + 82,3634Pi^2 - 0,9288Pi^3 - 4,6199\dot{m}^2}{\dot{m}^2 Pi} \quad (16)$$

Reemplazando la derivada (16) en la expresión para el balance de masa, un modelo para la predicción de la variación del flujo durante el proceso de llenado para la zona 1 es obtenido según,

$$\frac{d\dot{m}}{dt} = \frac{RT}{0,984V} \frac{\dot{m}^3 Pi[-0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1]^2}{0,0004\dot{m}^3 Pi + 82,3634Pi^2 - 0,9288Pi^3 - 4,6199\dot{m}^2} \quad (17)$$

La ecuación diferencial (17) relaciona la presión inicial con las dos principales variables del sistema que son el flujo másico y la presión de la cisterna. La solución de este modelo fue implementada en Excel utilizando el método de Euler para simular el comportamiento de la zona 1 durante el llenado de los cargues estándar. Los resultados de las simulaciones son mostrados en las Figuras 16-18. En la Figura 16 se observa que el modelo predice un incremento más acentuado que el descrito por los datos históricos de proceso; para 1,5 min el modelo predice un valor de caudal superior al reportado por los datos históricos. Se observa el mismo comportamiento para la presión de la cisterna (Figura 17); para 2 min el valor de predicción es superior a los datos históricos. De otro lado, la Figura 18 muestra tendencias que concuerdan con los datos históricos.

Figura 16. Flujo másico vs Tiempo

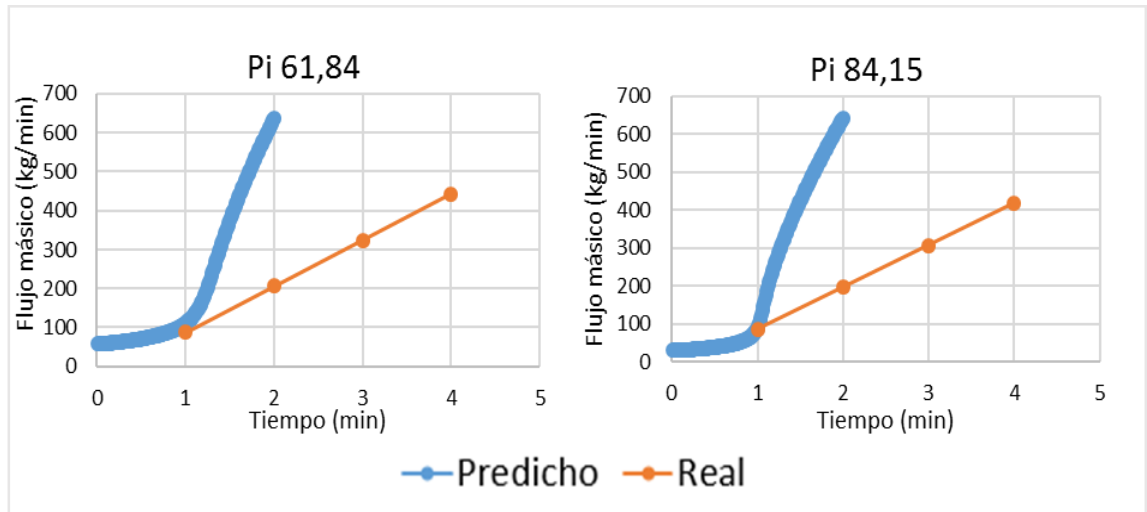


Figura 17. Presión cisterna vs Tiempo

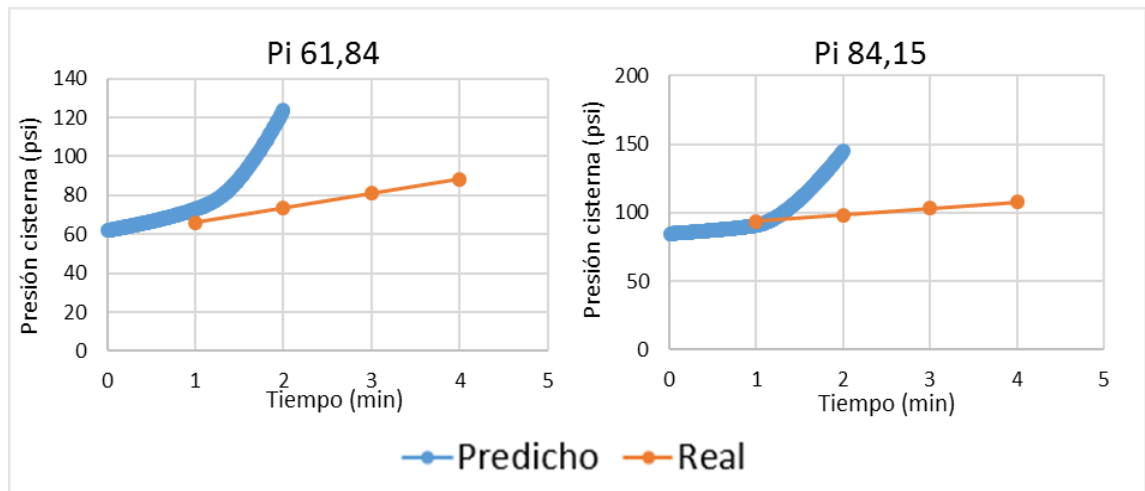
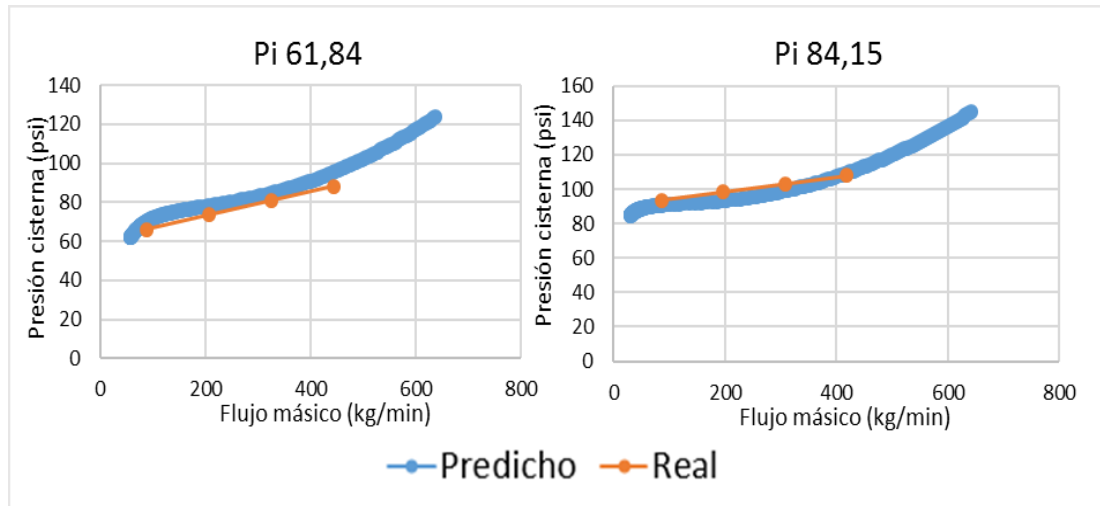


Figura 18. Presión cisterna vs Flujo másico



Los resultados de las simulaciones muestran que el modelo propuesto para la zona 1 carece de la representación de algunos fenómenos que suceden durante el proceso de llenado. El modelo planteado omite la representación explícita de la variación del caudal con el tiempo y no considera el efecto del eductor que recibe los vapores del brazo de retorno conectado con la cisterna (Figura 1); el eductor succiona los vapores de la cisterna reduciendo su presión y permitiendo un incremento en la masa de llenado en la misma [12]. Al omitir el tiempo de forma explícita, la variación exacta del caudal se presenta como incierta ya que se tiene una regresión que relaciona solo el flujo másico y la presión.

Para ajustar el modelo a la tendencia mostrada por los datos históricos, un factor de corrección α para el término de flujo en el balance de masa (Ecuación 9) fue incluido según:

$$\dot{m}^{\alpha} = \frac{d(m)}{dt} \quad (18)$$

Este factor de corrección α fue ajustado utilizando los datos históricos de proceso por medio de la herramienta Solver de Excel; La obtención de α fue efectuada a través de una minimización de la suma de los errores entre los valores predichos y los datos históricos para cada minuto de la zona 1. La consistencia en los valores obtenidos para el factor α fue verificada en los 24 cargues estándar; en el Anexo E se presentan los valores del factor α obtenidos para los cargues estándar considerados. Una regresión lineal que permite la obtención del factor de corrección según las particularidades con las que llega cada cisterna fue propuesta considerando la presión inicial de la cisterna y el caudal inicial del cargue (Anexo E)

$$\alpha = 0,0005\dot{m}_i - 0,0018 P_i + 0,8940 \quad (19)$$

La ecuación para el factor de corrección (19) fue incluida en el balance de masa del proceso. El modelo matemático corregido (18) fue solucionado y sus resultados comparados con los datos históricos de proceso. Las Figuras 19-21 presentan los resultados de la simulación con el modelo corregido. Estas figuras demuestran que las tendencias predichas con el modelo corregido para el flujo másico y la presión de cisterna, respectivamente, concuerdan con los datos históricos; con esto, el factor de corrección mejora el modelo matemático propuesto.

Figura 19. Flujo másico vs Tiempo

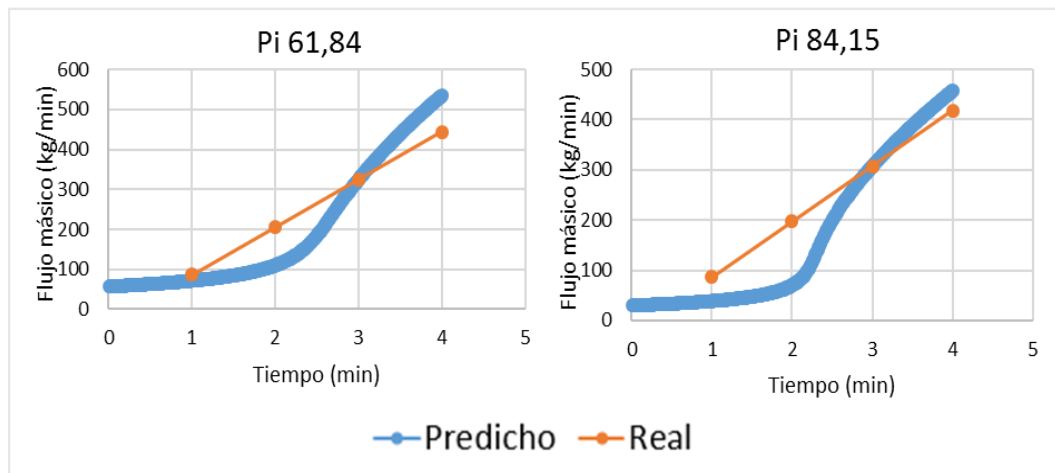


Figura 20. Presión cisterna vs Tiempo

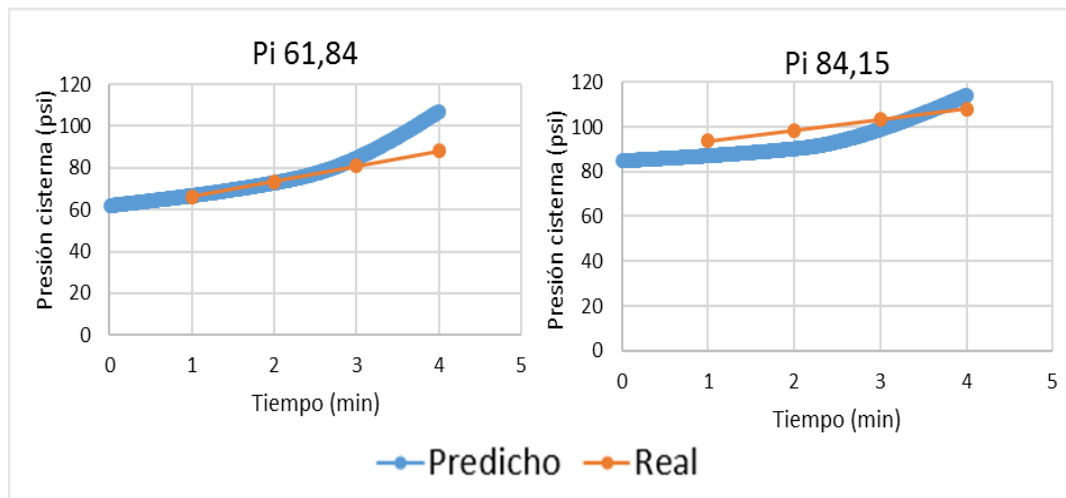
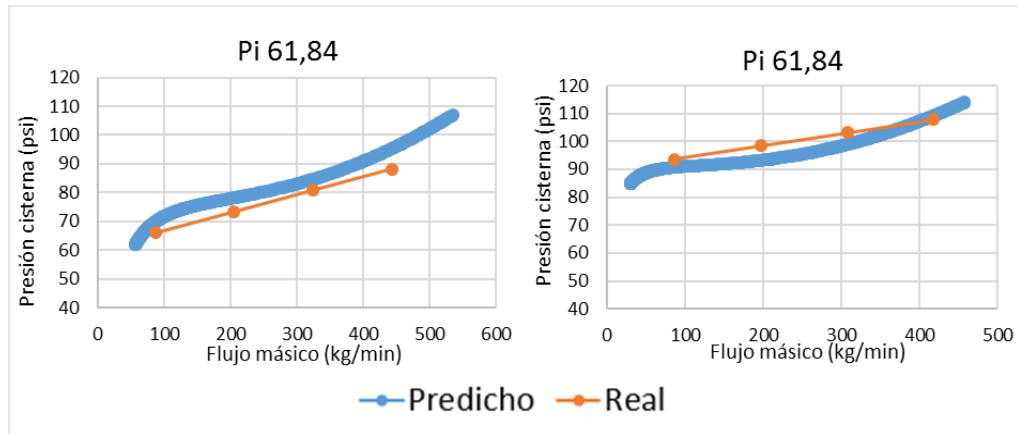


Figura 21. Presión cisterna vs Flujo másico



De otro lado, las tendencias obtenidas con el modelo corregido sugieren que la carencia explícita del tiempo en la regresión de la presión de la cisterna repercute en un aumento lento en el caudal al inicio de los cargues; *i.e.* el caudal aumenta lentamente debido a que la pendiente inicial con la presión es baja. Por lo anterior, en la primera parte de la simulación, los resultados del modelo se encuentran por debajo de los históricos para el caudal. Asimismo, en la sección final de la simulación, la pendiente para la curva caudal presión es mayor que al inicio del cargue, con lo cual la simulación reporta datos por encima de los históricos del caudal.

A pesar de que el modelo matemático desarrollado no tiene explícito el tiempo, las tendencias obtenidas en las simulaciones representan cualitativamente las tendencias de los datos históricos para la parte inicial de los cargues de las cisternas, mostrando una raíz del error cuadrático medio de $41,9 \pm 6,6$ kg/min, lo cual representa un 0,1% del caudal medio del cargue. Para la presión de llenado de las cisternas se tiene una raíz del error cuadrático medio de $5,32 \pm 0,81$ psi, lo

cual representa un 0,07% de la presión promedio del cargue. Este último valor es bajo en comparación con la predicción del flujo másico, por lo que se comprueba que el modelo resultante tiene una mayor exactitud en la simulación de la presión de llenado proporcionando resultados semicuantitativos (Anexo F).

Es importante mencionar que la ventaja del modelo corregido propuesto en el presente trabajo es que solo se requiere la presión inicial con la que llega la cisterna; el caudal inicial se ajusta para obtener esta presión inicial. Asimismo, se requiere mencionar que el rango de aplicación para el modelo corregido se encuentra entre 64 y 84 psi para la presión inicial de las cisternas y valores de flujo másico entre 80 y 420 kg/min.

A pesar del proceso de selección de cargues estándar siempre se tuvieron datos con errores de medición (valores atípicos) que hicieron necesaria la eliminación minuciosa de éstos; esto revela problemas de calibración y de respuesta de los dispositivos y elementos de medición usados durante el proceso de llenado que dificultan que cualquier proceso estadístico pueda estar lo más cercanamente posible a la realidad del sistema.

De otro lado, los resultados obtenidos para la simulación en la zona 2 no fueron satisfactorios, es decir no presentaba tendencias acordes a la realidad generando valores con altibajos en la operación que conducen a errores de tipo numérico. Estos errores pueden deberse al rango reducido de flujo másico que presenta esta zona (entre 440 y 470 kg/min). Dado lo anterior, podría ser posible simular el proceso de llenado para la zona 2 considerando un flujo másico constante y determinando la presión de llenado según el tiempo transcurrido.

Finalmente, es importante resaltar que durante el desarrollo del presente trabajo no se encontraron artículos o reportes tendientes a la simulación de procesos de llenado en tanques cisterna mediante la utilización de un eductor. Por lo tanto, el modelo corregido propuesto en este documento corresponde a un aporte importante para la comprensión y la simulación de este tipo de procesos.

4. CONCLUSIONES

- En el modelamiento de la caída de presión para el tramo de tubería con la instrumentación que presenta las mayores de carga se obtuvieron 2 modelos linealmente satisfactorios que sólo dependen de la presión inicial de la cisterna, la temperatura ambiente promedio y el flujo másico facilitando su utilización en simulaciones del proceso de llenado.
- La implementación de un factor alfa de corrección al modelo matemático para el caudal y la presión de llenado de las cisternas reportó mejoras significativas en la simulación de los cargues. El modelo matemático desarrollado para la presión de cisterna se encuentra restringido para valores de presión inicial de cisterna entre 60 y 84 psi, y valores de flujo másico entre 80 y 420 kg/min.

5. RECOMENDACIONES

- Los resultados encontrados pueden ser de gran ayuda para el análisis de variables determinantes en la operación de llenado, por esto se recomienda realizar validaciones adicionales de los modelos desarrollados en simulaciones del proceso de llenado y sobre un mayor número de cargues estándar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] NEW JERSEY DEPARTMENT OF HEALTH AND SENIOR SERVICES. Hoja informativa sobre sustancias peligrosas. New Jersey. 2004. 6 p.

[2] MARTÍNEZ, F.L. Guía de entrenamiento Departamento de Programación de la Producción. Ecopetrol S.A. Barrancabermeja: 2008. 24 p

[3] FERNÁNDEZ, M.R. Ingeniería Conceptual para despacho de PGR por botes y carrotanques simultáneamente. Ecopetrol S.A. 2008. 21 p.

[4] FILOSOFIA DE CONTROL-NEGLP. Construcción, montaje, gestión de compras, compras, ingeniería de detalle y puesta en marcha de las obras requeridas para la ampliación de la capacidad y almacenamiento de propileno grado refinería de la Gerencia Refinería Barrancabermeja. Ecopetrol S.A. Barrancabermeja: 2011. 53 p. (GRB-5209011-210001-ID-IN-MD-005).

[5] RUIZ, G. Análisis y optimización del sistema de entrega de propileno en el departamento de materias primas de la gerencia refinería de Barrancabermeja. Ecopetrol S.A. Barrancabermeja: 2015. 27 p.

[6] CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw Hill, 1992. 198 p.

[7] CENGEL, Yunus A. y CIMBALA, John M. Mecánica De Fluidos: Fundamentos Y Aplicaciones. México D.F.: McGraw Hill, 2007.

[8] DRAPER NR, SMITH H. Applied Regression Analysis. Third edit. USA: John Wiley & Sons; 1998. 736 p.

[9] HAIR JJ, BLACK W, BABIN B, ANDERSON R. Multivariate Data Analysis. 7th edition. USA: Prentice Hall; 2009.

[10] HILERA J, MARTÍNEZ V. Análisis estadístico multivariante: un enfoque teórico y práctico. McGraw-Hill. 2000. 712 p.

[11] MENDENHALL W. Introducción a la probabilidad y la estadística. 1987. p. 626.

[12] MOOYAART, W. Method and apparatus for filling closed containers with volatile liquids. US PATENT 2764

BIBLIOGRAFÍA

CENGEL, Yunus A. y CIMBALA, John M. Mecánica De Fluidos: Fundamentos Y Aplicaciones. México D.F.: McGraw Hill, 2007.

CRANE. Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: McGraw Hill, 1992. 198 p.

DRAPER NR, SMITH H. Applied Regression Analysis. Third edit. USA: John Wiley & Sons; 1998. 736 p.

HAIR JJ, BLACK W, BABIN B, ANDERSON R. Multivariate Data Analysis. 7th edition. USA: Prentice Hall; 2009.

HILERA J, MARTÍNEZ V. Análisis estadístico multivariante: un enfoque teórico y práctico. McGraw-Hill. 2000. 712 p.

MENDENHALL W. Introducción a la probabilidad y la estadística. 1987. p. 626.

MOOYAART, W. Method and apparatus for filling closed containers with volatile

liquids. US PATENT 2764

RUIZ, G. Análisis y optimización del sistema de entrega de propileno en el departamento de materias primas de la gerencia refinería de Barrancabermeja. Ecopetrol S.A. Barrancabermeja: 2015. 27 p.

ANEXOS

Anexo A: Cálculos para la cabeza requerida

Tabla 1. Propiedades del fluido

Densidad (kg/m³)	517,8
Viscosidad (cP)	0,063

Tabla 2. Pérdidas de carga por tuberías en la succión.

TUBERIA	Longitud (m)	Diámetro nominal(m)	Qop (m ³ /s)	e/D (mm)	Re	Factor fricción f	h $(\frac{m}{(m^3/s)^2})$
Tubería (12")	132,85	0,3033	0,0145	0,0099	740121,198	0,038	162,52

Tabla 3. Pérdida de carga por accesorios en la succión.

ACCESORIO	Cantidad	Factor fricción f	Le/D	Diámetro nominal(m)	Constante K	h $(\frac{m}{(m^3/s)^2})$	h TOTAL
Codo 45 (12")	5	0,038	16	0,3033	0,608	5,9366	29,6828
Codo largo 90 (12")	1	0,038	30	0,3033	1,14	11,1311	11,1311
Codo 90 (12")	5	0,038	30	0,3033	1,14	11,1311	55,6553
Válvula bola (12")	3	0,038	3	0,3033	0,114	1,1131	3,3393
Válvula MOV (12")	1	0,038	3	0,3033	0,114	1,1131	1,1131
Total							100,922

Tabla 4. Pérdida de carga por expansiones/reducciones en la succión.

CONTRACCION / REDUCCION	Diámetro 1	Diámetro 2	D1/D2 (Reducciones)	Constante K	$h \left(\frac{m}{(m^3/s)^2} \right)$
Reducción 12" a 8"	0,3033	0,2027	1,4963	0,215	2,0993

Tabla 5. Pérdida de carga por tuberías en la descarga.

TUBERIAS	longitud (m)	Diámetro nominal (m)	Qop (m3/s)	e /D(mm)	Re	Factor fricción f	$h \left(\frac{m}{(m^3/s)^2} \right)$
Tubería 8"	2,6	0,2027	0,0215	0,0148	1107435,54	0,044	7277,831
Tubería 6"	154,25	0,1541		0,0195	1456698,15	0,048	
Tubería 4"	0,5	0,1023		0,0293	2194302,88	0,057	

Tabla 6. Pérdida de carga por accesorios en la descarga.

ACCESORIO	Cantidad	Factor fricción f	Le/D	Diámetro nominal(m)	Cte K	$h \left(\frac{m}{(m^3/s)^2} \right)$	h TOTAL
Válvula de cheque (8")	1	0,044	55	0,2027	2,42	118,446	118,446
Válvula de bola (6")	1	0,048	3	0,1541	0,144	21,100	21,100
Válvula de bola (4")	6	0,057	3	0,1023	0,171	129,008	774,045
Válvula de bola (3")	4	0,06	3	0,0779	0,18	403,872	1615,489
Válvula compuerta (4")	1	0,057	8	0,1023	0,456	344,020	344,020
Válvula mariposa (4")	1	0,057	35	0,1023	1,995	1505,09	1505,087
Válvula MOV (4")	1	0,057	3	0,1023	0,171	129,008	129,008
Codo 90° (6")	14	0,048	30	0,1541	1,44	210,996	2953,937
						Total	7461,130

Tabla 7. Pérdida de carga por expansiones/reducciones en la descarga.

CONTRACCION / REDUCCION	Diámetro 1	Diámetro 2	D1/D2 (Reducciones)	Constante K	$h \left(\frac{m}{(m^3/s)^2} \right)$
Expansión 6" a 8"	0,1541	0,2027	---	0,666	97,580
Reducción 8" a 6"	0,2027	0,1541	1,315	0,140	6,852
Reducción 6" a 4"	0,1541	0,1023	1,506	0,215	31,503
Reducción 4" a 3"	0,1023	0,0779	1,313	0,140	105,620
Expansión 3" a 4"	0,0779	0,1023	---	0,664	1489,305
Reducción 4" a 3"	0,1023	0,0779	1,313	0,140	105,620
				Total	1836,480

Tabla 8. Pérdidas de carga en platinas de orificio

PLATINA	Beta = d/D	Diámetro Orificio (pulg)	$h \left(\frac{m}{(m^3/s)^2} \right)$
RO-31657	0,12139	0,96882	225278,46
RO-31654	0,57576	2,31802	6120,13
RO-31650	0,2217	0,89255	312036,72
Total			543435,31

Según las tablas anteriores se tiene la siguiente expresión para la pérdida de carga total en la succión y descarga de la bomba:

$$h_L = (162,52 + 100,922 + 2,0993 + 7277,831 + 7461,13 + 1836,480 + 543435,31 + K1 + K2 + K3 + K4) * Q^2 \quad (1)$$

El cálculo de la expresión para cabeza requerida se hace mediante la ecuación:

$$H = h_L + \left(\frac{P2}{\rho g} - \frac{P1}{\rho g} \right) + (Z2 - Z1) + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g} \right) \quad (2)$$

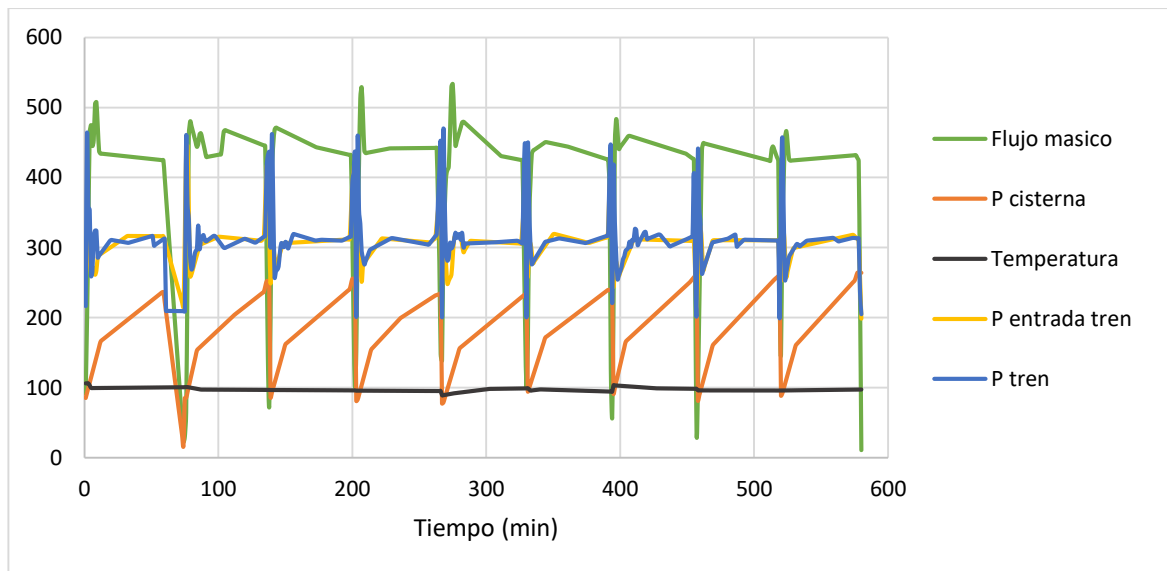
Reemplazando los valores obtenidos tenemos:

$$H = (560276,292 + k1 + k2 + k3 + k4) * Q^2 - 210,713 + 2 + 2450,763 * Q^2 \quad (3)$$

Anexo B: Análisis datos históricos

Los datos históricos constan de registros por minuto para la temperatura, el flujo másico, la presión en la entrada del brazo de llenado del tren, la presión en el brazo de retorno de vapores y la presión de tren. En la Figura 1 se observa la variabilidad de los datos analizados, con lo cual se identifica un comportamiento pseudoestacionario.

Figura 1. Comportamiento datos históricos año 2014.



Los estadísticos que caracterizan estos datos se encuentran en la Tabla 1. Se escogió el mes de diciembre para la selección de los cargues estándar con los que se desarrollarían las regresiones puesto que para este mes la varianza es menor en comparación con los otros.

Tabla 1. Caracterizacion de datos históricos.

ENERO					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	412,863	182,152	95,778	301,701	305,737
MAX	688,877	273,657	117,501	469,563	530,977
MIN	10,385	5,871	80,047	191,376	183,845
DESVIACION ESTANDAR	91,154	42,756	2,954	28,951	41,349
FEBRERO					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	411,911	179,042	95,031	301,262	307,800
MAX	664,521	271,215	106,015	492,607	525,059
MIN	1,917	2,405	77,023	181,583	180,789
DESVIACION ESTANDAR	96,967	42,950	2,954	32,315	44,856
MAYO					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	414,810	177,215	94,393	301,902	305,261
MAX	644,736	271,062	105,719	516,832	515,473
MIN	10,000	1,916	75,672	182,051	179,240
DESVIACION ESTANDAR	89,136	49,737	2,839	30,955	42,074
JULIO					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	417,753	187,728	98,115	308,964	313,607
MAX	781,464	274,420	110,403	506,876	518,484
MIN	0,925	15,378	77,781	195,232	189,321
DESVIACION ESTANDAR	85,781	43,959	3,386	29,436	38,928
AGOSTO					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	418,345	184,563	96,352	303,334	306,311
MAX	762,500	274,267	107,058	487,004	505,324
MIN	1,383	5,020	75,993	188,284	176,603
DESVIACION ESTANDAR	85,426	44,039	3,767	28,752	38,642
DICIEMBRE					
	m	P cist	Temperatura	P entrada tren	P tren
VALOR MEDIO	419,219	177,118	93,560	303,198	309,055
MAX	640,546	273,810	112,529	507,494	513,867
MIN	10,869	17,337	75,803	182,294	170,151
DESVIACION ESTANDAR	81,495	39,398	3,705	30,631	40,899

Anexo C: Regresiones lineales multiples

- PARA MODELAR DP

Tabla 1. Resultados modelo de 7 regresores.

MODELO DE 7 REGRESORES				
VARIABLES INDEPENDIENTES	CASO 1: Y=DP		CASO 2: Y=1/DP	
	Valor p	Coeficientes	Valor p	Coeficientes
Intercepto	6,32E-10	-3,26E+04	1,01E-09	2,41E+00
m	4,42E-10	1,48E+02	7,25E-10	-1,09E-02
Temperatura	0,00E+00	-4,75E+00	0,00E+00	3,30E-04
Pi cisterna	2,74E-10	4,09E+02	2,10E-09	-2,90E-02
Pi*m	4,16E-10	-1,82E+00	2,02E-09	1,30E-04
Pi^2	5,63E-10	-4,58E-02	4,50E-05	2,24E-06
m^2	4,88E-10	-1,65E-01	6,64E-10	1,22E-05
Pi*m^2	3,48E-10	2,04E-03	1,37E-09	-1,47E-07
R^2 (Calibración)	0,5357		0,5403	
R^2 (Validación)	0,5277		0,5272	
VARIABLES INDEPENDIENTES	CASO 3: Y=Ln DP		CASO 4: Y=raiz DP	
	Valor p	Coeficientes	Valor p	Coeficientes
Intercepto	3,75E-10	-2,70E+02	3,18E-10	-1,48E+03
m	1,31E-10	1,24E+00	1,79E-10	6,74E+00
Temperatura	0,00E+00	-3,86E-02	0,00E+00	-2,13E-01
Pi cisterna	1,60E-10	3,39E+00	1,49E-10	1,85E+01
Pi*m	1,98E-10	-1,51E-02	2,07E-10	-8,25E-02
Pi^2	9,16E-08	-3,22E-04	5,65E-09	-1,92E-03
m^2	1,34E-10	-1,39E-03	1,91E-10	-7,54E-03
Pi*m^2	1,48E-10	1,71E-05	1,64E-10	9,30E-05
R^2 (Calibración)	0,5525		0,5472	
R^2 (Validación)	0,5432		0,5388	

Se escogió el mejor de los 4 casos analizados presentados en la tabla 1 tomando como criterio que los valores para el R^2 ajustado de calibración y el R^2 de validación cruzada sean lo más altos y cercanos posible, el cuál para este modelo corresponde al caso 3 (Ln DP). Después, se eliminan los datos que según las gráficas de residuos superen el umbral de $\pm 1,96$, ya que estos se consideran como datos atípicos. Por último, se suprimen las variables con significancia estadística inferior al 95% de confianza ($p > 0.05$).

Tabla 2. Resultador mejor caso del modelo 7 regresores (caso 3)

VARIABLES INDEPENDIENTES	ln (DP) Sin datos atípicos		Según significancia estadística	
	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes
Intercepto	0,3149	-44,6149	0	-44,9898
m	0,2517	0,2275	0	0,2297
Temperatura	0	-0,035	0	-0,0351
Pi cisterna	0,971	0,0217	0,001	0,0261
Pi* m	0,9928	2,41E-05	--	--
Pi^2	0	-4,08E-04	0	-4,14E-04
m^2	0,25	-0,0003	0	-2,58E-04
Pi*m^2	0,9664	0	0	1,62E-07
R^2 (Calibración)	0,7802		0,7852	
R^2 (Validación)	0,7772		0,7826	

Figura 1. Valores predichos vs valores referencia modelo caso 3 sin atipicos (In DP)

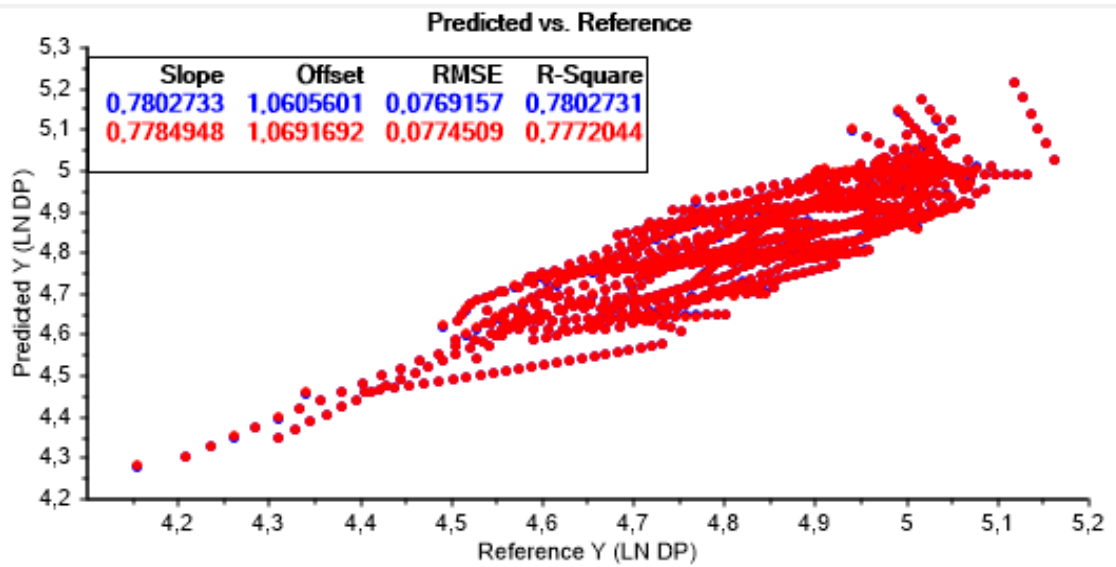


Figura 2. Gráfica de residuos sin atipicos Modelo caso 3 (In DP)

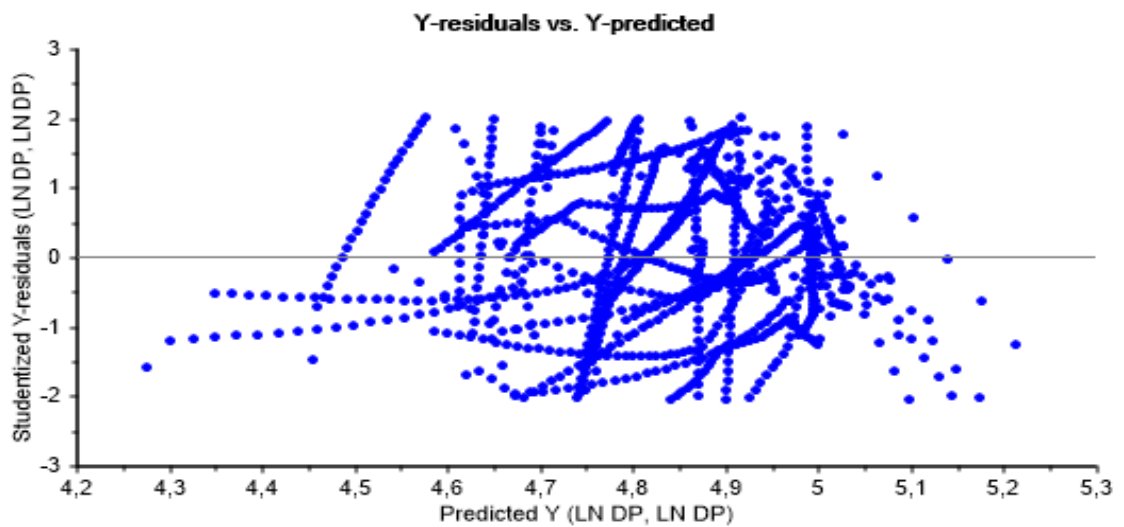


Tabla 3. Resultados modelo de 10 regresores.

MODELO DE 10 REGRESORES				
VARIABLES INDEPENDIENTES	CASO 1: Y=DP		CASO 2: Y=1/DP	
	Valor p	Coeficientes	Valor p	Coeficientes
Intercepto	0,1299	467087,9	0,0001	1,3171
m	0,1342	-1050,037	0,0001	0,2078
Temperatura	0	-4,6556	0	0,0003
Pi cisterna	0,3914	-12581,81	0,7464	0,3467
Pi*m	0,3016	25,1543	0,3915	-0,0015
Pi^2	0	-0,0501	0	0
m^2	0,1383	0,7872	0,0001	-0,0002
Pi*m^2	0,2421	-0,0177	0,1938	0
1/m	0,1262	-69150280	0,0001	13358,25
Pi/m	0,5251	2508360	0,7571	89,184
Pi/m^2	0,7176	-145289900	0,2989	-30485,06
R^2 (Predicho)	0,5517		0,5749	
R^2 (Referencia)	0,5125		0,5562	
VARIABLES INDEPENDIENTES	CASO 3: Y=Ln DP		CASO 4: Y=Raiz DP	
	Valor p	Coeficientes	Valor p	Coeficientes
Intercepto	0,0067	6777,51	0,0375	28537,39
m	0,0069	-15,3531	0,0388	-64,4594
Temperatura	0	-0,0374	0	-0,2076
Pi cisterna	0,4384	-92,137	0,3917	-559,226
Pi*m	0,2675	0,2187	0,2692	1,1965
Pi^2	0	-0,0004	0	-0,0021
m^2	0,0071	0,0116	0,0399	0,0485
Pi*m^2	0,1678	-0,0002	0,1927	-0,0009
1/m	0,0067	-994716,4	0,0366	-4203464
Pi/m	0,7118	11811,2	0,5821	96602,9
Pi/m^2	0,9114	361856,3	0,8567	-3225553
R^2 (Predicho)	0,5759		0,5665	
R^2 (Referencia)	0,5293		0,5241	

Se escogió el mejor de los 4 casos analizados presentados en la tabla 3 tomando como criterio que los valores para el R^2 ajustado de calibración y el R^2 de validación cruzada sean lo más altos y cercanos posible, el cuál para este modelo corresponde al caso 2 (1/DP). Después, se eliminan los datos que según las gráficas de residuos superen el umbral de $\pm 1,96$, ya que estos se consideran como datos atípicos. Por último, se suprimen las variables con significancia estadística inferior al 95% de confianza ($p > 0.05$).

Tabla 4. Resultador mejor caso del modelo 10 variables (caso 2)

VARIABLES INDEPENDIENTES	1/DP Sin datos atípicos		Según significancia estadística	
	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes
Intercepto	0,2314	-48,8485	--	--
m	0,2333	0,1088	--	--
Temperatura	0	0,0002	0	0,000241
Pi cisterna	0	8,563	0	7,779723
Pi*m	0	-0,0131	0	-0,011397
Pi^2	0	0	0	3,75E-06
m^2	0,2351	-0,0001	--	--
Pi*m^2	0	0	0	6,26E-06
1/m	0,2294	7311,763	0,0041	2,2982
Pi/m	0	-2494,733	0	-2361,2
Pi/ m^2	0	272463,1	0	268781,6
R^2 (Calibración)	0,7552		0,7537	
R^2 (Validación)	0,75		0,7499	

Figura 3. Valores predichos vs valores de referencia modelo caso 2 sin atipicos (1/DP)

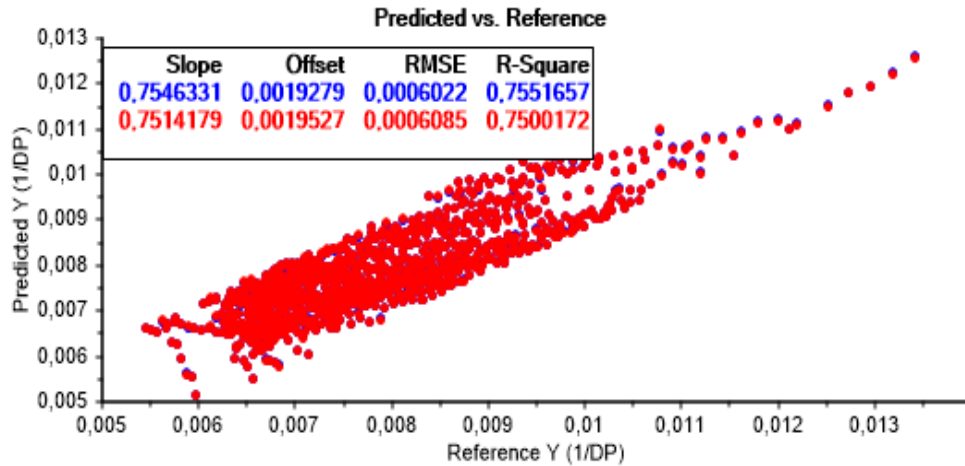
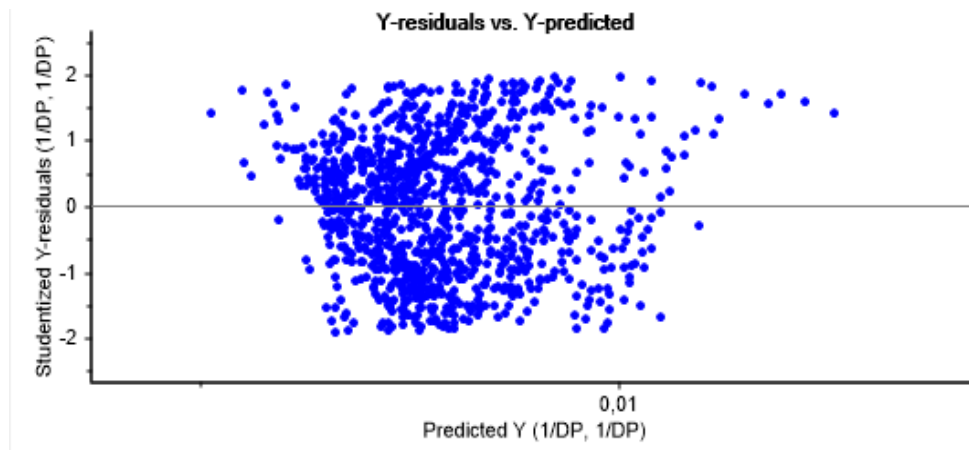


Figura 4. Gráfica de residuos modelo caso 2 sin atipicos (1/DP)



- **PARA MODELAR PRESIÓN DE CISTERNA ZONA 1**

Se aplica una regresión considerando como variables predictoras la presión inicial de la cisterna, la temperatura y el flujo másico de operación. Se plantea un modelo de 10 regresores mediante combinaciones a prueba y error de las variables antes mencionadas. Después, se eliminan los datos que según las gráficas de residuos superen el umbral de $\pm 1,96$, ya que estos se consideran como datos atípicos; y

por último, se suprimen las variables con significancia estadística inferior al 95% de confianza ($p > 0.05$).

Tabla 5. Resultados regresión para la zona1.

VARIABLES INDEPENDIENTES	Pcisterna (Zona 1)		Sin datos atípicos		Según significancia estadística	
	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes
\dot{m}	0,9981	-0,00096	0,77112	0,07023	--	--
Temperatura	0,0021	0,32293	1,06E-07	0,39237	0	0,39136
Pi cisterna	0,8764	0,18407	0,11684	1,13341	0	1,39777
\dot{m}^2	0,1947	0,00037	0,19429	0,00022	0	0,00017
$\dot{m} * Pi$	0,5806	-0,00238	0,71175	-0,00096	--	--
Pi^2	0,5931	0,00793	0,59577	-0,00474	0,0067	-0,00794
Pi / \dot{m}	0,9054	8,75305	0,13907	-67,43703	0,0003	-82,36337
Pi^2 / \dot{m}	0,8363	-0,19522	0,19548	0,74728	0,0002	0,92881
\dot{m} / Pi	0,4583	10,95222	0,65235	-3,94931	0,0138	-4,6199
\dot{m}^2 / Pi^2	0,376	-1,27783	0,7102	-0,31774	--	--
R^2 ajustado (Calibración)	0,7625		0,9208		0,9205	
R^2 ajustado (Validación)	0,7085		0,8964		0,9043	

Figura 5. Valores predichos vs valores referencia modelo inicial Presión de Cisterna Zona1

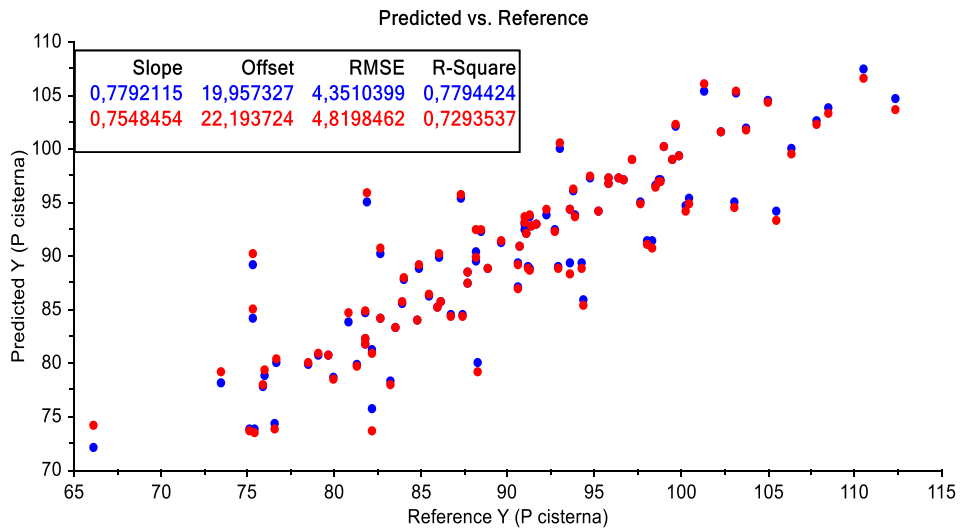


Figura 6. Residuos Modelo inicial Presión de Cisterna Zona 1

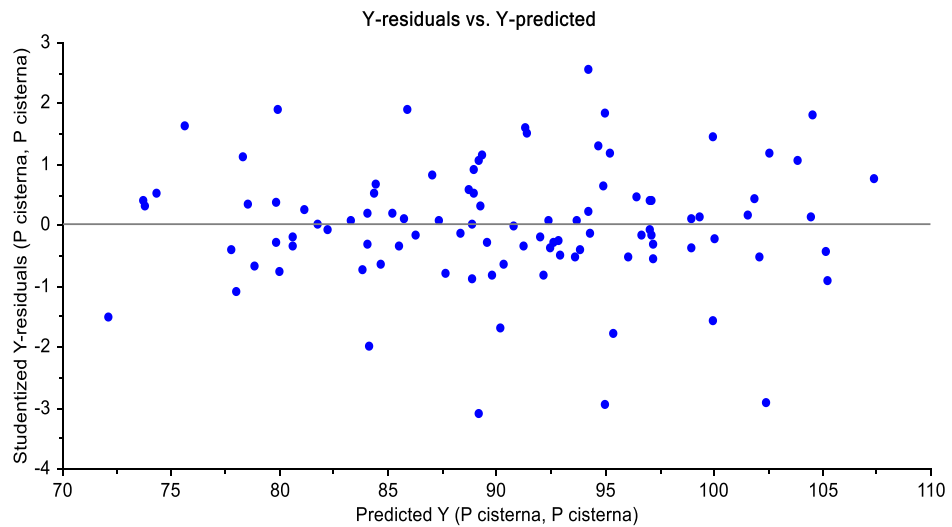


Figura 7. Valores predichos vs valores referencia modelo inicial sin atipicos Presión de Cisterna Zona 1

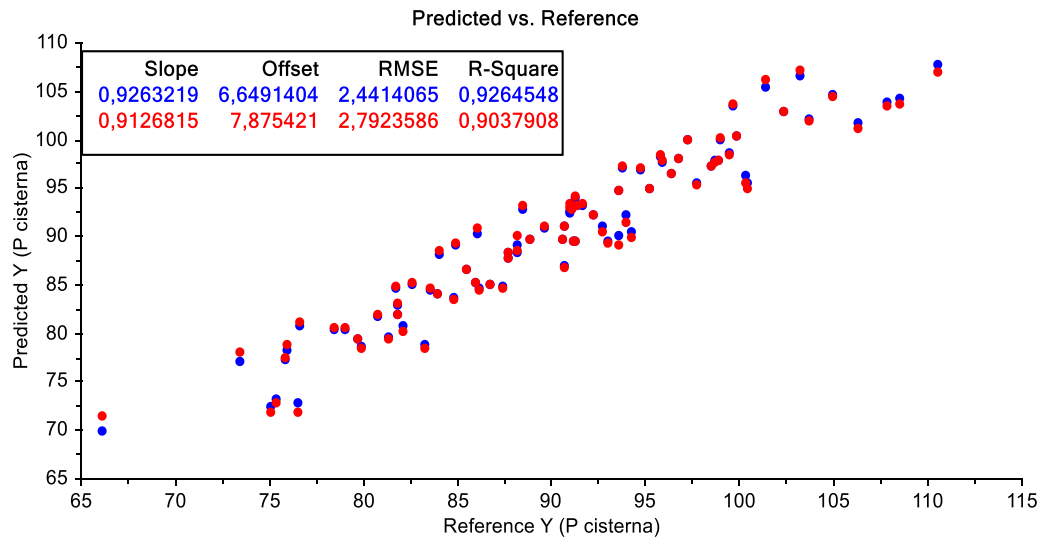
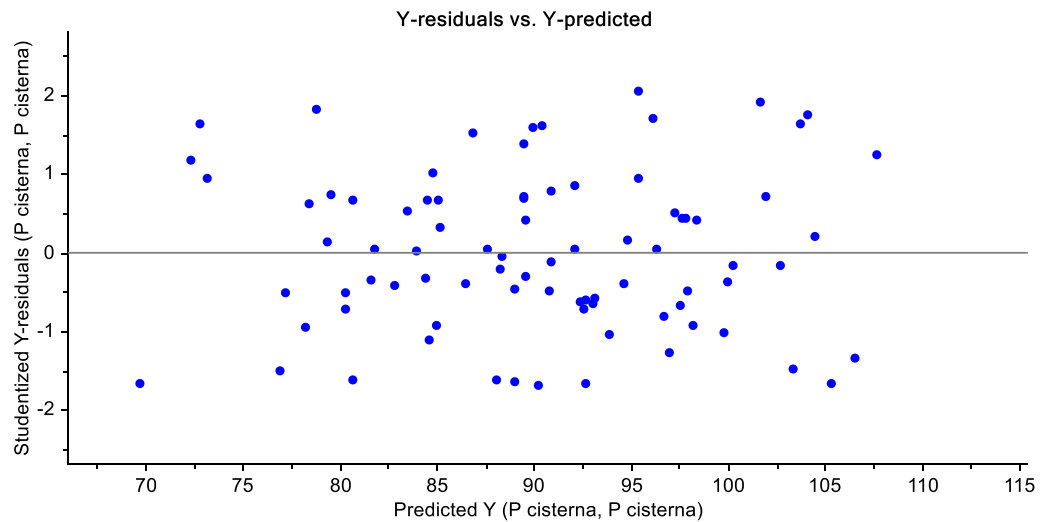


Figura 8. Residuos Modelo inicial sin atipicos Presión de Cisterna Zona 1



- **PARA MODELAR PRESIÓN CISTERNA ZONA 2**

Se aplica una regresión para la zona 2 considerando como variables predictoras las mismas de la zona 1. Se plantea un modelo de 10 regresores mediante combinaciones a prueba y error de las variables antes mencionadas. Después, se eliminan los datos que según las gráficas de residuos superen el umbral de $\pm 1,96$, ya que estos se consideran como datos atípicos; y por último, se suprimen las variables con significancia estadística inferior al 95% de confianza ($p > 0.05$).

Tabla 6. Resultados regresión para la zona 2.

VARIABLES INDEPENDIENTES	Pcisterna (zona 2)		Sin datos atípicos		Según significancia estadística	
	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes	valor p	coeficientes
Intercepto	0,0014	-2084,286	0,0878	-649,848	0	-453,326
\dot{m}	0,8073	-0,66	0	11,46	0	12,326
Temperatura	0	4,736	0	3,652	0	3,4801
Pi cisterna	0,1006	21,364	0,038	-15,144	0	-20,2165
\dot{m}^2	0,0003	-0,004	0	-0,015	0	-0,0156
$\dot{m} * Pi$	0,1376	0,019	0,0318	0,018	0	0,021
Pi^2	0,1447	-0,102	0,7619	-0,012	--	--
Pi / \dot{m}	0,0008	1337,984	0	1351,5	0	1364,213
Pi^2 / \dot{m}	0,0585	-9,707	0,7364	-1,146	--	--
\dot{m} / Pi	0,1357	238,049	0,0002	-351,407	0	-392,109
\dot{m}^2 / Pi^2	0,3978	-5,579	0	21,961	0	23,7485
R^2 ajustado (Calibración)	0,3699		0,8260		0,8684	
R^2 ajustado (Validación)	0,3485		0,8187		0,8649	

Figura 9. Valores predichos vs valores de referencia modelo inicial Presión de Cisterna Zona 2

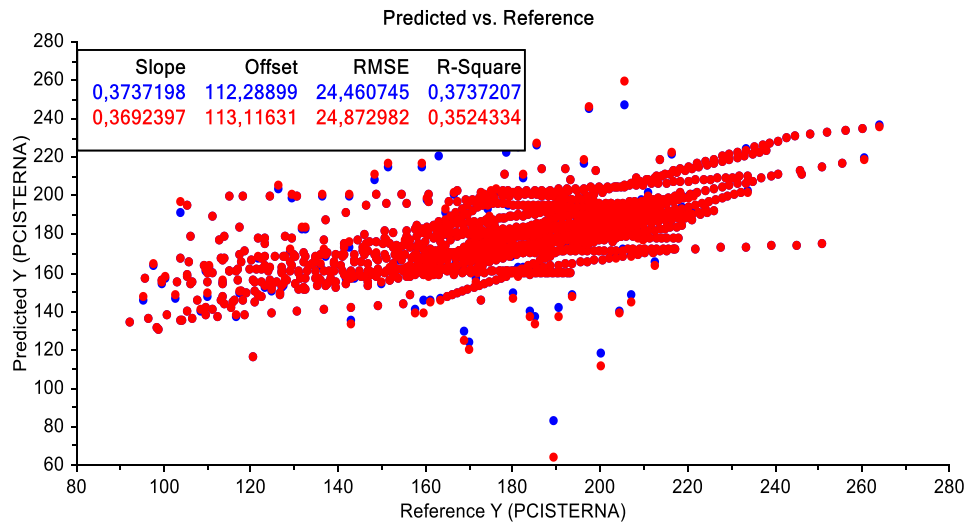


Figura 10. Residuos Modelo inicial Presión de Cisterna Zona 2

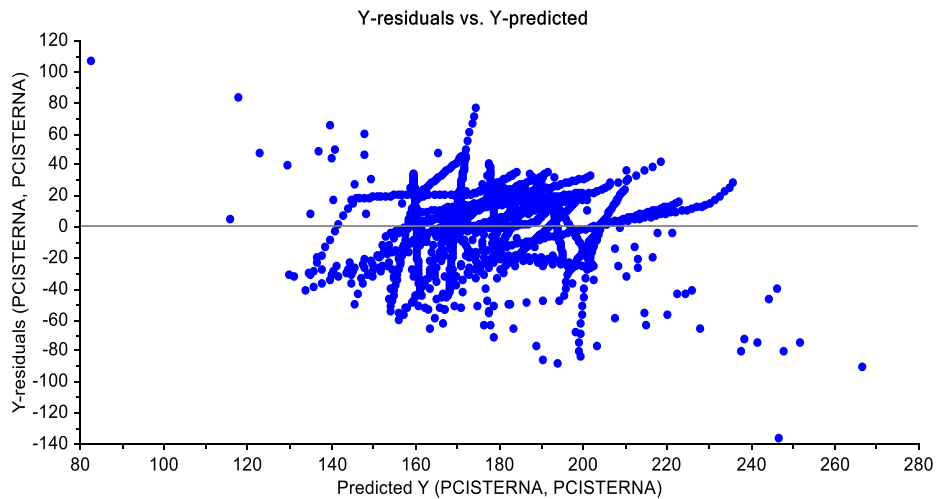


Figura 11. Valores predichos vs valores de referencia modelo inicial sin atipicos Presi3n de Cisterna Zona 2

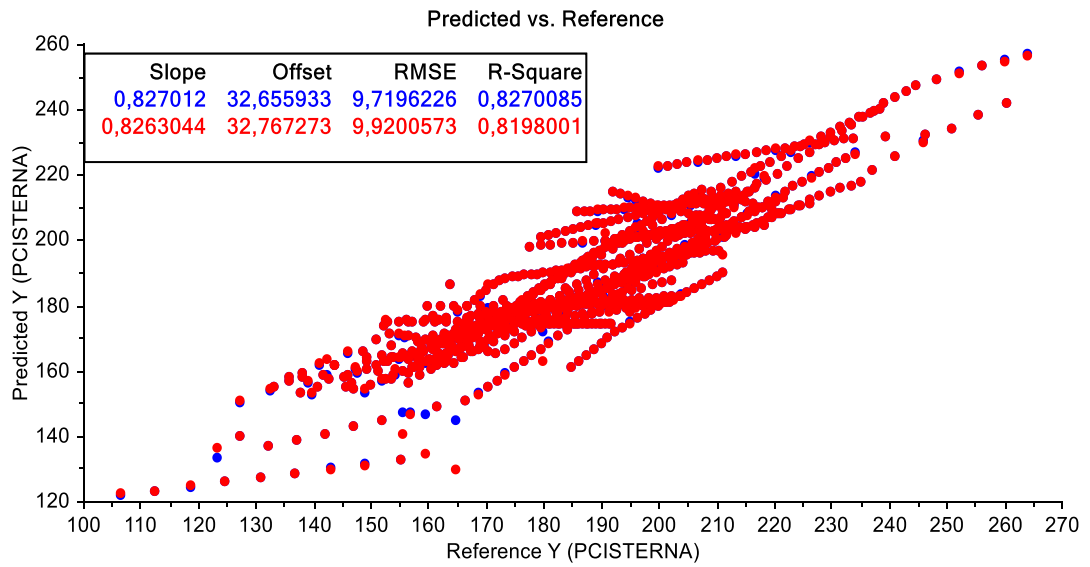
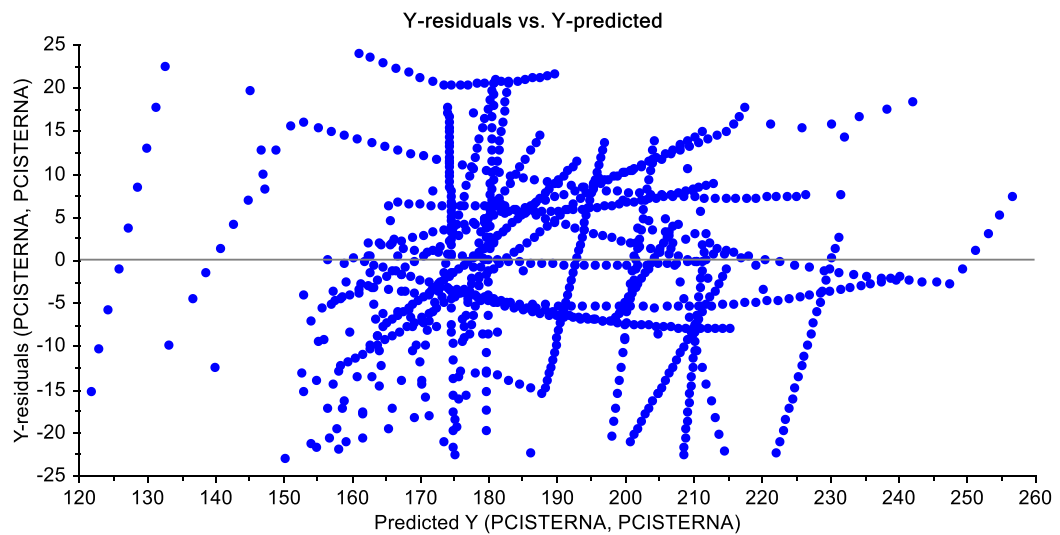


Figura 12. Residuos Modelo inicial sin atipicos Presi3n de Cisterna Zona 2



Anexo D: Ecuación del factor de compresibilidad (z) en función de P_{cist}

El factor de compresibilidad $Z(P_{cist})$ fue estimado de acuerdo a las condiciones que presenta el sistema de llenado. Para esto, se asumió un punto inicial y un punto final para la variación en la presión de la cisterna (*i.e.* 76,4 *psig* y 229,4 *psig* respectivamente), así como la temperatura promedio de los cargues estándar con un valor de 93,256 °F.

Además, se conocen las condiciones críticas del sistema:

$$T_c = 91,85 \text{ } ^\circ\text{C} \text{ y } P_c = 46,1 \text{ bar.}$$

Se obtiene la temperatura y presión reducida con la finalidad de ubicarlas en la carta de compresibilidad.

$$Tr = \frac{T}{T_c} = \frac{\frac{93,246 - 32}{1,8} + 273}{91,85 + 273} = 0,842 \quad (1)$$

$$Pr_1 = \frac{P_1}{P_c} = \frac{(76,435 \text{ psig} + 14,7)}{46,1 \times 10^5 \text{ Pa}} \times \frac{101325 \text{ Pa}}{14,7 \text{ psia}} = 0,136 \quad (2)$$

$$Pr_2 = \frac{P_2}{P_c} = \frac{(229,422 \text{ psig} + 14,7)}{46,1 \times 10^5 \text{ Pa}} \times \frac{101325 \text{ Pa}}{14,7 \text{ psia}} = 0,361 \quad (3)$$

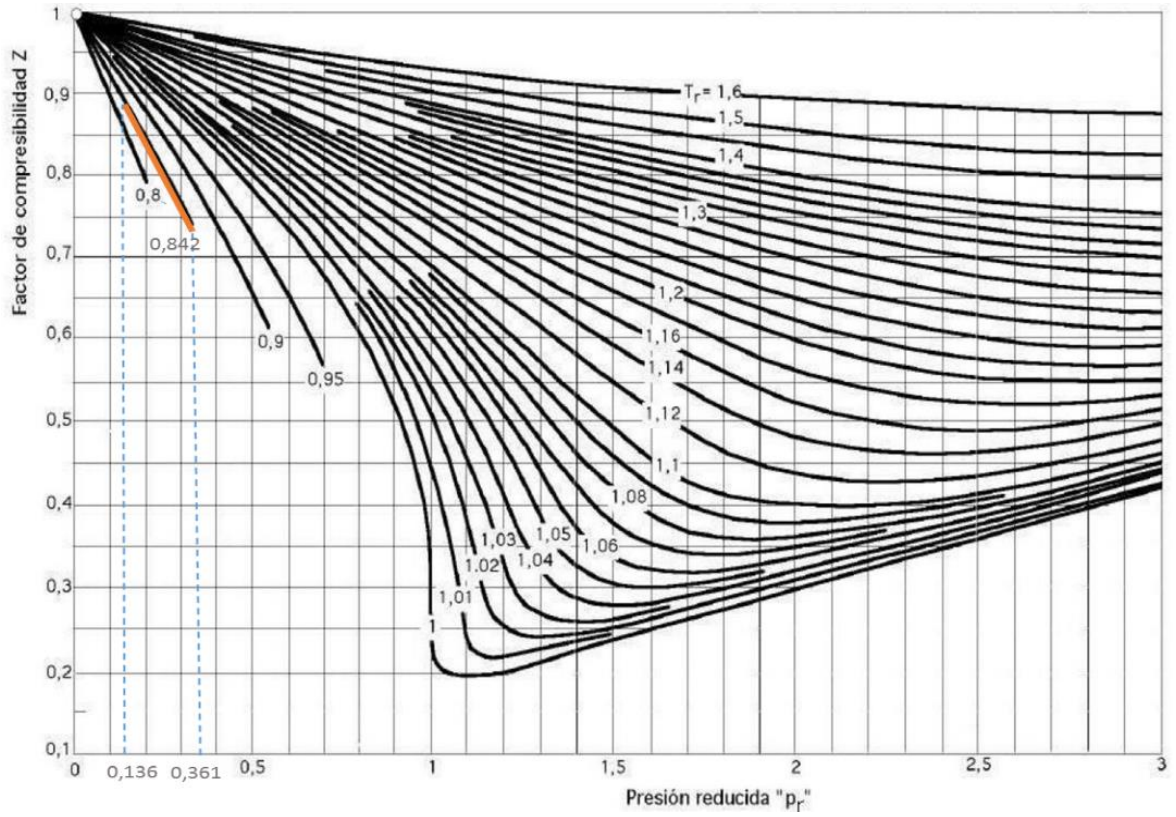
Con las presiones reducidas Pr_1 y Pr_2 se obtiene una línea recta sobre la carta del factor de compresibilidad para un valor de $Tr = 0,842$ (Figura 1). La siguiente ecuación representa la relación lineal:

$$Z(P_{cist}) = -0,6414 P_r + 1 \quad (4)$$

$$Z(P_{cist}) = -0,001073(P_{cist} + 14,7) + 1 \quad (5)$$

La P_{cist} se encuentra en unidades *psig*.

Figura 1. Carta para el factor de compresibilidad.



Anexo E: Factor Alfa

Para determinar la consistencia del factor alfa se realizó una verificación con todos los cargues estándar. Los resultados se observan en la tabla 1.

Tabla 1. Resultados optimización del Factor alfa

Cargue	P inicial	m̄ inicial	Factor α
1	73,335	156,205	0,843
2	78,035	105,276	0,796
3	75,355	117,327	0,822
4	68,412	76,119	0,818
5	71,418	129,672	0,841
6	65,525	127,279	0,843
7	83,69	105,098	0,807
8	80,894	141,474	0,825
9	70,481	83,441	0,817
10	70,149	151,389	0,846
11	81,029	140,917	0,83
12	70,286	88,443	0,818
13	83,77	131,389	0,841
14	61,836	87,094	0,835
15	64,2	88,58	0,809
16	71,581	90,04	0,81
17	75,509	85,02	0,797
18	77,64	73,529	0,786
19	84,15	86,592	0,791
20	80,419	136,035	0,817
21	81,364	113,833	0,819

Con los datos de la Tabla 1 se desarrolló una regresión lineal múltiple (Figura 1 y 2) para determinar el factor alfa considerando la presión inicial de la cisterna y el caudal inicial del cargue únicamente.

Figura 1. Valores predichos vs valores de referencia

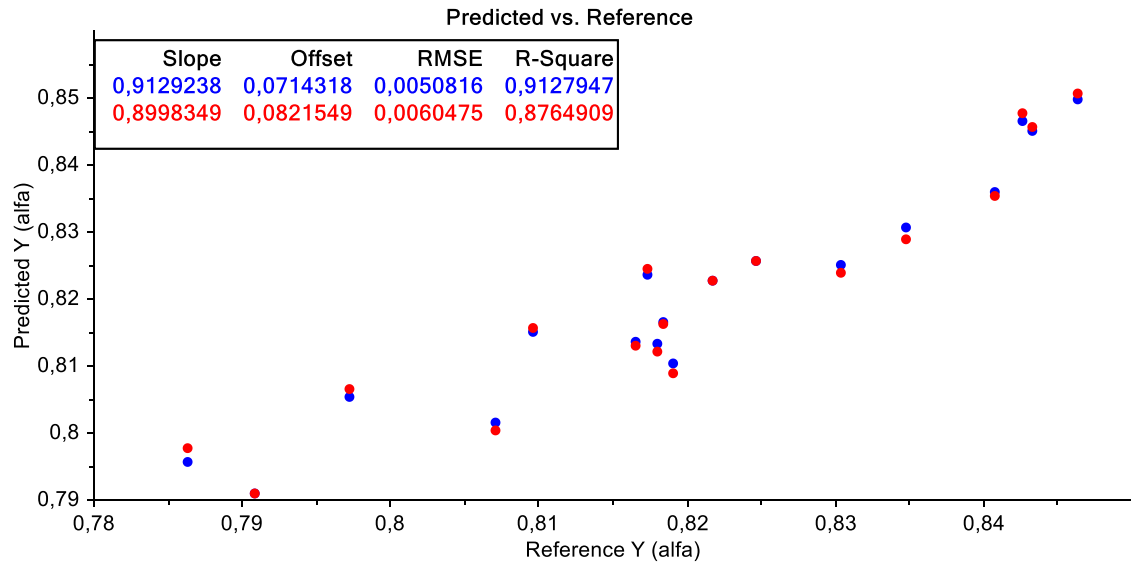
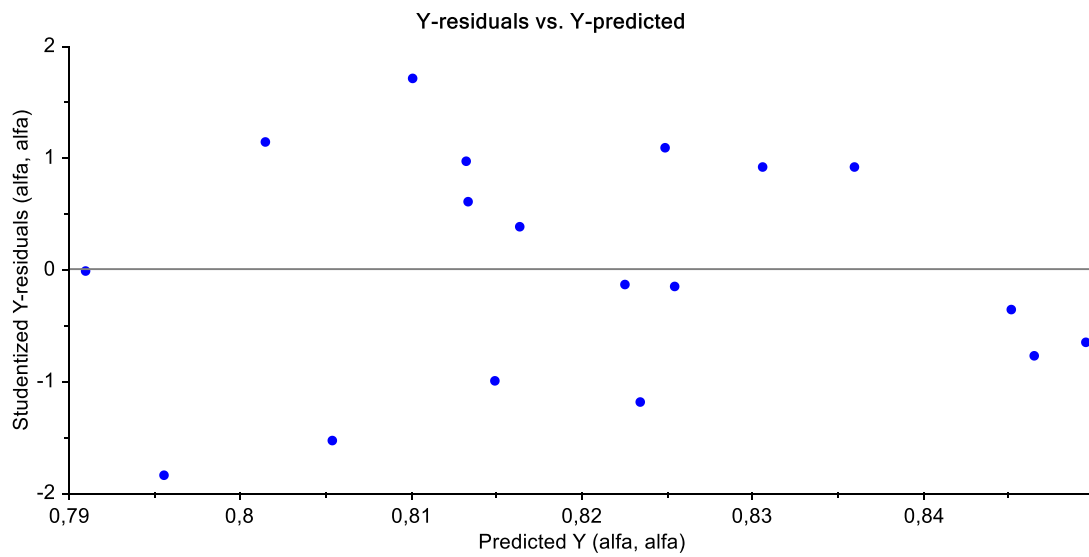


Figura 2. Gráfica de residuos



Anexo F: Error cuadrático medio

Al calcular el error cuadrático medio de las predicciones para el flujo másico y la presión de la cisterna en los diferentes cargues estándar, se comprueba que el modelo matemático tiene una mayor exactitud para la simulación de la presión de la cisterna. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos error cuadrático medio.

Cargue	Error \dot{m}	Error Pcist
1	66,657	7,735
2	30,812	3,325
3	40,211	8,83
4	20,711	4,13
5	55,943	6,01
6	54,219	7,197
7	46,244	4,699
8	53,976	9,345
9	27,126	2,872
10	64,681	5,494
11	56,703	6,378
12	32,39	5,321
13	62,136	6,883
14	33,37	4,731
15	26,272	4,131
16	30,572	4,183
17	25,203	3,71
18	19,501	3,294
19	35,328	3,232
20	48,746	4,698
21	49,695	5,594