

**ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE ENTREGA DE  
PROPILENO DE LA GRB UTILIZANDO ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ, ANÁLISIS  
MULTIVARIADO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS**

**GENARO RUIZ MONCADA**

**Ingeniero de Sistemas**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2016**

**ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE ENTREGA DE  
PROPILENO DE LA GRB UTILIZANDO ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ, ANÁLISIS  
MULTIVARIADO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS**

**GENARO RUIZ MONCADA**

**Ingeniero de Sistemas.**

**Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Química**

**Director:**

**Giovanni Morales Medina, I.Q., Dr.**

**Profesor de la escuela de Ingeniería Química, UIS**

**Co-director:**

**Dr. Dionisio Laverde**

**Profesor de la escuela de Ingeniería Química, UIS**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER**

**ESCUELA DE INGENIERIA QUÍMICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA**

**BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo agradecer a Dios por darme la fuerza, paciencia y perseverancia necesaria, para alcanzar este objetivo, por colocar en mi camino a las personas indicadas que me motivaron, influyeron y me apoyaron en esta etapa de mi vida.

A mi esposa y compañera Doris María y a mis hijos Angie Lorena y Arley Fabian, por su paciencia y permanente motivación.

A las directivas de la refinería de Barrancabermeja, por su empeño y compromiso en brindarnos esta grandiosa oportunidad de crecer como profesional y como persona.

A mi director de tesis el profesor Giovanni Morales Medina, por su disposición y constante apoyo en la orientación de este trabajo de aplicación, lo cual fue fundamental para llevarlo a feliz término.

A mi codirector Dionisio Laverde por su apoyo y orientación.

Al grupo de profesores de la Universidad Industrial de Santander, de la escuela de ingeniería química por el esfuerzo y tiempo dedicado en compartirnos su conocimiento académico y científico, al igual que las enseñanzas centradas en valores durante estos años.

Al grupo de ingenieros, operadores, mantenedores y supervisores del departamento de Materias Primas, a estudiantes de la UIS por su interés y apoyo en la consecución de estos resultados.

Al ingeniero Wilson Castellanos por su ayuda y contribución en el desarrollo de este trabajo.

## CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN .....	19
1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE.....	23
1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE PGR EN GRB.	23
1.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ .....	29
1.3 MODELO DE REGRESIÓN LINEAL.....	32
1.4 SIMULACIÓN DE PROCESOS: ASPEN HYSYS. ....	33
1.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO .....	33
1.6 OBJETIVO GENERAL .....	34
1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	35
2. METODOLOGIA .....	36
2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS.....	37
2.2 REALIZACIÓN DE SIMULACIÓN, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN.....	38
2.3 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ. ....	40
2.3.1 Verificación y valoración de incidentes. ....	40
2.3.2 Análisis del problema. ....	41
2.3.3 Análisis de causa raíz. ....	42
2.4 GENERACIÓN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	44
3. ANALISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HISTÓRICOS .....	46
3.1 DESCRIPCIÓN VENTANA OPERACIONAL Y ESTADÍSTICA UNIVARIADA	46
3.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DE DATOS SIMULADOS.....	55
3.3 ESTADÍSTICA MULTIVARIADA: AGRUPAMIENTO K-MEAN Y ANÁLISIS PCA .....	58

4. SIMULACION DE LA UNIDAD DE LLENADO .....	70
4.1 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA SIMULACIÓN .....	70
4.2 ESQUEMA DE DESPACHO DE PGR .....	72
4.3 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN.....	77
4.3.1 Caso 1. Base de simulación 10000 bpd.....	82
4.3.2 Caso 2. Base de simulación 11.000 bls/d. ....	84
4.3.3 Caso 3. Base de simulación 14.000 bls/d. ....	86
4.3.4 Caso 4. Base de simulación 7.000 bls/d. ....	88
5. DESARROLLO DEL ANALISIS DE CAUSA RAIZ.....	91
5.1 FASE I: CAPTURA DE INCIDENTES.....	91
5.1.1 Registro del incidente.....	91
5.1.2 Valoración del incidente previo. ....	92
5.2 FASE II: ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA. ....	92
5.2.1 Identificación de la problemática.....	92
5.2.2. Enunciado del problema. ....	94
5.2.3 Ubicación del problema.....	95
5.3 FASE III: ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ. ....	95
5.3.1 Paso 5. Análisis de las causas posibles.....	95
5.3.2 Paso 6. Validación de los datos. ....	97
5.3.3 Paso 7. Verificación de las causas. ....	98
5.3.3.1. Falla en válvula de recirculación. ....	100
5.3.3.4. Sistema neumático de las cisternas.....	105
5.3.3.5. Falla en el computador de flujo (Danload). ....	106
5.3.3.6. Falla en válvulas MOV del tren de llenado.....	107
5.3.4 Tablas de Verificación de la Causa.....	107
5.4 FASE IV: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.....	108
5.4.1 Paso 8. Metas y Soluciones.....	108
5.4.1.1 Soluciones sistema de recirculación. ....	110
5.4.1.2 Solución en válvulas solenoides. ....	111

5.4.1.3 Soluciones para el sistema de retorno de vapores. ....	111
5.4.1.4 Solución sistema neumático de las cisternas.....	112
5.4.1.5 Solución a falla en el computador de flujo (Danload).....	113
6. IMPACTOS Y BENEFICIOS .....	114
7. CONCLUSIONES .....	120
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
BIBLIOGRAFÍA.....	126
ANEXOS .....	130

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Eventos de seguridad de proceso ocurridos en el sistema de llenado de PGR (unidad U-3160) .....	20
Figura 2.	Sistema de almacenamiento de y entrega de PGR (U-3160). .....	23
Figura 3.	Esquema de entrega sistema de llenado de Propileno. ....	25
Figura 4.	Esquema general de la metodología utilizada. Fuente autor. ....	36
Figura 5.	Diagrama de flujo de la metodología .....	37
Figura 6.	Matriz RAM [28] .....	41
Figura 7.	Principales instrumentos de los trenes de llenado .....	46
Figura 8.	Tendencias de cargues estándar y sub-estándar. ....	49
Figura 9.	Cargues sub-estándar caracterizado por la inestabilidad del flujo, según pantalla del DCS. ....	50
Figura 10.	Variación de la presión de la cisterna en cargues estándar. ....	51
Figura 11.	Relación de los flujos manejados por los trenes de cargue. ....	55
Figura 12.	Gráfico de tendencias de la variable resultante con respecto a los factores. ....	56
Figura 13.	Superficie de respuesta de la variable presión de cisterna como una función de flujo del brazo de llenado y nivel de la cisterna. ....	58
Figura 14.	Gráfico de contorno para determinar rangos óptimos de respuesta y rangos óptimos de los factores. ....	58
Figura 15.	Distribución de la masa reportada (mr) y calculada (mc) clase 0. ....	60
Figura 16.	Varianza explicada por los 7 primeros componentes principales en las etapas de calibración y validación cruzada. ....	61
Figura 17.	Gráfico de los score de los dos primeros componentes principales; pretratamientos de normalización y derivación según Savitzky Golay. ....	62

Figura 18.	Gráfico de influencia para el PCA aplicado a los cargues analizados. Los puntos redondeados se relacionan con los respectivos en el gráfico de los scores (Figura 3.12). Posible dato atípico: cargue 74...	63
Figura 19.	Gráfico de dispersión biplot de los dos primeros componentes principales; en azul los cargues, en rojo las variables. ....	64
Figura 20.	Presión inicial descarga de la bomba vs presión de entrada al tren; los cargues utilizan la notación de 0 y 1 según la clasificación obtenida por el método k-mean. ....	64
Figura 21.	Presión final del tren de llenado vs presión de entrada al tren; los cargues utilizan la notación de 0 y 1 según la clasificación obtenida por el método k-mean. ....	65
Figura 22.	Esquema general sistema de llenado de cisternas y botes. ....	73
Figura 23.	Dimensiones de líneas y accesorios en sistema de succión de las balas, utilizados en la simulación.....	74
Figura 24.	Dimensiones de líneas y accesorios en la línea de descarga de las bombas hasta el tren de llenado, utilizados en la simulación. ....	75
Figura 25.	Sistema de retorno de vapores.....	76
Figura 26.	Esquema succión de bombas y recirculación a cabezal de recibo de propileno. ....	79
Figura 27.	Componentes configurados en la descarga de la bomba al tren de llenado. ....	80
Figura 28.	Componentes configurados en los trenes de llenado a las cisternas, incluyendo el sistema de retorno de vapores.....	81
Figura 29.	Agrupación de fallas por componentes del sistema de cargue de propileno (2014-2015).....	93
Figura 30.	Tendencias de presión en el tren de llenado de propileno.....	95
Figura 31.	Diagrama general de causa-efecto .....	96
Figura 32.	Esquema para definir la causa raíz (Fuente manual de ACR de la Ecopetrol) .....	99
Figura 33.	Presionamiento en los trenes de llenado de PGR. ....	100

Figura 34. Porcentaje de apertura válvula de recirculación VS orden del DCS. 101	101
Figura 35. Comparación apertura válvula y presión alcanzada .....	101
Figura 36. Presionamiento durante la rampa de finalización de cargue. ....	101
Figura 37. Comparaciones entre presiones con cargue manual y automático...102	102
Figura 38. Diagrama causa-efecto falla en válvulas solenoides. ....	103
Figura 39. O ring inadecuado en la válvula set stop. ....	104
Figura 40. Deficiencia de eductores por inestabilidad de flujo .....	105
Figura 41. Diagrama causa-efecto falla en el computador de flujo <i>Danload</i> . ....	106
Figura 42. Ubicación para instalar nueva toma de presión a la entrada del carrotanque.....	112
Figura 43. Masa promedio y cantidad de carrotanques entregados en el primer semestre de los años 2014, 2015 y 2016. ....	116

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Desvío de PGR por altos inventarios en el año 2014 (Departamento de planeación GRB).....	21
Tabla 2.	Etapas del método de análisis de causa raíz. [21].....	30
Tabla 3.	Análisis Anova para validez de la regresión .....	32
Tabla 4.	Esquemático resumen de la generación de datos por variabilidad de factores contra variable resultante en la simulación. Fuente: Autor....	40
Tabla 5.	Pasos y herramientas para identificación del problema. [21].....	42
Tabla 6.	Pasos y herramientas para definición del problema. [21] .....	42
Tabla 7.	Pasos y herramientas para análisis de causa posibles del problema. [21].....	43
Tabla 8.	Pasos y herramientas para análisis de causa probables del problema. [21].....	43
Tabla 9.	Pasos para la selección de las causas raíz. [21]. .....	44
Tabla 10.	Pasos para la selección de alternativas de solución. [21].....	45
Tabla 11.	Flujo en el tren uno por fuera de límites operacionales, mayor a 500 kg/min. ....	47
Tabla 12.	Descontrol en los trenes de llenado por alto flujo de operación.....	48
Tabla 13.	Presión de descarga de la bomba para febrero y mayo de 2015. ....	52
Tabla 14.	Liquidaciones de cargues de PGR, enero 2 de 2015.....	53
Tabla 15.	Análisis datos de presión del sistema de retorno de vapores del tren uno, para el mes de enero y junio del 2015 .....	54
Tabla 16.	Presión en el sistema de recirculación sin flujo a los trenes de llenado. ....	55
Tabla 17.	Análisis de Varianza para Presión Cisterna simulada - Suma de Cuadrados Tipo III. ....	56
Tabla 18.	De validación de regresión para los datos históricos de proceso .....	57
Tabla 19.	Análisis de Varianza de la regresión para datos de proceso .....	57

Tabla 20.	Cambio de las variables para un cargue sub-estándar.....	66
Tabla 21.	Cambio de las variables para un cargue estándar.....	67
Tabla 22.	Cambio en las variables de cargue sub-estándar por presión del tren. .....	68
Tabla 23.	Composición química del PGR para la ventana de operación (años 2014-2016).....	70
Tabla 24.	Condiciones de operación del cabezal principal de recibo de propileno .....	71
Tabla 25.	Cálculo Hidráulico Línea 12". Cabezal de succión.....	76
Tabla 26.	Condiciones operativas para la simulación según caso 1.....	82
Tabla 27.	Respuesta del sistema al cambio en los flujos según caso 1 .....	83
Tabla 28.	Respuesta del sistema al aumento en las presiones del tren de llenado según caso 1.....	83
Tabla 29.	Resultados al variar presión y temperatura, caso 1.....	84
Tabla 30.	Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 2. .....	84
Tabla 31.	Respuesta del sistema para cambio en la presión de los trenes según caso 2. ....	85
Tabla 32.	Respuesta del sistema para la disminución en la relación recirculación balas a flujo hacia los trenes de llenado, según caso 2. ....	85
Tabla 33.	Respuesta del sistema para un flujo de 14000 bls/d según caso 3. ...	86
Tabla 34.	Respuesta del sistema para una disminución en la temperatura según caso 3 .....	86
Tabla 35.	Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 3. .....	87
Tabla 36.	Respuesta del sistema para una variación de la presión en el sistema de retorno de vapores.....	87
Tabla 37.	Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 4. .....	88

Tabla 38.	Respuesta del sistema para un aumento en la presión de entrada a los trenes de llenado según caso 4. ....	89
Tabla 39.	Respuesta del sistema para diferentes valores en los flujos de los trenes de llenado según caso 4 .....	89
Tabla 40.	Resultados valoración incidente previo en la U-3160 de PGR. ....	92
Tabla 41.	Definición de causa raíz para las válvulas solenoides .....	108
Tabla 42.	Causa raíces y soluciones a falla de válvulas solenoides.....	109
Tabla 43.	Causa raíces y soluciones a fallas en el sistema de recirculación....	109
Tabla 44.	Causa raíces y soluciones por bajo flujo en el sistema de retorno. .	110
Tabla 45.	Desvíos de PGR a GLP por no disponibilidad del llenadero de propileno.....	115

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN CON DATOS REALES DE PROCESO (HISTÓRICOS LLENADERO PGR).....	130
ANEXO B. LÍNEA DE TIEMPO DE INCIDENTES PRESENTADOS EN EL LLENADERO DE PGR. ....	143
ANEXO C. TABLA DE CAUSAS POSIBLES QUE GENERAN PROBLEMAS EN EL SISTEMA DE PROPILENO.....	144
ANEXO D. TABLA DE CAUSAS PROBABLES QUE GENERAN PROBLEMAS EN EL SISTEMA DE PROPILENO.....	145
ANEXO E. DIAGRAMA CAUSA EFECTO PARA VÁLVULA DE RECIRCULACIÓN.....	150
ANEXO F. TABLAS DE VERIFICACIÓN DE LA CAUSA RAÍZ.....	152

## RESUMEN

**TITULO: ANÁLISIS Y DIAGNÓSTICO DE FALLAS EN EL SISTEMA DE ENTREGA DE PROPILENO DE LA GRB UTILIZANDO ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ, ANÁLISIS MULTIVARIADO Y SIMULACIÓN DE PROCESOS\***

**AUTOR: GENARO RUIZ MONCADA\*\***

**PALABRAS CLAVES: PROPILENO, CISTERNA, RECIRCULACION, SIMULACIÓN, ANALISIS.**

### DESCRIPCIÓN

En este estudio se realizó un modelado del llenadero de carrotanques de propileno de la refinería de Barrancabermeja teniendo en cuenta las especificaciones del diseño y la capacidad de los diferentes componentes que conforman el sistema de llenado, así como las restricciones y variaciones en los flujos de recirculación y cargue, al igual que la variación de presión en las cisterna,

Se realizó un análisis estadístico de los datos del proceso durante los años 2014 y 2015. Uno de los métodos estadísticos utilizados para el análisis y diagnóstico de fallas a través de los datos históricos es el de componentes principales. Con este método estadístico fue posible determinar los puntos de los históricos que muestran un comportamiento atípico (falla) respecto al conjunto total de datos de proceso e inferir las variables responsables de ese comportamiento

Se aplicó un análisis Anova de los diferentes factores que inciden sobre la variable resultante que es la presión de las cisternas, para este caso los factores o variables independientes fueron flujo de la bomba, flujo de la recirculación por alivio y control de presión, nivel de las cisternas, control de flujo a cada brazo, entre otros

Una vez realizado el modelado del sistema y el análisis estadístico de datos se aplicó la metodología de análisis de causa (ACR) el cual es un proceso estructurado que revisa en detalle la cadena de eventos y condiciones (causas y efectos) que resultan de un efecto primario (el problema). Con el ACR se lograron identificar las causas de falla de algunos componentes que estaban generando disturbios operacionales.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Escuela de Ingeniería Química; Maestría en Ingeniería Química; Director: Giovanni Morales Medina, I.Q., Dr.; Profesor de la escuela de Ingeniería Química, UIS; Co-director: Dr. Dionisio Laverde; Profesor de la escuela de Ingeniería Química, UIS

## ABSTRACT

**TITLE:** ANALYSIS AND DIAGNOSIS OF FAILURES IN THE GRB PROPYLENE DELIVERY SYSTEM USING ROOT CAUSE ANALYSIS, MULTIVARIATE ANALYSIS AND PROCESS SIMULATION\*

**AUTHOR:** GENARO RUIZ MONCADA\*\*

**KEYWORDS:** Propylene, Cistern, Recirculation, Simulation, Analysis

### DESCRIPTION:

In this study was made a modeling of the filling of propylene tankers of the Barrancabermeja refinery, taking in account the specifications of the design and capacity of the different components that compose the filling system, likewise the restrictions and variations in the recirculation flows and load flows, equally the variation of the cistern's pressure. It was made a statistical analysis of the process data during the years 2014 and 2015. One of the statistic methods used for the analysis and diagnostic of the failures across to the historic data is of the principal components. With this method was possible establish the historic points that shows an atypical behavior (fail) with respect to the total conjunct of the process data and deduce the responsible variables of this behavior. It was applied an Anova analysis of the different factors that influence on the resultant variable that is the cistern's pressure. For this case the factors or independent variables was the pump flow, the recirculation flow by relief and the pressure control, the level of the cisterns, the control of the flow at each arm, among others. Once realized the modeling of the system and the statistical analysis of the data, it was applied the methodology of the root cause analysis (RCA) which is a structured process that checks in detail the chain of events and conditions (causes and effects) that result of a primary effect( the problem). With RCA, it was possible to identify the failure causes of some components that was generating operational disturbs.

\*Master thesis

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

## INTRODUCCIÓN

El propileno o propeno ( $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3$ ) es un hidrocarburo perteneciente a la familia de los alquenos, que en condiciones normales es un gas incoloro y con un olor leve; el propileno se licúa a aproximadamente 147.5 psi a temperatura ambiente [1]. El propileno es utilizado en la producción de numerosas sustancias químicas orgánicas, entre las cuales se encuentran plásticos, resinas, caucho sintético, gasolina, textiles y componentes automotrices [2]. En lo concerniente a la industria del petróleo, el propileno se utiliza como aditivo para gasolina (20% del volumen), en la generación de polipropileno, síntesis de isopropanol, en mezclas de gases de calibración para la industria petroquímica, entre otras aplicaciones [1].

Actualmente, el requerimiento de propileno se encuentra en aumento y se estima que si esto continua, en 10 años la demanda global podría superar la producción de las refinerías; las principales unidades generadoras de propileno en la industria del petróleo corresponden a las unidades de ruptura catalítica [3]. El propileno derivado de las unidades de craqueo catalítico tipo FCC puede ser comercializado dentro del gas licuado del petróleo (GLP, pureza menor al 50%) o como grado refinería (PGR, pureza de hasta el 80%) con una diferencia marcada en su valor comercial [4]; en el segundo semestre del 2014 el precio del PGR estaba en \$83 U.S. por barril, mientras que el precio del GLP se encontraba \$50 U.S. por barril por debajo del PGR; para el mes de abril del 2015 la diferencia en precio entre los dos productos es de \$30 U.S por barril [5]; (Departamento de planeación Gerencia Barrancabermeja).

ECOPETROL cuenta con equipos de purificación de las corrientes de GLP obtenidas de las unidades FCC para generar la corriente de PGR. Los flujos resultantes de PGR son almacenados en la unidad U-3160 para ser despachados

por cisternas y embarcaciones a la empresa Propilco, la cual tiene sus instalaciones en la ciudad de Cartagena [6].

ECOPETROL produce PGR de la calidad requerida por Propilco, sin embargo, el sistema de llenado de la unidad U-3160 ha presentado una serie de eventualidades que limitan los despachos y disminuyen las entregas de PGR, incluyendo eventos de seguridad de proceso que ponen en riesgo al personal, las instalaciones y el medio ambiente.

Entre los eventos que han ocasionado el incumplimiento de las entregas de se tienen:

- Sobrepresión en el tren de llenado, ocasionando disparo del dispositivo de seguridad a la tea y fallas recurrentes en diferentes componentes del sistema (válvulas, eductores y brazos de llenado). Igualmente, la sobrepresión en las cisternas ha ocasionado el descargue a la atmósfera y la terminación de los cargues sin completar el volumen programado (Figura 1). Desde la puesta en servicio en julio del 2012, se han presentado 8 eventos de seguridad de proceso.

**Figura 1.** Eventos de seguridad de proceso ocurridos en el sistema de llenado de PGR (unidad U-3160)



- Daños en las válvulas de solenoide (20 válvulas con un costo de 5 millones de pesos por cada válvula) y accesorios por altas presiones en el sistema, también se han presentado múltiples fallas de las válvulas *set stop* y la válvula de control de presión del sistema de recirculación, todo esto impacta el cumplimiento de las entregas de PGR.
- Fallas en los computadores de control de flujo, lo cual ha permitido el cargue de cantidades mayores de lo programado, problemas de control de flujo y retrasos en las liquidaciones.
- Control inadecuado por tiempos de respuesta de la válvula de recirculación la cual controla la presión del sistema.

Las paradas de planta y el mantenimiento del sistema debido a los anteriores eventos han causado el desvío de la producción de propileno a GLP o gas combustible, con la correspondiente pérdida económica para los meses de julio, septiembre y octubre del 2014 (Tabla 1). Además, estos eventos retrasan las entregas y ocasionan el incumplimiento de los volúmenes comprometidos de PGR, con las consecuentes penalizaciones de orden pecuniario por parte del transportador.

**Tabla 1.** Desvío de PGR por altos inventarios en el año 2014 (Departamento de planeación GRB).

Mes	Julio	Septiembre	Octubre
<b>Desvió Barriles</b>	9700	12300	9200
<b>Diferencia con GLP (US\$/B)</b>	50	50	50
<b>Total (US\$)</b>	485000	615000	460000

Dadas las pérdidas de material por fallas mecánicas repetitivas en el sistema de llenado de PGR, se requiere un análisis del sistema con el objetivo de incrementar la confiabilidad del sistema, las ganancias económicas derivadas de la operación y

los indicadores de seguridad industrial. Este análisis del sistema de transporte y cargue de PGR puede ser guiado por la metodología del análisis de causa raíz (ACR). El análisis ACR puede indicar cuales son los elementos o componentes del sistema que están ocasionando los modos de falla, puede indicar si se trata de oportunidades en el diseño, en el control, en la operación o en el mantenimiento de los componentes del sistema.

Los resultados del ACR pueden ser validados por medio del análisis estadístico de los datos de proceso de la unidad [8] (sistema de llenado de PGR). Los datos históricos de proceso contienen información sobre los diferentes eventos que afectaron a las partes del sistema durante la ventana de operación analizada (año 2014 y 2015); el diagnóstico de las fallas en el proceso puede estar guiado con mayor precisión por medio del análisis estadístico de los datos reportados por la instrumentación. Uno de los métodos estadísticos utilizados para el análisis y diagnóstico de fallas a través de los datos históricos es el de componentes principales [9]. Con este método estadístico es posible determinar los puntos de los históricos que muestran un comportamiento atípico (falla) respecto al conjunto total de datos de proceso e inferir las variables responsables de ese comportamiento [10].

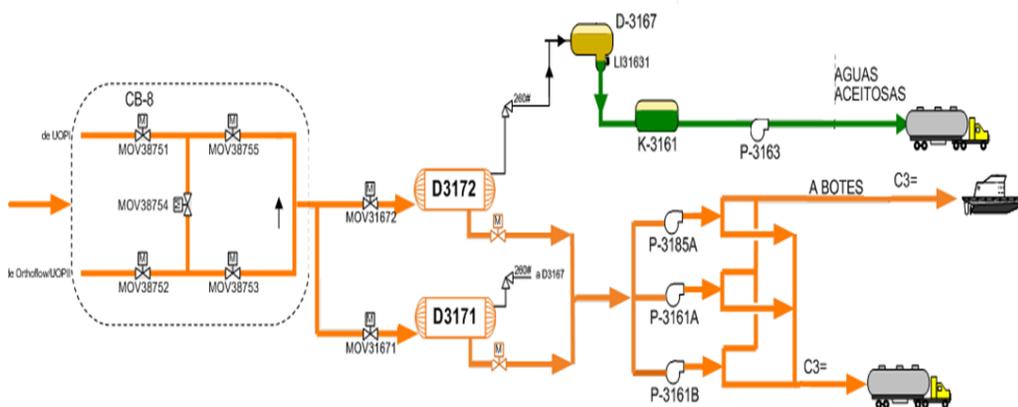
Los resultados obtenidos del análisis estadístico de datos y la simulación del sistema, se complementaron con la metodología de ACR, la cual ayudo a identificar causas de fallas que no son fácilmente identificables con el análisis de datos y la simulación, en conclusión el uso de esta tres herramientas facilitan el análisis y entendimiento del sistema de una manera integral, haciendo más fácil identificar las causas de falla de los diferentes componentes. La simulación del sistema de llenado habilito la exploración de su superficie operacional, con lo cual se identificaron las variables operacionales que estaban directamente relacionadas con el sobre presionamiento de las cisternas.

## 1. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL ARTE

### 1.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE PGR EN GRB.

El PGR que se produce en la GRB, es enviado desde las plantas de craqueo catalítico UOP I, UOP II y Orthoflow, hasta la estación de GLP NEGLP (U-3160) en donde se hace la medición del flujo (FE/FT-31650), se regula la presión (PV-31650) y se envía hacia una de las balas de almacenamiento (D-3171/3172). La capacidad de almacenamiento en la estación es de 28000 Bbls; cada una de las balas tiene una capacidad de 14000 Bbls. El PGR se almacena a una presión de 190 psi y a la temperatura de 100 °F aproximadamente. Subsecuentemente, el PGR es bombeado y medido antes de su entrega a carro tanques en el sistema de llenado de la NEGLP y/o a botes en el muelle Galán (Figura 1.1). El PGR es transportado hacia la ciudad de Cartagena para su entrega a Propilco S.A. [11]

**Figura 2.** Sistema de almacenamiento de y entrega de PGR (U-3160).



Para el almacenamiento de PGR se tiene en cuenta que: el llenado de las dos balas no se realiza de forma simultánea; solo se recibe en una bala a la vez. Lo mismo sucede con el despacho de propileno desde las balas hacia carro tanques

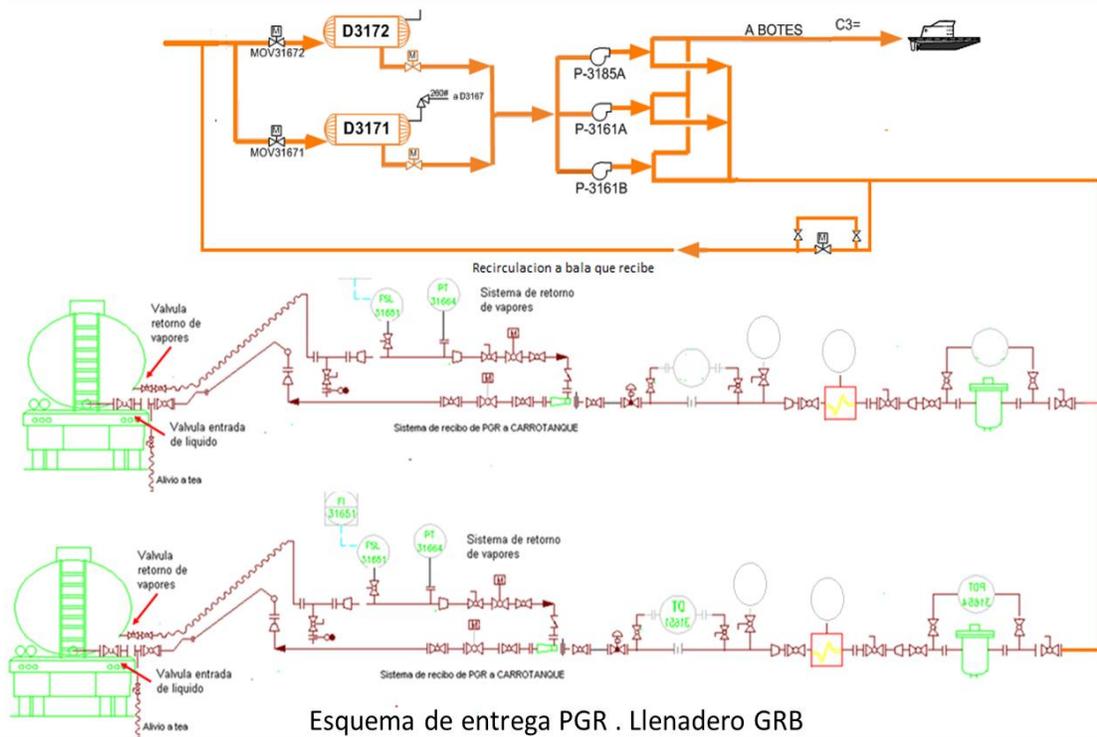
y/o botes (una sola bala). No se considera la operación recibe-entrega en las balas, es decir que las balas de PGR estarán recibiendo o entregando, pero no se contempla que se realicen ambas tareas en forma simultánea.

El control operacional de la planta de llenado se realiza a través de válvulas motorizadas, del monitoreo de nivel de inventario de tanques y de los flujos, presiones y temperaturas de las corrientes de llegada a la estación desde las unidades de proceso. El monitoreo de PGR de la NEGLP (U-3160) se efectúa con el sistema de control distribuido, “DCS I/A Foxboro” existente en la planta (sala de control de la NEGLP). Desde las balas D-3171 y D-3172 pasa el PGR a través de los analizadores AT31653A/B y de ahí a las líneas de succión con las válvulas MOV-31673 (D-3171) y MOV-31674 (D-3172). Posteriormente, se encuentran las bombas MP-3161 A/B y MP-3185A que direccionan el PGR hacia los brazos N° 1 y 2 en el sistema de llenado de carro tanques (Figura 1.2.). [11]

Las bombas MP-3161A/B despachan 680 GPM, mientras que la bomba P-3185A despacha 840 GPM a carro-tanques o botes. Si la presión de descarga de las bombas es superior a 310 PSI, las líneas de recirculación (FIC-31652 ó PICV-31653) son habilitadas para controlar la presión a la entrada de los trenes, los brazos de llenado cuentan con dos válvulas motorizadas (MOV-31677 y MOV-31678) para bloquear el flujo en caso de una situación anormal o de emergencia. Estas válvulas MOV solo habilitan el paso cuando el sistema de aterrizaje del carro tanque está conectado para iniciar su operación de llenado [11].

Adicionalmente, los brazos de llenado cuentan con un transmisor de presión PT-31667 en la línea de retorno, el cual genera una alarma y detiene el llenado para evitar el disparo de la válvula de seguridad del carro tanque en caso de sobrepresión. La información generada por la instrumentación de los brazos de llenado es recibida en el DCS a través de un módulo de comunicaciones.

**Figura 3. Esquema de entrega sistema de llenado de Propileno.**



A pesar de la instrumentación, las válvulas y los accesorios instalados y activos en el sistema de llenado (Figura 1.2), la planta U-3160 presenta diferentes eventos operativos que disminuyen su desempeño y ocasionan retrasos en las entregas pactadas con Propilco y pérdidas o degradación de PGR. Los eventos de mayor relevancia corresponden a fallas en la válvulas controladoras de flujo en el tren de cargue, falla del sistema de recirculación, falla en las válvulas solenoides, fallas en los computadores de flujo, fallas en válvulas motorizadas de los trenes, sobrepresión de los carro tanques antes de completar el volumen requerido y activación del sistema de alivio de presión hacia la tea y de los carrotanques al ambiente.

Se han realizado algunos análisis de eventos previos operativos de acuerdo al tipo de falla presentada (GRB, 2013 y 2014) que han conducido a la identificación preliminar de algunas causas, entre las cuales se tienen: Diseño inadecuado del

sistema de recirculación el cual causa sobrepresión del sistema, fallas en las válvulas de fondo de los carro tanques, por falta de mantenimiento o presencia de agua en el producto, falla de las válvulas solenoides por presencia de material particulado o inestabilidad en la presión del sistema, falla de tarjetas de actuadores eléctricos debido a la alta vibración del sistema, disparo de válvulas de seguridad de los carro tanques debido a fallas en las válvulas de retorno de vapores. Debido a lo anterior, se han implementado varias acciones que han mejorado algunas de las fallas presentadas, sin embargo, el problema principal de sobrepresión en el sistema continua y se tiene incertidumbre de si las causas identificadas corresponden a las verdaderas o si son causas secundarias derivadas de una falla raíz en el sistema.

La identificación de las causas primarias que ocasionan los eventos operativos no deseados puede conducir a la proposición de correctivos y sugerencias que al ser aplicadas llevarían a elevar el desempeño del sistema de llenado. En la literatura se reportan diferentes metodologías cualitativas que ayudan en la identificación de las causas primarias de eventos operacionales. Una de estas metodologías, ampliamente aplicada en la industria del refino del petróleo, corresponde al análisis de la causa raíz (ACR). Este método ha sido aplicado en la refinería de Barrancabermeja para la detección de diferentes causas de falla; a continuación se relacionan algunos trabajos realizados:

- Análisis de rodamientos en los reactores SR2201-51 (mayo de 2011): este estudio concluyó que las causas raíces de los problemas en los rodamientos de los reactores se debían al procedimiento inadecuado de parada del reactor, procedimiento inadecuado de arrancada del reactor, preservación inadecuada durante paradas prolongadas e inadecuada catalogación de repuestos. ACR para la alta temperatura de piel del horno H1304 (julio de 2011): el ACR llevó a concluir que la causa que más contribuyó a la ocurrencia del incidente fue el inadecuado patrón de flujo de gases de combustión en el interior del horno H1304. Por tanto,

las soluciones estuvieron orientadas a disminuir las restricciones internas en los serpentines y chimeneas de salida de los gases

El análisis de datos históricos del proceso por estadística multivariada emplea metodologías como el análisis de componentes principales (PCA) y los mínimos cuadrados parciales (PLS), por medio de los cuales es posible la supervisión de los procesos con comportamientos complejos (por ejemplo, no gaussiano, no lineal y no estacionario) y el diagnóstico y la detección de fallas; también se han usado métodos como PCA kernel, análisis de componentes independiente, PCA dinámico, entre otros [12]. El uso de la estadística multivariada para la detección de situaciones atípicas ha sido analizado en diferentes áreas de la industria, sobre todo en el diagnóstico de fallas y en el control de calidad. Los resultados del PCA pueden reportar conjuntos de situaciones atípicas relacionadas con fallas operativas o situaciones que pueden conducir a estas [13].

Respecto a la simulación de procesos fisicoquímicos, los resultados de las simulaciones permiten complementar los valores de las variables operativas no registradas y determinar las posibles fallas en el sistema por comparación con datos de proceso [14]. A continuación se presentan algunas aplicaciones relevantes de la simulación de procesos en la industria del petróleo que soportan los resultados obtenidos al aplicar ACR:

- Erdmann y colaboradores en 2011 desarrollaron una simulación para una planta de deshidratación empleando HYSYS. Erdmann por medio de un análisis de sensibilidad de las principales variables operacionales del proceso, identificaron que un aumento en la temperatura en el rehervidor ocasionaba un aumento en la concentración de glicol; [15].
- Melo & Hernández (2010) plantean una metodología para el uso de simuladores dinámicos de proceso, incluyendo múltiples lazos de control y su sintonización,

complementado con la experiencia en la operación de plantas, para validar o rechazar algunas de las hipótesis que se formulan en un análisis ACR de confiabilidad de procesos. La metodología planteada se ilustra con un estudio de caso de un sistema de separación y bombeo con múltiples lazos de control; el caso de estudio se simuló en estado estable y dinámico empleando los paquetes HYSYS y Pipe SYS para validar una hipótesis de presencia de gas a partir del registro de observaciones en la caída de presión aleatoria en un sistema de filtración de crudo [16].

- Rollo, et *al.*, 2005, desarrollaron un sistema de detección de causa raíz de alarmas; la razón fundamental para desarrollar estos sistemas de control es que en algunos procesos de producción, es necesario solucionar los problemas lo más pronto posible para evitar pérdidas económicas, o eventualmente exponerse al peligro. En muchas situaciones, el mal funcionamiento de uno o más componentes del proceso dificulta al operario el diagnóstico temprano de la causa raíz. Rollo, et *al.*, describen la solución a este problema basados en un sistema multivariable que procesa todas las alarmas entrantes e identifica la causa raíz de las alarmas que fueron disparadas secuencialmente (con la causa raíz) y presenta al operario el diagnóstico en pantalla [17].

- Widarsson & Dotzauer, 2008, desarrollaron un sistema de alerta temprana para escapes en calderas de recuperación basado en el balance másico, la información de operación normal y la simulación de los escapes utilizando una red Bayesiana. Estas redes se han usado para diagnóstico en muchas áreas, por ejemplo: medicina, electrónica y mecánica, el sistema de alerta temprana, es un sistema de diagnóstico, enfocado en ayudar al operario a detectar la falla, ubicarla, y aislarla lo más rápido posible. Es importante la detección de escapes en calderas de recuperación, para evitar daños severos en los equipos [18].

- Babji, et al., 2012, desarrollaron un método para el diagnóstico de la causa de oscilación en sistemas de circuitos cerrados, con el método propuesto lograron distinguir de una forma única de donde procede la perturbación, la naturaleza de la perturbación fue revisada con una herramienta de análisis tiempo/frecuencia. Los resultados obtenidos de la simulación y datos industriales demostraron la utilidad del método propuesto para el análisis de causa raíz [19].

- Konda, et al. 2005, hacen referencia al control de procesos integrados, soportados en la simulación y en la heurística, haciendo énfasis en el reciclo o reúso de energías por razones de seguridad, consideraciones ambientales y económicas. El marco propuesto se basa en la sinergia entre los poderes tanto de la simulación y la heurística, lo que resulta en una metodología práctica que conduce a un sistema de control variable. Adicionalmente los avances tecnológicos le han dado a la simulación la capacidad suficiente para manejar problemas complejos dentro de un tiempo razonable [20].

## 1.2 MÉTODO DE ANÁLISIS DE LA CAUSA RAÍZ

El análisis de causa raíz (ACR) es un proceso estructurado que revisa en detalle la cadena de eventos y condiciones (causas y efectos) que resultan de un efecto primario (el problema). Es un método de solución de problemas, para cualquier tipo de falla, que utiliza la lógica y un árbol de causas, que consiste en una representación visual de un evento de falla, en el cual el razonamiento por deducción y la verificación de los hechos conducen a las causas originales. El ACR se efectúa a través de cuatro fases, subdivididas en 11 pasos, las cuales se describen en la Tabla 1.1. [21].

**Fase I: Registro de Incidentes.** En esta fase se hace un registro y clasificación del incidente, esta fase hace énfasis en la recopilación de la información relacionada con el problema para establecer las posibles consecuencias del

incidente y decidir si se requiere un ACR. El propósito de este paso es recoger inmediatamente los hechos alrededor del incidente por parte de las personas directamente involucradas.

**Fase II: Análisis de Problemas.** Consiste en dividir una situación compleja en porciones manejables, dando respuestas a "¿cuál es el problema?". Consta de dos pasos:

1. Definición de problemas: esta etapa busca identificar el problema que se desea trabajar. Muchas veces el problema no está bien definido o existen muchos problemas, lo cual puede hacer difícil conocer desde donde se debe comenzar. El proceso descrito en esta etapa y las herramientas referenciadas son usados para ayudar a determinar donde se debe comenzar. El producto final de esta etapa es el planteamiento del Problema, lo cual establece el punto de partida y el nivel de expectativa.

2. Descripción del problema: este paso del análisis responde a la siguiente pregunta: "¿Qué hechos nos indican que existe un problema?". En este paso se invierte tiempo adicional en la recopilación de datos adicionales en términos de hechos verificables.

**Tabla 2.** Etapas del método de análisis de causa raíz. [21]

Fases	Descripción	Pasos
I. Registro de Incidentes o Malos Actores	La captura (registro) de un incidente o mal actor junto con la información relevante, decidir si se debe realizar un ACR y a qué nivel se debe conducir la investigación en caso de ser necesario.	1.Reporte de incidentes o Malos Actores
		2. Clasificación de incidentes o Jerarquización de Malos Actores
II. Análisis de Problemas	Dividir una situación compleja en porciones manejables. Respuestas a ¿Cuál es el problema?	3. Identificación del problema
		4. Definición del Problema
III. Análisis de Causa Raíz	La búsqueda sistemática de las causas de un problema. Respuestas a ¿Por qué?	5. Análisis de Causas posibles
		6. Validación de Datos
		7. Verificación de Causas
IV. Desarrollo de la Solución	Una Técnica sistemática para seleccionar la alternativa más balanceada (Una que elimine	8. Selección de criterios
		9. Alternativas de solución

Fases	Descripción	Pasos
	las causas sin crear nuevos / peores problemas).	10. Identificación de la decisión 11. Análisis de la Decisión

La recopilación de datos se realiza en varias fuentes: reporte de Incidentes, registros de datos, historia del equipo, reportes de operaciones, mantenimiento, ingenierías, otras locaciones, manufactura, procesos de compra. Asimismo, se utilizan varios métodos para recopilar los datos: entrevistas, reportes escritos, cuadros, computadores de proceso, observación, datos de laboratorio, pruebas, tendencias, investigaciones, reportes, etc.

**Fase III: Análisis de Causa Raíz.** El ACR se enfoca en determinar las causas del problema tal como se identifican en el enunciado del problema. En esta fase se eliminan posibles causas secundarias (infundadas) y se proporcionan detalles de cómo la causa raíz identificada explica los efectos. El propósito de esta fase es determinar la mayor cantidad de causas posibles del problema. En este paso se responde a “¿por qué ocurrió? ” y “¿qué lo ocasionó?”. El producto final de este paso es una lista de causas posibles.

**Fase IV: Desarrollo de la solución.** En esta fase se especifica lo que se debe cumplir: requerimientos mínimos de solución, evaluación y comparación de las soluciones y comprensión de los beneficios y los riesgos asociados con cada solución. El análisis adecuado en esta fase garantizará que las soluciones no sean la causa de problemas futuros. [21]

El ACR finaliza con la identificación de las principales causas que está ocasionando el problema, y la definición de las diferentes acciones requeridas agrupadas en diferentes alternativas, teniendo presente lo que debe lograr la solución, lo que debe evitar la solución y lo que debe mantener la solución.

### 1.3 MODELO DE REGRESIÓN LINEAL

Se usa para determinar una ecuación que defina el comportamiento de una variable resultante frente a uno a más factores. Cuando se aplica un análisis ANOVA sobre la regresión lineal, se emplea en gran parte para estimación de parámetros o coeficientes, significancia estadística de los mismos y validez de modelo completo después de evaluar el coeficiente de correlación del modelo. Para la obtención del modelo se utiliza el método de los mínimos cuadrados.

Modelo de primer orden

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \varepsilon$$

Modelo de segundo orden

$$y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_1 X_2 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \varepsilon$$

$$S^2 = \frac{SSE}{n - (k + 1)}$$

**Tabla 3.** Análisis Anova para validez de la regresión

Concepto	DF	SS	MS
Regresión	k	SSR	MSR=SSR/k
Error	n-(k+1)	SSE	MSE=SSE/[n-(k+1)]
Total	n-1	Total, SS	

Autor: Douglas C. Montgomery "Diseño y Análisis de Experimentos [22]"

Donde

SS = Suma de cuadrados total

SST = Suma de cuadrados tratamiento

SSE = Suma de cuadrados error

MSE = Cuadrado medio error

MST = Cuadrado medio de los tratamientos

K = Tratamientos

N = Observaciones

#### **1.4 SIMULACIÓN DE PROCESOS: ASPEN HYSYS.**

La simulación de procesos es el estudio de un sistema mediante la manipulación computacional de la representación matemática del fenómeno físico; de esta manera, se busca establecer el comportamiento de una operación de estructura conocida. [23] En este orden de ideas, se podría definir un simulador de procesos como un paquete informático que puede realizar cálculos de balances de materia y energía, sea éste un equipo u operación básica aislada, una unidad de planta o la planta completa. Así mismo, las técnicas de simulación de procesos se fundamentan en el desarrollo y obtención de uno o varios modelos matemáticos del sistema, que reproduce su comportamiento en condiciones estacionarias (simulación estacionaria) o en estado no estacionario (simulación dinámica). La simulación es una herramienta informática importante, ya que puede permitir, por ejemplo, desde el diseño de un intercambiador de calor hasta el desarrollo y optimización de una compleja unidad de proceso, [23]

Respecto a *Aspen Plus*, este software es una herramienta de simulación que permite el diseño y optimización de procesos químicos y petroquímicos en estado estacionario y dinámico. Dicho Software es constantemente utilizado en la industria de petróleo y gas, pues permite modelar más de 50 operaciones unitarias, usando una base de datos de más de 2000 compuestos y sus propiedades, como sustancias puras, electrólitos, crudos, correlaciones específicas para fracciones de petróleo, procesos de recicló, entre otros. [24].

#### **1.5 MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIVARIADO**

Los procesos industriales utilizan un número considerable de variables relacionadas con el control y monitoreo del proceso, este tipo de procesos son conocidos como multivariados, y generalmente la mayoría de las variables se encuentren correlacionadas. Debido al número de variables disponibles, el

volumen de datos puede ser demasiado para su análisis, por lo tanto, es conveniente una reducción de variables a un número tal que conserven la mayor variabilidad de los datos originales.

Los procesos de monitoreo por estadística multivariada emplean modelos para análisis de datos históricos, como lo son el análisis de componentes principales (PCA) y los mínimos cuadrados parciales (PLS). Herramientas como el PCA / PLS han permitido la supervisión de los procesos con comportamientos complejos y el diagnóstico y detección de fallas; también se han usado métodos como PCA kernel, análisis de componentes independiente, PCA dinámico, entre otros [25].

El análisis de componentes principales (PCA), es una herramienta estadística aplicable a sistemas multivariados, que permite la transformación de los datos a un espacio de menor dimensión conteniendo la información más relevante sobre del proceso. El PCA transforma el conjunto de variables originales en un conjunto reducido de k-componentes principales y combinaciones lineales, que contienen la mayoría de la varianza del conjunto original a partir de una matriz de observaciones de  $n \times m$  [26].

Este monitoreo se aplica a procesos con registro de datos que operan en estado estacionario; para el caso de análisis en el presente documento, proceso de llenado de las cisterna, las variables presentan un comportamiento cuasi estacionario durante la mayor parte de cargue, con lo cual se justifica la aplicación del PCA [27].

## **1.6 OBJETIVO GENERAL**

Identificar las relaciones causa-efecto en las fallas operacionales del sistema de entrega de PGR y proponer estrategias procedimentales, de control y/o diseño que optimicen el desempeño de la operación.

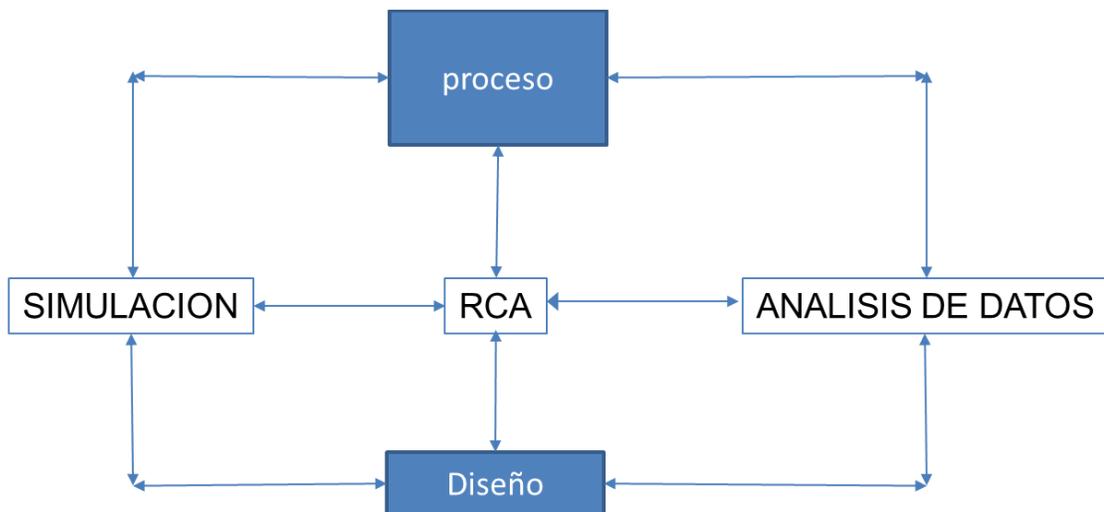
## **1.7 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Identificar las causas principales que ocasionan las diferentes fallas del tren de llenado por medio de la aplicación del análisis de la causa raíz (ACR).
- Simular la operación de los diferentes componentes del tren de llenado de cisternas y cotejar los resultados con los principales hechos derivados del ACR.
- Proponer y analizar diferentes estrategias procedimentales, de control y/o diseño para el sistema de PGR.

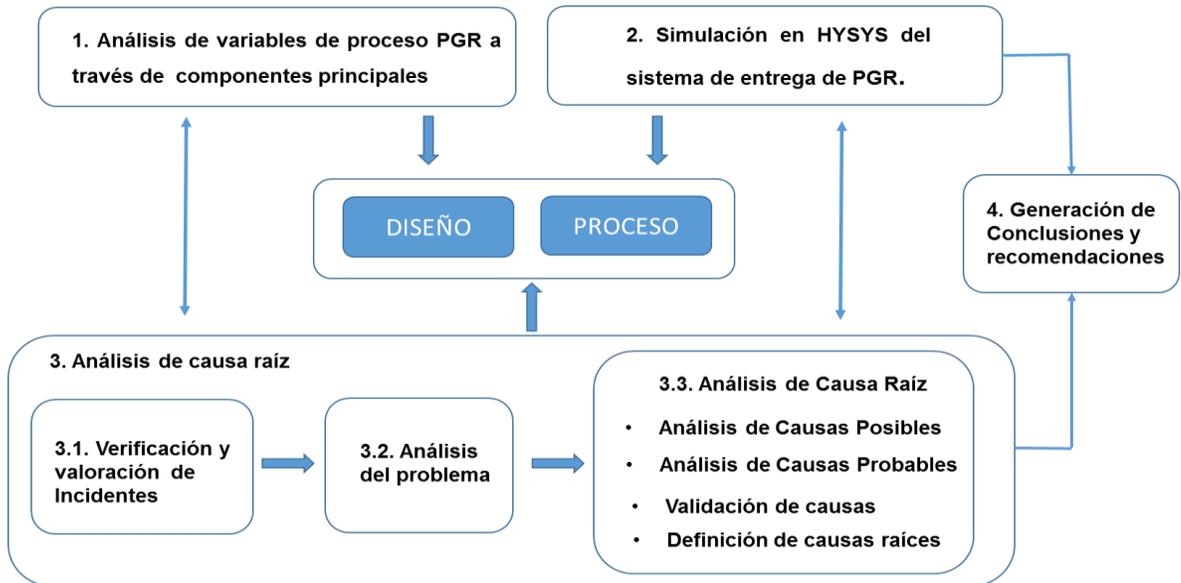
## 2. METODOLOGIA

Para el desarrollo del presente trabajo de aplicación, las herramientas de la simulación de procesos, el análisis estadístico y del análisis de causa raíz fueron aplicadas con el fin de adquirir el conocimiento necesario del proceso, de los componentes y del diseño, para identificar y soportar las causas de los defectos o fallas presentes en el sistema de entrega de propileno (Figura 2.1). La aplicación consecutiva del análisis de datos y de la simulación de procesos conduce a la verificación de las condiciones estándar del proceso y la predicción del comportamiento de las diferentes variables ante diferentes escenarios operativos. Complementariamente, los resultados del análisis estadístico y de la simulación soportan los resultados cualitativos de la aplicación del análisis de causa raíz. La metodología seguida para el desarrollo del trabajo es mostrada en la Figura 2.2.

**Figura 4.** Esquema general de la metodología utilizada. Fuente autor.



**Figura 5.** Diagrama de flujo de la metodología



## 2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE DATOS

La recolección y análisis de las diferentes variables del sistema fue efectuada en la ventana de operación comprendida entre los años 2014 y 2015. Dentro de las variables recolectadas se encuentran: temperatura de operación de las cisternas, presiones en balas, presiones de descarga en bombas, presiones en trenes de llenado y en cisternas, flujos de despacho, flujo recirculación, tiempos de llenados y volúmenes cargados.

El diagnóstico de las fallas en el proceso puede estar guiado con mayor precisión por medio del análisis estadístico de los datos reportados por la instrumentación. Uno de los métodos estadísticos utilizados para el análisis y diagnóstico de fallas a través de los datos históricos es el de componentes principales. Con este método estadístico es posible determinar los puntos de los históricos que muestran un comportamiento atípico (falla) respecto al conjunto total de datos de proceso e inferir las variables responsables de ese comportamiento; este comportamiento atípico puede reflejarse como diferentes agrupaciones en el diagrama de los

scores, por lo cual se aplica también el método de agrupación *k-mean* para guiar los resultados por componentes principales.

Se realizó análisis Anova de los diferentes factores que inciden sobre la variable resultante que es la presión de las cisternas, para este caso los factores o variables independientes fueron flujo de la bomba, flujo de la recirculación por alivio y control de presión, nivel de las cisternas, control de flujo a cada brazo, entre otros.

Con todo lo anterior se identificó la significancia estadística de cada factor con respecto a la variable resultante, además se seleccionaron las variables de mayor significancia con intervalo de confianza del 95% para crear un modelo estadístico por correlación de variables, capaz de predecir el comportamiento de la variable presión de llenado de la cisterna con un intervalo de confianza del 95%. Ver anexo 1

## **2.2 REALIZACIÓN DE SIMULACIÓN, ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD Y VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN.**

La simulación del sistema de llenado permitió la exploración de su superficie operacional, con lo cual se simularon diferentes condiciones operativas en donde el sistema presento zonas de mejores condiciones operacionales. La aplicación de estas metodologías condujo a la identificación de las principales fuentes o causas que conllevan a los eventos de incumplimiento por fallas mecánicas en el sistema PGR.

Antes de iniciar al proceso de simulado fue necesario un árbol de decisiones para la selección del modelo termodinámico, donde se revisaron los modelos que estaban relacionados con gases licuados a presiones superiores a las 30 bar y con precisión en cálculos para fluidos en tuberías y alta caídas de presión. Con

todas estas observaciones el modelo ajustado para interpretar el proceso fue PR-SRK (Peng-Robinson y Soave-Redlich-Kowng).

Para el desarrollo de la simulación fue necesario realizar una recolección de datos de especificaciones de bombas, válvulas de control, platinas de orificio, eductor, válvulas de alivio, dimensiones de tubería, accesorios, entre otros. Todo esto fue cargado al simulador de acuerdo con cada módulo seleccionado, para el caso de las tuberías se cargaron al simulador el número de accesorios, además de tener en cuenta altura y longitud de tubería. Para el caso de las bombas se utilizó método avanzado teniendo en cuenta la curva de las bombas y las rpm del motor, en cuanto a las cisternas se simularon como tanques horizontales presurizados con capacidad para alivio a 330 psig. Para el caso del eductor se construyó teniendo en cuenta los fenómenos succión y caída de presión. Para ajustar el alivio como recirculación y la recirculación por cada eductor, fue necesario ajustes por el módulo de recicló del software.

La simulación fue sometida a un análisis de sensibilidad y variabilidad para poder establecer una cantidad de datos suficiente para desarrollar un análisis estadístico sobre los mismos, poder determinar tendencias de las variables, además de emplear todo esto para realizar una comparación con los datos históricos del proceso, generando la validación de la simulación, mediante Anova de comparación de muestras y estudio de comparación de media y desviaciones estándar por la metodología t-students. En la Tabla 2.1 se muestra un resumen de los datos y los cambios de factores tenidos en cuenta para dicho estudio. Cada dato representa un promedio de tres datos por cada tres variaciones.

**Tabla 4.** Esquemático resumen de la generación de datos por variabilidad de factores contra variable resultante en la simulación. Fuente: Autor

		Flujo de llenado por tren de llenado, BPD											
		3204			3560			3916			4825		
		Nivel de cisterna, BLS											
		79,5	198,5	318	79,5	198,5	318	79,5	198,5	318	79,5	198,5	318
Flujo bomba, BPD	8000	R1	R10	R19	R28	R37	R46	R55	R64	R73	R82	R91	R100
		R2	R11	R20	R29	R38	R47	R56	R65	R74	R83	R92	R101
		R3	R12	R21	R30	R39	R48	R57	R66	R75	R84	R93	R102
	10000	R4	R13	R22	R31	R40	R49	R58	R67	R76	R85	R94	R103
		R5	R14	R23	R32	R41	R50	R59	R68	R77	R86	R95	R104
		R6	R15	R24	R33	R42	R51	R60	R69	R78	R87	R96	R105
	12000	R7	R16	R25	R34	R43	R52	R61	R70	R79	R88	R97	R106
		R8	R17	R26	R35	R44	R53	R62	R71	R80	R89	R98	R107
		R9	R18	R27	R36	R45	R54	R63	R72	R81	R90	R99	R108

R (Variable resultante): presión de cisterna

## 2.3 DESARROLLO DEL ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.

**2.3.1 Verificación y valoración de incidentes.** Con la información de diferentes eventos de falla del sistema, se procedió a verificar y valorar los incidentes según la matriz de riesgo RAM utilizada en la GRB, (Risk Assessment Matrix). La matriz de riesgo se utiliza como herramienta de decisión para evaluar y clasificar los riesgos que impliquen consecuencias para las personas, el ambiente, los clientes, los bienes y la imagen de ECOPETROL S.A.

Para determinar el nivel de las consecuencias se utiliza una escala de "0" a "5"; para evaluar la probabilidad se utiliza una escala de "A" a "E", basándose en la experiencia o evidencia histórica en que las consecuencias identificadas se han materializado dentro de la industria, la empresa o el área; representa la probabilidad de que se desencadenen las consecuencias potenciales o reales estimadas, según el caso. El cruce de las dos escalas determina la evaluación y clasificación cualitativa del riesgo, ver figura 2.3 Matriz RAM.

Figura 6. Matriz RAM [28]

 DIRECCIÓN DE RESPONSABILIDAD INTEGRAL MATRIZ DE VALORACIÓN DE RIESGOS - RAM					ECP-DRI-F-045					
					ACT: 2	1/1	31 de Marzo de 2008			
Para mayor información sobre el uso y manejo de este formato consulte instructivo ECP-DRI-I-007										
CONSECUENCIAS					PROBABILIDAD					
Personas	Economica	Ambiental	Cientes	Imagen de la Empresa		A No ha ocurrido en la Industria	B Ha ocurrido en la Industria	C Ha ocurrido en la Empresa	D Sucede varias veces al año en la Empresa	E Sucede varias veces al año en la Unidad, Superintendencia o Departamento
Una o mas fatalidades	Catastrofica > \$10M	Contaminación Irreparable	Veto como proveedor	Internacional	5	M ●	M ●	H ●	H ●	VH ●
Incapacidad permanente (parcial o total)	Grave \$1M a \$10M	Contaminación Mayor	Pérdida de participación en el mercado	Nacional	4	L ○	M ●	M ●	H ●	H ●
Incapacidad temporal (>1 día)	Severo \$100k a \$1M	Contaminación Localizada	Pérdida de clientes y/o desabastecimiento	Regional	3	N ●	L ○	M ●	M ●	H ●
Lesión menor (sin incapacidad)	Importante <\$10k a \$100k	Efecto Menor	Quejas y/o reclamos	Local	2	N ●	N ●	L ○	L ○	M ●
Lesión leve (primeros auxilios)	Marginal <\$10k	Efecto Leve	Incumplir especificaciones	Interna	1	N ●	N ●	N ●	L ○	L ○
Ninguna lesión	Ninguna	Ningún efecto	Ningún impacto	Ningún impacto	0	N ●	N ●	N ●	N ●	N ●

**2.3.2 Análisis del problema.** En esta etapa se realizan dos pasos, la identificación y definición del problema. La Tabla 2.1 y la Tabla 2.2 muestran los sub pasos realizados y las herramientas utilizadas para la identificación y definición del problema.

El análisis de los incidentes acontecidos en la ventana de operación fue realizado según los hallazgos, causas y recomendaciones de investigaciones previas realizadas sobre reportes de incidentes por fallas como: componentes del sistema, calidad del producto y fallas de las cisternas. En esta etapa también se verificó la efectividad de las acciones recomendadas en las respectivas investigaciones.

**Tabla 5. Pasos y herramientas para identificación del problema. [21]**

PASO	RESULTADO	OBSERVACIONES
3. Identificación (enunciado) del problema	Definición del problema	El producto final de esta etapa es el Planteamiento del Problema, lo cual establece el punto de partida y el nivel de expectativa.
SUB-PASO	HERRAMIENTA(s)	OBSERVACIONES
Revisar los antecedentes del incidente, elaborar una lista de problemas e inquietudes.	Diagrama de Relación (Inventario/agrupación)	Es importante definir las fronteras, evitar ser muy general o muy específico, revisar los registros actuales e históricos, estar dispuesto a analizar el problema desde varios ángulos o desde diferentes puntos de vista.
Para cada inquietud se debe definir el problema, qué fue lo que la originó?	Línea de tiempo (Secuencia de eventos)	
Agrupar los problemas dentro de áreas problema.	Modelo de Cambio	
Priorizar los problemas con base en el impacto (identificar lo más importante)	Diagrama Pareto	
Desarrollar el Planteamiento del Problema en términos de desempeño esperado vs. desempeño real.	Planteamiento del Problema	

**Tabla 6. Pasos y herramientas para definición del problema. [21]**

PASO	RESULTADO	OBSERVACIONES
4. Ubicación del problema	Listado de hechos	En este paso se invierte tiempo en la recopilación de datos. Entre más exactamente se defina el problema en términos de qué, donde "existe" y "no existe", mejor será el producto final en la fase del Análisis de Causa Raíz.
SUB-PASO	HERRAMIENTA(s)	OBSERVACIONES
Construir ó desarrollar el modelo Existe/No Existe (Diferenciación)	Modelo Existe/No existe ó Es/ No es	Es importante: Asegurarse la calidad de los datos, solo hechos.
Si el modelo tiene varias casillas vacías, usar el Análisis de Precisión (Pin Point Análisis) para determinar las necesidades de datos adicionales	Análisis de Precisión (Pin Point Análisis) Recopilación de Datos	Obtener datos de varias fuentes: Reporte de Incidentes, registros de datos, historia del equipo, operaciones, mantenimiento, ingeniería, diseño, otras locaciones, manufactura y compra.  Utilizar varios métodos para recopilar los datos: entrevistas, reportes escritos, cuadros, manuales, computadores de proceso, observar, verificar condiciones, acompañar los procedimientos operativos y de mantenimiento.
Según se requiera, revisar las herramientas y la información del paso anterior.	Línea de tiempo. Modelo de Cambio.	

**2.3.3 Análisis de causa raíz.** En esta fase se definieron y analizaron las causas posibles que podían estar generando las fallas en el sistema de PGR, posteriormente se validaron estas causa posibles, con el fin de identificar las causas probables y finalmente aplicando los pasos de ACR se identificaron la

causa raíz, las Tabla 2.3, Tabla 2.4 la Tabla 2.5, muestran los pasos, sub pasos y herramientas de apoyo que se pueden utilizar para identificar estas causas.

**Tabla 7.** Pasos y herramientas para análisis de causa posibles del problema. [21]

PASO	RESULTADO	OBSERVACIONES
5. Análisis de las Causas Posibles	Causas posibles	El propósito de este paso es determinar la mayor cantidad de causas posibles. Aquí nos hacemos las siguientes preguntas: Por qué ocurrió?, "Qué lo ocasionó?"
SUB-PASO	HERRAMIENTA(S)	OBSERVACIONES
Determinar las causas aproximadas del problema: las causas de hecho más cercanas, más elementales conocidas del problema antes de entrar en suposiciones. Preguntar: "Por qué ocurrió?"	Análisis de Árbol de Fallas Análisis de Cambio Árbol lógico de Fallas	Cuídese de los problemas que parecen tener una respuesta directa y tener éxito simple. Se puede tender a llegar a conclusiones apresuradas y acortar el proceso. Probablemente existan otras causas que se deban tratar.
Determinar / Hacer una lluvia de ideas de las Causas Posibles de cada Causa Aproximada. Preguntar: "Qué lo ocasionó?"	Diagrama de espina de pescado Humano / Sistema Revisión de la lista	Nota: Tal vez sea necesario reciclar los sub-pasos y/o las herramientas varias veces.

**Tabla 8.** Pasos y herramientas para análisis de causa probables del problema.

[21]

PASO	RESULTADO	OBSERVACIONES	
6. Validación de las Causas con datos y hechos	Causas probables	El propósito es determinar cuál de las causas posibles tienen hechos que las soporten. Este paso se enfoca en: eliminar los datos que no son verificables. Esto se hace para asegurar que el Proceso de Solución de Problemas permanezca basado en hechos.	
Pregunta SUB-PASO / Proceso	Si "SI"	Si "NO"	OBSERVACIONES
1. Revise cada causa posible y pregúntese "tengo hechos que soporten ésta causa?"	Entonces se convierte en una causa Probable	Pase a la pregunta 2.	Mantener el rigor del proceso, todo debe estar soportado en evidencias. Apoyese en las siguientes herramientas: Análisis de Precisión: Ayuda a determinar las necesidades de datos. Recolección de datos: proporciona ideas para los recursos de datos
2. Luego pregúntese "¿tengo hechos para eliminarla?"	Entonces retírela de la lista	Pase a la pregunta 3	
3. Luego pregúntese "¿se dispone de más datos para confirmar o negar esta causa?"	Entonces busque datos/hechos adicionales.	Manténgalo en la Lista de Causas	

**Tabla 9.** Pasos para la selección de las causas raíz. [21].

PASO	RESULTADO	OBSERVACIONES	
7. Selección de las causas raíz	Causas Raíces	El paso final del RCA es verificar e identificar cuáles de las Causas Probables y de las restantes Causas Posibles concuerdan con cada dimensión de la Descripción del problema, incluyendo :Identidad, Ubicación, Tiempo y Duración	
SUB-PASO proceso / Pregunta	Si "S"	Si "NO"	OBSERVACIONES
1. Tome cada causa validada y compárela con Es/No Es, pregunte "¿cumple con todas las 4 dimensiones?"	Vaya al paso 2.	Retírelo de la lista de causas	Si la causa no se ajusta a todas las 4 dimensiones, no es una causa viable. Tenga cuidado de no diluir la lista de Causas Raíz con "otros problemas que no se basan en hechos". No siempre es posible una verificación del 100%. Algunos aspectos pueden requerir de un mantenimiento o parada de planta para inspección interna de componentes del sistema.
2. Enseguida pregunte "¿sé con certeza que puede ocasionar un problema?"	Es una probable Causa Raíz	Vaya al paso 3.	
3. Luego pregunte "¿la causa que lo inició puede repetir el problema?"	Se convierte en una Causa Raíz	Vaya al paso 4	
4. Finalmente pregunte "si se reversa la causa se eliminarían los problemas?"	Se convierte en una Causa Raíz	Sigue siendo una causa probable	

Las fases para el ACR escritas en el capítulo anterior fueron aplicadas a los incidentes acontecidos y reportados durante la ventana de operación definida.

## 2.4 GENERACIÓN DE CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los resultados de las actividades anteriores orientaron las conclusiones y las recomendaciones generadas con miras al incremento en la eficiencia del sistema de llenado de PGR. El ACR finaliza la definición de las diferentes acciones requeridas agrupadas en diferentes alternativas, teniendo presente lo que debe lograr la solución, lo que debe evitar la solución y lo que debe mantener la solución. La Tabla 2.6 muestra los criterios a tener presente para seleccionar las alternativas de solución de acuerdo a la metodología de análisis de causa raíz.

**Tabla 10.** Pasos para la selección de alternativas de solución. [21]

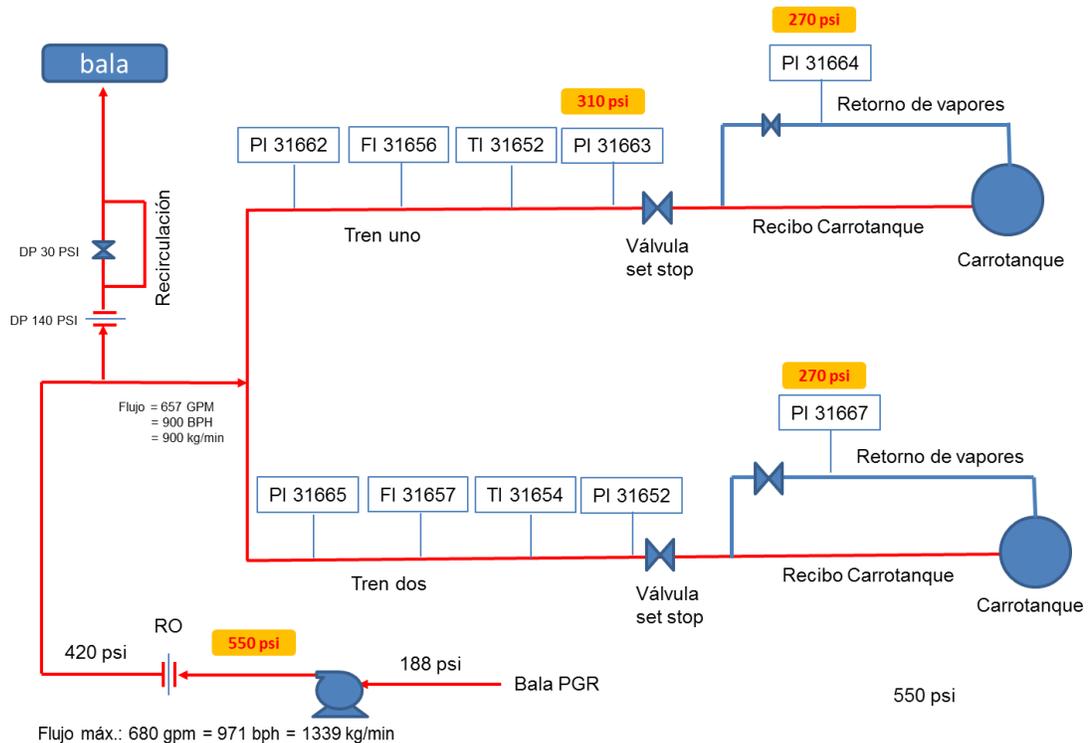
Paso	8. Selección de Criterios	9. Alternativas de Solución
Objetivo	El objetivo de la Selección de Criterios es definir los factores específicos que deben ser satisfechos por la solución. También provee una definición y un acuerdo común sobre qué queremos lograr y lo que es aceptable. definir Metas Requeridas (Deberes) y Metas Deseadas (Deseos).	Generar diferentes Alternativas de Solución para asegurar que se tome una visión más amplia. Algunas veces la solución ideal, está más allá de nuestro alcance financiero.
Proceso	1. Definir las Metas Requeridas preguntando: "Qué debe lograr la solución?", "Qué debe evitar la solución?", "Qué debe mantener la solución?"	Se debe desarrollar una serie de Alternativas de Solución al nivel de concepto. Como mínimo, desarrollar una o más alternativas para cada una de las siguientes categorías: 1. Proyecto Capital 2. Proyecto no Capital 3. Cambio de Procedimiento / Documentación 4. Capacitación: Habilidades / Conocimiento 5. Status Quo (Ningún Cambio) 6. Combinación de los anteriores
	2. Definir las Metas Deseadas preguntando: "Qué desea que la solución ideal alcanzara?", "Qué desea que solución ideal evitara?", "Qué desea que la solución ideal mantenga?"	
	3. Documentar tabla con los "Deberes" determinados en 1 y los "Deseos" determinados en 2. Para cada "Deseo" se asigna un peso relativo a la importancia en una escala de 0 - 10 (siendo 10 el más importante).	

### 3. ANALISIS ESTADÍSTICO DE DATOS HISTÓRICOS

#### 3.1 DESCRIPCIÓN VENTANA OPERACIONAL Y ESTADÍSTICA UNIVARIADA

Los datos históricos de proceso entre 2014 y el primer semestre de 2016 fueron analizados para evidenciar las variables que registran valores por fuera de los límites operacionales y la relación entre estas variables, que puedan estar generando fallas operacionales y su propagación en el sistema. Los datos históricos cuentan con las siguientes variables: presión de descarga de las bombas, flujos de entrada a los trenes de llenado, presión de entrada a los trenes, presión de retorno de vapores, presión de salida de los trenes y temperatura de los trenes. La Figura 3.1, muestra un esquema general del sistema en donde se identifican los principales instrumentos de medición.

**Figura 7.** Principales instrumentos de los trenes de llenado



Los datos de las variables se recopilaron de manera independiente con intervalos de un minuto durante las 24 horas del día, para todos los días de cada mes. Se obtuvieron 43.000 datos mensuales y 518.400 datos por años por cada una de las 15 variables seleccionada, disponiendo de un total de 7.776.000 datos por año; estos datos corresponden a la variación de los respectivos cargues con el tiempo. Posteriormente se analizaron los datos de manera individual con el fin de identificar valores atípicos según las tendencias de las variables. La Tabla 3.1 muestra los valores críticos por encima de la ventana operacional para el flujo en el tren dos para el mes de marzo del 2015. El valor promedio de flujo para la ventana operacional correspondió a 450 kg/min y los datos atípicos fueron tomados como aquellos valores superiores a 500 kg/min; este valor corresponde a  $Q_1+1.5*(Q_3-Q_1)$  donde  $Q_1$  y  $Q_3$  corresponden al primer y al tercer cuartil respectivamente.

**Tabla 11.** Flujo en el tren uno por fuera de límites operacionales, mayor a 500 kg/min.

Fecha	01/03/2015	03/03/2015	09/03/2015	15/03/2015	27/03/2015	28/03/2015
01-mar-15 01:20:00	0,0	434,5	0,0	569,3	430,1	428,9
01-mar-15 03:04:00	606,2	0,0	0,0	0,0	423,9	428,1
01-mar-15 03:05:00	627,9	0,0	0,0	0,0	424,0	426,7
01-mar-15 03:06:00	564,6	0,0	0,0	0,0	424,0	425,3
01-mar-15 03:10:00	0,0	630,4	0,0	0,0	424,2	425,1
01-mar-15 03:11:00	0,0	721,3	126,6	0,0	424,2	425,6
01-mar-15 03:13:00	0,0	492,0	361,3	180,2	424,3	426,4
01-mar-15 15:00:00	0,0	0,0	623,3	0,0	0,0	440,7
01-mar-15 15:01:00	0,0	0,0	686,3	0,0	0,0	438,1
01-mar-15 15:02:00	0,0	0,0	587,1	0,0	0,0	435,5
01-mar-15 16:41:00	443,9	0,0	0,0	0,0	0,0	646,6
01-mar-15 16:42:00	445,3	0,0	0,0	0,0	0,0	576,4
01-mar-15 19:22:00	0,0	0,0	0,0	0,0	677,9	444,3
01-mar-15 19:23:00	0,0	0,0	0,0	0,0	743,7	444,0

La Tabla 3.2 muestra valores atípicos para otras variables en el sistema de llenado. Para este caso los flujos manejados por ambos trenes (columna 3 y 4) están por fuera de su límite operacional, mayor a 500 kg/min. Los datos muestran que la presión a la entrada de los trenes se encontraba dentro del rango operativo,

menor a 350 psi, sin embargo al caer el flujo por el tren dos, por debajo de los 200 kg/min (columna 4), la presión a la entrada de los trenes se incrementa por encima de los 400 psi (límite superior).

**Tabla 12.** Descontrol en los trenes de llenado por alto flujo de operación.

	1	2	3	4	5	6	7
Fecha: 31/03/2015	P. Tren 1	P. Tren 2	F. Tren 1	F. Tren 2	Vol Tren 1	Vol Tren 2	P. Bomba
07:25:00 p.m.	286,23	281,15	336,89	554,73	1364,07	832,56	511,38
07:26:00 p.m.	252,86	249,67	390,50	603,98	1736,70	981,85	504,85
07:27:00 p.m.	230,34	229,37	428,98	603,09	2109,32	1558,12	506,66
07:28:00 p.m.	231,42	230,84	433,44	602,19	2481,94	2134,39	508,48
07:29:30 p.m.	240,78	240,20	436,80	600,85	3040,88	2998,80	511,20
07:30:00 p.m.	243,90	243,31	446,64	600,41	3227,19	3286,93	512,11
07:31:00 p.m.	250,15	249,55	466,31	599,51	3599,81	3863,20	513,92
07:32:00 p.m.	270,72	269,75	587,33	407,82	3972,43	4439,48	516,70
07:33:00 p.m.	294,87	293,45	733,70	163,35	4345,05	4923,26	561,84
07:34:00 p.m.	346,29	343,42	651,94	109,84	4717,68	4944,61	530,32
07:35:00 p.m.	404,52	399,97	510,19	109,14	5090,30	4965,95	518,51
07:35:10 p.m.	414,23	409,39	486,56	109,02	5152,40	4969,51	538,37
07:35:20 p.m.	404,01	399,40	451,73	102,68	5214,51	4973,07	538,68

Según lo anterior, la matriz de datos incluye datos atípicos correspondientes a cargues en condiciones sub-estándar que evidenciaban fallas operacionales durante el llenado de las cisternas; los cargues sub-estándar se caracterizan por presentar volúmenes de llenado de las cisternas por debajo de lo programado, por presentar presiones en las cisternas por encima de 270 psi (límite superior a partir del cual se libera PGR a la atmósfera), por presentar tiempos de llenado mayores a 60 minutos y por presentar presiones a la entrada de los trenes superiores a 400 psi.

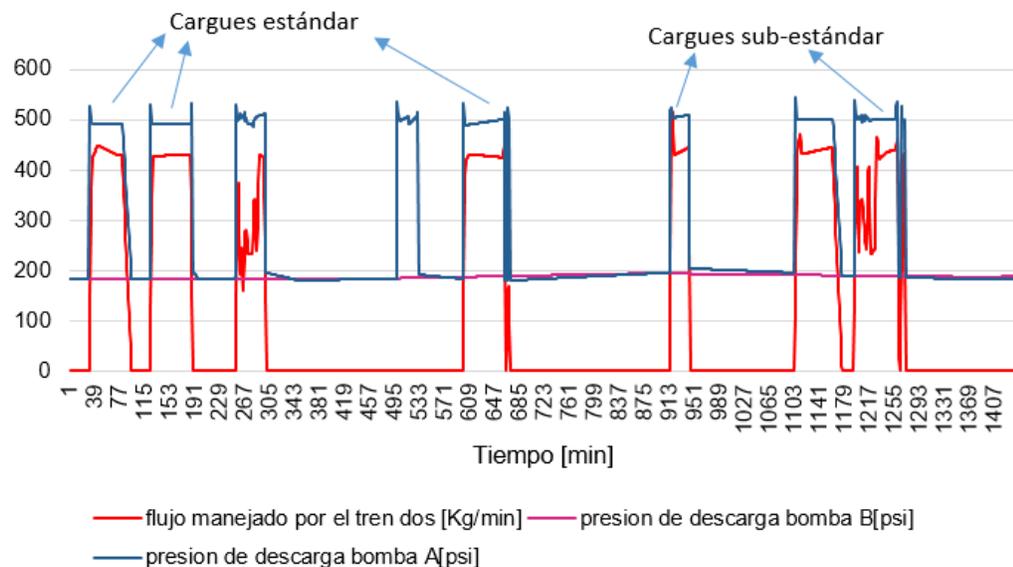
En promedio, los cargues con características estándar (sin evidencia de fallo operativo aparente) presentan una duración de hasta 60 min y una tendencia de flujo másico diferenciada por tres zonas (Figura 3.2), según:

- Zona1 o parte inicial, la cual presenta una pendiente positiva con un pico con valores de hasta 580 kg/min, resultado de la acción de la válvula de control en la

entrada de los trenes de llenado. La duración de esta zona se encuentra entre 10 y 20 min con promedio en 15 min.

- Zona 2 o de estado pseudo-estacionario, el cual está caracterizado por una meseta de caudal entre 420 y 460 kg/min mantenido por más de 40 min.
- Zona 3 o parte final, en donde el caudal disminuye abruptamente (en un tiempo promedio de 10 min) evidenciando el accionar de la válvula de control de presión del brazo de retorno o recirculación, cuando se alcanza un valor superior a 270 psi; o una masa por encima de los 26000 kg.

**Figura 8.** Tendencias de cargues estándar y sub-estándar.



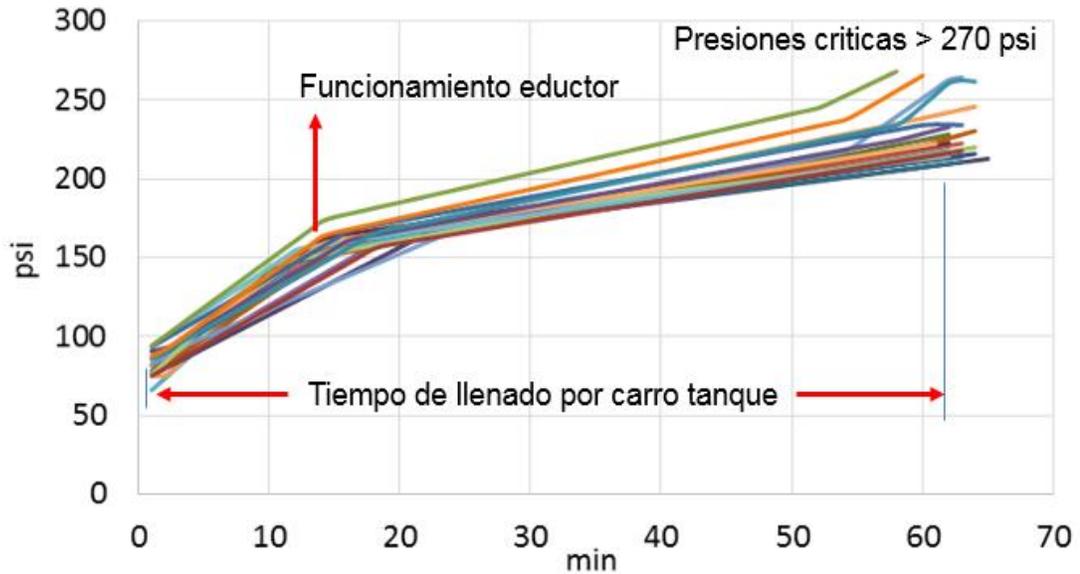
Aquellos cargues con mucho ruido, inestables, con interrupciones y de duración corta o prolongada son definidos como cargues sub-estándar; los datos muestran algunos cargues sub-estándar, con un promedio de flujo de 200 kg/min y una duración de hasta 3 horas. Las Figuras 3.2 y 3.3 ejemplifican cargues estándar y cargues sub-estándar en la operación de llenado de las cisternas.

**Figura 9.** Cargues sub-estándar caracterizado por la inestabilidad del flujo, según pantalla del DCS.



Un cargue estándar exhibe un incremento monótonico en la presión de la cisterna (presión en la línea de retorno de vapores) que inicia en la presión de llegada del automotor; la presión promedio de ingreso de las cisternas es de 80 psi. La presión de la cisterna durante un cargue exitoso puede aumentar hasta una presión de 270 psi; en el tablero de control se evidencia una caída abrupta de la presión después de la desconexión de la cisterna tan pronto termina el cargue (Figura 3.4). Del análisis de la pendiente de la presión de retorno se encontró que existen 3 zonas, siendo la primera zona la de pendiente más pronunciada que puede durar hasta 20 minutos. Las otras dos zonas muestran incrementos en la presión con menor pendiente evidenciando la acción del eductor sobre el aumento en la carga hidrostática en la cisterna a medida que prosigue el cargue; el flujo ocasionado por el eductor permite disminuir el incremento de la presión mientras se asegura el ingreso de PGR a la cisterna sin el accionar de las válvulas de seguridad.

**Figura 10.** Variación de la presión de la cisterna en cargues estándar.



De otro lado, la presión de llegada de las cisternas puede influir en el número de cargues estándar. Según el comportamiento de las variables existe un sesgo de fallo cuando la cisterna llega con presiones superiores a los 80 psi. En la matriz de datos analizados, el porcentaje de cargues sub-estándar con presiones iniciales de llenado superiores a 80 psi corresponde aproximadamente al 40%, mientras que el porcentaje de cargues estándar con presiones iniciales de llenado superiores a 80 psi corresponde a la mitad del porcentaje anterior.

Según los resultados del análisis estadístico univariado, la presión de descarga de la bomba evidencian falla en el sistema cuando su valor se encuentra por encima de 550 psi, lo cual genera sobrepresión en el tren de llenado con el consecutivo accionamiento de la válvula de seguridad y pérdida de PGR hacia la tea. La Tabla 3.3 presenta las frecuencias de cargues con presiones de descarga de la bomba en diferentes intervalos para los meses de febrero y mayo de 2015; es posible evidenciar que se presentaron una mayor cantidad de cargues sub-estándar en el mes de mayo (84 cargues). Estos cargues sub-estándar debido a presiones con

valores por encima de los límites operativos definidos, sucedieron por fallas en las válvulas MOV y válvulas solenoides. De esta forma el análisis estadístico univariado está soportando una posible causa raíz en el sistema de llenado relacionada con las válvulas MOV y las válvulas solenoides; el capítulo 5 presentará el análisis de causa raíz para el sistema.

Esta evidencia de falla en las válvulas referidas es crítica para el sistema. La información relacionada en la tabla 3.3, permite identificar los días del mes en los cuales el equipo no opero, por ejemplo para los días del 1 al 5 y del 26 al 29 de enero del 2015 el sistema de bombeo estuvo fuera de servicio. Durante el mes de mayo el sistema presento 84 eventos por fuera del límite operativo, al operar la bomba por encima de 550 psi. En la información relacionada en la fila de total día, para el día 16 de mayo, el equipo opero 464 minutos, equivalente a 7,7 horas, con podemos determinar de acuerdo a los tiempos de llenado de las cisternas, que el sistema realizo 8 cargues, para un tola de 16 cisternas en el día. Los colores en la tabla se utilizan para resaltar algunas condiciones especiales de la variable.

**Tabla 13.** Presión de descarga de la bomba para febrero y mayo de 2015.

Datos de presion de descarga de bomba de cargue de propileno MP 3160 A, durante el mes de Enero del 2015																															
Rango / dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Entre 350/450	0	0	0	0	0	0	6	0	0	5	1	0	0	6	4	0	0	0	0	0	0	0	5	4	0	0	0	0	0	4	0
Entre 450/500	0	0	0	0	0	1	11	58	0	20	86	36	0	50	128	46	0	31	52	0	0	0	158	53	72	0	0	0	0	49	0
Entre 500/520	0	0	0	0	0	116	96	6	0	91	29	82	57	115	41	11	0	27	5	0	0	0	21	125	39	0	0	0	0	80	0
Entre 520/550	0	0	0	0	0	8	13	2	0	9	1	5	5	13	26	6	0	5	5	0	0	0	28	37	9	0	0	0	0	10	0
Entre 550/700	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Total dia	0	0	0	0	0	127	126	66	0	125	117	123	62	184	200	63	0	63	62	0	0	0	207	220	124	0	0	0	0	143	1
Datos de presion de descarga de bomba de cargue de propileno MP 3160 A, durante el mes de Mayo del 2015																															
Rango / dia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Entre 350/450	0	0	0	4	0	4	0	0	5	0	4	5	0	5	4	6	5	15	4	5	5	5	26	5	5	13	5	8	1	6	16
Entre 450/500	85	139	95	13	114	121	0	0	2	0	31	3	6	2	25	145	2	150	10	67	88	109	170	12	83	80	63	96	45	45	19
Entre 500/520	91	33	23	104	1	56	0	107	163	0	306	185	231	160	197	277	164	118	68	156	84	106	240	188	77	81	154	117	117	185	158
Entre 520/550	6	11	2	4	7	4	0	9	3	0	21	33	4	4	11	19	12	10	3	14	5	5	38	31	7	4	14	42	12	23	43
Entre 550/700	2	1	1	1	0	2	0	10	4	0	3	3	3	2	2	1	0	0	0	1	2	5	8	7	2	2	4	3	6	4	6
Total dia	185	186	124	130	127	193	7	134	186	10	376	241	257	187	254	464	200	311	104	263	205	252	505	267	199	206	267	294	210	293	273

De otro lado, el valor promedio para la masa de los cargues corresponde a 26231 kg en un total de 4531 cargues del año 2014, a 26019 kg en un total 3919 cargues del año 2015 y a 26202 kg en un total de 2840 cargues del primer semestre del 2016. La Tabla 3.4 ilustra las características de despacho de cargues para el mes de enero de 2015, en la cual se evidencia que varios cargues estuvieron por debajo de la masa requerida. Del total de cargues realizados en el 2015, el 78% de estos cumplieron con la masa programada, mientras que el restante se despacharon por debajo del volumen requerido. Los despachos con cantidades inferiores, en su mayoría, fueron provocados por fallas en el sistema y por terminación prematura de los cargues (sobrepresión en la cisterna). La sobrepresión en la cisterna afecta la operación normal del cargue; cuando el valor de presión en la cisterna sobrepasa 270 psi el cargue es suspendido por liberación de PGR de la cisterna. Durante los meses de enero y junio de 2015 se presentaron en total 16 días (12 días en enero y 4 días en junio) en donde los cargues fueron suspendidos por sobrepresión en la cisterna (Tabla 3.5).

**Tabla 14.** Liquidaciones de cargues de PGR, enero 2 de 2015.

FECHA	PLACAS	ALMACENAMIENTO	CANT.(T)	DENSIDAD (Kg/l)	CANT. (Bbl 82°)
29/01/2015	SOP066	D3172	17,676	0,5177	221,73
29/01/2015	SOP256	D3172	18,878	0,5177	236,81
13/01/2015	SOP256	D3171	19,191	0,5177	240,91
25/01/2015	SOP256	D3171	20,307	0,5179	254,74
27/01/2015	SOP065	D3171	21,938	0,518	275,2
09/01/2015	SOP065	D3171	22,537	0,5177	282,81
11/01/2015	SOQ004	D3172	22,666	0,518	284,22
12/01/2015	SOQ114	D3171	23,356	0,5177	293,2
06/01/2015	SOP056	D3172	26,484	0,518	331,74
26/01/2015	SOP787	D3172	26,484	0,5177	332,1
30/01/2015	SXU966	D3171	26,484	0,518	332,34

**Tabla 15.** Análisis datos de presión del sistema de retorno de vapores del tren uno, para el mes de enero y junio del 2015

Datos de presión del sistema de retorno de vapores del tren uno, en de enero del 2015.																															
Rango / día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Entre 200/250	0	269	306	180	203	139	253	300	285	236	263	184	143	243	257	244	207	162	177	259	206	168	252	177	214	214	268	221	326	260	203
Entre 251/260	0	20	8	4	17	7	10	12	23	31	13	31	7	17	46	37	0	2	26	0	2	2	42	0	18	0	13	4	18	11	63
Entre 261/269	0	24	14	3	18	8	3	0	14	14	13	17	12	12	34	13	0	0	14	0	0	0	27	0	7	0	15	3	9	13	22
Entre 270/330	0	0	1	4	0	1	0	0	0	1	4	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0	0	2
Datos de presión del sistema de retorno de vapores del tren uno, en junio del 2015.																															
Rango / día	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
Entre 200/250	191	374	309	133	213	324	172	221	138	236	270	341	196	250	191	242	384	386	281	265	322	357	214	147	147	333	387	136	0	0	0
Entre 251/260	0	0	11	0	0	0	4	0	0	12	0	16	14	0	5	3	0	0	12	0	6	24	8	5	0	12	15	0	0	0	0
Entre 261/269	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	11	10	0	10	9	0	0	0	0	8	0	10	5	0	0	11	0	0	0	0
Entre 270/330	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0

La presión de la cisterna es afectada por bajos flujos en los trenes de cargue debido a problemas en las válvulas set stop, válvula solenoide, válvula de recirculación y fallas en internos de algunas válvulas MOV. Con lo cual, esta variable corresponde a una manifestación de una posible causa raíz referente a fallas en las válvulas anteriores; esto suministra un soporte al análisis de causa raíz que se presenta en el capítulo 5.

Complementariamente, la Figura 3.5 Relaciona los flujos manejados por cada tren (FI 31656 y FI 31657), con la presión a la entrada de los mismos trenes (PI 31663). La tendencia de las variables muestra una estabilidad inicial en el sistema; los flujos por ambos trenes se encontraban dentro del rango operacional (286.88 psi), con una apertura de válvula del 12.39 % (PCV 31663). Después de 2 minutos, el sistema presentó inestabilidad; el flujo por el tren dos disminuyó a 209.18 kg/min, generando sobrepresión en el sistema (343.69 psi) con una apertura en la válvula de 46.24%. Esta condición causó la suspensión del cargue; la Tabla 3.6 muestra una de las condiciones críticas que se generan en el sistema de llenado de propileno cuando la válvula llega a 100% de apertura. Con esto, la

presión de entrada de los trenes es indicativo de falla en la válvula de entrada a los mismos; la variación en la presión de entrada a los trenes soporta el análisis de causa raíz del capítulo 5, ya que resulta como consecuencia de una fallo en la respectiva válvula.

**Figura 11.** Relación de los flujos manejados por los trenes de cargue.



**Tabla 16.** Presión en el sistema de recirculación sin flujo a los trenes de llenado.

Fecha y hora	Presión tren uno	Presión tren dos	Flujo tren uno	Flujo tren dos	Presión descarga bomba
11-ene-15 00:00:00	448,85	448,88	0,00	0,00	535,11
11-ene-15 00:00:01	448,85	448,88	0,00	0,00	535,11
11-ene-15 00:58:35	428,23	428,28	0,00	0,00	421,70
11-ene-15 00:58:37	427,67	427,72	0,00	0,00	364,90
11-ene-15 00:58:44	425,70	425,75	0,00	0,00	228,71
11-ene-15 00:58:45	425,42	425,47	0,00	0,00	210,74

### 3.2 ANÁLISIS DE VARIANZA DE DATOS SIMULADOS

Los factores presión de descarga de la bomba, flujo de recirculación, nivel de cisterna, flujo del tren de llenado fueron considerados para aplicar un análisis ANOVA en la ventana de operación respectiva. Partiendo de la hipótesis nula que los factores no tienen relación con respecto a la variable resultante, la tabla

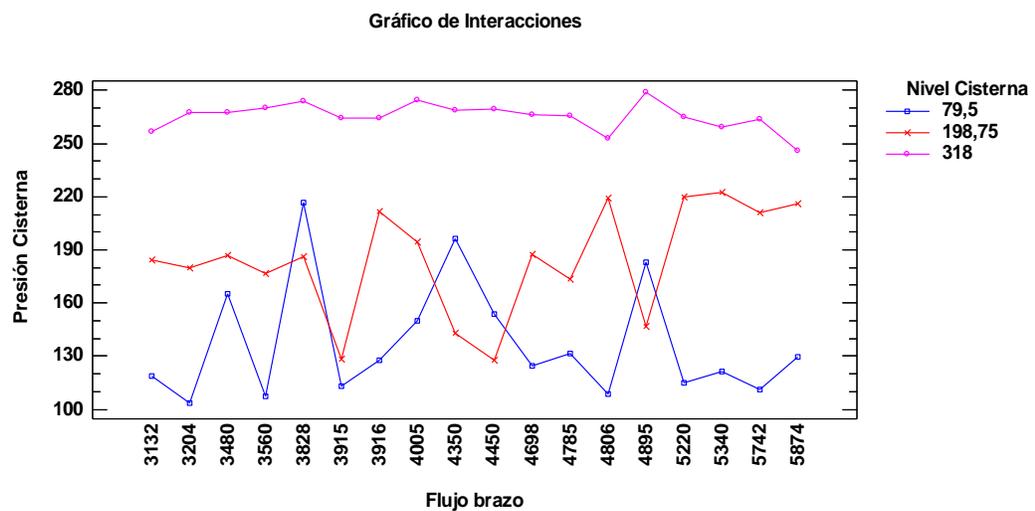
ANOVA reportó que las variables de mayor significancia estadística para definir el comportamiento de la presión de la cisterna durante el llenado corresponden a flujo del tren de llenado, nivel de la cisterna y presión de la bomba, puesto que el valor de probabilidad de dichas factores estuvo por debajo de 0.05. En la Tabla 3.7 se muestra la tabla ANOVA realizado para dos factores y la variable resultante. En la Figura 3.6 se muestra la tendencia de la variable resultante con respecto a los factores.

**Tabla 17.** Análisis de Varianza para Presión Cisterna simulada - Suma de Cuadrados Tipo III.

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Flujo brazo	23155,0	17	1362,06	10,94	0,0000
B:Nivel Cisterna	450396,	2	225198,	1809,49	0,0000
INTERACCIONES					
AB	84580,7	34	2487,67	19,99	0,0000
RESIDUOS	13441,0	108	124,454		
TOTAL (CORREGIDO)	571573,	161			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

**Figura 12.** Gráfico de tendencias de la variable resultante con respecto a los factores.



Fuente: Autor

Aplicando una regresión lineal se obtiene que el coeficiente de determinación indica que la regresión explica un 98,18% la varianza de la presión de la cisterna durante el llenado de la cisterna (Tabla 3.8).

**Tabla 18.** De validación de regresión para los datos históricos de proceso

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Flujo de brazo	0,0250374	0,001670757	25,7916	0,0000
Nivel de Cisterna	0,495107	0,0129309	35,9688	0,0000
Presión de bomba	0,0422249	0,00853228	4,94885	0,0000

**Tabla 19.** Análisis de Varianza de la regresión para datos de proceso

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,38484E7	3	4,61615E6	7046,76	0,0000
Residuo	256134,	391	655,074		
Total	1,41046E7	394			

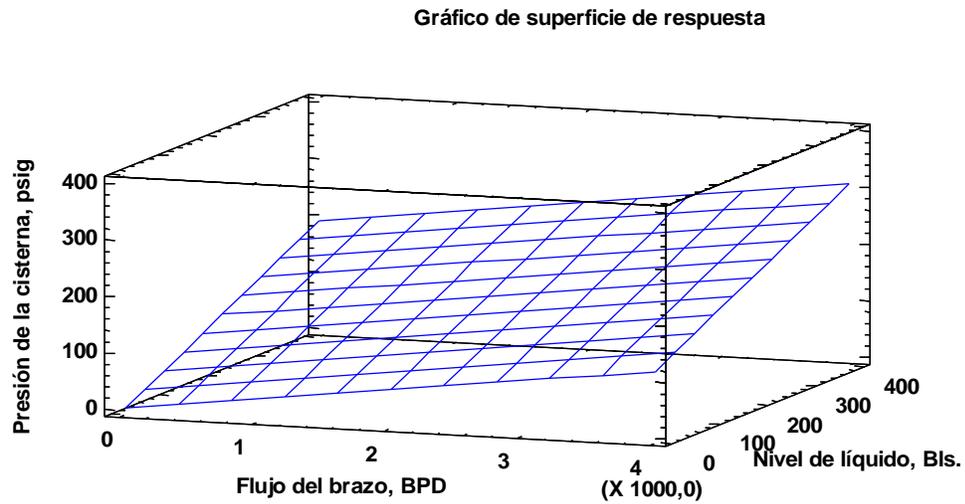
R-cuadrada = 98,18% R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,17%

$$PC \text{ (psig)} = 0,495107 \cdot NC \text{ (Bls)} + 0,0422249 \cdot PB \text{ (psig)} + 0,0250374 \cdot FB \text{ (BPD)}$$

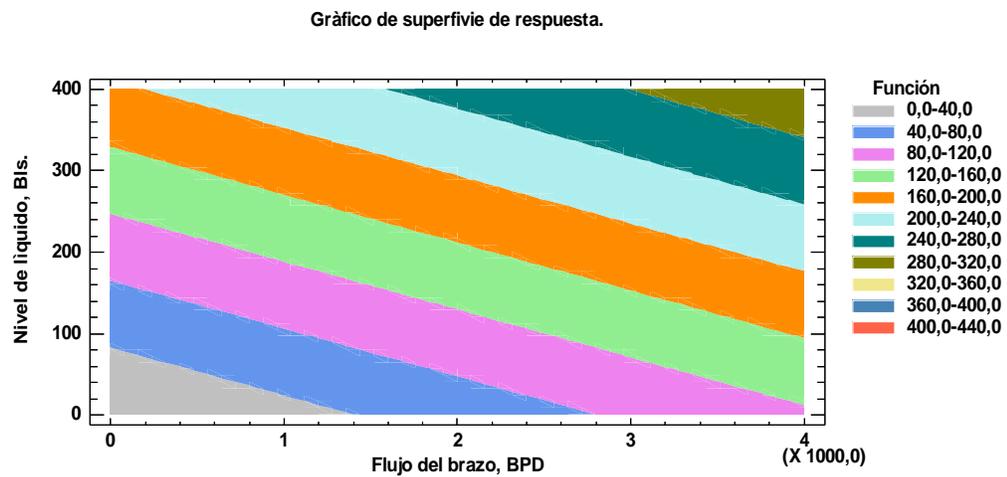
PC: Presión de cisterna, NC: Nivel de cisterna, FB: Flujo brazo de llenado, BPD barriles por día, Bls: Barriles

Las Figuras 3.7 y 3.8 muestran la superficie de respuesta con los límites para la presión de descarga de la bomba (entre 470 y 526 psig) y para el flujo de brazo de llenado (entre 3600 y 4000 BPD). La regresión para la presión de la cisterna permite comparar el respectivo valor con el reportado por el sensor para cada momento del cargue, con lo cual es posible inferir alguna falla en los componentes de las válvulas MOV del sistema.

**Figura 13.** Superficie de respuesta de la variable presión de cisterna como una función de flujo del brazo de llenado y nivel de la cisterna.



**Figura 14.** Gráfico de contorno para determinar rangos óptimos de respuesta y rangos óptimos de los factores.



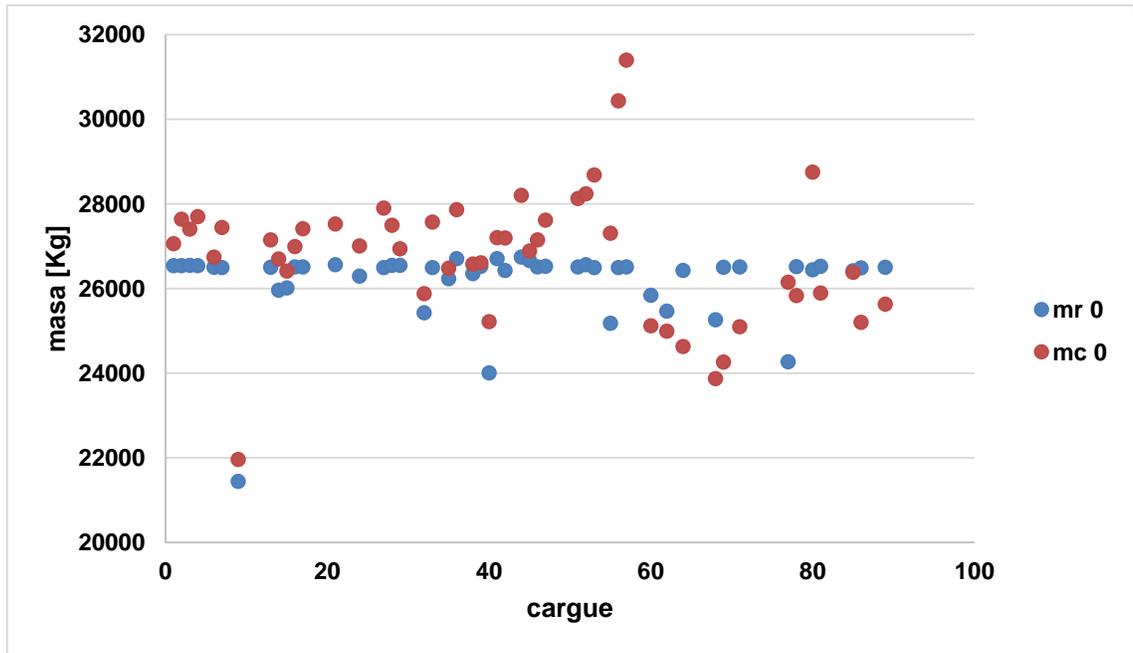
### 3.3 ESTADÍSTICA MULTIVARIADA: AGRUPAMIENTO K-MEAN Y ANÁLISIS PCA

El siguiente análisis establece la relación entre las diferentes variables utilizando métodos de estadística multivariada, con lo cual es posible inferir la influencia de

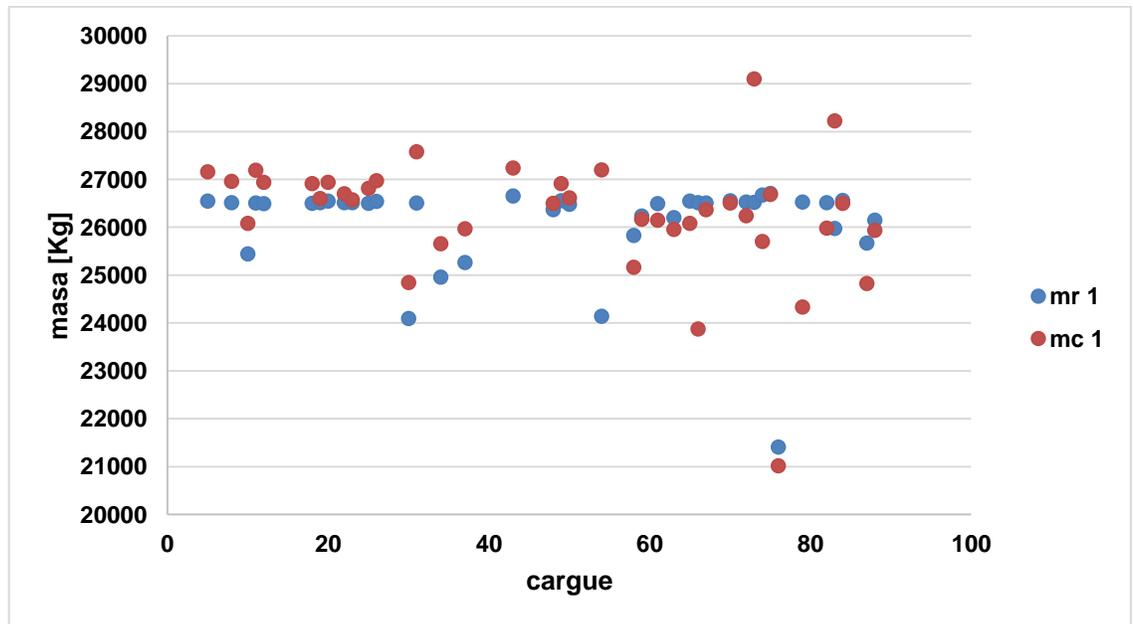
una variable o grupos de variables sobre el comportamiento global del sistema. La matriz de cargues a analizar con estadística multivariada fue establecida con los datos reportados para 90 cargues de la ventana de operación, considerando la información hasta el minuto 60; estos cargues fueron seleccionados según la continuidad y la disponibilidad de su información en la ventana de operación. La matriz para el análisis por componentes principales (PCA) fue construida considerando las filas como los cargues individuales, mientras que las columnas estaban constituidas por los valores de presiones, temperaturas y flujos para los primeros 60 minutos del respectivo cargue. Con lo anterior, la dimensión de la matriz de análisis correspondió a 90 filas con 540 columnas.

El método de agrupamiento *k-mean* fue aplicado utilizando la distancia euclidiana para clasificar la información de los cargues en dos grupos, denominados clase 0 y clase 1. En primera instancia, se analiza si la masa cargada en las cisternas corresponde a la variable que influye para la agrupación. Las masas de llenado calculadas y reportadas de acuerdo a las clases 0 y 1 son mostradas en la Figura 3.9 y en la Figura 3.10, respectivamente. El análisis de las tendencias reportadas en estas figuras conlleva a establecer que no existen diferencias marcadas respecto a las masas de llenado para los cargues de la clase 0 y los cargues de la clase 1; las medias poseen una diferencia de menos de 400 g. Con esto la diferencia entre las clases debe radicar en la variación de los datos operativos durante los cargues y a inconvenientes en el sistema, validando la suposición de que la estadística multivariada puede indicar fallas en los componentes de la unidad de llenado.

**Figura 15.** Distribución de la masa reportada (mr) y calculada (mc) clase 0.



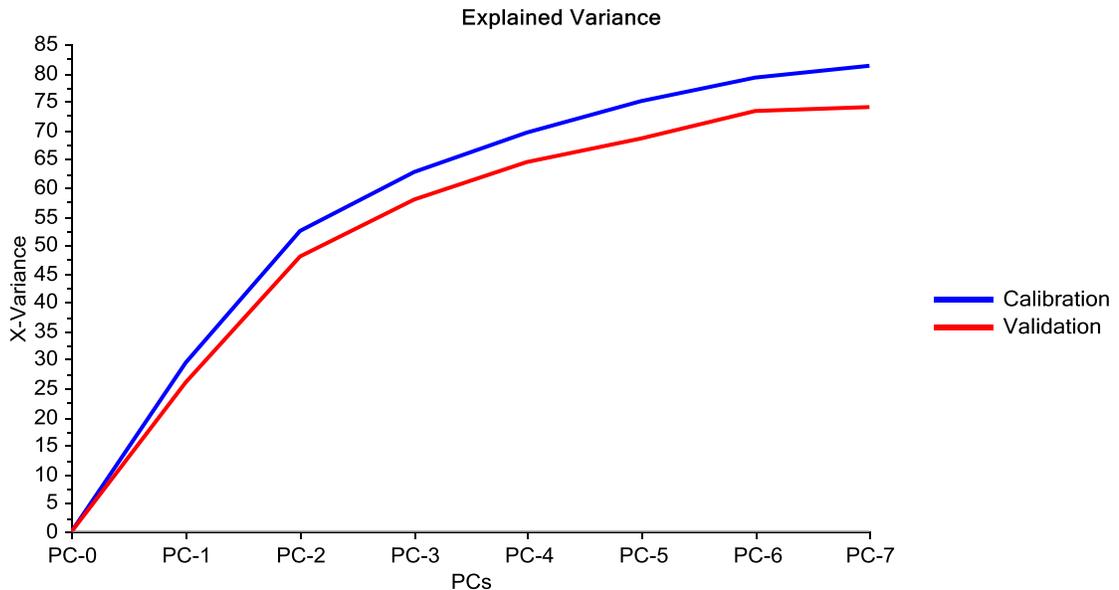
**Figura 3.10.** Distribución de la masa reportada (mr) y calculada (mc) clase 1.



El análisis por componentes principales (PCA) fue aplicado a la matriz con los cargues etiquetados según los resultados del método *k-mean* con la distancia

euclidiana; la matriz fue sujeta a los pretratamientos de normalización y derivación. El resultado del PCA indica que el 85% de la varianza de los datos iniciales es reproducida utilizando 7 componentes principales (Figura 3.11); los resultados de la validación cruzada indican que el 75% de la varianza es reproducida con igual número de componentes principales. Según lo anterior, aproximadamente  $\frac{3}{4}$  de la varianza total mostrada durante los cargues es agrupada en sólo 7 componentes formados por combinaciones lineales de variables específicas del sistema; es importante recordar que el sistema cuenta con 540 variables, así como mencionar que aunque el proceso es esencialmente dinámico, gran parte del mismo se desarrolla en un estado cercano al estacionario –pseudostacionario–, lo cual permite la aplicación del PCA.

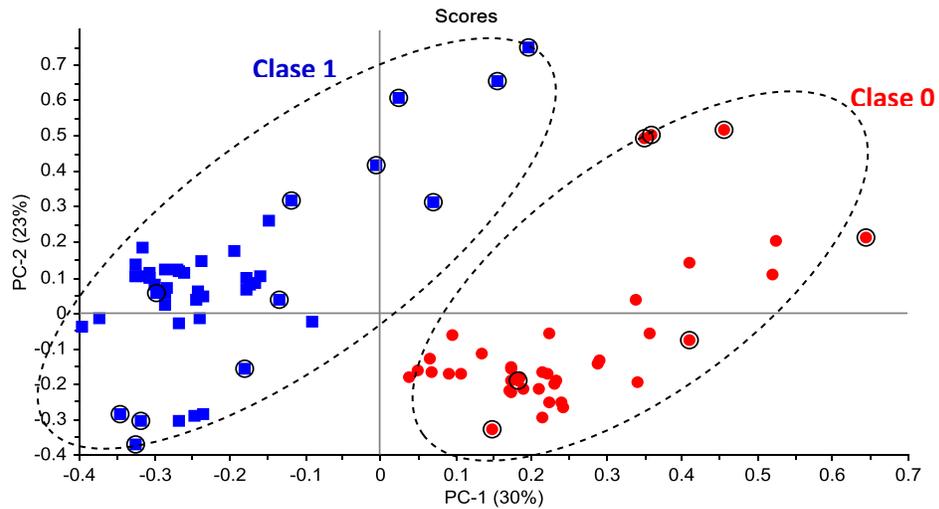
**Figura 16.** Varianza explicada por los 7 primeros componentes principales en las etapas de calibración y validación cruzada.



Los resultados de los *score* para los dos primeros componentes principales (53% de varianza) son presentados en forma gráfica en la Figura 3.12. En esta figura se presentan los diferentes cargues de las clases 0 y 1; según las distancias entre los

conglomerados en la gráfica de *scores* es posible proponer que el conjunto total de cargues se divide en cargues clase 0 y cargues clase 1; con esto, los resultados del PCA dan soporte adicional a los resultados obtenidos con el método *k-mean*.

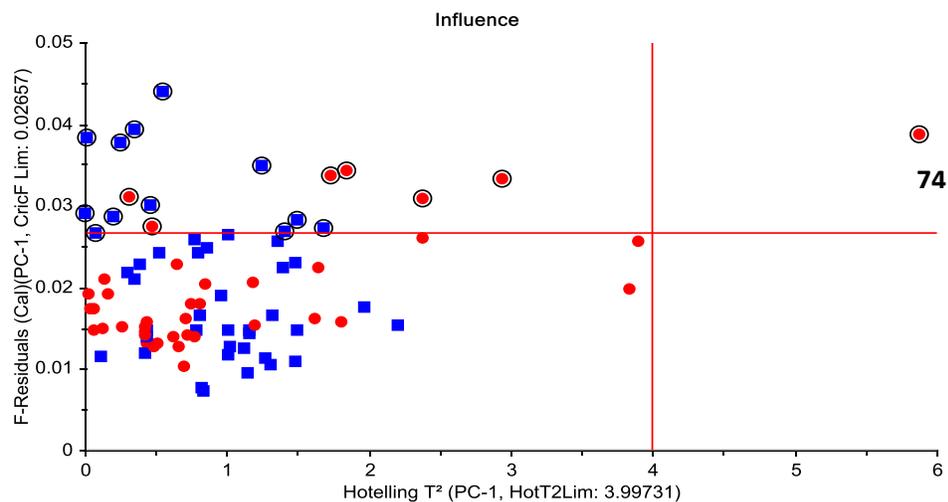
**Figura 17.** Gráfico de los score de los dos primeros componentes principales; pretratamientos de normalización y derivación según Savitzky Golay.



Los puntos redondeados mostrados en la Figura 3.12 se relacionan con los cargues influyentes en el conjunto analizado. Según la definición dada para los cargues estándar (sección 3.1) que cumplen con la masa de llenado de las cisternas, la clase 0 se encuentra conformada por un 85% de cargues estándar, mientras que la clase 1 se encuentra conformada en su mayoría por cargues con características subestándar. Por lo anterior, algunas muestras de la clase 1 presentan valores de PC-1 positivos (cargues estándar) y una muestra de la clase 0, muestra 74, se presenta como un dato atípico e influyente según el gráfico de influencia (Figura 3.13). Asimismo, según el gráfico de influencia, existen cargues en las dos clases que sesgan el comportamiento del conjunto analizado; según la definición de cargues estándar y subestándar, los cargues en el conjunto respectivo con un valor alto del estadístico F (Figura 3.13), pueden estar

representando cargues estándar dentro de la clase 1 y cargues subestándar dentro de la clase 0 (Figura 3.12). Lo anterior es consecuencia de la condición inherentemente dinámica del sistema (25% de la varianza que no es reproducida por los componentes principales).

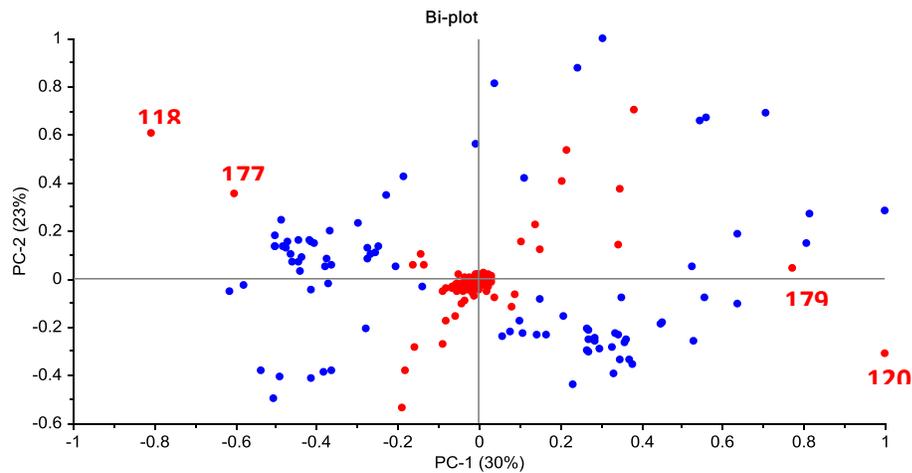
**Figura 18.** Gráfico de influencia para el PCA aplicado a los cargues analizados. Los puntos redondeados se relacionan con los respectivos en el gráfico de los scores (Figura 3.12). Posible dato atípico: cargue 74.



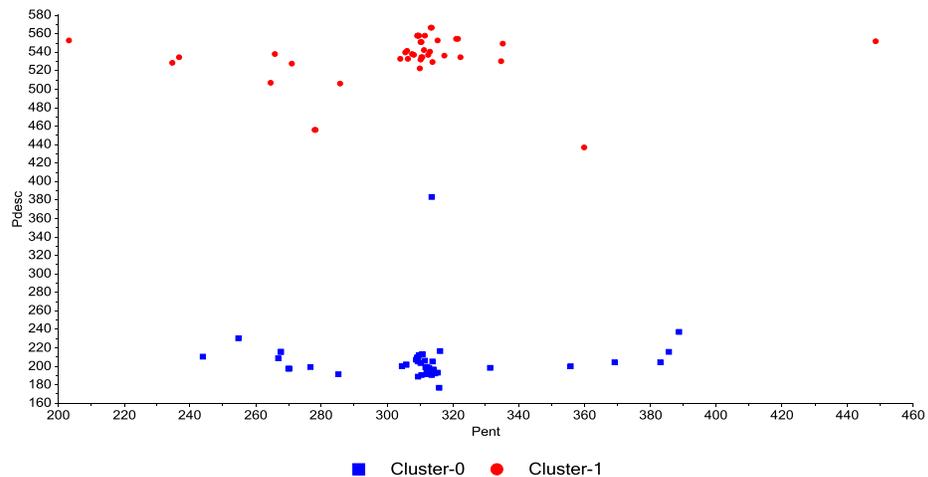
Con el objetivo de identificar las variables que más influyen en la clasificación de los cargues, los resultados del análisis PCA fueron representados en la denominada gráfica de dispersión *biplot*, en la cual se relacionan tanto los *scores* como los *loadings* de los dos primeros componentes principales. La Figura 3.14 presenta la gráfica de dispersión *biplot*, según la cual, los cargues son agrupados en las clases 0 o 1 debido a los signos de los *loading* referentes a las variables 120 y 179 y, 118 y 177, respectivamente; es importante mencionar que las variables 118, 120, 177 y 179 corresponden a las variables más influyentes que conforman los componentes principales. Estas variables están relacionadas con los valores iniciales de la presión de descarga de la bomba (Figura 3.15) y los valores finales de la presión del tren de llenado (Figura 3.16). Según las Figura

5.12 y 5.13, los cargues de la clase 0 presentan los menores valores para la presión inicial de descarga de la bomba y la presión final del tren de llenado; los cargues de la clase 1 presentan el comportamiento inverso a los cargues de la clase 0 para las anteriores variables.

**Figura 19.** Gráfico de dispersión biplot de los dos primeros componentes principales; en azul los cargues, en rojo las variables.

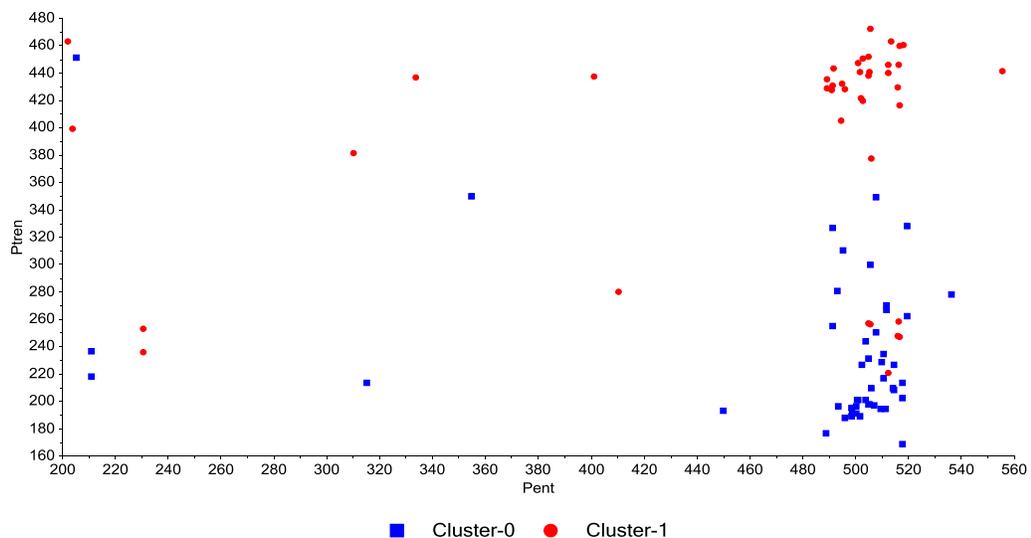


**Figura 20.** Presión inicial descarga de la bomba vs presión de entrada al tren; los cargues utilizan la notación de 0 y 1 según la clasificación obtenida por el método k-mean.



Según lo obtenido anteriormente, aquellos cargues que inicien con una presión a la entrada del tren inferior a 240 psi y finalicen con una presión del tren de llenado inferior a 270 psi, se comportarán según los estándares de llenado de las cisternas con un porcentaje de éxito superior al 85 % (cargues de la clase 0). De otro lado, los cargues cuya presión inicial de descarga de la bomba sea superior a 490 psi y el valor final del tren de llenado presente un valor superior a 380 psi, habrán exhibido un comportamiento sub-estándar (clase 1) con una duración superior a los cargues estándar y con posibles fallas operativas. Los valores altos de presión indican fallas en el sistema, con lo cual los cargues en turno presentarán disparos por sobrepresión causando retrasos en el despacho para alcanzar la masa de PGR requerida. Estos comportamientos obtenidos con la estadística multivariada amplían aquellos inferidos por medio de la estadística univariada y por lo tanto presentan un soporte para las deducciones obtenidas a partir del análisis de causa raíz presentado en el capítulo 4.

**Figura 21.** Presión final del tren de llenado vs presión de entrada al tren; los cargues utilizan la notación de 0 y 1 según la clasificación obtenida por el método k-mean.



Las Tablas 3.9 y 3.10 presentan la evolución de los valores de las variables para un cargue subestándar y otro estándar para los días 19 y 20 de marzo, respectivamente. Para el cargue subestándar, los flujos en los trenes se diferencian en un valor superior a 40 kg/min y por presiones iniciales de descarga de las bombas superior a 480 psi (cargues clase 1), ocasionando el desbalance de presiones y la sobrepresión en el tren con menor caudal (Tabla 4.7, tren 2); el cargue se detuvo por disparo de la válvula de seguridad con una masa cargada en cada cisterna inferior a 26 ton. De otro lado, para el cargue estándar reportado en la Tabla 3.10, los flujos en los trenes están cercanos con una diferencia promedio inferior a 20 kg/min y presiones iniciales a la entrada del tren inferior a 240 psi (cargues clase 0), con lo cual la operación de llenado culmina con la masa requerida de 26.2 ton para las dos cisternas.

**Tabla 20.** Cambio de las variables para un cargue sub-estándar

Fecha	Presión Tren 1	Presión Tren 2	Flujo Tren 1	Flujo Tren 2	P. retorno Tren 1	P. retorno Tren 2	Masa Cisterna 1	Masa Cisterna 2	Descarga Bomba	Tem. Tren 1	Tem. Tren 2
19-mar-15 01:17:16	397,513	392,307	335,00	62,53	75,69	81,70	433,95	588,72	515,19	81,92	81,71
19-mar-15 01:43:08	306,366	306,184	433,18	420,87	173,04	182,88	14627,80	14302,03	496,27	95,27	96,67
19-mar-15 01:43:09	306,369	306,187	433,18	420,87	173,07	182,92	15301,00	14965,00	496,27	95,27	96,67
19-mar-15 02:14:08	337,921	338,246	436,85	346,96	215,04	261,21	24706,16	24197,06	501,06	98,09	95,12
19-mar-15 02:15:35	344,626	345,274	370,89	206,55	216,65	269,99	25194,59	24370,68	442,92	98,15	95,05
19-mar-15 02:17:14	193,222	193,207	7,34	4,09	217,03	266,23	25388,37	24378,02	201,09	97,93	94,97
19-mar-15 02:17:16	190,163	190,135	0,00	0,00	217,03	266,19	25392,29	24378,17	201,00	97,93	94,97

Los datos de la tabla 3.9 muestran que la presión en la descarga de la bomba y a la entrada de los trenes para algunos cargues se encontraba por fuera de los valores operativos definidos para los cargues de la clase 0; el flujo por el tren uno fue menor al flujo del tren dos durante el cargue, la presión en el sistema de retorno del tren dos fue mayor que la alcanzada en el sistema de retorno del tren uno –incluso alcanzo los valores limites definidos para el llenado la cisterna–, con lo cual la masa final de las cisternas estuvo por debajo de 26 ton.

Con la información suministrada por la estadística multivariada se puede concluir que el sistema presentó una falla en algunos de los componentes internos del tren de medición, que no permitió el control del flujo en el tren uno, llegando a disparar el cargue por alcanzar la presión de corte de la cisterna (270 psi), sin cumplir los volúmenes requeridos e incluso generando una mayor temperatura en el tren uno.

**Tabla 21.** Cambio de las variables para un cargue estándar

Fecha y hora	Presión tren uno	Presión tren dos	Flujo tren uno	Flujo tren dos	Presión retorno tren uno	Presión retorno tren dos	Masa Cisterna 1	Masa Cisterna 2	Descarga Bomba	Tem. Tren 1	Tem. Tren 2
20-mar-15 01:33:27	198,73	198,87	61,42	28,70	83,77	74,91	100,75	328,24	187,06	84,06	84,22
20-mar-15 01:33:31	202,19	202,37	76,78	35,88	83,86	75,06	127,62	353,01	329,91	84,06	84,22
20-mar-15 01:50:45	293,53	293,67	449,29	428,88	151,02	148,94	10839,00	10478,55	485,49	93,51	93,64
20-mar-15 02:06:15	312,90	313,05	441,80	427,00	179,25	182,58	14271,14	13805,28	488,03	93,40	93,63
20-mar-15 02:22:04	313,96	314,06	434,15	425,09	202,09	206,09	21196,00	20586,76	490,62	93,28	93,62
20-mar-15 02:33:17	318,35	318,37	414,35	425,97	214,99	221,00	26106,88	25395,97	492,46	93,20	93,61
20-mar-15 02:34:32	385,49	384,99	144,12	459,50	216,43	222,67	26296,96	25931,92	530,03	93,19	93,61
20-mar-15 02:35:08	417,73	416,96	14,41	475,59	217,12	223,46	26297,22	26189,17	520,26	93,19	93,61
20-mar-15 02:35:12	420,41	419,63	0,00	476,93	217,19	223,55	26297,25	26217,75	520,55	93,19	93,61
20-mar-15 02:37:09	189,77	189,71	0,00	11,92	219,44	226,15	26298,11	26226,26	185,10	93,17	93,61
20-mar-15 02:37:11	185,83	185,78	0,00	3,97	219,47	226,19	26298,13	26226,28	185,10	93,17	93,61
20-mar-15 02:37:12	183,86	183,82	0,00	0,00	219,47	226,19	26298,13	26226,29	185,10	93,17	93,61

La tabla 3.10 muestra los resultados de las variables en un cargue realizado en condiciones normales de operación; la presión en los trenes es similar durante el cargue en 300 psi promedio; los flujos en los trenes reportó 430 kg/min en promedio; la presión final en las cisternas se mantuvo en valores de 226 psi en el tren dos y 219 psi en el tren uno; la masa de las cisternas reportó valores por encima de 26,200 kg en ambos trenes. Asimismo, la Tabla 3.11 muestra la tendencia entre las diferentes variables para un cargue realizado el día 10 de enero del 2015, el cual finalizó por control de presión y no de masa cargada (clase 1). Los promedios de flujo y presión reportaron valores estándar de operación: 415 kg/min por el tren uno y 437 kg/min por el tren dos y presión de descarga de la

bomba en 510 psi. Sin embargo, al alcanzar el minuto 58 el sistema reportó sobrepresión, terminando la cisterna uno con 24416 kg y la cisterna dos con 24972 kg. La revisión de las partes mecánicas de los componentes reportaron condiciones de funcionamiento estándar (circulación, válvula set stop y solenoides) se encontraban en condiciones normales, excepto por una válvula MOV que generó la sobrepresión en el brazo de retorno de vapores respectivo (Tabla 3.11, celdas coloreadas de rojo), causando una elevación de la presión final del tren de llenado superior a 380 psi (cargue clase 1). En efecto, los datos históricos confirman que una presión del tren de llenado elevada corresponde a una condición de flujo nulo por sobrepresión de la cisterna ocasionando cargues con masa de llenado incompleta. Con esto, la identificación de las variables por parte del PCA aplicado en esta sección, ayuda a identificar la zona del sistema en donde se presenta la falla operativa y valida las causas que son inferidas en el análisis de causa raíz presentado en el capítulo 5.

**Tabla 22.** Cambio en las variables de cargue sub-estándar por presión del tren.

Fecha y hora	Presión tren uno	Presión tren dos	Flujo tren uno	Flujo tren dos	Presión retorno tren uno	Presión retorno tren dos	Volumen tren uno	Volumen tren dos	Presión descarga bomba	Temp. tren uno	Temp. tren dos
10-ene-15 15:27:14	206,56	206,47	1,88	3,65	86,51	78,15	54,33	221,66	203,64	99,21	107,62
10-ene-15 15:27:15	207,11	207,02	3,76	7,29	86,62	78,32	61,12	229,05	203,64	99,25	107,61
10-ene-15 15:39:23	291,01	290,93	448,25	469,32	172,16	166,93	5005,06	5608,11	499,08	102,52	100,41
10-ene-15 15:49:18	304,46	304,38	446,58	449,58	186,21	194,11	9315,39	10004,45	500,68	101,38	99,31
10-ene-15 16:11:51	313,13	313,01	426,68	444,35	218,16	227,46	19252,84	20001,52	504,33	98,78	99,20
10-ene-15 16:20:54	316,60	316,47	416,39	430,60	230,98	252,19	23241,04	24013,64	505,80	98,52	99,16
10-ene-15 16:23:48	285,14	285,06	288,60	297,90	235,09	265,33	24416,26	24968,85	318,01	98,48	99,15
10-ene-15 16:23:49	284,24	284,17	285,12	294,31	235,11	265,40	24416,27	24968,89	288,77	98,48	99,15
10-ene-15 16:24:50	229,45	229,47	73,02	75,37	236,55	270,01	24416,55	24971,67	204,12	98,46	99,14
10-ene-15 16:25:10	211,48	211,54	3,48	3,59	237,03	271,52	24416,64	24972,58	204,11	98,46	99,14
10-ene-15 16:25:11	210,58	210,64	0,00	0,00	237,03	271,52	24416,65	24972,62	204,11	98,46	99,14

Para sintetizar lo obtenido en el presente capítulo, es posible mencionar que el análisis estadístico univariado y multivariado resultó de gran importancia para la

identificación de condiciones operacionales estándar y subestándar del sistema de entrega de PGR. Con este análisis se definieron las tendencias para diferentes variables, con lo cual se identificaron los cargues con comportamientos estándar, ayudando a limitar e identificar el área o componente que estaba presentando problemas. Lo anterior facilita y respalda la identificación de causas probables definidas durante el desarrollo del análisis de causa raíz (capítulo 5). Del análisis PCA se obtiene que durante los cargues que presentan fallas de algún componente, el sistema alcanza presiones entre 560 y 580 psi en la descarga de la bomba y presiones mayores a 460 psi a la entrada del tren de llenado, causando a su vez disparo de la válvula de seguridad del tren, hacia la tea.

## 4. SIMULACION DE LA UNIDAD DE LLENADO

### 4.1 CONSIDERACIONES INICIALES PARA LA SIMULACIÓN

La composición química para el PGR durante la ventana de operación tomada (años 2014-2016) es mostrada en la Tabla 4.1; esta composición fue obtenida de los promedios reportados por el laboratorio de pruebas y control de calidad de GRB Asimismo, los rangos de presión y temperatura para la ventana operativa son especificados en la Tabla 4.2.

**Tabla 23.** Composición química del PGR para la ventana de operación (años 2014-2016).

COMPOSICION PGR RECIBIDO EN EL LLENADERO DE CTQS				
COMPONENTE	UNIDADES	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
Etano	% Vol	0.02	0.02	0.02
Etileno	ppm wt	13.2	13.8	15.2
Propano	% Vol	24.4	23.6	21.6
Propileno	% Vol	74.7	75.5	77.6
Metil Acetileno	ppm wt	26.3	25.4	23.2
Propadieno	ppm wt	7.6	7.3	6.7
i-Butano	% Vol	0.33	0.32	0.31
n-Butano	% Vol	0.08	0.08	0.07
C <sub>4</sub> <sup>+</sup>	% Vol	0.41	0.40	0.39
H <sub>2</sub> S	ppm wt	0.13	0.14	0.16
COS	ppm wt	11.6	11.8	12.6
Metil Mercaptano	ppm wt	12.3	11.9	10.9
Etil Mercaptano	ppm wt	1.8	1.7	1.6
CO	ppm wt	2.3	2.5	3.0
CO <sub>2</sub>	ppm wt	2.2	2.2	2.4

**Tabla 24.** Condiciones de operación del cabezal principal de recibo de propileno

CONDICIONES DE OPERACIÓN			
CONDICIÓN	MÍNIMO	NORMAL	MÁXIMO
Flujo (BPD)	4700	7300	10700
Presión (psig)	250	250	250

Las simulaciones de proceso desarrolladas en el programa HYSYS V8.8, correspondientes a las balas de almacenamiento, las líneas de succión, la descarga de bombas y las facilidades hidráulicas e instrumentales del sistema, asumieron las siguientes consideraciones:

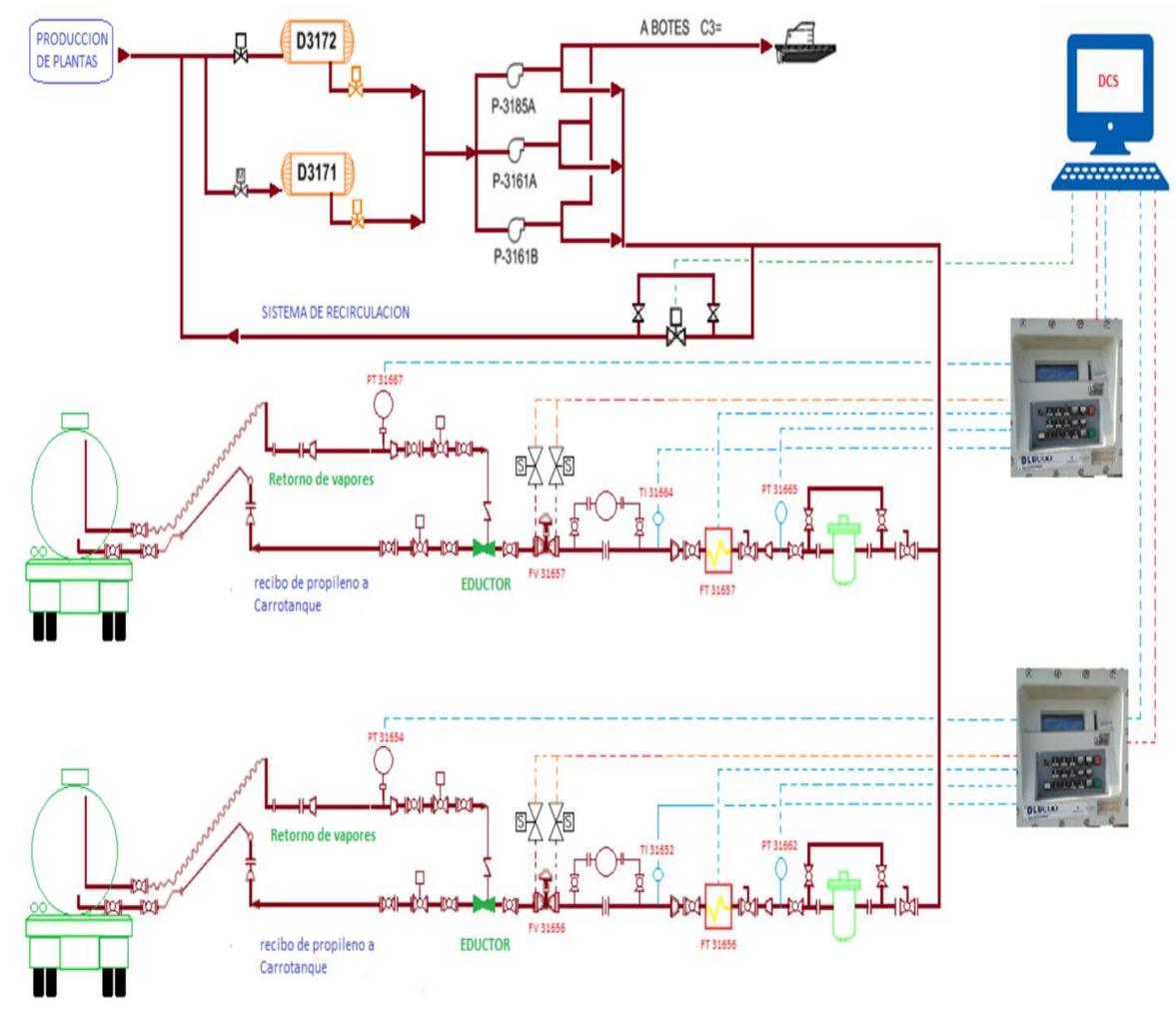
- Temperatura ambiente de 105 °F.
- El sistema se encuentra en estado estacionario, operando en la meseta de caudal cuasi-estacionario (ver capítulo 5).
- La presión de almacenamiento de PGR en las balas D-3171 y D-3172 es de 225 psig, que corresponde a 5 psi por encima de la presión de vapor del PGR a 105 °F.
- La presión de entrega de PGR en el llenadero de carrotanques después del tren de medición es 260 psi.
- Caída de presión en las platinas de orificio en descarga de bombas constante e igual a 115 psi.
- La caída de presión en la zona de medición de PGR de las cisternas constante e igual a 25 psi, distribuidos según: filtro 10 psi, medidores 10 psi y válvula set stop 5 psi.
- La restante caída de presión para que el PGR llegue a la presión de la cisterna se adjudica al eductor (91 psi).
- El caudal máximo de llenado por carrotanque de PGR es 340 gpm (485 bls/h).
- El flujo del eductor se encuentra entre de 230 y 237 gpm
- Los valores de NPSH requerido por la bomba P-3161 es 11.5 ft, mientras el NPSH disponible es de 23.7 ft, con lo cual no hay inconvenientes por cavitación.

## 4.2 ESQUEMA DE DESPACHO DE PGR

El recibo de PGR se hace en una línea de 8" de tamaño nominal. Posteriormente, el PGR pasa por una válvula control (PV-31650) donde se regula la presión para el almacenamiento. La operación de despacho de PGR se realiza utilizando la bomba P-3161 (con una de relevo), que succiona el líquido de las balas (Figuras 4.1 y 4.2) y lo transporta por la línea hasta la cisterna (Figura 4.3). La línea de transporte puede dividirse en dos zonas, la zona 1 hasta la entrada del tren de llenado y la zona 2 desde este punto hasta la cisterna. La Figura 4.3, muestra el detalle de la línea con sus accesorios desde la descarga de la bomba hasta la entrada del tren de llenado. Las especificaciones de tuberías y accesorios se presentan en las Tablas 4.3.

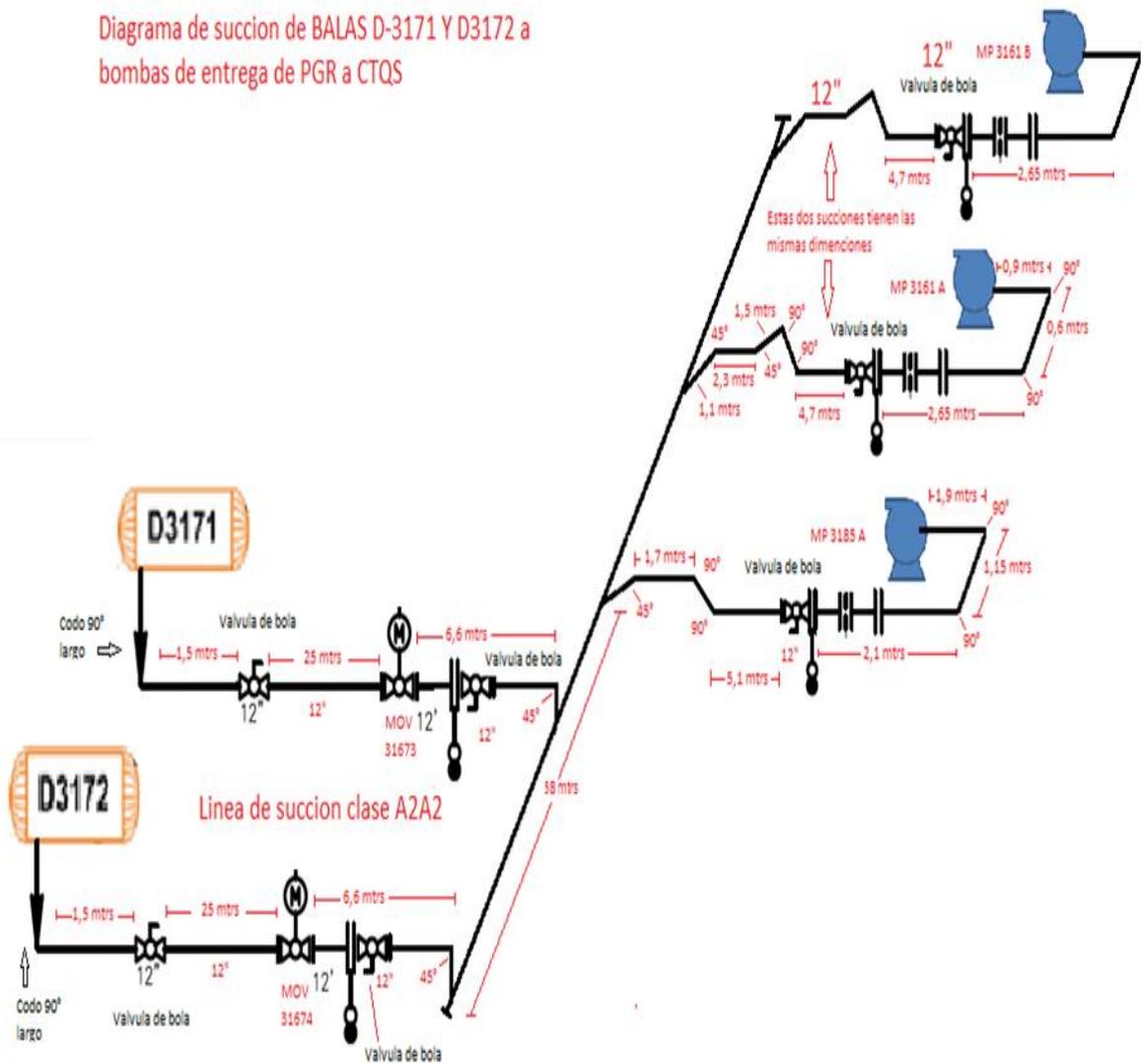
El flujo de descarga de la bomba ingresa a cada brazo de llenado, en donde los computadores de flujo en conjunto con las válvulas solenoides y válvulas set stop se encargan de regular el flujo de llenado requerido, posteriormente pasa por el eductor e ingresa a la cisterna. Los vapores extraídos son recirculados hacia un eductor en la línea de llenado (Figura 4.4), el cual genera un vacío causado por el flujo de líquido que permite recircular el vapor, manteniendo así la presión interna de la cisterna y asegurando que el flujo total medido previamente sea despachado al cliente.

Figura 22. Esquema general sistema de llenado de cisternas y botes.



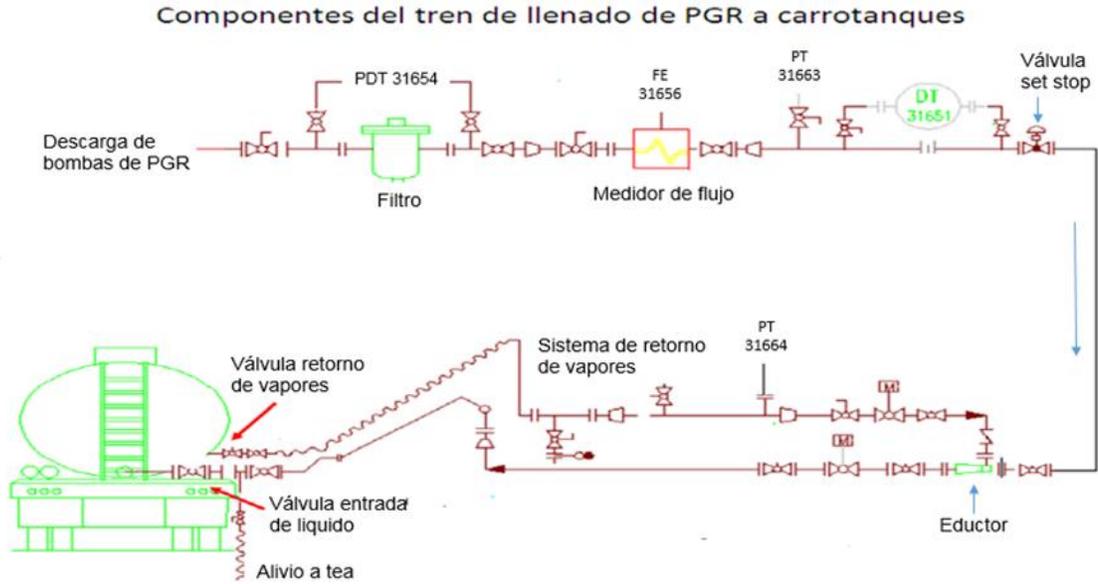
**Figura 23.** Dimensiones de líneas y accesorios en sistema de succión de las balas, utilizados en la simulación.

Diagrama de succión de BALAS D-3171 Y D3172 a bombas de entrega de PGR a CTQS





**Figura 25.** Sistema de retorno de vapores.



**Tabla 25.** Cálculo Hidráulico Línea 12". Cabezal de succión

Descripción	Cabezal de Succión Bombas Despacho PGR		
<b>NÚMERO DE LÍNEA</b>	12"-PGR-009-A2A2-SP-009		
DIÁMETRO (in) / Sch / ID (in)	12	40	11.938
CONDICIÓN	MIN	NORM	MAX
Presión Entrada (psig)	225.0	225.0	225.0
Presión Salida (psig)	225.1	224.8	224.6
Temperatura (°F)	70	95	110
Flujo Volumétrico (gpm) (NOTA 1)	230	1,125	1,52
Flujo másico (lb/h)	55,02	353	394,5
Gravedad Específica @ PT	0.477	0.477	0.477
Densidad @ PT (lb/ft <sup>3</sup> )	29.78	29.78	29.78
<b>TUBERÍA Y ACCESORIOS</b>			
Longitud recta (ft)	547		
Cabeza estática (Altura inicial - Altura final) (ft)	-5.8		
ACCESORIOS	Cantidad	Ft por unidad	Ft Total
Válvulas Bola/ Globo / Cheque	6	329.0	1974.1
Codo 90°	4	15.5	61.9
Codo 45°	2	29.0	58.1
Tee's	6	19.4	116.1
TOTAL ACCESORIOS (ft)	<b>2210</b>		
LONGITUD EQUIVALENTE TOTAL (ft)	<b>2757</b>		

### **4.3 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN.**

La simulación del sistema de llenado permitió la exploración de su superficie operacional, con lo cual se simularon diferentes condiciones operativas en donde el sistema presento zonas de condiciones operativas estables. La aplicación de estas metodologías condujo a la identificación de las principales fuentes o causas que conllevan a eventos de incumplimiento por fallas mecánicas en el sistema PGR, debido a presiones con valores por encima de los límites operativos.

Como se mencionó en el capítulo 3, antes de iniciar al proceso de simulado se definió el modelo termodinámico relacionado con gases licuados a presiones superiores a los 30 bar y con precisión en cálculos para fluidos en tuberías y alta caídas de presión. Con todas estas observaciones el modelo ajustado para interpretar el proceso fue PR-SRK (Peng-Robinson y Soave-Redlich-Kowng).

Para el desarrollo de la simulación fue necesario realizar una recolección de datos de especificaciones de equipos, tubería y demás componentes que conforman el sistema de entrega de propileno. Todo esto fue cargado al simulador de acuerdo con cada módulo seleccionado, para las tuberías se cargaron al simulador el número de accesorios. Para las bombas se utilizó método avanzado teniendo en cuenta la curva de las bombas y las rpm del motor, en cuanto a las cisternas se simularon como tanques horizontales presurizados con capacidad para alivio a 330 psig. Para el caso del eductor se construyó teniendo en cuenta los fenómenos succión y caída de presión.

Tal como se ilustra en el capítulo 3, los resultados de análisis estadístico para el proceso simulado como para el proceso real indican que el proceso simulado reporta un comportamiento similar al proceso real, por lo cual la simulación representa el comportamiento de la variable resultante presión de la cisterna en

función de las variables flujo de brazo de llenado, nivel de la cisterna y presión de la bomba.

Las Figuras 4.5 - 4.7 muestran el sistema de recibo, de almacenamiento, parte del cabezal de succión principal a bombas, el sistema de recirculación a bala de recibo, los trenes de llenado y el sistema de recuperación de vapores definidos en Hysys para representar la operación de la unidad de carga de PGR. La simulación codificada fue sometida a diferentes pruebas para determinar el desempeño del sistema de llenado en diferentes condiciones de flujo en la descarga de la bomba, en la recirculación y en los trenes de llenado, con el fin de identificar su impacto en la presión de las cisternas. Los casos de análisis fueron: caso 1, flujo normal de operación de 10000 bpd; caso 2, flujo de 11000 bpd; caso 3, flujo máximo de 14000 bpd y caso 4, flujo mínimo de 7000 bpd, a todas estas condiciones se les realizó cambios en los flujos hacia la recirculación y hacia los trenes de llenado, con el fin de comparar los resultados con el comportamiento real del proceso.

**Figura 26.** Esquema succión de bombas y recirculación a cabezal de recibo de propileno.

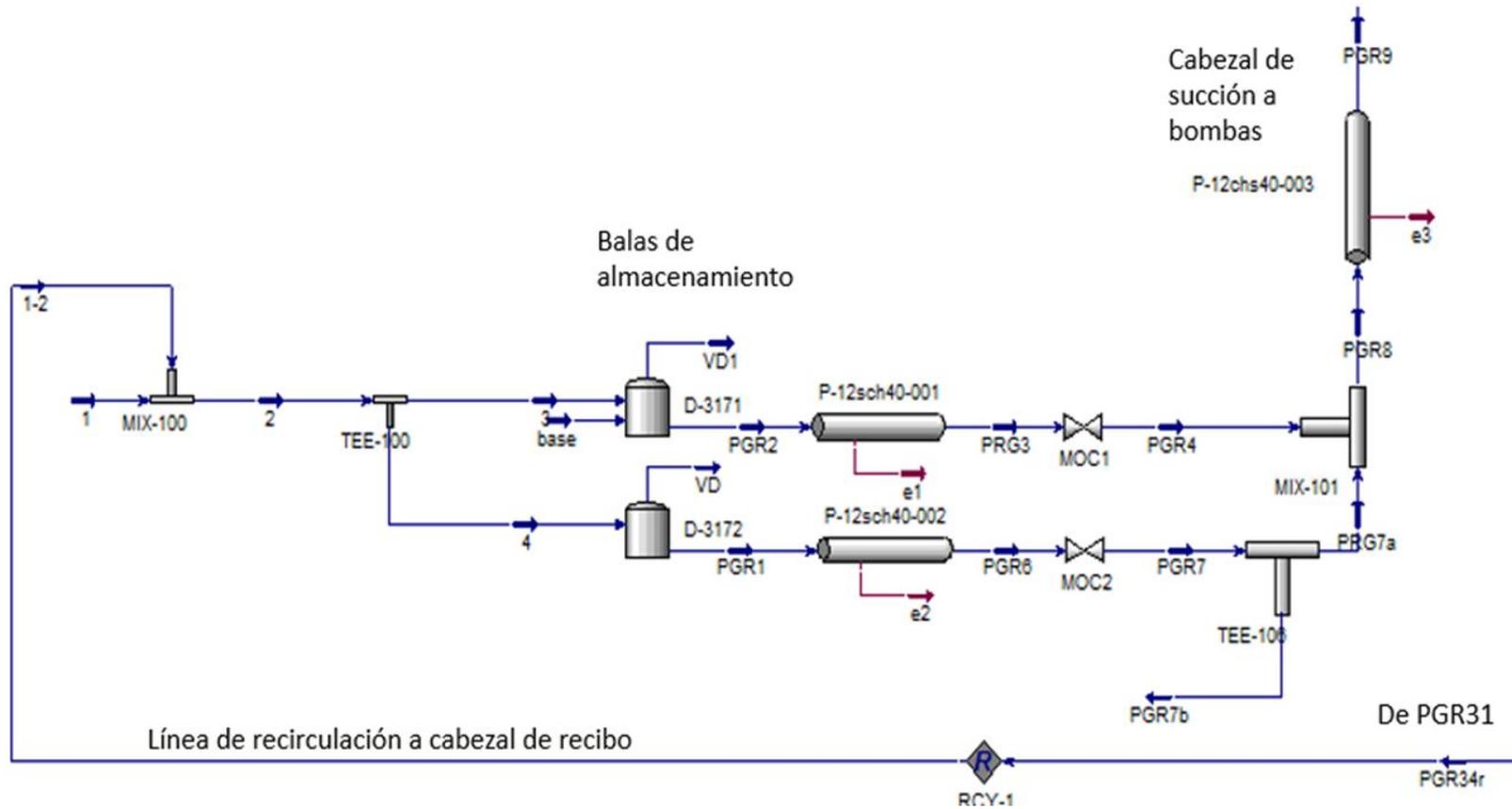
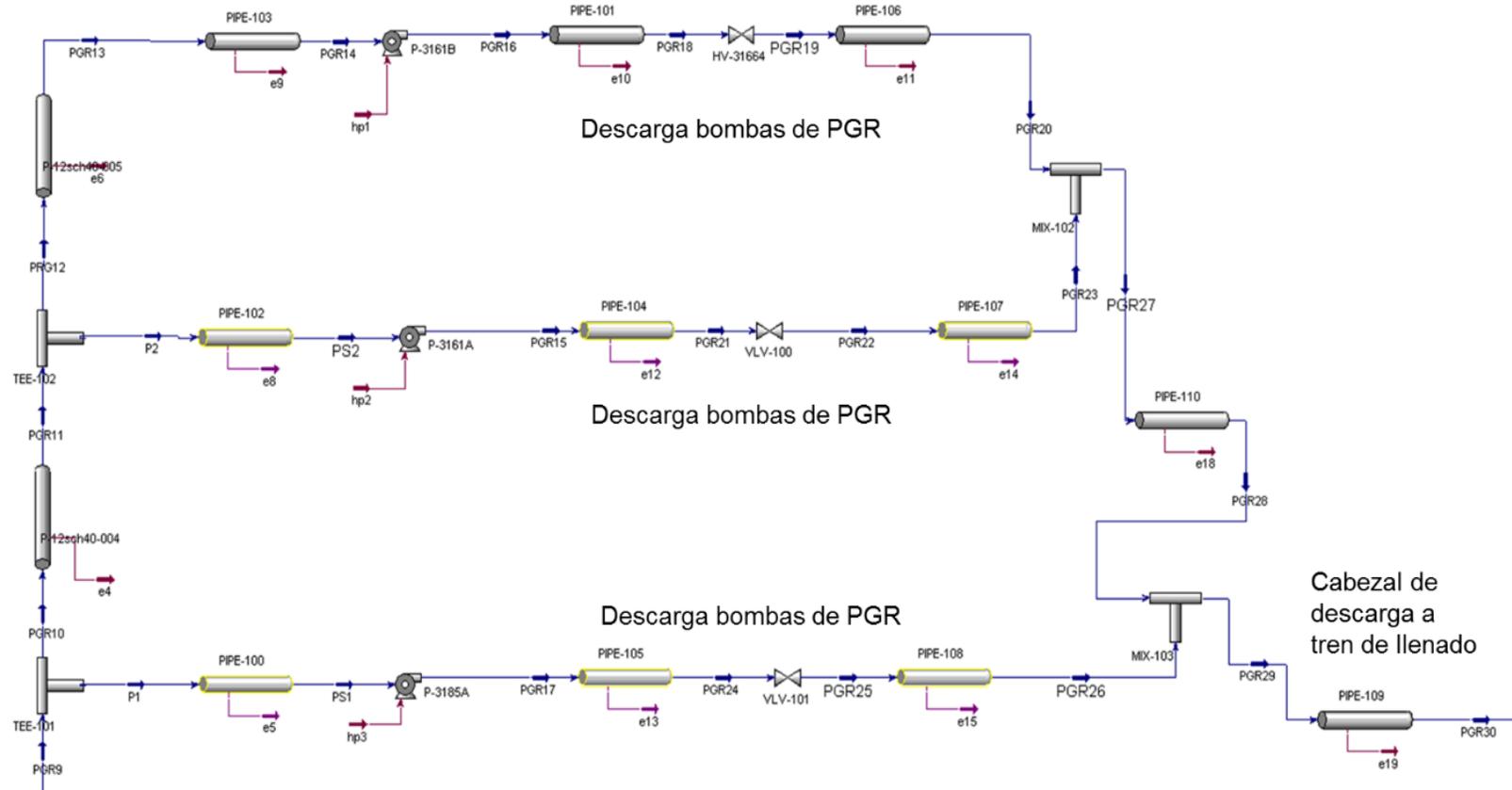
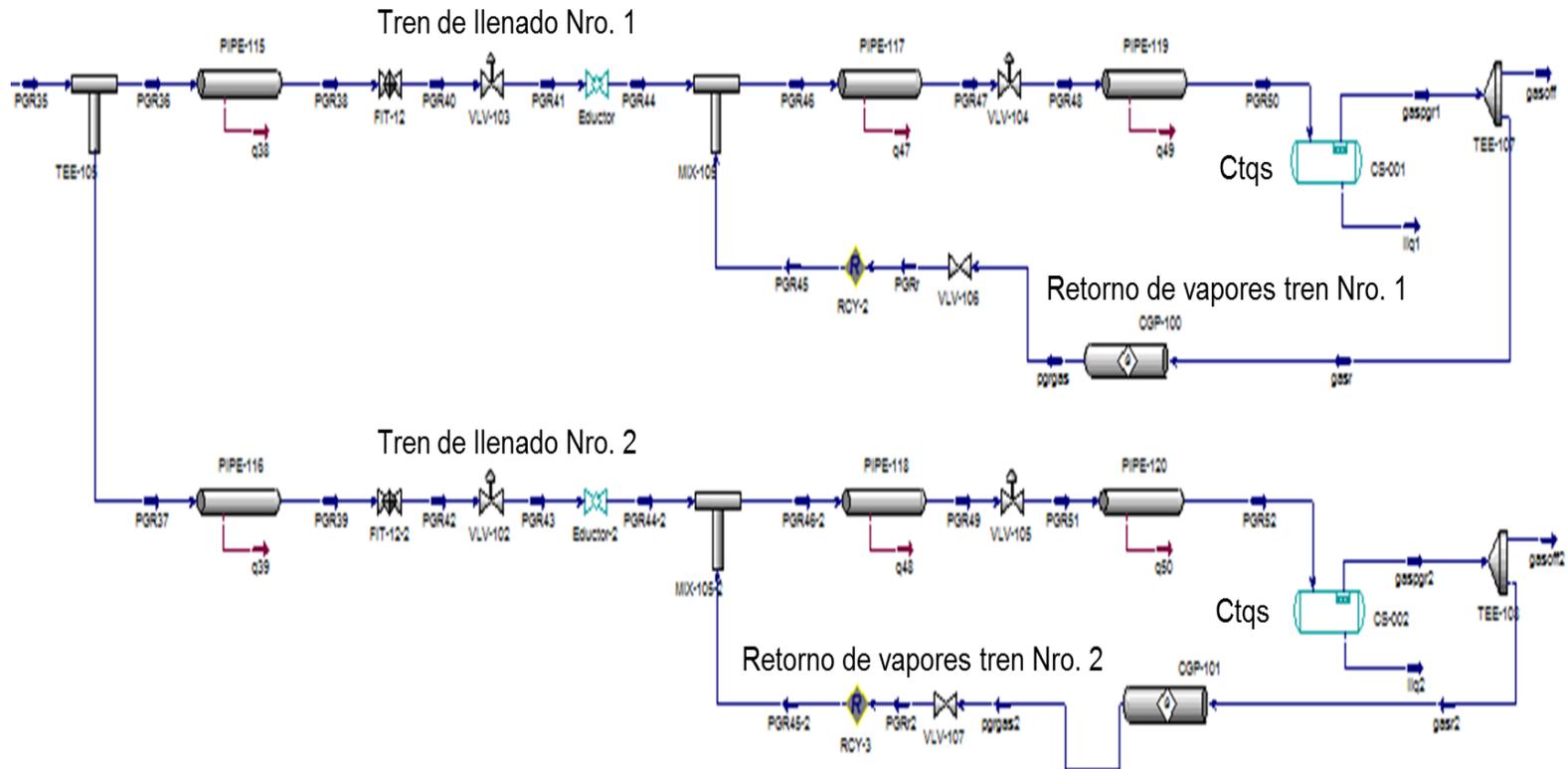


Figura 27. Componentes configurados en la descarga de la bomba al tren de llenado.



**Figura 28.** Componentes configurados en los trenes de llenado a las cisternas, incluyendo el sistema de retorno de vapores.



**4.3.1 Caso 1. Base de simulación 10000 bpd.** Según los resultados de la simulación en estado estacionario, entre la bala y la entrada de succión a las bombas se pierden 7 psi, la presión de descarga de la bomba corresponde a 468 psi y en el desvío hacia la circulación y el tren de llenado el sistema reporta 293.82 psi (Tabla 4.4); este último valor evidencia la pérdida de presión que existe entre la descarga de la bomba y este punto, debido a la platina de orificio y a los accesorios instalados. La recirculación presenta un flujo de 3200 bpd hacia las balas de almacenamiento, mientras 6800 bpd continúan hacia los trenes de llenado. A cada tren de llenado ingresan 3400 bls/d, con una temperatura de 90,6°F y una presión de 293,7 psi. A la entrada de las cisternas llega el producto a 201 psi. Estas condiciones de flujo concuerdan con los datos históricos analizados (capítulo 3) e indican que el sistema se encuentra balanceado (operando las dos cisternas) en un estado cuasi-estacionario; la línea de retorno de vapores no reporta flujo de PGR hacia el eductor, presenta una presión de 191,1 psi y 85,99 °F (Tabla 4.4). Según lo anterior, la simulación para este flujo genera valores representativos de la operación del proceso industrial.

**Tabla 26.** Condiciones operativas para la simulación según caso 1

General		Succion	Descarga	Recir.		Entrada a trenes		Entrada a CTQS	
CASO 1	BASE	PGR14	PGR16	TEE 103		TEE 105		PGR50	PGR52
Stream Name	Liq. Phase	Liq. Phase	Liq. Phase	PGR31	PGR32	PGR36	PGR37	Liq. Phase	Liq. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1	1	1	1	1,00	1,00
Temperature [F]	86	85,96	91,35	90,58	90,58	90,58	90,58	89,94	89,94
Pressure [psig]	195	188,46	468,46	293,82	293,82	293,71	293,71	184,95	184,95
Mass Flow [lb/hr]	75712,78	75712,78	75712,78	24228,09	51484,69	25742,34	25742,34	25734,83	25734,83
Liq Vol Flow [barrel/day]	10000	10000,00	10000,00	3200,00	6800,00	3400,00	3400,00	3399,01	3399,01

El flujo enviado hacia los brazos de llenado fue cambiado para operar en un brazo con un 40% del flujo total, mientras el restante fue especificado en el otro brazo; el flujo en el brazo uno corresponde a 2720 bls/d (Tabla 4.5). El cambio referido ocasionó que la cisterna correspondiente y su sistema de retorno de vapores se presionara a 293.7 psi y 200.4 psi, respectivamente; con esto el sistema de retorno del otro brazo presentó un flujo de vapor de 16 bls/d debido a la

disminución en la presión (180 psi). A su vez no se presente flujo por el sistema de retorno de una de las cisternas, debido a que el producto en estas condiciones está un 40% en estado líquido, generando pérdida de eficiencia del eductor y un mayor presionamiento de la cisterna, según el análisis de datos y análisis de condiciones operativas, cuando el flujo de un brazo está por debajo del flujo requerido, el eductor pierde eficiencia y al no retirar los gases de la cisterna, esta tiende a presentar sobrepresión.

**Tabla 27.** Respuesta del sistema al cambio en los flujos según caso 1

Ajuste flujo brazos	Brazo1	Brazo2	Cisterna 1	Cisterna 2	Retorno 1		Retorno 2
CASO 1	PGR44	PGR44-2	Liq1	liq2	PGR45		PGR45-2
Stream Name	Liq. Phase	Liq. Phase	Liq. Phase	Liq. Phase	V. Phase	Liq. Phase	V. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1	0,61	0,39	1,00
Temperature [F]	90,58	90,08	89,88	85,31	85,97	85,97	87,86
Pressure [psig]	293,71	200,43	184,78	171,86	190,51	190,51	179,16
Liq Vol Flow [barrel/day]	2720	4080	2718,40	3984,83	0	0	16,23

La Tabla 4.6, muestra los resultados del aumento en la presión de los brazos de retorno de vapores, según las condiciones del caso 1. Según los datos de esta tabla, los brazos de retorno reportan 82,31 °F y 164,16 psi y, 87,86 °F y 179,16 psi, respectivamente.

**Tabla 28.** Respuesta del sistema al aumento en las presiones del tren de llenado según caso 1.

CASO 1	Liq1		liq2		PGR45		PGR45-2	
Stream Name	V. Phase	Liq. Phase						
Vapour / Phase Fraction	0	1	0	1	0,99	1,05E-03	0,99	4,68E-05
Temperature [F]	79,48	79,48	85,31	85,31	82,31	82,31	87,86	87,86
Pressure [psig]	156,95	156,95	171,86	171,86	164,16	164,16	179,16	179,16
Molar Flow [MMSCFD]	0,00	4,18	0,00	6,45	0,15	1,62E-04	2,65E-02	1,24E-06
Mass Flow [lb/hr]	0,00	19546,77	0,00	30168,97	712,87	0,75619175	123,18	5,80E-03
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	0,00	2581,86	0,00	3984,83	93,99	9,99E-02	16,23	7,66E-04

La tabla 4.7, muestra datos de la simulación que sugieren inestabilidad en el sistema de retorno de vapores cuando varía la presión o la temperatura, manteniendo todas las condiciones anteriores del caso 1, como se evidencia con

temperaturas de 86,02 y presiones de 193,10 y 190,68 no hay flujo por el sistema de retorno de vapores.

**Tabla 29.** Resultados al variar presión y temperatura, caso 1.

CASO 1	Liq1		liq2		PGR45		PGR45-2	
Stream Name	V. Phase	Liq. Phase						
Vapour / Phase Fraction	1	0	0	1,00	0,15	0,85	0,26	0,74
Temperature [F]	90,01	90,01	84,98	84,98	86,09	86,09	86,02	86,02
Pressure [psig]	187,37	187,37	170,99	170,99	193,10	193,10	190,68	190,68
Molar Flow [MMSCFD]	4,40	0	0	6,44	0,00	0,00	0,00	0,00
Mass Flow [lb/hr]	20593,88	0	0	30119,50	0,00	0,00	0,00	0,00
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	2720,00	0	0	3978,30	0,00	0,00	0,00	0,00

**4.3.2 Caso 2. Base de simulación 11.000 bls/d.** La Tabla 4.8 muestra los resultados obtenidos para un flujo de operación de 11000 bls/d en el sistema. Según esta tabla, en las descargas de las bombas se obtienen 528 psi y en el desvío hacia la circulación y los trenes de llenado el sistema reporta 413 psi; la simulación fue ajustada para obtener un flujo de 3300 bls/d hacia la circulación y 7700 bls/d hacia los trenes de llenado. La simulación también reporta que los trenes de llenado manipulan 3850 bls/d cada uno, con una temperatura de 92,02°F, una presión de entrada de 413,64 psi y una presión de entrada a las cisternas de 172 psi. Estas condiciones concuerdan con los datos históricos de operación analizados en el capítulo 3. Según lo anterior, la simulación para este flujo genera valores representativos de la operación del proceso industrial.

**Tabla 30.** Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 2.

CASO 2	base9	PGR14	PGR16	PGR30	TEE 103		TEE 105	
Stream Name	L. Phase	L. Phase	L. Phase	L. Phase	PGR31	PGR32	PGR36	PGR37
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1	1	1	1	1
Temperature [F]	86	85,96	92,48	92,02	92,02	92,02	92,02	92,02
Pressure [psig]	195	188,45	528,45	413,78	413,78	413,78	413,64	413,64
Liq Vol Flow [barrel/day]	11000	11000	11000	11000	3300	7700	3850,00	3850,00

CASO 2	PGR50		PGR52		PGR45		PGR45 2	
Stream Name	V. Phase	L. Phase						
Vapour / Phase Fraction	3,26E-02	0,97	3,28E-02	0,97	0,99	3,51E-03	1,00	3,19E-03
Temperature [F]	85,62	85,62	85,60	85,60	88,15	88,15	88,13	88,13
Pressure [psig]	172,54	172,54	172,48	172,48	179,73	179,73	179,68	179,68
Liq Vol Flow [barrel/day]	125,46	3749,12	126,09	3748,75	24,49	8,71E-02	24,75	7,98E-02

La Tabla 4.9, presenta los resultados del aumento en la presión de los brazos de retorno de vapores a cada tren de llenado (PGR45 y PGR45-2), según las condiciones del caso 2. Según esta tabla, un aumento en la presión de los trenes de llenado causa inestabilidad en el proceso de cargue y tiende a anular el flujo en los brazos de retorno (eductores). Como se observa en la tabla, las cisternas presentan presiones menores (223 y 284 psi) que las respectivas de sus brazos de llenado (230 y 290 psi), lo cual provoca en la operación de planta, la suspensión del cargue por disparo de las válvulas de seguridad ante un llenado excesivo e incontrolado de las cisternas.

**Tabla 31.** Respuesta del sistema para cambio en la presión de los trenes según caso 2.

CASO 2	Liq 1		Liq 2		PGR45		PGR45 2
Stream Name	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	V. Phase	L. Phase	L. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	0	1	0	1,99E-02	0,98	1
Temperature [F]	91,08	91,08	91,40	91,40	86,60	86,60	86,98
Pressure [psig]	223,38	223,38	284,04	284,04	229,84	229,84	290,50
Molar Flow [MMSCFD]	6,23	0,00	6,23	0,00	0,00	0,00	0,00
Mass Flow [lb/hr]	29149,42	0,00	29149,42	0,00	0,00	0,00	0,00
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	3850	0	3850	0	0	0	0

De otro lado, una disminución en la relación de flujos de recirculación a las balas de PGR y hacia los trenes de llenado, mantiene la estabilidad del sistema durante el cargue de las cisternas. Manteniendo el flujo del caso 2, el sistema de llenado reporta estabilidad en el cargue (Tabla 4.10). La disminución en las presiones de las líneas de llenado mantiene el flujo de PGR hacia las cisternas y conduce a una operación estable por recirculación de gases en los brazos de retorno (eductores).

**Tabla 32.** Respuesta del sistema para la disminución en la relación recirculación balas a flujo hacia los trenes de llenado, según caso 2.

	Recirculación		Trenes de llenado		Entrada cisternas		Retorno de Vapores	
CASO 2	PGR31	PGR32	PGR44	PGR44 2	PGR50	PGR52	PGR45	PGR45 2
Stream Name	L. Phase	L. Phase	L. Phase	L. Phase	L. Phase	L. Phase	V. Phase	V. Phase
Vapour / Phase Fraction	0,00	0,00	1,00	1,00	0,97	0,94	1,00	1
Temperature [F]	92,02	92,02	91,59	91,57	85,41	81,72	88,02	86,64
Pressure [psig]	413,78	413,78	320,42	317,40	171,99	162,41	179,35	174,08
Liq Vol Flow [barrel/day]	1100,00	9900,00	3960,00	5940,00	3852,31	5673,89	27,28	84,31

**4.3.3 Caso 3. Base de simulación 14.000 bls/d.** La Tabla 4.11 muestra los resultados obtenidos con una base de flujo de 14000 bls/d. De acuerdo a la simulación, en el desvío hacia la circulación y el tren de llenado el sistema presenta una presión de 379 psi. El flujo de recirculación hacia las balas de PGR fue establecido en 2800 bls/d, mientras que el flujo hacia los trenes de llenado fue fijado en 11200 bls/d (5600 bls/d para cada tren. Las variables de entrada a las cisternas reportan valores de 230,80 psi, y 90,7 °F, mientras que los brazos de retorno de vapores reportan los valores de 238,88 psi y 86,67 °F, con lo cual no hay flujo por el sistema de retorno, para este caso. Lo anterior implica que las cisternas se sobre presionan ocasionando el disparo de las válvulas de seguridad. De otro lado, la simulación reporta una disminución adecuada en la presión de los brazos de retorno de vapores cuando la temperatura disminuye 20 °F (Tabla 4.12). La presión en los brazos a 70 °F conduce a una estabilización en la operación de llenado de las cisternas debido al flujo a través de los eductores.

**Tabla 33.** Respuesta del sistema para un flujo de 14000 bls/d según caso 3.

caso3	base14	PGR16	PGR31	PGR32	PGR50	PGR52	PGR45	PGR45-2
Stream Name	L. Phase							
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1	1	1	0,99	0,99
Temperature [F]	86	92,29	91,72	91,72	90,97	90,97	86,67	86,67
Pressure [psig]	195	518,39	379,19	379,19	230,80	230,80	238,88	238,88
Liq Vol Flow [barrel/day]	14000	14000	2800	11200	5600	5600	0	0

**Tabla 34.** Respuesta del sistema para una disminución en la temperatura según caso 3

Ajustando presión y temperatura en sistema de retorno de vapores								
caso3	PGR44	PGR44-2	PGR50		PGR52		PGR45	PGR45-2
Stream Name	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	V. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	1	0,13	0,87	0,18	0,82	1	1
Temperature [F]	91,25	91,25	70,91	70,91	65,89	65,89	78,59	76,13
Pressure [psig]	283,3497	283,35	136,92	136,92	126,09	126,09	153,43	147,17
Std Ideal Liq Vol Flow [ba	5600	5600	779,17	5083,58	1092,91	4964,23	262,74	457,14

Por otra parte, un cambio en la relación de los flujos transportados por cada tren de llenado conduce a condiciones de operación diferentes en cada cisterna; la Tabla 4.13 presenta los resultados obtenidos al cambiar la mencionada relación de flujos. Las condiciones obtenidas con esta variación conducen a que las condiciones en los brazos de retorno de vapores se desequilibren; aunque el brazo de menor flujo reporta menor presión en el brazo de retorno de vapores, este valor de presión no es suficiente para habilitar el flujo a través del correspondiente eductor, conduciendo a un sistema sin estabilidad. Eventualmente, una menor relación entre los flujos dispuestos para cada brazo puede conducir a que el brazo con el flujo dentro los límites operativos operen de forma adecuada.

**Tabla 35.** Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 3.

Se ajusto el flujo a los trenes de llenado												
caso3	PGR44		PGR44-2		PGR50		PGR52		PGR45		PGR45-2	
Stream Name	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	
Vapour / Phase Fraction	1	1	1,17E-02	0,99	1	0,21	0,79	1,63E-03	0,99			
Temperature [F]	91,26	91,25	88,44	88,44	91,00	86,01	86,01	86,76	86,76			
Pressure [psig]	284,27	282,33	180,33	180,33	236,42	188,11	188,11	245,15	245,15			
Std Ideal Liq Vol Flow [ba]	5040	6160	58,3261	4981,67	6160	0	0	0	0			

La tabla 4.14 ilustra los resultados obtenidos al realizar ajustes en la presión del sistema de retorno de vapores y manteniendo el resto de condiciones del Caso 3, se puede evidenciar que en el sistema de retorno de vapores el producto se encuentra en estado vapor, favoreciendo el funcionamiento del eductor, pero con temperaturas inferiores a 80° F.

**Tabla 36.** Respuesta del sistema para una variación de la presión en el sistema de retorno de vapores

caso3	PGR46		PGR46-2		PGR50		PGR52		PGR45	PGR45-2
Stream Name	V. Phase	L. Phase	V. Phase	V. Phase						
Vapour / Phase Fraction	0,13	0,87	0,13	0,87	0,16	0,84	0,17	0,83	1	1
Temperature [F]	76,63	76,63	76,16	76,16	69,13	69,13	66,15	66,15	77,21	76,55
Pressure [psig]	149,96	149,96	149,12	149,12	133,04	133,04	126,88	126,88	149,96	149,12
Molar Flow [MMSCFD]	1,18	7,61	1,34	9,28	1,45	7,34	1,77	8,85	0,63	0,65
Mass Flow [lb/hr]	5488,41	35593,04	6243,67	43409,28	6740,83	34340,62	8249,76	41403,20	2922,21	3013,89
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	724,09	4701,40	823,50	5733,77	889,49	4535,99	1088,43	5468,84	385,48	397,27

**4.3.4 Caso 4. Base de simulación 7.000 bls/d.** La tabla 4.15, presenta los resultados obtenidos considerando un flujo de 7000 bls/d. Según los resultados, en la descarga de la bomba se obtiene 518 psi y en la recirculación hacia las balas y el tren de llenado el sistema exhibe 401,57 psi; la simulación fue configurada para obtener un flujo de 2100 bls/d en la recirculación hacia las balas y 4900 bls/d hacia los trenes de llenado, con lo cual estos reportaron flujos de 2352 bls/d y 2548 bls/d, respectivamente. Según los datos obtenidos en la simulación (Tabla 4.15), se obtienen presiones de 165 psi en los brazos de retorno de vapores, lo cual ocasiona que los flujos de retorno se encuentren en fase vapor, favoreciendo la presión en las cisternas.

**Tabla 37.** Respuesta del sistema para la disminución en los flujos según caso 4.

Caso4 base 7	base 7	PGR16	PGR31	PGR32	PGR36	PGR37	PGR50	PGR52	PGR45	PGR45-2
Stream Name	L. Phase	V. Phase	V. Phase							
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1	1	1	0,91	0,91	0,99	1,00
Temperature [F]	86	92,30	91,81	91,81	91,81	91,81	79,90	79,81	82,47	82,48
Pressure [psig]	195	518,50	401,57	401,57	401,51	401,51	157,91	157,68	164,45	164,48
Liq Vol Flow [barrel/day]	7000	7000	2100	4900	2352	2548	2228,67	2413,25	95,69	102,75

De otro lado, una elevación en la presión de entrada a los trenes de llenado conlleva a una elevación en la presión de los correspondientes brazos de retorno de vapor, afectando el desempeño de los cargues de las cisternas (Tabla 4.16). Según la tabla 4.16, el flujo por uno de los brazos de retorno de vapores se encuentra fase líquida, desbalanceando el sistema al favorecer el flujo por el tren que presenta menor presión en su brazo de retorno. Lo anterior conduciría al disparo de las válvulas de seguridad de la cisterna del primer brazo por sobrepresión.

**Tabla 38.** Respuesta del sistema para un aumento en la presión de entrada a los trenes de llenado según caso 4.

Caso4	PGR44	PGR44-2	PGR46	PGR46-2		PGR50	PGR52		PGR45	PGR45-2	
Stream Name	L. Phase	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	1	1	1,46E-02	0,98	1	2,73E-02	0,97	1	1,76E-02	0,98
Temperature [F]	91,39	91,39	86,83	86,95	86,95	86,79	84,39	84,39	80	85	85
Pressure [psig]	309,96	309,81	200,00	180,00	180,00	193,63	172,51	172,51	200,00	180	180
Molar Flow [MMSCFD]	3,81	4,13	6,07	0,10	6,81	6,07	0,19	6,72	2,26	4,90E-02	2,74
Mass Flow [lb/hr]	17807,65	19291,62	28353,76	466,41	31806,51	28353,76	871,72	31401,21	10546,12	224,84	12756,47
Std Ideal Liq Vol Flow [barrel/day]	2352	2548	3744,63	61,34	4200,94	3744,63	114,73	4147,55	1392,63	29,48	1684,80

El cambio en los flujos de los trenes de llenado a 2940 bls/d y 1960 bls/d, respectivamente conduce a una mejor condición operativa (Tabla 4.17). Según la Tabla 4.17, los resultados indican que los flujos en los brazos de retorno se encuentran en fase vapor, lo cual favorece el desempeño de los cargues de las cisternas.

**Tabla 39.** Respuesta del sistema para diferentes valores en los flujos de los trenes de llenado según caso 4

Caso4	PGR36	PGR37	PGR50		PGR52		PGR45	PGR45-2
Stream Name	L. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	L. Phase	V. Phase	V. Phase
Vapour / Phase Fraction	1	1	2,45E-02	0,98	0,15	0,85	1,00	1
Temperature [F]	91,81	91,81	86,58	86,58	68,06	68,06	88,69	70,73
Pressure [psig]	401,51	401,51	175,17	175,17	130,86	130,86	181,34	137,61
Std Ideal Liq Vol Flow [barre]	2940	1960	71,64	2878,96	302,04	1756,82	10,58	98,86

Los resultados de las simulaciones reportadas con los anteriores casos conducen a concluir que el sistema presenta inestabilidad ante cualquier cambio realizado en las condiciones de la presión de la bomba, flujo en los trenes de llenado y nivel de la cisterna. Lo anterior se confirma en planta con los registros de los DCS que muestran oscilaciones en las presiones y los flujos cuando uno de los componentes del sistema (válvulas *set stop*, válvulas de solenoide o válvulas de control) presenta falla; en estos casos los controladores no muestran una acción eficiente para mantener el proceso de llenado y cumplir con los tiempos estipulados en cada cargue. La tendencia a la inestabilidad en la operación del

sistema explica que en los registros de los controladores las oscilaciones o inestabilidades sobrepasen los límites de operación estipulados por el sistema de llenado, lo cual puede afectar diversos componentes del mismo.

Algunas de las hipótesis o causas posibles definidas durante el desarrollo del ACR, se validaron con las simulaciones realizadas con respecto al flujo y presión manejada en el sistema de recirculación. Los resultados muestran que la presión definida en el diseño del sistema debe ser mantenida durante el cargue con el fin de no afectar la disponibilidad de las válvulas y sus componentes. Asimismo, las fluctuaciones en la presión originan inestabilidad en el brazo de recirculación, lo cual conduce a fallas durante el proceso de llenado. Los resultados de la simulación de las presiones de descarga de las bombas antes y después de las platinas de orificios instaladas en la descarga de las bombas MP 3161 A/B, corroboran que estos elementos son necesarios con el fin de mantener las presiones y el flujo requerido en los trenes de cargue, para no afectar algunos componentes y mantener las condiciones operacionales requeridas por el sistema.

Los resultados de la simulación confirman que el sistema puede cumplir con los compromisos de entrega, con la restricción de que se mantengan las condiciones operacionales definidas en el diseño del sistema. Como se podrá apreciar en el capítulo de análisis de causa raíz (capítulo 5), las válvulas solenoides son afectadas por las presiones excesivas que se presentan en el sistema, ocasionado por fallas en el control del flujo, lo cual afecta la eficiencia del educador.

## **5. DESARROLLO DEL ANALISIS DE CAUSA RAIZ**

Este capítulo presenta los resultados de la aplicación del ACR en el sistema de llenado de propileno de la GRB (U-3160). La metodología fue descrita sucintamente en el capítulo II. Durante el desarrollo del ACR se utilizó la información y el conocimiento generado sobre el sistema en el análisis de datos y la simulación, adicionalmente estas dos herramientas se utilizaron para validar o descartar algunas causas adicionales identificadas durante el desarrollo del RCA.

### **5.1 FASE I: CAPTURA DE INCIDENTES.**

El evento previo seleccionado para el inicio del ACR corresponde a la falla en el despacho a carro tanques.

#### **5.1.1 Registro del incidente.**

- Descripción corta. ¿Qué sucedió? No fue posible el despacho de PGR, durante dos días. El día martes 17 de febrero del 2015, se detuvo por completo el despacho de producto a carro tanques. Se reanudó el día miércoles 18 de febrero en turno B, luego de la normalización del sistema de llenado de cisternas
- ¿Dónde sucedió el incidente? En el sistema de llenado de Propileno de la estación de GLP U3160 del departamento de Materias Primas de la GRB.
- ¿Cómo sucedió el incidente? La válvula PCV 31663 del sistema de recirculación presentó falla en el sistema de control, por lo cual se operó manualmente. Lo anterior ocasionó fallas en las válvulas set stop de los brazos de cargue.

- ¿Consecuencia real de lo sucedido? Incumplimiento en la entrega de producto a clientes. También, un impacto económico de USD \$ 63900 por desvió de 2570 barriles de PGR hacia GLP.

**5.1.2 Valoración del incidente previo.** De acuerdo a la matriz de riesgo (RAM) definida en la GRB, el incidente previo fue valorado como de alto impacto (H). La tabla 10 muestra los resultados por consecuencias según la matriz RAM.[24]

La evaluación y clasificación de los riesgos debe hacerse teniendo en cuenta los siguientes tres elementos: El primero es la categoría de consecuencia con la cual está relacionada la evaluación: Personas (PE), Económica (EC), Ambiental (MA), Cliente (CL) e Imagen (IM). El segundo corresponde a la gravedad de las consecuencias: 0-5. El tercero corresponde al nivel de probabilidad del suceso: A-E.

**Tabla 40.** Resultados valoración incidente previo en la U-3160 de PGR.

RESULTADOS VALORACION RAM	
	VALORACIÓN
PERSONAS	0E - N
ECONÓMICA	4E - H
AMBIENTAL	0E - N
CLIENTES	2E - M
IMAGEN DE LA EMPRESA	1E - L
NIVEL DE INVESTIGACIÓN	H - N2

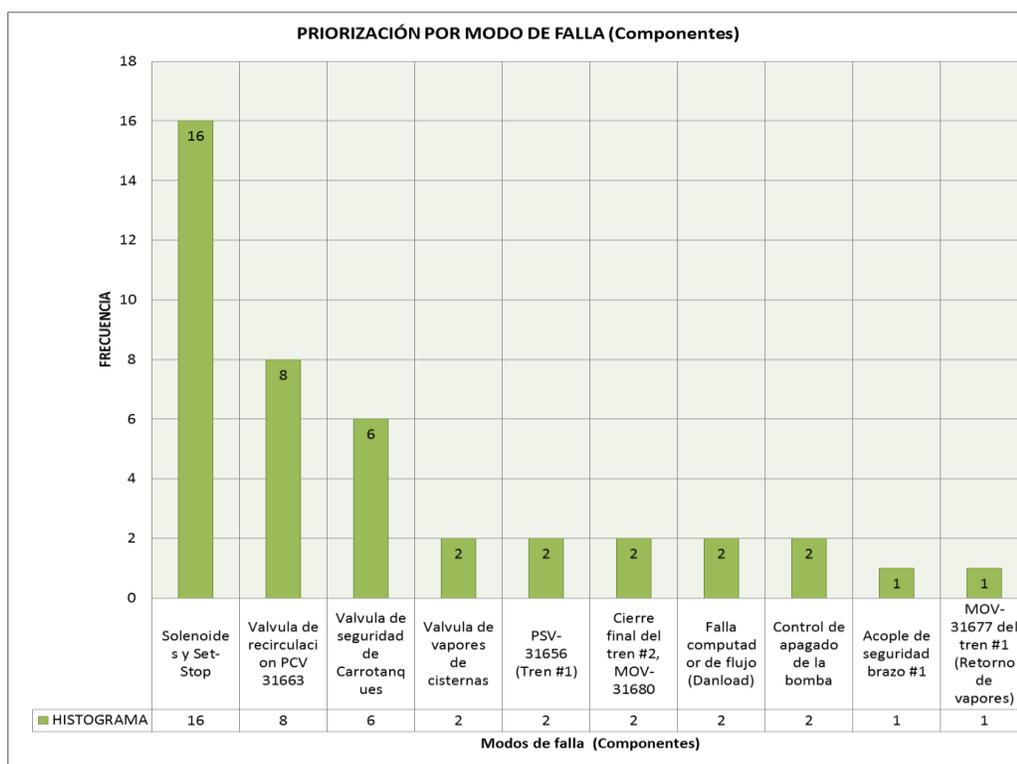
Los resultados en la tabla 5.1 nos indican que el mayor impacto está relacionado con la parte económica (4E-H) y la afectación a clientes (2E-M).

## 5.2 FASE II: ANÁLISIS DE LA PROBLEMÁTICA.

**5.2.1 Identificación de la problemática.** Siguiendo la metodología y con la participación de un equipo multidisciplinario, los antecedentes de los incidentes en el sistema de PGR entre los años 2013-2015, fueron analizados por medio de

datos históricos del proceso. La figura 5.1 presenta el histograma para las fallas del sistema agrupadas por componentes. Según este histograma el mayor número de fallas se registra en las válvulas set stop y válvulas solenoides ubicadas en los brazos de llenado de carro tanques con un porcentaje de 38%; como segundo componente causante de fallas se encuentra el sistema de recirculación con un 19%. Ver anexo 2 relacionado con la línea de tiempo de los incidentes presentados en el llenadero de propileno.

**Figura 29.** Agrupación de fallas por componentes del sistema de cargue de propileno (2014-2015).



Las válvulas *set stop* y solenoides tienen reporte de 16 eventos, que ocasionaron corte en el suministro de propileno a carro tanques, compra de nuevas válvulas solenoides y liberación de PGR al ambiente y a la tea. El sistema de recirculación registra 8 eventos de falla, los cuales causaron suspensión del despacho de PGR, fallas en otros componentes y degradación de propileno hacia GLP. Los incidentes

relacionados corresponden a eventos aislados que se reportaron según el primer componente detectado en falla, el cual no necesariamente corresponde a la causa principal del evento; es decir, algunos de los eventos detectados en las válvulas de recirculación pudieron ser consecuencia de una falla en otro componente (por ejemplo, las válvulas *set stop*).

### **5.2.2. Enunciado del problema.**

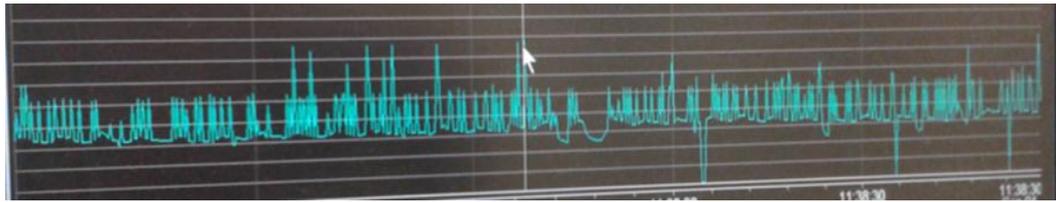
**Desempeño esperado:** El sistema de llenado de propileno (U3160) de la GRB, fue diseñado para tener una disponibilidad de 100% y una confiabilidad de 100%, con cero eventos de seguridad de proceso. El sistema permitiría la entrega de 14 carro tanques diarios (equivalentes a 4500 BPD) de forma simultánea en los dos brazos y con la posibilidad de operar con un solo brazo en caso de que sea requerido. El sistema opera con un flujo de 250 GPM en cada brazo, con una presión máxima de 350 psig, antes de las válvulas *set stop*, un tiempo de llenado de 65 minutos máximo para una cisterna, y recibir el 100% de la producción de propileno de las plantas, evitando el desvío de producto.

**Desempeño Actual:** El sistema de llenado de propileno ofrece una disponibilidad y una confiabilidad inferior al 100% por falla frecuente de componentes, sobrepresión de cisternas y/o disparos de válvulas de seguridad (de cisternas o brazos de llenado). El sistema no permite la entrega mínima a cisternas (4500 BPD), presenta tiempos largos de cargues y causa un desvío o degradación de propileno hacia el sistema de GLP o gas combustible, debido a altos inventarios en las balas de almacenamiento. Asimismo, el llenado de dos cisternas en simultáneo puede incidir en la estabilidad del sistema.

**Impacto:** el impacto del desempeño actual se manifiesta en: (a) desvío por 2570 barriles durante el tiempo del evento; equivalentes a USD \$ 51400, (b) pago de flete por USD \$4100/cisterna, (c) intervención de emergencia de mantenimiento correctivo por USD \$12500.

**5.2.3 Ubicación del problema.** Las causas de los eventos más frecuentes se deben a los relacionados con problemas de sobrepresión en el tren de llenado; la Figura 3.2 muestra las oscilaciones de esta variable durante varios cargues con problemas durante el llenado, alcanzando presiones de 510 psi, frente a una presión normal de 290 psi.

**Figura 30.** Tendencias de presión en el tren de llenado de propileno.



### 5.3 FASE III: ANÁLISIS DE CAUSA RAÍZ.

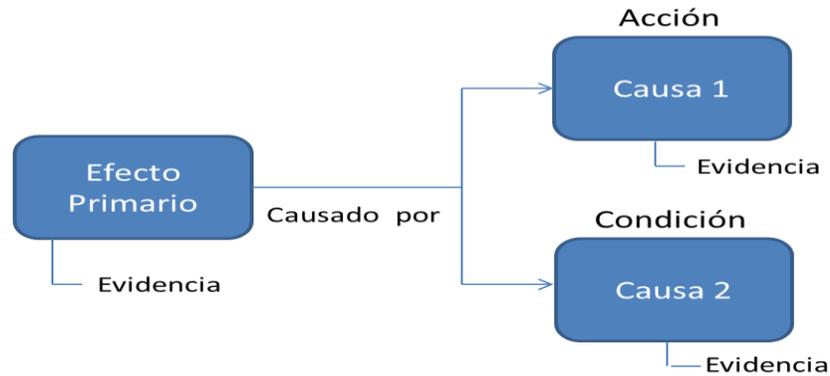
**5.3.1 Paso 5. Análisis de las causas posibles.** Por medio de una lluvia de ideas en el cual participo un equipo multidisciplinario y del diagrama causa efecto (Figura 5.3.) se describieron 44 causas posibles (Anexo 3.), agrupadas en 6 componentes o efectos primarios, los cuales son:

- Falla en válvulas solenoides y set stop.
- Falla en el sistema de recirculación (PCV 31663).
- Fallas en el sistema de retorno de gases.
- Fallas en los computadores de flujo (Danload).
- Fallas en MOV de trenes de llenado.
- Falla en válvulas de seguridad de carro tanques.

Las causas posibles de las fallas en válvulas solenoides y *set stop* corresponden a: mallas inadecuadas en los filtros, baja presión inicial en las cisternas, reparación o ajuste incorrecto de partes de la válvulas, sobrepresión en la válvula cuando finaliza primero una cisterna, falla del controlador, diseño y/o selección

inadecuada de las válvulas solenoides, falla en la operación de la válvula de recirculación y falla en válvula *set stop*.

**Figura 31.** Diagrama general de causa-efecto



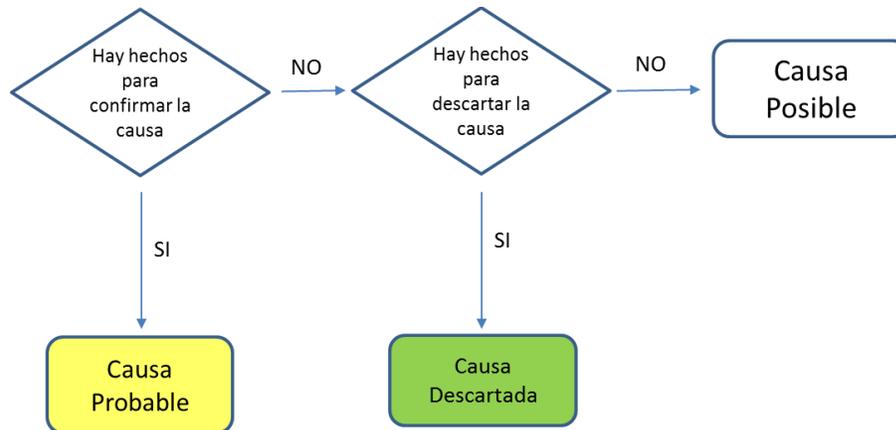
En el sistema de recirculación, se identificaron las siguientes causas posibles: selección inadecuada de la válvula, diámetros incorrectos de las platinas de orificio, selección inadecuada del actuador, estrategia de control y sintonía del lazo inadecuada, presión de descarga alta en las bombas, procedimiento inadecuado de calibración, procedimiento inadecuado de mantenimiento y falta de repuestos adecuados.

En relación al sistema de retorno de gases, las causas posibles corresponden a: falla del sistema neumático de la cisterna, daño de conectores de mangueras de aire de instrumentos, procedimiento inadecuado de operación, mantenimiento deficiente de las válvulas de las cisternas y flujo inadecuado de operación.

Para las fallas relacionadas con los computadores de flujo (*Danload*), se definieron las siguientes causas posibles: diseño inadecuado de liquidación de carro tanques, configuración inadecuada del *Danload*, y sobre corriente por falla en válvulas solenoides. Otras causas posibles de falla en el sistema de llenado pueden ser consultadas en el anexo 3.

**5.3.2 Paso 6. Validación de los datos.** Aquí se realiza una verificación de las causas anteriores, para ver cuál de las causas posibles tienen hechos de apoyo o que la soporten. Su propósito es eliminar o descartar causas que no son verificables. La figura 5.4 ilustra los sub-pasos del proceso de validación. [18]

**Figura 5.4.** Esquema para validar las causas probables



Fuente manual de ACR de Ecopetrol

La disponibilidad de información y de datos, condujo al descarte de diferentes causas posibles, con lo cual se definieron las causas probables; algunas de estas causas son:

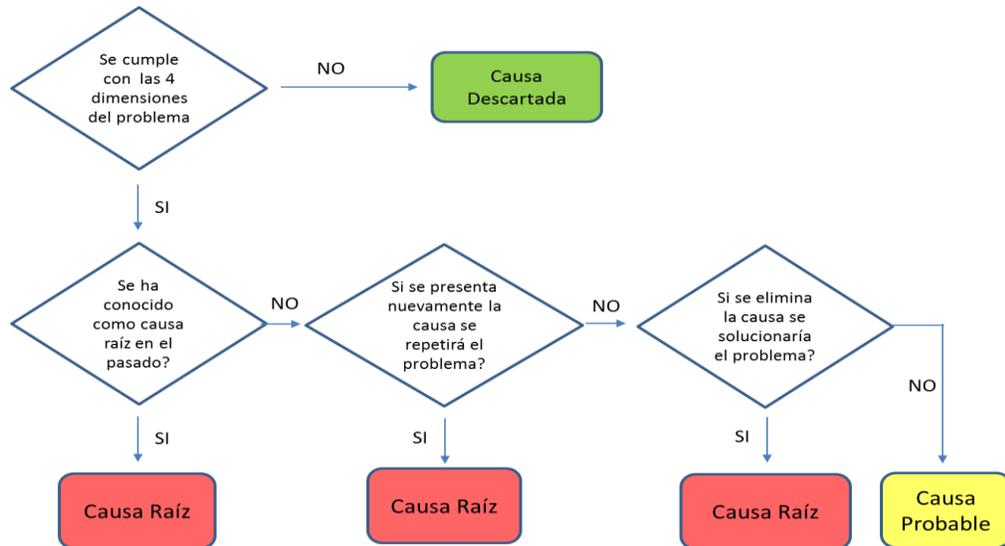
- **Malla inadecuado en los filtros:** se han encontrado partículas en las válvulas de fondo de las cisternas, en el asiento de las válvulas y en los propios filtros durante su limpieza.
- **Calibración inadecuada en válvulas solenoides:** no había claridad sobre el número de vueltas con que debía quedar la válvula normalmente abierta y la normalmente cerrada, causando problemas en el control de flujo.
- **Sobrepresión en la entrada de la válvula:** Los reportes indican que la presión ha sobrepasado los valores recomendados para las válvulas solenoides.

- **Falla Operación válvula de recirculación:** la falla de la recirculación afecta a varios componentes del tren de llenado y a los mismos componentes del actuador eléctrico.
- **Falla en válvula set stop:** las fallas en esta válvula, afecta las solenoides y otros componentes del sistema.
- **Sistema de control de presión en carro tanques:** el sistema utiliza la presión registrada en la línea de vapores para controlar la presión en las cisternas; al presentarse falla en la válvula de vapores de fondo de la cisterna, el sistema no registra la presión real y por lo tanto no detecta un sobrepresión en la cisterna.

La lista completa de causas probables puede ser analizada en el Anexo 4.

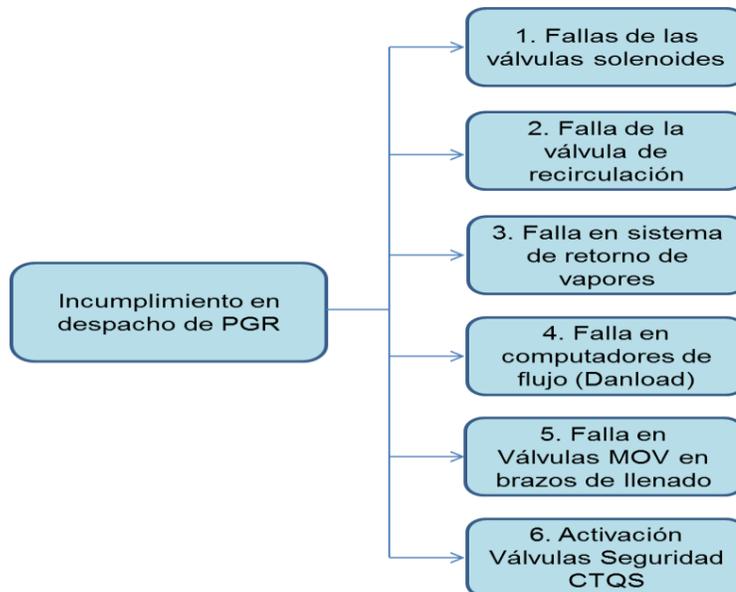
**5.3.3 Paso 7. Verificación de las causas.** En este paso se identificaron cuáles de las causas probables concuerdan con cada dimensión de la descripción del problema (identidad, ubicación, tiempo y duración) la figura 5.5 muestra la metodología utilizada. Las causas que concordaron con la descripción del problema fueron asumidas como causas raíz. [18]

**Figura 32.** Esquema para definir la causa raíz (Fuente manual de ACR de la Ecopetrol)



Las causas definidas como raíz del incumplimiento en el despacho de PGR, se clasificaron dentro de 6 componentes o efectos primarios del tren de llenado, las cuales son: (Figura 5.6).

**Figura 5.6.** Agrupación de fallas por componentes. Fuente: Autor.



**5.3.3.1. Falla en válvula de recirculación.** Esta válvula puede fallar a consecuencia de: capacidad insuficiente de la válvula de reducir presión, daño en tarjeta electrónica, falla acople actuador válvula y mantenimiento inadecuado. En el Anexo 5, se desglosa el diagrama causa-efecto para la válvula de recirculación. Las fallas en esta válvula de recirculación ocasionó cargues de cisternas incompletos debido a valores de presión superiores a 500 psi dentro de los trenes de cargue, tal como se evidencia en la figura 5.7.

Según los resultados de verificación, los tiempos de respuesta de apertura de la válvula de recirculación resultaron poco adecuados para el sistema. Se evidenció que el problema se presenta cuando el sistema está finalizando el cargue debido a un aumento brusco en la presión. El DCS da la orden de cerrar o abrir la válvula de recirculación pero esta válvula no alcanza a responder a tiempo (Figura 5.8). Tal como se evidencia en las tendencias de la Figura 5.9, en el momento de iniciar el cargue la presión alcanza un valor de 518 psi, pese a que la válvula de recirculación indicaba un 100% abierta, con un *setpoint* de 310 psi. Lo anterior reafirma que el tiempo de respuesta de la válvula de la recirculación es muy largo, lo cual impone una incertidumbre en la cantidad de PGR despachado por cisterna.

**Figura 33.** Presionamiento en los trenes de llenado de PGR.



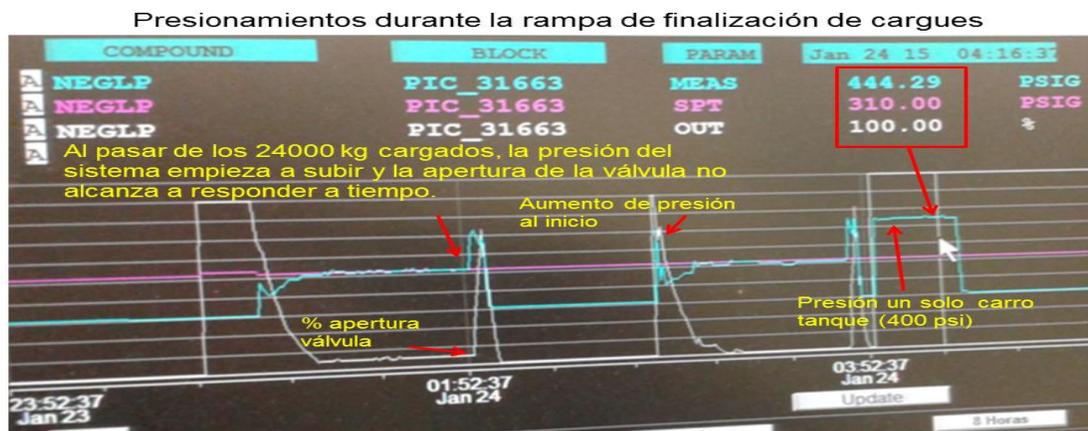
**Figura 34.** Porcentaje de apertura válvula de recirculación VS orden del DCS.



**Figura 35.** Comparación apertura válvula y presión alcanzada

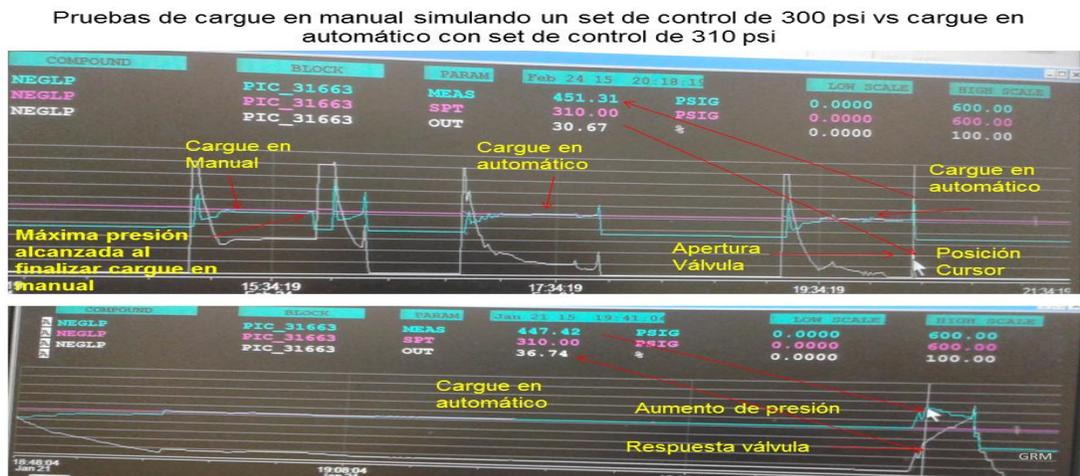


**Figura 36.** Presionamiento durante la rampa de finalización de cargue.

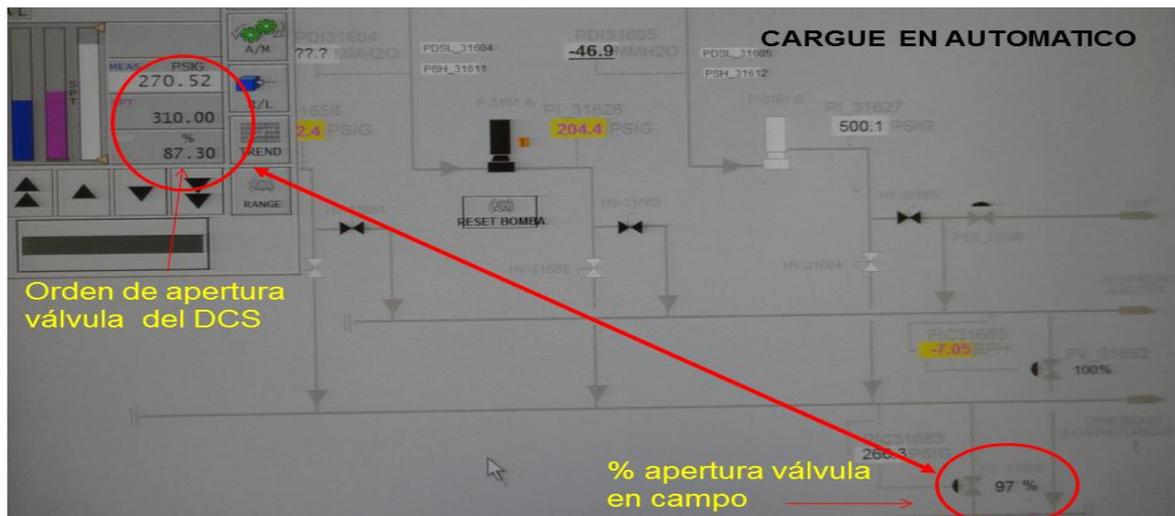


Para solucionar el tiempo de respuesta de la válvula de control, se planteó una disminución en el valor del *setpoint*. Las pruebas con cargues en manual fijando los puntos de control en 300 y 290 psi, indicaron una mejora notable en los tiempos de repuesta de la válvula con una disminución en las presiones al finalizar los cargues (Figura 5.11). Durante los cargues con punto de ajuste en 310 psi y con control automático, se alcanzaron diferencias de hasta de 10% de apertura de la válvula y % de apertura en el DCS (Figura 5.12).

**Figura 37.** Comparaciones entre presiones con cargue manual y automático.



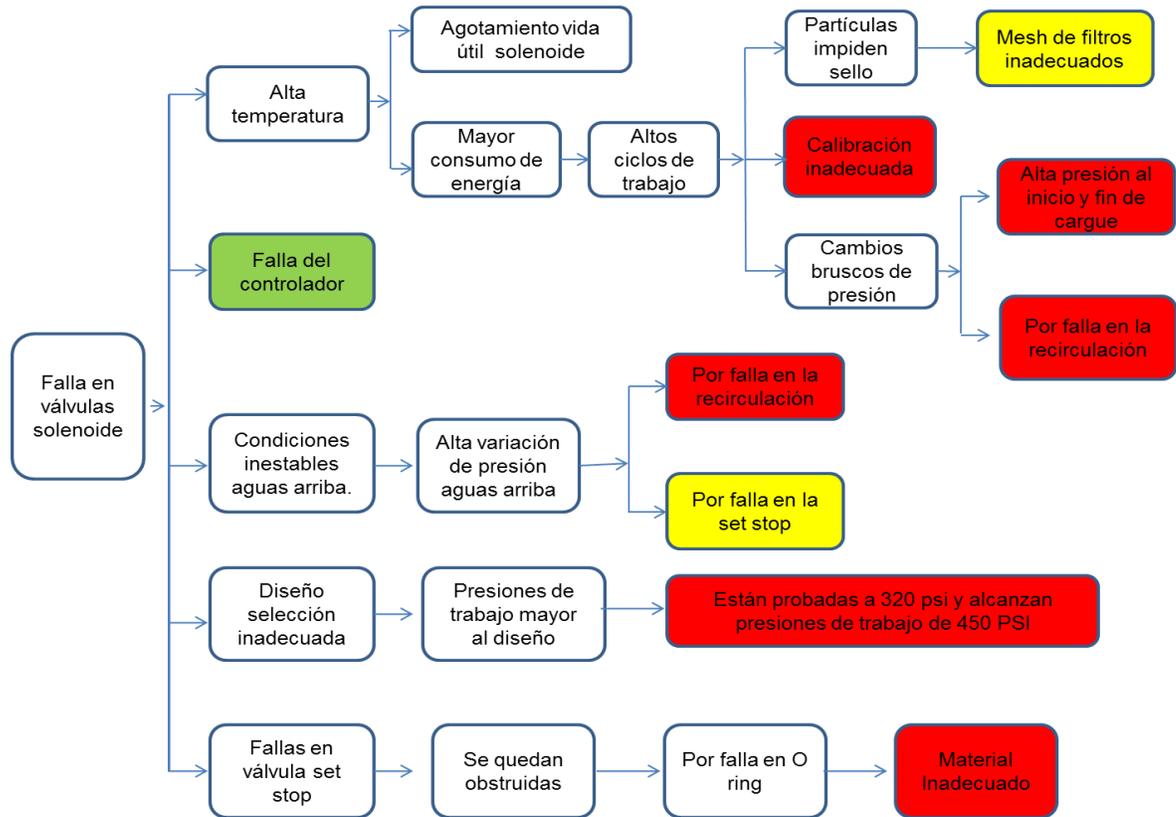
**Figura 5.12.** Diferencia entre % de apertura en el DCS y % apertura de válvula.



### 5.3.3.2. Falla en válvulas solenoides.

Las válvulas solenoides fallan a consecuencia de: fallas en el sistema de recirculación, presiones de operación elevadas, selección inadecuada y fallas en las válvulas *set stop*. El diagrama causa efecto mostrado en la Figura 5.13 soporta las anteriores causas en las válvulas solenoides.

**Figura 38.** Diagrama causa-efecto falla en válvulas solenoides.



El análisis de los eventos de falla en las válvulas solenoides condujo a la identificación de un atascamiento frecuente del pistón accionador debido al sello denominado *O ring* (Figura 5.14). La Figura 5.14, muestra las condiciones de un *O ring* del tapón ubicado dentro del cilindro. Los *O ring* fueron sustituidos por otros de material y dimensiones adecuadas consiguiendo mayor tiempo de estabilidad en el sistema.

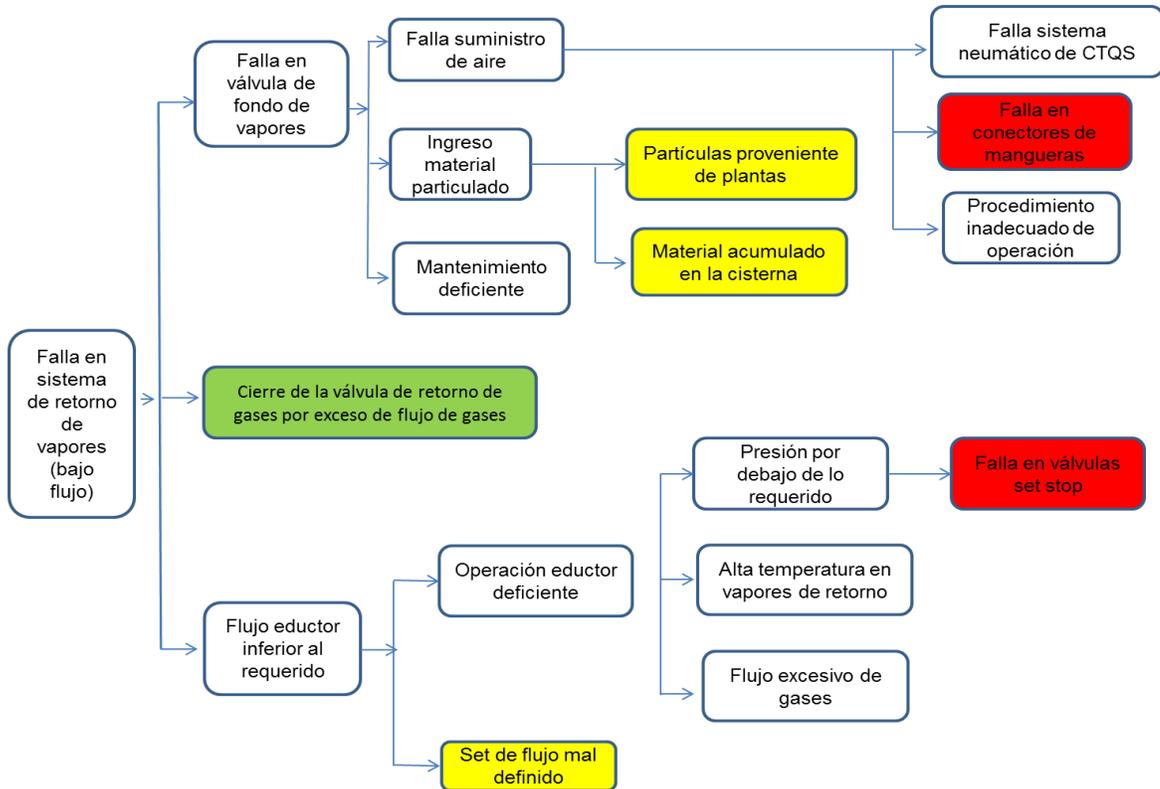
Figura 39. O ring inadecuado en la válvula set stop.



### 5.3.3.3. Falla en Sistema de retorno de vapores.

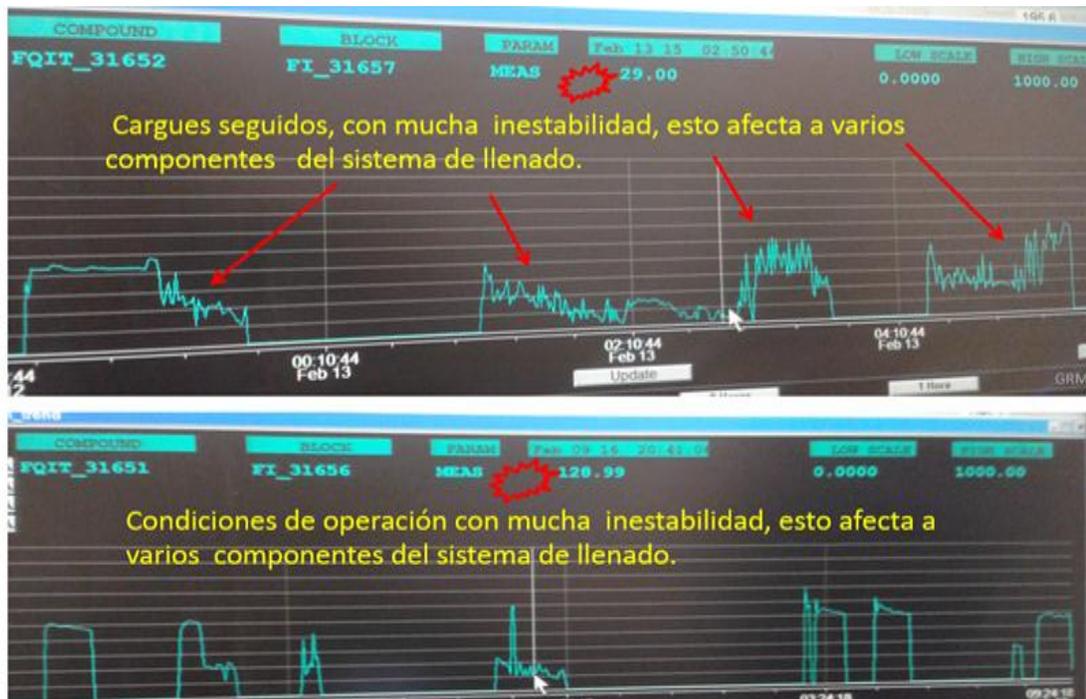
El diagrama causa-efecto para el sistema de retorno de vapores (Figura 5.15) permite identificar fallas en: el sistema neumático de las cisternas, los conectores neumáticos, la operación de la bomba, en las válvulas de control en los trenes de llenado, falla de la válvula set stop y set de flujo mal definido. Las anteriores fallas causan inestabilidad operacional en el eductor que pueden conducir a tiempos de llenado largos y generar cargues incompletos.

Figura 5.15. Diagrama causa-efecto para el sistema de retorno de vapores



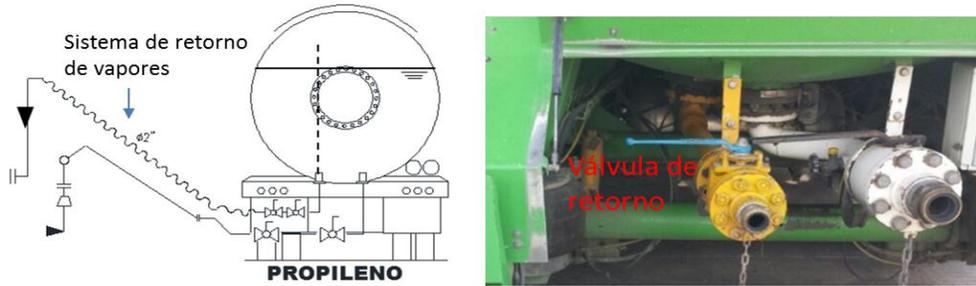
La figura 5.16, muestra la inestabilidad de flujo en el tren de llenado, lo cual impacta la operación del eductor, el cual a su vez ocasiona deficiencias en el sistema de retorno de vapores.

**Figura 40.** Deficiencia de eductores por inestabilidad de flujo



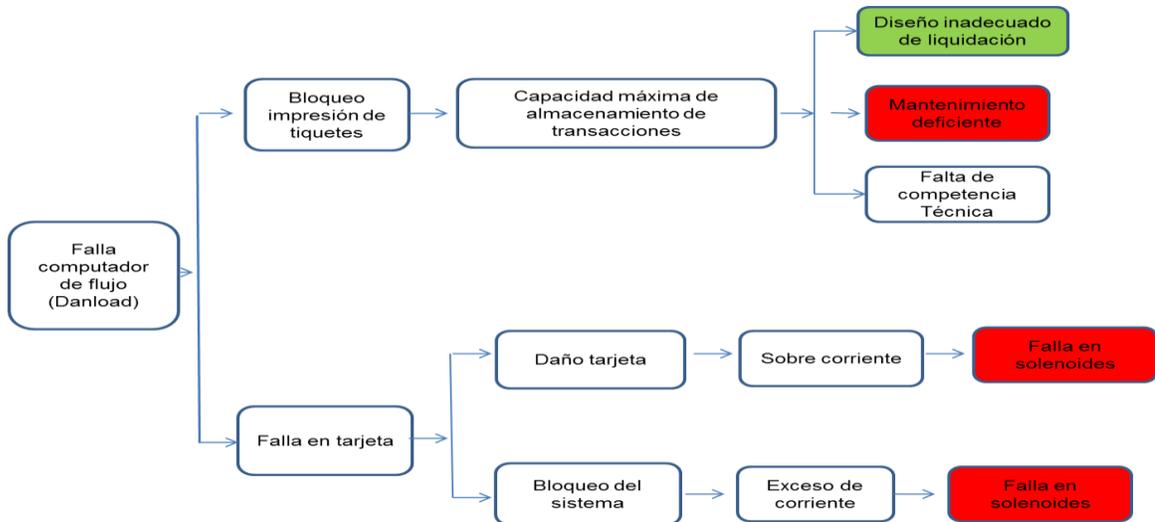
**5.3.3.4. Sistema neumático de las cisternas.** Las fallas de las válvulas de fondo de las cisternas (Figura 5.17) causan el accionamiento de las válvulas de seguridad (330 psi) y la consecuente pérdida de PGR. La deficiencia en los conectores de las cisternas fue identificada como la causa raíz para las fallas durante el cargue. El sistema de retorno de vapores tiene configurado un valor para la presión de 270 psi, que equivale a la presión en la cisterna, con el cual se controla la finalización del cargue. La deficiencia en la conexión permite el paso de PGR a pesar de estar en el punto de presión máxima del cargue, ocasionando una elevación en la presión que conlleva al descargue de PGR a la atmosfera debido a la válvula de seguridad de las cisternas.

**Figura 5.17.** Sistema de retorno de vapores de Propileno



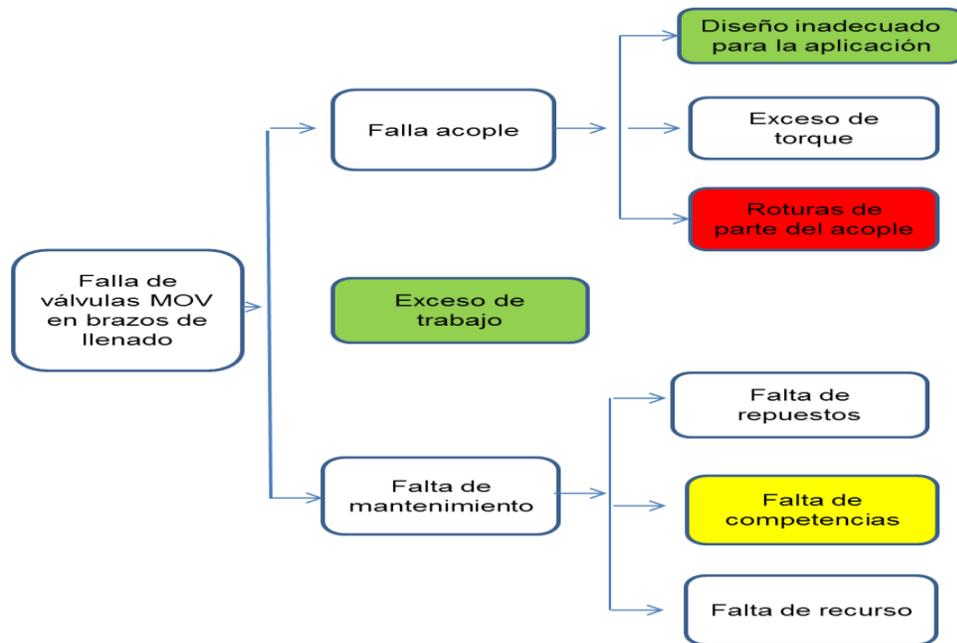
**5.3.3.5. Falla en el computador de flujo (Danload).** Las causas raíces de los eventos en los computadores de flujo están relacionadas con procedimiento inadecuado de mantenimiento de software y con sobre-corrientes en el sistema ocasionado por fallas de las válvulas solenoides; la Figura 5.18 presenta el diagrama causa-efecto para las fallas en el Danload. Respecto a la segunda causa, el Danload presenta un control que protege la tarjeta por sobre-corriente por medio de la inactivación de la tarjeta. Las pruebas de verificación entre la comunicación entre Danload y válvulas solenoides permitieron validar las causas raíz en el sistema.

**Figura 41.** Diagrama causa-efecto falla en el computador de flujo *Danload*.



**5.3.3.6. Falla en válvulas MOV del tren de llenado.** La falla del acople de la válvula, conduciendo a la rotura del mismo acople fue identificada como la causa raíz en las válvulas MOV (Figura 5.19). La rotura del acople afecta la parte interna de la válvula impidiendo un cierre o una apertura total de la válvula, lo cual se manifiesta en la alteración de los tiempos y volúmenes de llenado de las cisternas.

**Figura 5.19.** Diagrama causa-efecto falla en las válvulas MOV.



**5.3.4 Tablas de Verificación de la Causa.** Las respectivas tablas de verificación de la causa raíz de falla en cada componente pueden ser consultadas en el Anexo 6.

En la tabla 5.2 se pueden evidenciar las causas raíz identificada para la falla de las válvulas solenoides.

**Tabla 41.** Definición de causa raíz para las válvulas solenoides

CAUSAS PROBABLES	DIMENSIONES DEL PROBLEMA				SE HA CONOCIDO COMO CAUSA RAÍZ EN EL PASADO?	ESTA CAUSA REPETIRÍA EL PROBLEMA?	ELIMINANDO LA CAUSA SE ELIMINA EL PROBLEMA?	CAUSA RAÍZ
	IDENTIDAD	TIEMPO	LUGAR	EXTENSIÓN				
	QUE?	CUANDO?	DONDE?	CUANTO?				
Mesh de los filtros F-31651 / 52 inadecuado para la aplicación	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Calibración inadecuada de válvula de aguja en el cambio/repación de partes, por parte de personal de mantenimiento.	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
Falla Operación válvula de recirculación PV31663	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Diseño o selección inadecuada	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
Falla en valvulas set stop	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI

#### 5.4 FASE IV: DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN.

En esta fase se especifican los requerimientos mínimos de solución por medio de una evaluación y una comparación entre las posibles soluciones. Este procedimiento es fundamental para evitar que las soluciones implementadas conlleven a fallas en otras partes del sistema.

**5.4.1 Paso 8. Metas y Soluciones.** Una de las metas de la solución es aumentar la vida útil de las válvulas solenoides. De acuerdo a las causas raíces identificadas, se plantean cuatro soluciones, agrupadas en acciones en las solenoides y acciones en las válvulas set stop. Respecto a las válvulas solenoides, se plantea el cambio de solenoides por otras que trabajen a mayor presión y un procedimiento para asegurar el ajuste de las válvulas de aguja. Por otra parte, las otras dos causas están relacionadas con el sistema de recirculación y con el cambio de repuestos en válvula set stop. La Tabla 5.3, 5.4 y 5.5 relacionan las causas raíces y las soluciones.

**Tabla 42. Causa raíces y soluciones a falla de válvulas solenoides**

SISTEMA	EFEECTO PRIMARIO	META GLOBAL	CAUSA RAÍZ	SOLUCIONES	
Sistema llenadero de PGR a carrotaques	1. Falla de las solenoides de las válvulas set stop de los dos brazos	Aumentar la vida útil de las solenoides de las válvulas set stop de los dos brazos	CAUSA Selección inadecuada de valvulas solenoides	S1	Gestionar la compra de valvulas solenoides con capacidad para trabajar a mayores presiones.
			CAUSA Calibración inadecuada de válvula de aguja en el cambio/reparación de partes, por parte de personal de mantenimiento al turno.	S2	Entrenar a los mantenedores instrumentistas de analítica en la calibración adecuada de las válvulas solenoides. Asegurar procedimiento.
			CAUSA Falla Operación válvula de recirculación PV31663	S3	Aplica soluciones para el sistema de recirculacion
			CAUSA Falla en valvula set stop.	S4	Asegurar compra de repuestos adecuados

**Tabla 43. Causa raíces y soluciones a fallas en el sistema de recirculación**

SISTEMA	EFEECTO PRIMARIO	META GLOBAL	CAUSA RAÍZ	SOLUCIONES	
Sistema llenadero de PGR a carrotaques	2. Falla de la válvula de recirculación PCV-31663	Reducir las fallas y lograr el desempeño esperado de la válvula de recirculación Lograr una disponibilidad continua >2 años	CAUSA Selección inadecuada de la válvula	S5	Seleccionar e instalar una válvula que responda a la necesidad del proceso de control de presión, o cambiar por una valvula de 4".
				S6	Recalcular el cuadro de recirculación para determinar si la válvula actual con una RO aguas arriba de diametro superior, permite el desempeño esperado. Instalar nueva RO.
			CAUSA Set de control operacional inadecuado	S7	Realizar pruebas y ajustar set de control, para mejorar la respuesta de la valvula.
			CAUSA RO del sistema de recirculación mal especificada.	S8	Rediseñar o recalcular la RO con el fin de obtener las presiones y flujo requerido en los trenes de llenado
			CAUSA Falla en la calibracion de ajuste entre actuador y valvula	S9	Definir y asegurar procedimiento de ajuste entre actuador y valvula

**Tabla 44.** Causa raíces y soluciones por bajo flujo en el sistema de retorno.

SISTEMA	EFEECTO PRIMARIO	META GLOBAL	CAUSA RAÍZ	SOLUCIONES
Sistema llenadero de PGR a carrotaques	3. Bajo Flujo en la salida de gases de la cisterna	Cargar el 100% de la capacidad de la cisterna (26500 kg)	CAUSA Material particulado ingresa al mecanismo móvil de la válvula	S16 Negociar con el transportador del PGR aumentar la frecuencia de inspección / mantenimiento de las cisternas (actualmente cada 5 años)
			CAUSA Set de flujo crucero está seteado en 230 GPM, especificado durante la puesta en marcha del proyecto.	S17 Aumentar el set a 250 GPM, de acuerdo con la hoja de especificaciones del educor.
Sistema llenadero de PGR a carrotaques	Falla de la MOV-31680	Funcionamiento 100% confiable de la válvula	CAUSA Repuesto / parte inadecuada de acople	S18 Instalar el repuesto de diseño original del acople entre actuador y válvula

Seguidamente se realiza una discusión sobre las posibles soluciones, su efecto en la eliminación de las causas raíces y su impacto en el sistema.

**5.4.1.1 Soluciones sistema de recirculación.** Una de las soluciones planteadas en relación al sistema de recirculación, consistió en realizar un ajuste sobre el set point de control de presión, debido a que la respuesta de la válvula no es la adecuada según al análisis de datos realizado; en el análisis se evidenció que la válvula iniciaba su apertura una vez se alcanzaban 310 psi, y como este valor se alcanza en los momentos críticos o de finalización de cargues, hace que la válvula no alcance su apertura total con la correspondiente sobrepresión del sistema. Al realizar pruebas con set point de 300 psi y 290 psi, se reportó que la repuesta de la válvula fue más adecuada para las necesidades del sistema, obteniendo perfiles de presión por debajo del punto máximo y favoreciendo la confiabilidad de los otros componentes del sistema.

Asimismo, el procedimiento de montaje de la válvula de recirculación fue modificado para incluir la utilización de tuerca y contratuerca para el ajuste mecánico del acople entre actuador y válvula, ajuste simultaneo de la

configuración del corrido y topes de carrera en el actuador, así como la necesidad de dejar una holgura de 4 vueltas aproximadas entre el asiento de la válvula y el tapón de sello. Lo anterior con el fin de evitar inestabilidad en el sistema generada por altas vibraciones y presiones que activan la protección por torque que tiene el actuador; esta protección puede conducir a una sobre corriente que afecta al motor y/o la tarjeta.

**5.4.1.2 Solución en válvulas solenoides.** Una de las soluciones planteadas para las fallas de las válvulas solenoides está relacionada con la falla del sistema de recirculación. Otra solución identificada consistió en la instalación de un O ring adecuado en las válvulas set stop para evitar inestabilidad en el control que conduce a fallas en la tarjeta del controlador del Danload; con esto se mejora el control del flujo en los trenes, favoreciendo la confiabilidad de la válvula set stop y de las válvulas solenoides, la solución principal está relacionada con el cambio de especificación de la válvula solenoide, debido a que las existentes por diseño la máxima presión de trabajo es de 350 PSI, mientras en el sistema se alcanzan presiones por encima de los 500psi.

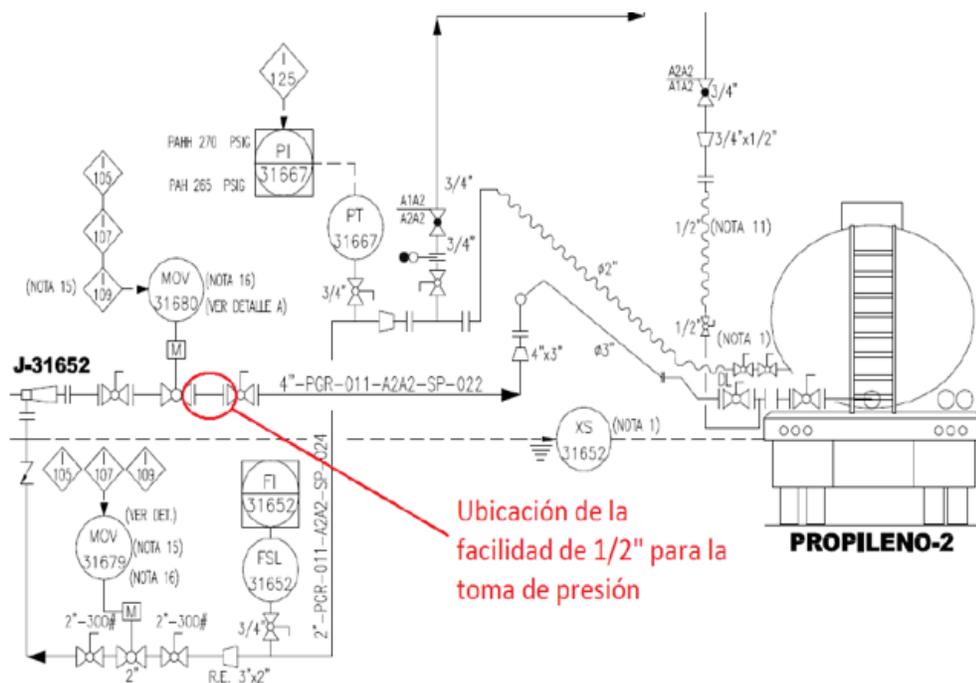
Otra de las oportunidades identificadas está relacionada con el procedimiento de ajuste de la válvula de aguja de cada solenoide; la válvula de entrada debe estar abierta tres vueltas completas y la de salida debe estar abierta dos vueltas completas, esto de acuerdo a recomendación del fabricante permitiendo que la respuesta de la válvula *set stop* sea la adecuada para el control de flujo requerido durante el cargue.

**5.4.1.3 Soluciones para el sistema de retorno de vapores.** La eficiencia del sistema de retorno de vapores es afectada notoriamente por la inestabilidad del flujo de llenado, el cual a su vez es afectado por falla de control de la válvula set stop; estas condiciones causan cargues incompletos debido a que los carro tanques se presionan por deficiencia del eductor. Por lo anterior, una de las

soluciones definidas para mejorar el funcionamiento del sistema de retorno de vapores está relacionada con el control de flujo, lo cual se logra en parte con los aseguramientos de las acciones definidas para las válvulas solenoides y válvula set stop relacionadas anteriormente y asegurando un flujo por cada tren de llenado entre 420 kg/min y 470 kg/min.

**5.4.1.4 Solución sistema neumático de las cisternas.** La solución planteada para la mejora en la conexión en el sistema neumático de carro tanques consiste en la implementación de un nuevo control, el cual podría estar ubicado en el sistema de recibo de la cisterna, esto garantiza que al incrementar la presión de entrada en la cisterna por encima de 285 psi, el sistema suspende el cargue. En este punto de recibo, la presión del equipo de bombeo mantiene abierta la válvula de recibo de fondo de la cisterna, con lo cual se obtiene una medición continua de la presión.

**Figura 42.** Ubicación para instalar nueva toma de presión a la entrada del carro tanque.



La figura 5.20 muestra el lugar en donde se instaló la nueva toma de presión, con el fin de implementar el nuevo control de presión de llenado del carrotanque, de acuerdo al análisis realizado, este control se configuro 15 PSI por encima del control ubicado en el sistema de retorno el cual está definido en 270 PSI, el nuevo control se configuro en 285 PSI.

**5.4.1.5 Solución a falla en el computador de flujo (Danload).** Para la falla generada en el Danload, por sobre corriente en el sistema, ocasionado por las fallas de las válvulas solenoides, se identificó que el computador de flujo poseía un control para proteger la tarjeta, para lo cual automáticamente cambia los valores configurados, inactivando la tarjeta. Inicialmente esto no era claro y cuando se presentaba este tipo de problemas, el sistema de llenado quedaba fuera de servicio por un buen tiempo, incluso se cambiaban tarjetas y otros componentes tratando de solucionar el problema, para esto se definió procedimiento para realizar pruebas de verificación entre la comunicación entre Danload y válvulas solenoides, procedimiento para verificar el estado de configuración del Danload y la solución principal está relacionada con el cambio de válvulas solenoides que soporten una mayor presión de trabajo.

## 6. IMPACTOS Y BENEFICIOS

Después de implementar el 90% de las acciones definidas con este trabajo de aplicación, el sistema ha estado 100% disponible durante 7 meses.

Las acciones implementadas son:

- Se ajustó el set point del sistema de recirculación en 290 psi.
- Implementación de procedimiento definido de ajuste y calibración para el actuador eléctrico y válvula del sistema de recirculación.
- Ajuste de los flujos de cargue por cada tren de acuerdo a los valores identificados 450 kg/min.
- Cambio del O ring de las válvulas set stop.
- Implementación y aplicación del control de presión a la entrada de las cisternas, con el fin de evitar disparo de las válvulas de seguridad de las mismas.

En consecuencia los eventos de sobrepresión fueron disminuidos y los índices de seguridad de proceso y las entregas de PGR fueron mejoradas alcanzando el cumplimiento en los volúmenes programados por cada cisterna.

Igualmente las cantidades de propileno desviados a GLP y a la tea fueron disminuidos, lo cual impactó positivamente en el margen de refinación grueso de la GRB derivado de la operación del sistema de llenado. Es importante mencionar que en el segundo semestre del 2014 se desviaron aproximadamente 40.000 mil barriles de propileno hacia el sistema de GLP, debido a la no disponibilidad del sistema de llenado, generando pérdidas por más de 2 millones de dólares, la Tabla 6.1 muestra las cantidades de propileno desviada en el primer semestre del 2015 hacia la corriente de GLP, con un diferencial de precio en promedio de 35

dólares por barril. En el primer semestre del 2016 el sistema ha estado disponible, por lo cual no se ha desviado propileno debido a fallas en el sistema.

**Tabla 45.** Desvíos de PGR a GLP por no disponibilidad del llenadero de propileno.

Desvíos de PGR por alto inventario			
Mes	Julio	Septiembre	Octubre
Desvió Barriles	9700	12300	9200
Diferencia con GLP (US\$/B)	50	50	50
Total (US\$)	485000	615000	460000

Desvios de propileno por alto inventario 2015					
Mes	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo
Desvio Bls	10.000	14.000	30.000	23.000	14.000
Dif. Precio (US\$/B)	47	39	39	30	41
Total (US\$)	470000	546000	1170000	690000	574000

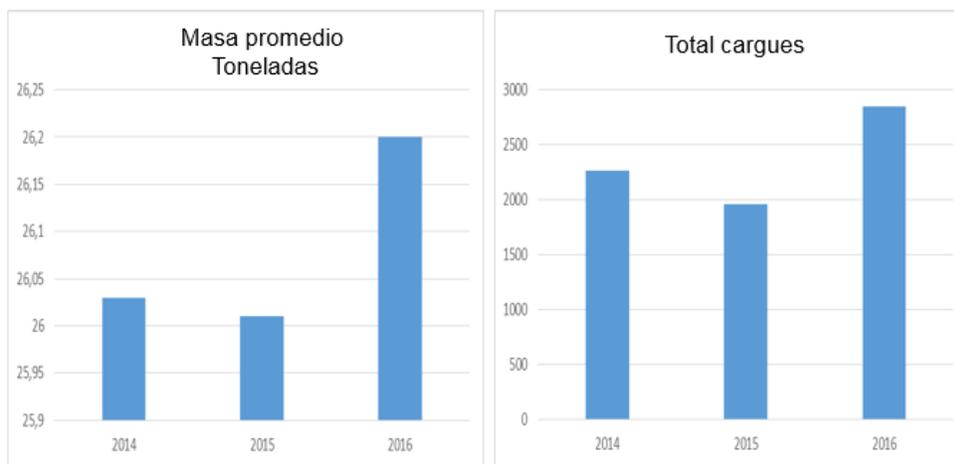
Las causas identificadas en el análisis de causa raíz en conjunto con el análisis de datos y la simulación están relacionadas con desajustes en el control operacional, selección inadecuada de componentes, procedimientos operacionales y de mantenimiento sub estándar. La solución a las anteriores causas redundará en disminución en los mantenimientos de los diferentes componentes como válvulas solenoides, válvulas *set stop*, válvulas de recirculación, tarjetas en los *Danload* y en válvulas MOV. Durante los años 2013 y 2014 cerca de 200 millones de pesos fueron invertidos solo en mano de obra para recuperar el sistema de entrega de llenado de propileno debido a las fallas; a este costo se debe incluir los mantenimientos preventivos definidos. En el primer semestre del 2016, no se ha incurrido en costos de mantenimiento debido a fallas en los componentes.

Otro factor que impacta positivamente en los beneficios económicos derivados de la implementación de las acciones identificadas en el presente trabajo de aplicación, está relacionado con el aprovechamiento del 100% de la capacidad de

las cisternas debido a la disminución en el número de cargues incompletos; por ejemplo para el primer trimestre de 2015, se realizaron 1214 cargues, con un promedio de 25908 kg por cargue, con lo cual el 78 % (952 cargues) cumplieron con el volumen total, el otro 22% (252 cargues) estuvieron por debajo del volumen requerido, se dejaron de entregar aproximadamente 485.600 kg en los tres meses, debido a cargues incompletos, lo cual equivale aproximadamente a 18 carrotanques, es decir 6 carrotanques menos por mes. Teniendo presente solo el diferencial de precio entre el glp y el propileno en el primer semestre del 2015, estos 18 carrotanques que se dejaron de cargar equivalen a 420 millones de pesos en los tres meses.

En el primer semestre del 2016 se han entregado 2.840 cargues, con un promedio de 26.202 kg por cargue. En la figura 6.1 se evidencia la diferencia entre los volúmenes y numero de carrotanques entregados en los años, 2014. 2015 y 2016, evidenciando una mejora significativa en la operación del llenadero de propileno.

**Figura 43.** Masa promedio y cantidad de carrotanques entregados en el primer semestre de los años 2014, 2015 y 2016.



Asimismo, otro de los beneficios o logros derivados del presente trabajo de aplicación corresponde a la disminución de los eventos de seguridad de proceso, lo cual protege la integridad y la vida de las personas de la estación de GLP. Es importante señalar que desde la puesta en servicio en julio del 2012, hasta diciembre del 2015 se han presentado 10 eventos de seguridad de proceso; para el presente año no se han reportado eventos de seguridad en el sistema de llenado.

## **RESUMEN**

En resumen con la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz, el análisis de datos y la simulación realizada, se pudieron identificar las causas raíces de las fallas de los 6 componentes identificados y definidos:

- Falla en válvulas solenoides y set stop.
- Falla en el sistema de recirculación (PCV 31663).
- Fallas en el sistema de retorno de gases.
- Fallas en los computadores de flujo (Danload).
- Fallas en MOV de trenes de llenado.
- Falla en válvulas de seguridad de carro tanques.

Se identificó que presiones mayores a 350 psi a la entrada de los trenes de llenado generaban fallas en las válvulas solenoides, causando descontrol operacional, afectando consecuentemente otros componentes como el sistema de recirculación, tarjetas del computador de flujo Danload y deficiencia del eductor.

La falla entre el acople y actuador de la válvula de recirculación, generaban mayores vibraciones y presiones que causaban mayor inestabilidad del sistema de cargue de propileno, llegando incluso a afectar las tarjetas del actuador y la inestabilidad del flujo de cargue, causando presionamiento en las cisternas y cargues incompletos, ocasionado por un deficiente procedimiento de acople y

configuración, afectado adicionalmente por el tiempo de respuesta de la válvula de recirculación.

Los flujos de cargue por debajo de 350 kg/min causan que la eficiencia del eductor disminuya, lo cual hace que se amplíen los tiempos de llenado, se genere suspensión del cargue por presionamiento de las cisternas por encima de 270 PSI, con un volumen menor al requerido.

La presión en las cisternas y la masa cargada se ve favorecida por el manejo de flujo entre 430 y 460 kg/min por cada tren, haciendo que las cisternas terminen con presiones finales de 230 psi y volúmenes mayores a 26000 Kg, logrando incluso cargues con duraciones inferiores a los 60 minutos.

En la finalización del cargue de las cisternas, se generan presiones por encima de los 450 PSI, debido al tiempo de respuesta de la válvula de recirculación, el cual no es suficiente para evitar el presionamiento del sistema, generando afectación a las válvulas solenoides y válvula set stop.

Debido a la presión alcanzada en las cisternas al finalizar los cargues la cual es máximo de 270 PSI, y teniendo presente la pérdida de presión en los diferentes componentes del tren de llenado, se puede concluir que las válvulas solenoides están mal especificadas, ya que su presión de prueba están por debajo de la presión requerida para que el sistema opere adecuadamente, esta condición causa falla repetitiva de estas válvulas, lo cual afecta otros componentes y el normal cargue de cisternas. Se deben seleccionar válvulas solenoides que soporten más de 500 PSI, ya que uno de los valores críticos de presión en el sistema, se presenta en el momento de finalizar los cargues el cual es de 460 psi aproximadamente, este valor se verifico, operando el sistema 100% por la recirculación, registrando valores entre 450 Y 470 psi con la válvula de recirculación 100% abierta.

La falla del sistema de aire de las cisternas, causa el cierre total o parcial de la válvula de fondo de retorno de vapores, lo cual genera presiones mayores a 330 psi, ocasionado el disparo de las válvulas de seguridad de las cisternas, debido a que el control que suspende el cargue por presiones mayores a 270 psi, captura el valor de la presión del sistema de retorno de vapores y al cerrarse la válvula de fondo el valor queda congelado inhibiendo la acción del controlador.

Temperaturas de cargue por encima de los 100°F y presiones iniciales en las cisternas por encima de 90 PSI, ocasionan presionamiento y cargues incompletos. Con la aplicación de las acciones o recomendaciones productos de esta investigación, el sistema del llenadero de propileno está en condiciones de cumplir de manera confiable con las entregas requeridas a clientes.

La aplicación conjunta de los métodos k-mean y análisis por componentes principales permite identificar los cargues con características estándar de aquellos con características sub-estándar. Las presiones a la entrada los trenes de llenado fueron identificadas como las partes sensibles del proceso de llenado de las cisternas. Estos métodos permiten identificar y estandarizar la operación del proceso de llenado aun cuando su aplicación se realiza a un proceso en estado cuasi-estacionario.

Según el análisis y simulación realizada en el presente trabajo, para garantizar la operación de un cargue estándar, la presión a la entrada de los trenes se debe mantener entre 230 PSI al inicio y 320 PSI al final. Asimismo, los flujos de llenado de las cisternas deben estar entre 400 kg/min y 450 kg/min con el fin de garantizar la buena operación del eductor y evitar el presionamiento de las cisternas por encima de 270 psi. La aplicación de la metodología de análisis de causa raíz, en conjunto con herramientas de simulación y el análisis de datos, resulto de gran utilidad para identificar y resolver problemas críticos presentes en el sistema de entrega de propileno

## 7. CONCLUSIONES

Las variables de mayor significancia estadística para definir el comportamiento de la presión de la cisterna durante el llenado son flujo del tren de llenado, nivel de la cisterna y presión de la bomba, las cuales pueden predecir la presión de la cisterna con un intervalo de confianza del 95%.

Cabe resaltar que tanto para el proceso real como para el proceso simulado las variables evaluadas tienden a incrementar la presión de la cisterna, lo cual significa que se debe controlar las tres variables de forma ágil para reducir el impacto de cada una sobre la presión final y así reducir los procesos fallidos de llenado de carrotanques de PGR.

Para mantener controlada la presión de la cisterna durante todo el llenado y así evitar un incremento de presión súbito, debe mantener la presión de la bomba entre 470 y 526 psig, el flujo de brazo de llenado entre 3600 y 4000 BPD.

La aplicación de la metodología de análisis de causa raíz, en conjunto con herramientas de simulación y el análisis de datos, resultó de gran utilidad para identificar y resolver problemas críticos presentes en el sistema de entrega de propileno. Mediante el análisis de causa raíz se identificó que las presiones mayores a 350 psi a la entrada de los trenes de llenado generaban fallas en las válvulas solenoides, causando descontrol operacional, afectando consecuentemente otros componentes como el sistema de recirculación, las tarjetas del computador de flujo *Danload* y el eductor. Conduciendo a cargues incompletos y tiempos de cargue mayores.

La aplicación conjunta de los métodos *k-mean* y análisis por componentes principales permitió identificar los cargues con características estándar de aquellos

con características sub estándar. Estos métodos permiten identificar y estandarizar la operación del proceso de llenado aun cuando su aplicación se realiza a un proceso en estado cuasi-estacionario.

Según el análisis y las simulaciones realizadas en el presente trabajo, para garantizar la operación de un cargue estándar, la presión a la entrada de los trenes se debe mantener entre 230 psi al inicio y 320 psi al final. Asimismo, los flujos de llenado de las cisternas deben estar entre 400 kg/min y 450 kg/min con el fin de garantizar la operación adecuada del eductor y evitar la sobrepresión en las cisternas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] <<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>> [Consultado 8 de Marzo 2015]

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

[3] COUCH, K., GLAVIN, J.P., WEGERER, D.A., QAFISHEH J.A. Factors influencing the selection of propylene yield design points and a comparative study of an absorption-based gas concentration unit relative to cold-box recovery design show how refiners can leverage existing assets to close the market gap for propylene production. UOP LLC Q3 (2007); p. 33-43.

[4] KNIGHT, J. & MEHLBERG, R. Maximize propylene from your FCC unit. Innovative use of catalyst and operating conditions increases on-purpose olefin production. *Hydrocarbon Processing* (2011); p. 91-95.

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

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

[7] GRANADA, M.A. & GALENO, P. Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles. Ecopetrol S.A. 3 ed. 2012. 46 p. (ECP-VSM-M-001).

[8] He, B., Chen, T., Yang, X. 2014. Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-based multivariate contribution

analysis with fuzzy-signed directed graphs. *Computers and Chemical Engineering*, 64, 167-177

[9] Quin, S.J. 2012. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36, 220-234

[10] Wise, B.M. and Gallagher, N.B. 1996. The process chemometrics approach to process monitoring and diagnosis. *J. Proc. Cont.*, 6, 329-348

[11] 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).

[12] He, B., CHEN, T., YANG, X., Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-bases multivariate contribution analysis with fuzzy-signed directed graphs. 2014

[13] QIN, J. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. 2012

[14] OLIVAS, N. La importancia de la simulación de procesos en la Industria. Universidad Nacional de Ingeniería Uni-R.U.A.C.S. 2013. 3 p.

[15] ERDMANN, L., RUIZ, L.A., BENÍTEZ, L., TARIFA, E. Análisis de sensibilidad por simulación del proceso de deshidratación de una planta de acondicionamiento de gas natural. *Avances en ciencias e Ingeniería* 3 (2012); p. 119-130

- [16] MELO, R. & HERNÁNDEZ, C. Simulación dinámica de sistemas. Herramienta para validar o rechazar hipótesis en el troubleshooting de sistemas de proceso. Instituto Mexicano del Petróleo. Monterrey, 2010, 16 h. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos Sección Monterrey.
- [17] ROLLO, M., NOVÁK, P., KUBALÍK, J., PECHOUEEK, M. Alarm root cause detection system. *Emerging solutions for future manufacturing systems* 159 (2005); p. 109-116.
- [18] WIDARSSON, B. & DOTZAUER, E. Bayesian network-based early-warning for leakage in recovery boilers. *Applied Thermal Engineering* 28 (2008); p. 754-760.
- [19] BABJI, S., NALLASIVAM, U., RENGASWAMY, R. Root Cause Analysis of Linear Closed-Loop Oscillatory Chemical Process Systems. *Industrial & Engineering Chemistry Research* 51 (2012); p. 13712–13731.
- [20] N. V. S. N. Murthy Konda, G. P. Rangaiah,\* and P. R. Krishnaswamy. Plantwide Control of Industrial Processes: An Integrated Framework of Simulation and Heuristics. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, National University of Singapore, 10, Kent Ridge Crescent, Singapore 119260
- [21] Alexander Martínez, Arturo Saldarriaga. Manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas. Ecopetrol S.A. 2006
- [22] MONGOMERYTH Douglas, Diseño de experimentos aplicados a la ingeniería química, Mc-Graw Hill, segunda edición, México, 2003.
- [23] V. M. JENNIFER DYMENT, «Jump Start: Getting Started with Aspen Plus V8,» 2015.

- [24] D. Gil C. , J. R. Guevara L., J. . L. García Z. y A. Leguizamon R., Análisis y simulación de procesos en Ingeniería Química, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011
- [25] HE, B., CHEN, T., YANG, X., Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-bases multivariate contribution analysis with fuzzy-signed directed graphs. 2014. [Citado Julio 2016], 1 p.
- [26] MINA, J. VERDE, C. Detección de Fallas usando Análisis de Componentes Principales. Instituto de ingeniería UNAM Apdo. p. 1-2.
- [27] YIN, S., DING, S., XIE, X., LUO, H. A review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring. Vol 61, No 11, 2014. [Citado Julio 2016], 1 p.
- [28] Clara Inés Arbeláez Gerencia Complejo de Barrancabermeja. Instructivo para uso de la matriz de evaluación de riesgos RAM. 31 de marzo de 2008
- [29] ORDÓÑEZ, Audri. Diseño e implementación de sistemas de cromatografía en línea en las URC's y en la NEGLP para la ampliación de la capacidad de PGR en la GRB. Bucaramanga, 2012, 57 h. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.
- [30] RAMÍREZ, M.C. Desarrollo de módulos de simulación de procesos en ingeniería química. El Salvador, 2005, 64 h. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Química
- [31] CITIRIK, E. Root-cause analysis of burner tip failures in coal-fired power plants. *Applied Thermal Engineering* 73 (2014); p. 831-841

## BIBLIOGRAFÍA

<<http://encyclopedia.airliquide.com/encyclopedia.asp>> [Consultado 8 de Marzo 2015]

Alexander Martínez, Arturo Saldarriaga. Manual para la aplicación de la metodología de análisis de causa raíz para la solución de problemas. Ecopetrol S.A. 2006.

BABJI, S., NALLASIVAM, U., RENGASWAMY, R. Root Cause Analysis of Linear Closed-Loop Oscillatory Chemical Process Systems. Industrial & Engineering Chemistry Research 51 (2012); p. 13712–13731.

CITIRIK, E. Root-cause analysis of burner tip failures in coal-fired power plants. Applied Thermal Engineering 73 (2014); p. 831-841

Clara Inés Arbeláez Gerencia Complejo de Barrancabermeja. Instructivo para uso de la matriz de evaluación de riesgos RAM. 31 de marzo de 2008

COUCH, K., GLAVIN, J.P., WEGERER, D.A., QAFISHEH J.A. Factors influencing the selection of propylene yield design points and a comparative study of an absorption-based gas concentration unit relative to cold-box recovery design show how refiners can leverage existing assets to close the market gap for propylene production. UOP LLC Q3 (2007); p. 33-43.

D. Gil C. , J. R. Guevara L., J. . L. García Z. y A. Leguizamon R., Análisis y simulación de procesos en Ingeniería Química, Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2011

ERDMANN, L., RUIZ, L.A., BENÍTEZ, L., TARIFA, E. Análisis de sensibilidad por simulación del proceso de deshidratación de una planta de acondicionamiento de gas natural. *Avances en ciencias e Ingeniería* 3 (2012); p. 119-130

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

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 refinera de la Gerencia Refinería Barrancabermeja. Ecopetrol S.A. Barrancabermeja: 2011. 53 p. (GRB-5209011-210001-ID-IN-MD-005).

GRANADA, M.A. & GALENO, P. Manual de medición de hidrocarburos y biocombustibles. Ecopetrol S.A. 3 ed. 2012. 46 p. (ECP-VSM-M-001).

He, B., Chen, T., Yang, X. 2014. Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-based multivariate contribution analysis with fuzzy-signed directed graphs. *Computers and Chemical Engineering*, 64, 167-177

Quin, S.J. 2012. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. *Annual Reviews in Control*, 36, 220-234

He, B., CHEN, T., YANG, X., Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-bases multivariate contribution analysis with fuzzy-signed directed graphs. 2014

HE, B., CHEN, T., YANG, X., Root cause analysis in multivariate statistical process monitoring: Integrating reconstruction-bases multivariate contribution analysis with fuzzy-signed directed graphs. 2014. [Citado Julio 2016], 1 p.

KNIGHT, J. & MEHLBERG, R. Maximize propylene from your FCC unit. Innovative use of catalyst and operating conditions increases on-purpose olefin production. Hydrocarbon Processing (2011); p. 91-95.

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

MELO, R. & HERNÁNDEZ, C. Simulación dinámica de sistemas. Herramienta para validar o rechazar hipótesis en el troubleshooting de sistemas de proceso. Instituto Mexicano del Petróleo. Monterrey, 2010, 16 h. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos Sección Monterrey.

MINA, J. VERDE, C. Detección de Fallas usando Análisis de Componentes Principales. Instituto de ingeniería UNAM Apdo. p. 1-2.

MONGOMERYTH Douglas, Diseño de experimentos aplicados a la ingeniería química, Mc-Graw Hill, segunda edición, México, 2003.

N. V. S. N. Murthy Konda, G. P. Rangaiah,\* and P. R. Krishnaswamy. Plantwide Control of Industrial Processes: An Integrated Framework of Simulation and Heuristics. Department of Chemical and Biomolecular Engineering, National University of Singapore, 10, Kent Ridge Crescent, Singapore 119260

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

OLIVAS, N. La importancia de la simulación de procesos en la Industria. Universidad Nacional de Ingeniería Uni-R.U.A.C.S. 2013. 3 p.

ORDÓÑEZ, Audri. Diseño e implementación de sistemas de cromatografía en línea en las URC's y en la NEGLP para la ampliación de la capacidad de PGR en la GRB. Bucaramanga, 2012, 57 h. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad Industrial de Santander. Escuela de Ingeniería Química.

QIN, J. Survey on data-driven industrial process monitoring and diagnosis. 2012

RAMÍREZ, M.C. Desarrollo de módulos de simulación de procesos en ingeniería química. El Salvador, 2005, 64 h. Trabajo de grado (Ingeniería Química). Universidad de El Salvador. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Escuela de Ingeniería Química

ROLLO, M., NOVÁK, P., KUBALÍK, J., PECHOUEEK, M. Alarm root cause detection system. Emerging solutions for future manufacturing systems 159 (2005); p. 109-116.

V. M. JENNIFER DYMENT, «Jump Start: Getting Started with Aspen Plus V8,» 2015.

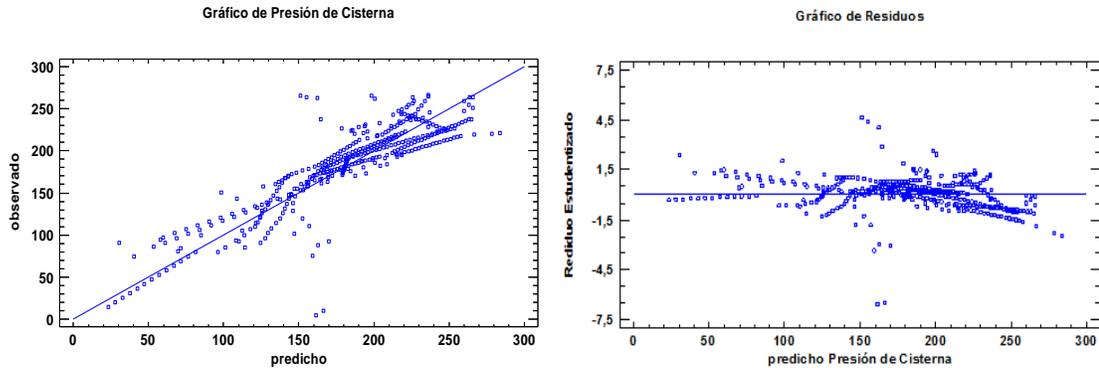
WIDARSSON, B. & DOTZAUER, E. Bayesian network-based early-warning for leakage in recovery boilers. Applied Thermal Engineering 28 (2008); p. 754-760.

Wise, B.M. and Gallagher, N.B. 1996. The process chemometrics approach to process monitoring and diagnosis. J. Proc. Cont., 6, 329-348

YIN, S., DING, S., XIE, X., LUO, H. A review on Basic Data-Driven Approaches for Industrial Process Monitoring. Vol 61, No 11, 2014. [Citado Julio 2016], 1 p.

## ANEXOS

### ANEXO A. VALIDACIÓN DE LA SIMULACIÓN CON DATOS REALES DE PROCESO (HISTÓRICOS LLENADERO PGR)



#### Regresión Múltiple - Presión de Cisterna

Variable dependiente: Presión de Cisterna (psig)

Variables independientes:

Flujo de brazo Histórico (BPD)

Nivel de Cisterna (Bl)

Presión de bomba (psig)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Flujo de brazo Histórico	0,0250374	0,000970757	25,7916	0,0000
Nivel de Cisterna	0,465107	0,0129309	35,9688	0,0000
Presión de bomba	0,0422249	0,00853228	4,94885	0,0000

#### **Análisis de Varianza**

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,38484E7	3	4,61615E6	7046,76	0,0000
Residuo	256134,	391	655,074		
Total	1,41046E7	394			

R-cuadrada = 98,184 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,1747 por ciento

Error estándar del est. = 25,5944

Error absoluto medio = 17,6121

Estadístico Durbin-Watson = 0,733731

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,61345

### **El StatAdvisor**

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Presión de Cisterna y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

Presión de Cisterna = 0,0250374\*Flujo de brazo Historico + 0,465107\*Nivel de Cisterna + 0,0422249\*Presión de bomba

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98,184% de la variabilidad en Presión de Cisterna. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,1747%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 25,5944. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 17,6121 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0000, que corresponde a Presión de bomba. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

### Intervalos de confianza del 95,0% para las estimaciones de los coeficientes

		<i>Error</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Flujo de brazo Hi	0,0250374	0,000970757	0,0231288	0,0269459
Nivel de Cisterna	0,465107	0,0129309	0,439684	0,49053
Presión de bomba	0,0422249	0,00853228	0,02545	0,0589999

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra intervalos de confianza del 95,0% para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran con qué precisión pueden estimarse los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles, y el nivel de ruido que está presente.

### Regresión Múltiple - Presión de Cisterna

Variable dependiente: Presión de Cisterna (psig)

Variabes independientes:

Flujo de brazo Histórico (BPD)

Nivel de Cisterna (Bl)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Flujo de brazo Histórico	0,0285888	0,000673045	42,4768	0,0000
Nivel de Cisterna	0,486617	0,0125381	38,8111	0,0000

### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	1,38324E7	2	6,9162E6	9960,97	0,0000
Residuo	272177,	392	694,33		
Total	1,41046E7	394			

R-cuadrada = 98,0703 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,0654 por ciento

Error estándar del est. = 26,3501

Error absoluto medio = 18,5994

Estadístico Durbin-Watson = 0,693834

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,634131

### **El StatAdvisor**

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Presión de Cisterna y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

Presión de Cisterna = 0,0285888\*Flujo de brazo Historico + 0,486617\*Nivel de Cisterna

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98,0703% de la variabilidad en Presión de Cisterna. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,0654%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 26,3501. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 18,5994 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0000, que corresponde a Flujo de brazo Historico. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

### Intervalos de confianza del 95,0% para las estimaciones de los coeficientes

		<i>Error</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Flujo de brazo Hi	0,0285888	0,000673045	0,0272656	0,029912
Nivel de Cisterna	0,486617	0,0125381	0,461966	0,511267

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra intervalos de confianza del 95,0% para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran con qué precisión pueden estimarse los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles, y el nivel de ruido que está presente.

### Validación de la simulación con datos reales de proceso (Históricos llenadero PGR)

Gráfico de Presión Cisterna

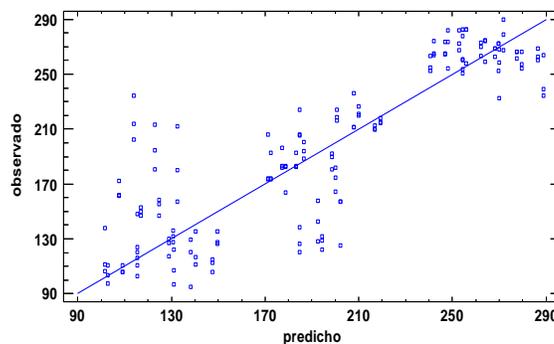
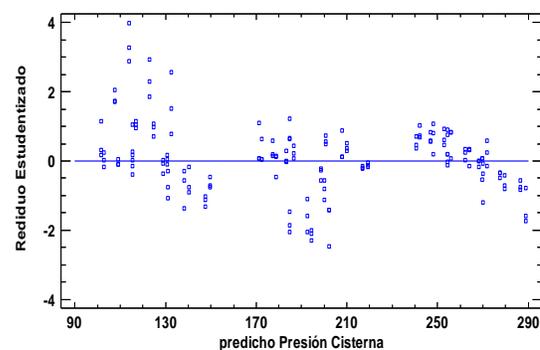


Gráfico de Residuos



## Regresión Múltiple - Presión Cisterna

Variable dependiente: Presión Cisterna (psig)

Variables independientes:

Nivel Cisterna (%)

Flujo brazo (BPD)

		Error	Estadístico	
Parámetro	Estimación	Estándar	T	Valor-P
Nivel Cisterna	0,583587	0,0240831	24,2322	0,0000
Flujo brazo	0,0175923	0,00119149	14,7649	0,0000

## **Análisis de Varianza**

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6,61473E6	2	3,30736E6	3269,51	0,0000
Residuo	161853,	160	1011,58		
Total	6,77658E6	162			

R-cuadrada = 97,6116 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 97,5967 por ciento

Error estándar del est. = 31,8053

Error absoluto medio = 22,506

Estadístico Durbin-Watson = 0,973717

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,511036

## **El StatAdvisor**

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Presión Cisterna y 2 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

Presión Cisterna = 0,583587\*Nivel Cisterna + 0,0175923\*Flujo brazo

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 97,6116% de la variabilidad en Presión Cisterna. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 97,5967%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 31,8053. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 22,506 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,0000, que corresponde a Nivel Cisterna. Puesto que el valor-P es menor que 0,05, ese término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0%. Consecuentemente, probablemente no quisiera eliminar ninguna variable del modelo.

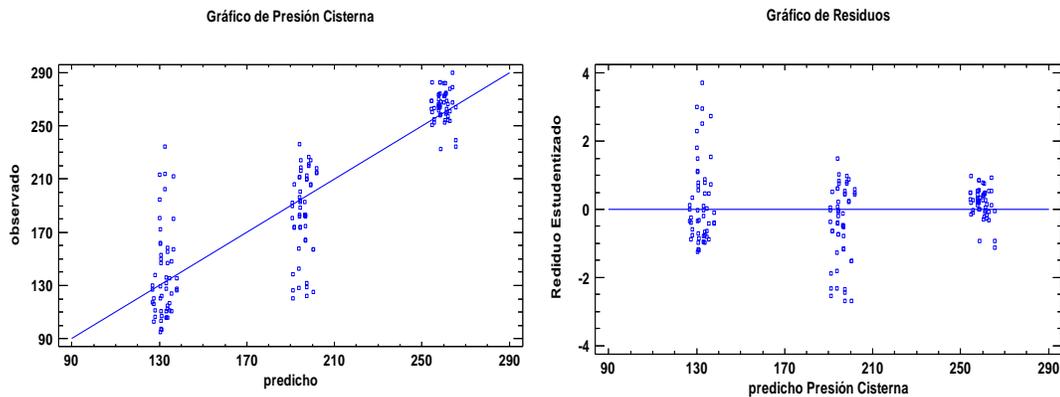
### **Intervalos de confianza del 95,0% para las estimaciones de los coeficientes**

		<i>Error</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Nivel Cisterna	0,583587	0,0240831	0,536025	0,631149
Flujo brazo	0,0175923	0,00119149	0,0152392	0,0199454

### **El StatAdvisor**

Esta tabla muestra intervalos de confianza del 95,0% para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran con qué precisión pueden

estimarse los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles, y el nivel de ruido que está presente.



### Regresión Múltiple - Presión Cisterna

Variable dependiente: Presión Cisterna (psig)

Variables independientes:

Presión de Bomba (psig)

FB\*FR (BPD)

Nivel Cisterna (%)

Flujo brazo (BPD)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Presión de Bomba	0,139352	0,0225633	6,17606	0,0000
FB*FR	-0,0141665	0,0155857	-0,908941	0,3648
Nivel Cisterna	0,534579	0,0231321	23,1098	0,0000
Flujo brazo	0,00654646	0,00425853	1,53726	0,1262

### Análisis de Varianza

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
Modelo	6,64671E6	4	1,66168E6	2021,66	0,0000
Residuo	129866,	158	821,936		
Total	6,77658E6	162			

R-cuadrada = 98,0836 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,0472 por ciento

Error estándar del est. = 28,6694

Error absoluto medio = 20,4998

Estadístico Durbin-Watson = 1,19799

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,398125

### **El StatAdvisor**

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Presión Cisterna y 4 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Presión Cisterna} = 0,139352 * \text{Presión de Bomba} - 0,0141665 * \text{FB} * \text{FR} + 0,534579 * \text{Nivel Cisterna} + 0,00654646 * \text{Flujo brazo}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98,0836% de la variabilidad en Presión Cisterna. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,0472%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 28,6694. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 20,4998 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,3648, que corresponde a FB\*FR. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar FB\*FR del modelo.

### Intervalos de confianza del 95,0% para las estimaciones de los coeficientes

		<i>Error</i>		
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>Límite Inferior</i>	<i>Límite Superior</i>
Presión de Bomba	0,139352	0,0225633	0,0947876	0,183917
FB*FR	-0,0141665	0,0155857	-0,0449497	0,0166168
Nivel Cisterna	0,534579	0,0231321	0,488891	0,580267
Flujo brazo	0,00654646	0,00425853	-0,00186454	0,0149575

### El StatAdvisor

Esta tabla muestra intervalos de confianza del 95,0% para los coeficientes en el modelo. Los intervalos de confianza muestran con qué precisión pueden estimarse los coeficientes dados la cantidad de datos disponibles, y el nivel de ruido que está presente.

### Regresión Múltiple - Presión Cisterna

Variable dependiente: Presión Cisterna (psig)

Variabes independientes:

Nivel Cisterna (%)

Presión de Bomba (psig)

Flujo brazo (BPD)

		<i>Error</i>	<i>Estadístico</i>	
<i>Parámetro</i>	<i>Estimación</i>	<i>Estándar</i>	<i>T</i>	<i>Valor-P</i>
Nivel Cisterna	0,534312	0,0231176	23,1128	0,0000
Presión de Bomba	0,133535	0,0216247	6,1751	0,0000
Flujo brazo	0,00343482	0,00253152	1,35682	0,1768

## Análisis de Varianza

Fuente	Suma de Cuadrados	Gl	Cuadrado Medio	Razón-F	Valor-P
Modelo	6,64603E6	3	2,21534E6	2698,23	0,0000
Residuo	130545,	159	821,037		
Total	6,77658E6	162			

R-cuadrada = 98,0736 por ciento

R-cuadrado (ajustado para g.l.) = 98,0494 por ciento

Error estándar del est. = 28,6537

Error absoluto medio = 20,5626

Estadístico Durbin-Watson = 1,19516

Autocorrelación de residuos en retraso 1 = 0,399719

### El StatAdvisor

La salida muestra los resultados de ajustar un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre Presión Cisterna y 3 variables independientes. La ecuación del modelo ajustado es

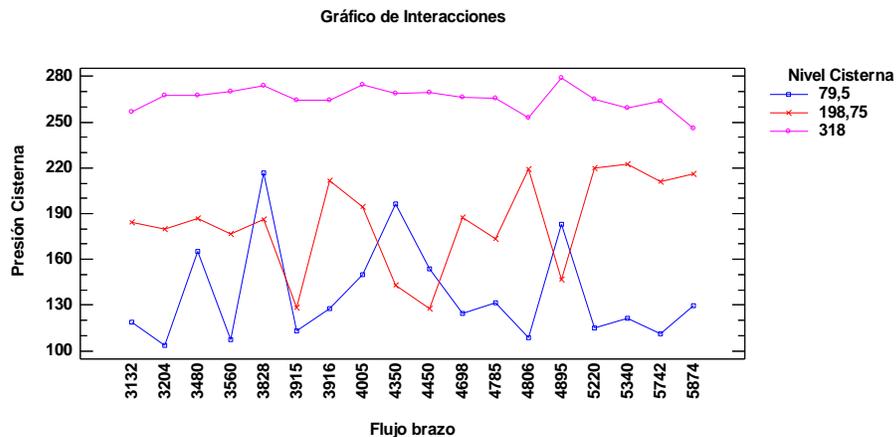
$$\text{Presión Cisterna} = 0,534312 \cdot \text{Nivel Cisterna} + 0,133535 \cdot \text{Presión de Bomba} + 0,00343482 \cdot \text{Flujo brazo}$$

Puesto que el valor-P en la tabla ANOVA es menor que 0,05, existe una relación estadísticamente significativa entre las variables con un nivel de confianza del 95,0%.

El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo así ajustado explica 98,0736% de la variabilidad en Presión Cisterna. El estadístico R-Cuadrada ajustada, que es más apropiada para comparar modelos con diferente número de variables independientes, es 98,0494%. El error estándar del estimado muestra que la desviación estándar de los residuos es 28,6537. Este valor puede usarse para construir límites para nuevas observaciones, seleccionando la opción de Reportes

del menú de texto. El error absoluto medio (MAE) de 20,5626 es el valor promedio de los residuos. El estadístico de Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay alguna correlación significativa basada en el orden en el que se presentan en el archivo de datos.

Para determinar si el modelo puede simplificarse, note que el valor-P más alto de las variables independientes es 0,1768, que corresponde a Flujo brazo. Puesto que el valor-P es mayor o igual que 0,05, ese término no es estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95,0% ó mayor. Consecuentemente, debería considerarse eliminar Flujo brazo del modelo.



### **ANOVA Multifactorial - Presión Cisterna**

Variable dependiente: Presión Cisterna (psig)

Factores:

Flujo brazo (BPD)

Nivel Cisterna (%)

Número de casos completos: 162

### El StatAdvisor

Este procedimiento ejecuta un análisis de varianza de varios factores para Presión Cisterna. Realiza varias pruebas y gráficas para determinar que factores tienen un efecto estadísticamente significativo sobre Presión Cisterna. También evalúa la significancia de las interacciones entre los factores, si es que hay suficientes datos. Las pruebas-F en la tabla ANOVA le permitirán identificar los factores significativos. Para cada factor significativo, las Pruebas de Rangos Múltiples le dirán cuales medias son significativamente diferentes de otras. La Gráfica de Medias y la Gráfica de Interacciones le ayudarán a interpretar los efectos significativos. Las Gráficas de Residuos le ayudarán a juzgar si los datos han violado los supuestos subyacentes al análisis de varianza.

### Análisis de Varianza para Presión Cisterna - Suma de Cuadrados Tipo III

<i>Fuente</i>	<i>Suma de Cuadrados</i>	<i>Gl</i>	<i>Cuadrado Medio</i>	<i>Razón-F</i>	<i>Valor-P</i>
EFFECTOS PRINCIPALES					
A:Flujo brazo	23155,0	17	1362,06	10,94	0,0000
B:Nivel Cisterna	450396,	2	225198,	1809,49	0,0000
INTERACCIONES					
AB	84580,7	34	2487,67	19,99	0,0000
RESIDUOS	13441,0	108	124,454		
TOTAL (CORREGIDO)	571573,	161			

Todas las razones-F se basan en el cuadrado medio del error residual

### El StatAdvisor

La tabla ANOVA descompone la variabilidad de Presión Cisterna en contribuciones debidas a varios factores. Puesto que se ha escogido la suma de cuadrados Tipo III (por omisión), la contribución de cada factor se mide eliminando los efectos de los demás factores. Los valores-P prueban la significancia estadística de cada uno de los factores.

## ANEXO B. LÍNEA DE TIEMPO DE INCIDENTES PRESENTADOS EN EL LLENADERO DE PGR.

FECHA	24/04/2012 →	01/06/2012	16/09/2012	17/09/2012	26/10/2012	04/11/2012
Evento	En la VEGLP, se realizaron pruebas para diagnosticar las válvulas set stop de Daniel. Con la bomba grande (SP3185A) al operar los dos brazos, el brazo 2 no alcanza el flujo de estabilización. las pruebas indican falla de la válvula set stop del brazo #2 al tratar de cargar con una sola bomba los dos brazos.	Entra en operación el proyecto de PGR. Aún están pendientes pruebas de desempeño del sistema.	En la nueva estación de GLP. Disparo válvula de seguridad de CTQ.	En la cisterna identificada R52554 se dispara válvula de seguridad de la cisterna por cerrarse válvula de seguridad de fondo "condición que conlleva a hacer un acto substándar".	Disparo válvula de seguridad de CTQ.	Disparo válvula de seguridad de CTQ.
Equipo	Antiguo Llenadero	Nuevo Llenadero	Válvula de seguridad CTQ	Válvula de vapores Cisterna	Válvula de seguridad CTQ	Válvula de seguridad CTQ
FECHA	04/11/2012 →	26/12/2012	11/11/2013	23/11/2013	16/03/2014	18/06/2014
Evento	Disparo válvula de seguridad de CTQ.	•Durante el cargue la válvula set-stop no actúa de forma normal, las solenoides abren y cierran constantemente. •Válvulas Set-stop y válvula MOV se cerraron al finalizar el cargue. Actuaron bien hasta el final. Falla del paro de la bomba. La bomba no se detuvo al terminar el cargue y siguió operando.	•Congelamiento de la línea de retorno de vapores del tren #1 y fuga por la válvula de retorno de vapores. •Presencia de pase de todas las válvulas incluyendo la MOV. La MOV-31677 se encontraba cerrada y la Presión de la Línea era de 13,4 psi. •La línea quedó congelada hasta el tambor de la Tea. •Tren #1 fuera de servicio.	Se devuelve a patio de Plexport la Cisterna SZZ669 R-56055, a la hora de empezar cargue no abrió la válvula de fondo de vapores.	En el día de hoy, Turno B, se presentó problemas con el cargue de PGR; el sistema de Presión mínima (PV-31663) en descarga de P-3161 A/B NO ABRIÓ, ocasionando disparo de la bomba.	Falla FV-31652 (PV-31663).
Equipo	Válvula de seguridad CTQ	Solenoides y Set-Stop	MOV-31677 del tren #1 (retorno de vapores)	Válvula de vapores Cisterna	Válvula de recirculación FV-31652	Válvula de recirculación FV-31652
FECHA	04/07/2014 →	15/08/2014	11/09/2014	30/09/2014	29/01/2015	16/02/2015
Evento	Acople de seguridad del brazo #1 (acople entre el brazo de llenado y la cisterna), se accionó ocasionando escape de PGR a la atmósfera y por ende afectando al operador y al conductor de la cisterna.	Válvula de seguridad PSV-31656 del tren de cargue #1 de PGR con escape de producto por venteo.	Disparo de la válvula de seguridad de las cisternas a la atmósfera.	En lo llevado del año hasta esta fecha se registra el consumo de 9 válvulas solenoides modelo 1711 NO. Todas fueron requeridas por eventos de falla.	Falla FV-31652 (PV31663), se repara y queda operando.	Operación con válvula PV31663 eventualmente en manual y cargando 2 carrotanques. Evidencia de falla de solenoide NO; Sin stock de repuestos para solenoide.
Equipo	Acople de seguridad brazo #1	PSV-31656 (Tren #1)	Válvula de seguridad CTQ	Solenoides y Set-Stop (9 eventos)	Válvula de recirculación FV-31652	Válvula de recirculación FV-31652
FECHA	17-feb-15 →	18-feb-15	19-feb-15	15-mar-15	30-mar-15	22-abr-15
Evento	•Tiempo fuera de servicio. •Intervención por parte de eléctricos GRB de cuadrilla. Movimiento correctivo FV- 31652.	•Tiempo fuera de servicio. Sin servicio de cargue. •Intervención por parte de contratista de MOVs marca EIM. Falla FV-31652.	•Válvula Set-Stop operando en falla.	Rotura del acople vástago-actuador de la MOV 31680. Se generó desvío de PGR a gas combustible, aprox. 2000 B.	Falla de control de flujo de la set stop y falla de la válvula de recirculación. Además, desconfiguración del Danload.	Soltura del acople actuador- válvula MOV31680. Se debe intervenir de emergencia con metalistas para evitar que se suelte completamente o se parta. La falla de esta válvula puede generar el presionamiento de las cisternas y que no se realice el cargue completo.
Equipo	Válvula de recirculación FV-31652	Válvula de recirculación FV-31652	Solenoides y Set-Stop	Cierre final del tren #2, MOV-31680	Computadores de flujo (Danload)	Cierre final del tren #2, MOV-31680

## ANEXO C. TABLA DE CAUSAS POSIBLES QUE GENERAN PROBLEMAS EN EL SISTEMA DE PROPILENO

Anexo 1. Causas posibles que pueden estar generando los problemas en el sistema de Propileno							
Efecto Primario							
1	Falla de valvulas solenoides y valvulas set stop.	2	Falla de la válvula de recirculación (PCV 31663)	3	Bajo flujo en la salida de gases de la cisterna	4	Falla en computadores de flujo (Danload)
5	Falla de la MOV-31680	6	Disparo Válvula de seguridad CTQ	7		8	
1	Mesh de los filtros F-31651/52 inadecuado para la aplicación.	12	Selección inadecuada del actuador.	23	Diseño inadecuado del acople	34	Mantenimiento deficiente de las válvulas por parte de PLEXPOR
2	Baja presión de la cisterna: < 60-70 psig	13	Seteo inadecuado del actuador	24	Procedimiento inadecuado de mantenimiento.	35	Set de flujo crucero mal seteados o especificado durante la puesta en marcha del proyecto.
3	Calibración inadecuada de válvula de aguja de valvulas solenoides.	14	Procedimiento inadecuado de ajuste del acople	25	Alta vibración del sistema	36	Diseño inadecuado de liquidación de los carotranques
4	Aumento brusco de presión en la entrada de la válvula cuando finaliza primero una cisterna	15	Soportería insuficiente para el peso/posición del actuador	26	Falta de procedimientos para diagnóstico, mantenimiento preventivo y correctivo.	37	danload (mantenimiento y operación)
5	Falla del controlador.	16	Estrategia de control y sintonía del lazo inadecuada.	27	Falta de oportunidad en la entrega de repuestos	38	Falta de competencias en la configuración del danload
6	Falla Operación válvula de recirculación PCV31663.	17	ROs en descarga de la bomba y antes de la válvula de recirculación mal especificadas	28	Falta de competencias de mantenedores propio.	39	Descalibración del final de carrera (se registra "alarma por torque" en DCS)
7	Diseño / selección inadecuada	18	Presión muy alta en descarga de la bomba SP3161 ó muy alta cabeza del SP3161	29	Falta de recurso determinado por la estrategia (mixta).Personal	40	Diseño/selección inadecuado para la aplicación
8	El componente mecánico de la válvula esta diseñado para controlar flujo y no presión	19	Falla válvula de set stop	30	Falla del sistema neumatico de la cisterna (baja la presión < 40 psig)	41	Repuesto / parte inadecuada
9	Selección inadecuada de la válvula	20	Falta y/o inadecuada soportería del cuadro de control de recirculación	31	Daño de conectores de mangueras que suministran el aire a la válvula	42	Sistema de aire de los CTQS inadecuado
10	Diametro de la RO 31650 en la entrada de la válvula no fue recalculado, después del cambio de las RO 31657A/58A	21	Alimentación eléctrica inadecuada (corriente mayor a la normal)	32	Procedimiento inadecuado de operación	43	Sistema de control inadecuado
11	Acopleentre actuador y valvula inadecuado.	22	procedimiento inadecuado de calibración, del componente mecánico de la válvula	33	Calamilla (escamas de metal oxidado) y otros sólidos procedente del interior de la cisterna	44	Mantenimiento de valvulas de fondo de cisternas inadecuado

Los colores se utilizaron para diferenciar las causas agrupadas en 6 componentes.

**ANEXO D. TABLA DE CAUSAS PROBABLES QUE GENERAN PROBLEMAS EN EL SISTEMA DE PROPILENO**

<b>DEFINICION DE CAUSAS PROBABLES.</b>			
<b>CAUSA</b>	<b>TIPO</b>	<b>VALIDACIÓN (EVIDENCIA)</b>	<b>Comentarios</b>
Mesh de los filtros F-31651/52 inadecuado para la aplicación	PROBABLE	Válida. Porque se han encontrado partículas en las válvulas de fondo de las cisternas, en el asiento de las válvulas solenoides set stop y en los propios filtros durante su limpieza.	Imágenes de la inspección de las set stop e informe análisis de falla de las válvulas de fondo. Informe análisis de las partículas encontradas en las válvulas de fondo evidencias de eventos anteriores. Las válvulas set stop disponen de filtro a la entrada de producto por la toma de alta
Baja presión de la cisterna: < 60-70 psig	DESCARTADA	Descartada. El sistema tiene una protección que no permite el cargue si la presión en el sistema de retorno no es mayor a 30 PSI, por otra parte se tiene evidencia que se realizan cargues conformes con presiones inicial de cisternas entre 60 y 90 PSI	Registro de los datos de cargue tomado por los operadores y datos de verificación producto de este análisis tomadas desde el DCS.
Calibración inadecuada de válvula de aguja en las solenoides en el cambio / o reparación de partes.	PROBABLE	Válida. Inicialmente no se disponía de procedimiento, actualmente existe procedimiento creado por los mismos mantenedores que normalmente atienden el mantenimiento de las válvulas solenoides. Pero este procedimiento aun no es conocido por todo el personal de mantenimiento.	Procedimiento existente INS-N-0003, generado por personal de instrumento del área de Materias Primas
Aumento brusco de presión en la entrada de la válvula cuando finaliza primero una cisterna o cuando hay problemas en el sistema	PROBABLE	Se tiene evidencia que las sobre presiones en el tren de llenado afectan la operación confiables de las solenoides	generalmente se da por falla en el sistema de recirculación o falla en las válvulas set stop
Falla del controlador (DSC)	POSIBLE	Pendiente. Según Ingeniero Electronico: Gabriel Quintero, con revisión en campo no hay evidencia que la configuración actual del controlador pueda afectar el desempeño de las válvulas solenoides. No se tienen evidencias al respecto que permita validar o descartar esta causa posible.	
Falla Operación válvula de recirculación FV 31652, anterior PCV 31663.	PROBABLE	Validada. Se tienen múltiples evidencias de fallas, en las cuales se evidencia que la falla de la recirculación afecta a varios componentes del tren.	Se realizaron seguimiento detallados a la operación y reparación del sistema, evidenciando oportunidades en los procedimientos de intervención
Falla en válvula set stop	PROBABLE	Validada. Se tienen evidencias de las fallas de la válvula set stop, debido a problemas internos con el O-ring, el cual hace pegar la válvula y esto afecta las solenoides	
Diseño/selección inadecuada de las solenoides	PROBABLE	De acuerdo a la información suministrada por personal de instrumentos, es posible que las solenoides estén mal seleccionadas, esto debido a las presiones a las cuales vienen probadas las solenoides vs la presión real del sistema	

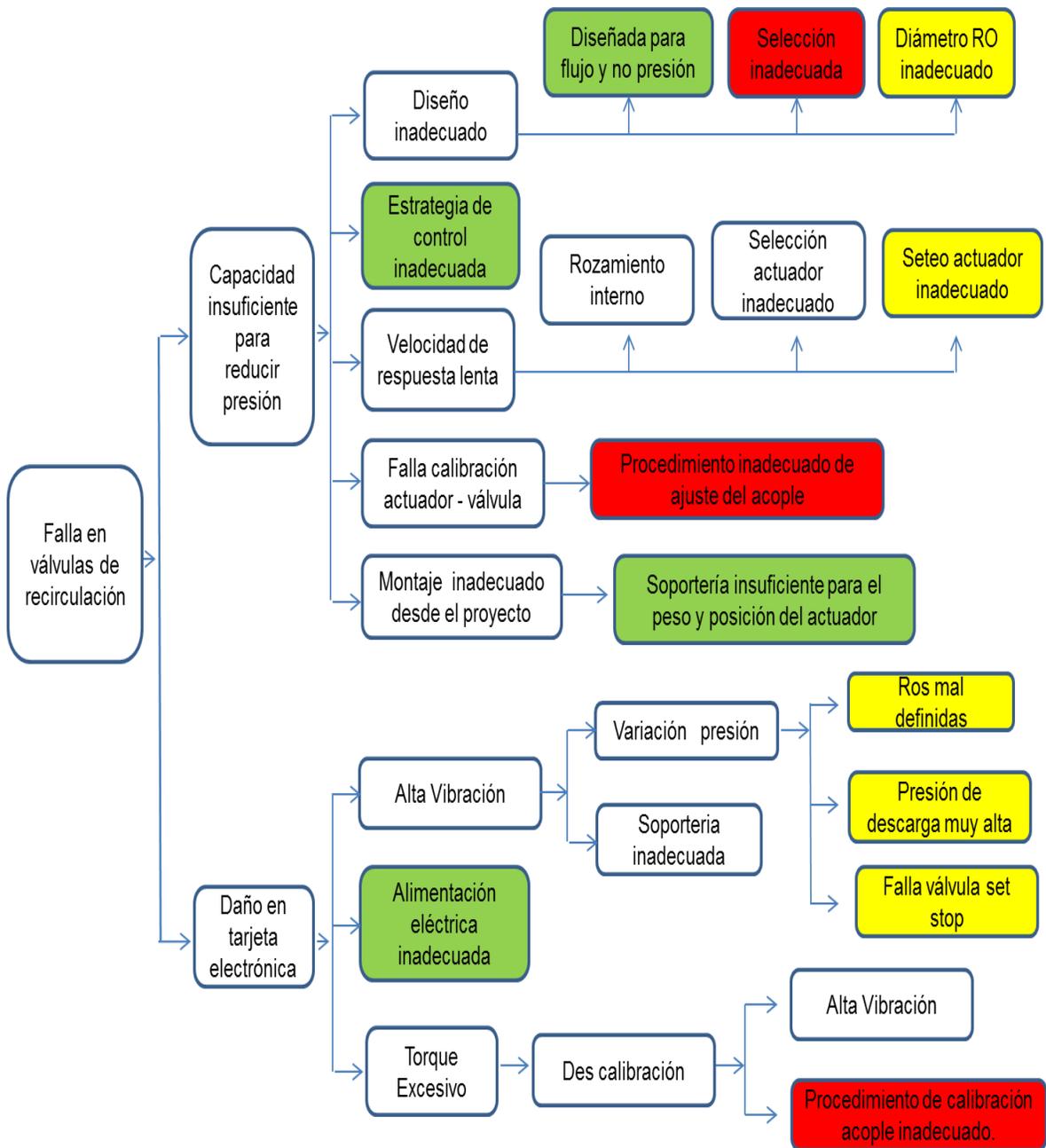
DEFINICION DE CAUSAS PROBABLES.			
CAUSA	TIPO	VALIDACIÓN (EVIDENCIA)	Comentarios
El componente mecánico de la válvula esta diseñado para controlar flujo y no presión	POSIBLE	Posible. El desempeño del componente mecánico de la válvula es independiente de la variable a controlar. El desempeño depende de la característica intrínseca de caudal (geometría de cierre por eje.: tapon-asiento).	Informe de análisis presentado por Gabriel Quintero en el desarrollo del RCA. Donde muestra la curva de la válvula señalada.
Selección inadecuada de la válvula de recirculación	PROBABLE	Validada. El tipo de válvula no es adecuado para el control que se requiere; el diámetro o dimensiones de la válvula no es el adecuado para la configuración actual, para las P3161A/B. Si se trabaja con la SP3185A, es posible que la válvula de recirculación permitan el control de la presión constante que se requiere arriba de la set stop. Recomiendan una válvula "quick opening" con una curva parabolica, el ingeniero de Instrumentos y Controles Leonardo Baena y el Ing. Geonavis Hernandez.	Simulación del sistema en Inplant, realizado durante el desarrollo del RCA.
Diametro de la RO 31650 en la entrada de la válvula no fue recalculado, después del cambio de las RO 31657A/31658A	PROBABLE	Validada. En el documento "Chequeo hidraulico de Líneas de proceso, rev A&B" se presentan los datos de recalcado de las RO 31657A/58A, pero no de la RO 31650; es decir se mantuvo la RO original aún despues de cambiar las RO mas cercanas a la descarga de las bombas SP3161A/B. Los datos encontrados en los datos de ingeniería coinciden en versión con los de las RO recalculadas ubicadas en las descargas de la P3161A/B (RO 31657A/58A).	Documento en word "Chequeo hidraulico de Líneas de proceso, rev A&B"
Acople inadecuado. El tipo de acople actuador-válvula hace rotar el mecanismo vástago - tapon, cuando el mov debe ser unicamente deslizando.	DESCARTADA	Descartada. Es poco probable que se presente giro del vástago de la válvula dentro del cuerpo de la misma. El movimiento rotario del mecanismo del actuador se convierte en lineal antes del acople. Sin embargo, es necesario verificar el tipo de mecanismo de transmisión (mov rotatorio - lineal).	Informe de Analisis presentado en el desarrollo del RCA
Selección inadecuada del actuador	PROBABLE	Validada. El actuador permite la modulación del flujo. Sin embargo, para el tipo de aplicación de control de flujo los actuadores generalmente utilizados son de fuente de energía neumatica, los cuales responden mas rápido y confiable.	Articulo neumatic vs elctrical actuators, revisado en el RCA.
Seteo inadecuado del actuador	DESCARTADA	Descartada. El seteo que se da al actuador consiste en fijar unas posiciones limite del desplazamiento del vástago de la válvula. En esta válvula de recirculación el seteo correcto es 0% a 100%, sin embargo, el seteo se vé reflejado en la posición del vástago. Por lo tanto, la calibración del conjunto es lo que se debe asegurar.	Se evidencia en las fallas presentadas al soltarse el acople, que la oportunidad por una parte en asegurar el ajuste de la contratuerca del acople.
Procedimiento inadecuado de ajuste del acople	PROBABLE	Validada. No existe un procedimiento que asegure la calibración. Se ha evidenciado que cada vez que se calibra el conjunto actuador - válvula la calibración es asegurada por la experticia de quien realice la actividad.	Documento generado sobre lo evidenciado en los seguimientos a este sistema.
Soportería insuficiente para el peso/posición del actuador	DESCARTADA	Descartada. Ingeniero Estatico realizó pruebas en campo de la rigidez de montaje del actuador; la rigidez es la adecuada y no se requiere soportería adicional entre la válvula y el actuador. Se descarta que por la geometría y peso del actuador se genere un mal funcionamiento de la válvula. Por el contrario para el by-pass se demostró que la rígidez no es suficiente y con una fuerza minima se genera vibración en la línea.	Informe presentado duarnte el desarrollo del RCA.

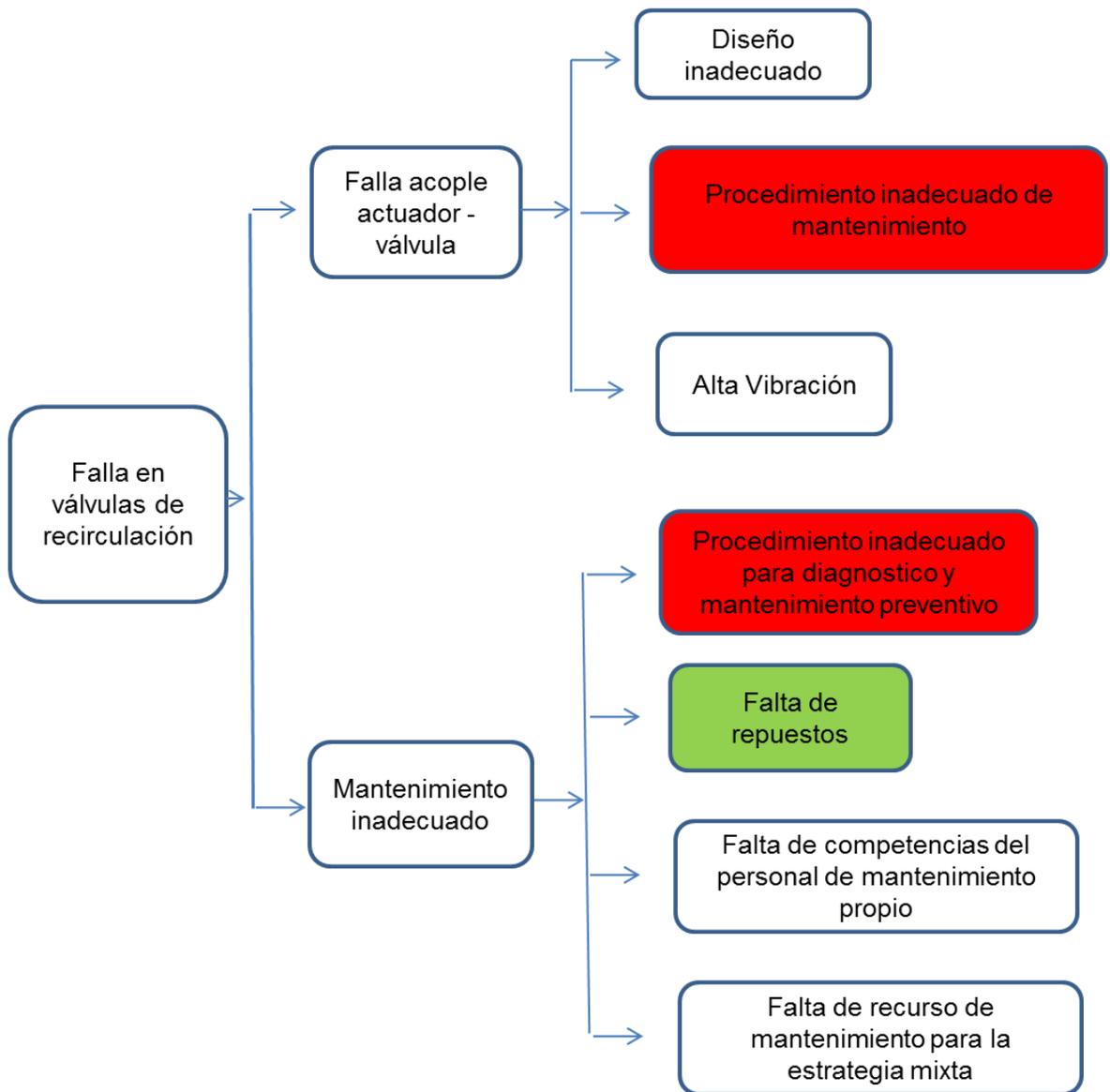
DEFINICION DE CAUSAS PROBABLES.			
CAUSA	TIPO	VALIDACIÓN (EVIDENCIA)	Comentarios
Estrategia de control y sintonía del lazo inadecuada	DESCARTADA	Descartada. Información entregada por Gabriel Quintero aclara que la estrategia es del tipo PI (Proporcional, Integrativa), que permite a la válvula hacer control de presión o flujo. La sintonía es suficiente para la respuesta de la válvula. El desplazamiento de la válvula esta estimado en 45 seg, mientras la respuesta del controlador es de 300 mseg.	Informe de análisis presentado por Gabriel Quintero, durante el dedsarrollo del RCA.
ROs en descarga de la bomba y antes de la válvula de recirculación mal especificadas	PROBABLE	Validada. Los datos registrados en un cargue normal de dos cisternas muestran presiones entre 290 - 350 psig. Con la simulación realizada en Inplant, se pudo verificar que las RO después de la bomba SP3161, si cumplen con la función de caída de presión excedente para llevarla al nivel de la presión de descarga de la P3185A. La RO ubicada antes de la válvula de recirculación esta diseñada para proteger la válvula y la línea de recibo de PGR que es la que recibe la recirculación.	Ver informe de la simulacion.
Presión muy alta en descarga de la bomba SP3161 ó muy alta cabeza del SP3161	PROBABLE	Validada. La bomba está diseñada para trabajar con 680 GPM y entregar una presión de 540 psig, según data sheet y curva. Mientras que el sistema está diseñado para manejar 460 GPM normalmente y 230 GPM como mínimo, según documentos de la ingeniería. Si la bomba entrega 460 GPM con la recirculación cerrada la presión antes de la RO 31557A y RO31558A es de 575 psig. Para generar una caída de presión antes del brazo de medición existe una RO 31657A /58A, que según calculos tumban hasta 115 psig c/u.	Documento en PDF "Hojas de Datos bombas PGR NEGLP"; Curva de Byron Jackson DCN-015006, rev final; documento en word "Chequeo hidraulico de Líneas de proceso, rev A&B"
Falla válvula de set stop	PROBABLE	De acuerdo a los seguimientos realizados en el taller, se pudo evidenciar que hay oportunidades con el tipo de o ring isntalados en la valvula set stop, los cuales se salen de la posición de operación, debido al desgaste.	Se dispoonen de fotos y videos del montaje de la valvula y el atascamiento que presenta cuando falla.
Falta y/o inadecuada soportería del cuadro de control de recirculación	PROBABLE	Validada. Es evidente durante el arranque y pare de cargue el movimiento excesivo de la línea de bypass de la recirculación (FV 31652). Cuando la línea está en stand by, se pudo verificar que al aplicar una pequeña fuerza perpendicular a la línea, esta se mueve facilmente. Pendiente medir vibración sobre cuerpo de la MOV y comparar con las especificaciones de vibración max.	E-mail de Rodolfo Zuluaga del 08/04/14.
Alimentacion eléctrica inadecuada (corriente mayor a la normal)	DESCARTADA	Válidada. Los eventos de falla presentados hasta la fecha no se han relacionado con exceso de corriente.	
procedimiento inadecuado de calibración, del componente mecánico de la válvula de reccirculacion	PROBABLE	Validada. No existe un procedimiento que asegure la calibración. Se ha evidenciado que cada vez que se calibra el conjunto actuador - válvula la calibración es asegurada por la experticia de quien realice la actividad.	
Diseño inadecuado del acople	DESCARTADA	Descartada. Este tipo de acople roscado es el que normalmente se utiliza en este tipo de conexiones. Se compara con esquemas de otras válvulas evaluados en internet.	

DEFINICION DE CAUSAS PROBABLES.			
CAUSA	TIPO	VALIDACIÓN (EVIDENCIA)	Comentarios
Diseño inadecuado del acople	DESCARTADA	Descartada. Este tipo de acople roscado es el que normalmente se utiliza en este tipo de conexiones. Se compara con esquemas de otras válvulas evaluados en internet.	
Procedimiento inadecuado de mantenimiento.	PROBABLE	Validada. La evidencia tomada cuando se suelta el acople, relaciona este modo de falla con procedimiento inadecuado de mantenimiento correctivo. No hay evidencia de procedimiento estandarizado de acople/calibración de esta válvula.	Ver documento donde se ilustra lo evidenciado
Alta vibración sistema de recirculación	DESCARTADA	Descartada. La evidencia tomada cuando se suelta el acople, relaciona este modo de falla con procedimiento inadecuado de mantenimiento correctivo.	
Falta de procedimientos para diagnóstico, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo para uso de personal propio	PROBABLE	Validada. No hay procedimientos en el departamento de mantenimiento y/o en la Gerencia Técnica de la GRB.	
Los repuestos los provee el contrato de mantenimiento de MOVs, el cual no es continuo.	DESCARTADA	Descartada. Las fallas de la MOV no se han relacionado a falta de repuestos; aunque los repuestos del actuador eléctrico los debe proveer el contrato, que no es continuo y en este momento no está activo.	
Falta de competencias de mantenedores propio, para intervención de actuadores de MOV.	PROBABLE	Validada. No hay personal propio competente para el mantenimiento de los actuadores MOV. No hay procedimientos estandarizados para la calibración de las válvulas y el acople correcto de actuador-válvula.	
Falta de recurso determinado por la estrategia (mixta)	PROBABLE	Válidada. La estrategia de mantenimiento es mixta: el mantenimiento del actuador es contratado, el mantenimiento de la válvula es propio con el personal de taller de válvulas. Desde octubre de 2014 no hay contrato de MOV.	
Falla del sistema neumático de la cisterna (baja la presión < 40 psig)	PROBABLE	Con la información de investigaciones anteriores debido a disparo de las válvulas de las cisternas se pudo evidenciar que hay oportunidades en el sistema neumático de los Carro Tanques.	Ver anexo sobre las evidencias de estas investigaciones
Daño de conectores de mangueras que suministran el aire a la válvula de los carrotanques	PROBABLE	Validada. Hay reportes de los operadores del área sobre fallas frecuentes de los conectores.	Reportes de turno de operaciones y correos sobre el tema.
Procedimiento inadecuado de conexión de Carrotanques	DESCARTADA	Se dispone de procedimiento y se evidencia que el personal tiene claro la realización de la actividad	

DEFINICION DE CAUSAS PROBABLES.			
CAUSA	TIPO	VALIDACIÓN (EVIDENCIA)	Comentarios
Calamilla (escamas de metal oxidado) y otros sólidos procedente del interior de la cisterna	PROBABLE	Validada. En los Informe de: Soligas se evidencian partículas provenientes de trabajos del proyecto (13/09/2012). y en el "RCA corrosión en cisternas que transportan PGR" con fecha septiembre 2013, hay evidencia de la presencia de herrumbre y otras partículas, encontradas durante las inspecciones a las cisternas durante los años 2012 y 2013. El origen de estas partículas se identificó como acumulación de residuos de la vieja estación, del desprendimiento de partículas del interior de la cisterna y de arrastre de las nuevas líneas del proyecto de propileno.	Informe de Soligas con fecha 13/09/2012 "RCA corrosión en cisternas que transportan PGR" con fecha septiembre 2013.
Mantenimiento deficiente de las válvulas por parte de PLEXPOR T	POSIBLE	Pendiente. No hay evidencia de que el mantenimiento de las válvulas por parte de PLEXPOR T sea deficiente. De lo que si se tiene información es que estas válvulas son inspeccionada cuando se hace mantenimiento a la cisterna, cada 5 años. Antes de completar este periodo las válvulas se inspeccionan externamente si fallan.	
Set de flujo crucero está seteado en 230 GPM, especificado durante la puesta en marcha del proyecto.	PROBABLE	Validada. La hoja de especificaciones de los educutores J-31651/52 dice que estan diseñados para trabajar con un flujo normal de 250 GPM. Actualmente solamente se manejan 230 GPM de PGR liquido a través del educutor. Es decir, al aumentar el flujo de PGR a través del educutor aumentará el retiro de vapores de la cisterna, segun lo evidenciado en seguimiento a los cargues.	Hoja de datos de educutor.
Diseño inadecuado de liquidación de los carrotanques	DESCARTADA	Descartada. El actual procedimiento de liquidación requiere el numero de transacción del computador de flujo tanto para que conductor pueda salir de la GRB como por si es requerido por autoridades en carretera. Esta forma de liqueidar ocasiona que se agoten los recursos (espacio) de la memoria del download. (200 transacciones). Para esta forma de liquidación debe ser mas grande o la frecuencia de backup mayor.	Informe de análisis presentado por Gabriel Quintero. Pag 11.
Falta de gestión integral del danload (mantenimiento y operación)	POSIBLE	Validada. No se encontró información sobre una estrategia para el mantenimiento del danload. Es posible que su mantenimiento haga parte del acance del contrato de medición	
Falta de competencias en la operación del danload.	PROBABLE	Validada. El ingeniero Gabriel Quintero asegura que nunca ha recibido entrenamiento en la operación/ mantenimiento de este equipo, al igual que personal de medicion.	
Descalibración del final de carrera valvula MOV tren de llenado (se registra "alarma por torque" en DCS)	POSIBLE	Por la configuración de esta válvula este modo de falla no aplica: el vástago no tiene desplazamiento lineal (sube y baja), tiene una bola en su interior, que permite el paso de fluido al girar. Con la última falla registrada, manualmente se giro para determinar si estaba pegada y se pudo verificar que se puede mover facilmente por su configuración (accionamiento es de un 1/4 de vuelta).	
inadecuado para la aplicación (Valvula MOV tren de llenado)	DESCARTADA	Descartada. El diseño original entregado por Insurcol en un plano corresponde al estandar utilizado entre actuadores y valvulas de este tipo.	
Repuesto / parte inadecuada. Mov trenes de llenado	PROBABLE	Validada. El acople que falló en abril de 2015, no corresponde al diseño original. Insurcol entregó un plano como el original, en el cual el tipo de acople es de una sola pieza. Al parecer en una falla anterior y ante la imposibilidad por alguna razon de fabricar el acople original, se instaló un acople diferente cuyo diseño no soportaba el torque aplicado.	Ver evidencias sobre las fallas de estas valvulas.
Sistema de control de presion en los carrotanques inadecuado	PROBABLE	En diferentes revisiones e investigaciones realizadas, se ha identificado esta oportunidad, relacionada con la forma como se controla la presion en los Carro Tanques	Ver evidencias en anexo xxx sobre las fallas de disparo de las cisternas

**ANEXO E. DIAGRAMA CAUSA EFECTO PARA VÁLVULA DE RECIRCULACIÓN.**





## ANEXO F. TABLAS DE VERIFICACIÓN DE LA CAUSA RAÍZ.

EFECTO PRIMARIO	CAUSAS PROBABLES	DIMENSIONES DEL PROBLEMA				SE HA CONOCIDO COMO CAUSA RAÍZ EN EL PASADO?	ESTA CAUSA REPETIRÍA EL PROBLEMA?	ELIMINANDO LA CAUSA SE ELIMINA EL PROBLEMA?	CAUSA RAÍZ
		IDENTIDAD	TIEMPO	LUGAR	EXTENSIÓN				
		QUE?	CUANDO?	DONDE?	CUANTO?				
	Incumplimiento en el despacho de PGR, por falla o mal funcionamiento de varios componentes del sistema	Cuando se realiza el procedimiento de llenado de las cisternas del cliente	Los problemas se presentan en el brazo de medición y en el cuadro de recirculación de flujo de P3161A/B	Un día sin despacho de PGR equivale a pérdidas por USD \$121300 para el departamento de Materias Primas,					
Falla de las solenoides de las válvulas set stop de los dos brazos	Mesh de los filtros F-31651/52 inadecuado para la aplicación	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
	Calibración inadecuada de válvula de aguja en el cambio/reparación de partes, por parte de personal de mantenimiento.	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
	Falla Operación válvula de recirculación PV31663	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
	Diseño o selección inadecuada	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
	Falla en válvulas set stop	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI

Falla de la válvula de recirculación (FV-31652)	Selección inadecuada de la válvula	SI							
	Diametro de la RO 31650 en la entrada de la válvula no fue recalculado, después del cambio de las RO 31657A/58A	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
	Selección inadecuada del actuador	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	Procedimiento inadecuado de ajuste del acople	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
	ROs en descarga de la bomba y antes de la válvula de recirculación mal especificadas	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	Falta y/o inadecuada soportería del cuadro de control de recirculación	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	Procedimiento inadecuado de calibración, del componente mecánico de la válvula	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
	Falta de procedimientos para diagnostico, mantenimiento preventivo y mantenimiento correctivo para uso de personal propio	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO
Falta de competencias de mantenedores propios	SI	NO	SI	SI	NO	NO	NO	NO	

Falla en sistema de retorno de vapores (bajo Flujo)	Daño de conectores de mangueras que suministran el aire a la válvula	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI
	Material particulado ingresa al mecanismo móvil de la válvula	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	Falla en válvula set stop	SI	SI	SI	SI	NO	SI	SI	SI

Falla en computadores de flujo (Danload)	Diseño inadecuado de liquidación de los carrotaques	SI	SI	NO	SI	NO	NO	NO	NO
	Falta de gestión integral del danload (mantenimiento y operación)	SI	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO
	Falta de competencias en la operación del danload	SI	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO
	Falla en tarjeta	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI

Sistema llenadero de PGR a carrotaques	Falla de válvulas MOV en brazos de llenado	Repuesto / parte inadecuada de acople	SI	SI	SI	SI	NO	SI	NO	SI
Sistema llenadero de PGR a carrotaques	Disparo Válvulas de seguridad CTQS	Sistema de control de presión en los carrotaques inadecuado	SI	SI	SI	SI	SI	SI	NO	SI