Universidad Autónoma de Querétaro
Facultad de Ingeniería
Maestría en Ingeniería de Calidad

Determinación de parámetros de operación de banco de pruebas de ingeniería de Cilindro Maestro y Booster aplicando diseño de experimentos.

Opción de titulación
Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de Maestro en Ingeniería de Calidad.

Presenta:
Ing. Ind. Andy Fabián Hernández Referia (225966)

Dirigido por:
M.C. Guillermo Hiyane Nashiro

M.C. Guillermo Hiyane Nashiro
Presidente — Firma

M. en A. Ma. Guadalupe López Vallejo
Secretario — Firma

Dr. Roberto de la Llata Gómez
Vocal — Firma

M.C. Alejandra Estrella Sánchez
Suplente — Firma

M.I. Javier García Pérez
Suplente — Firma

Dr. Aurelio Domínguez González
Director de la Facultad

Dra. Ma. Guadalupe Flavia Loarca Piña
Director de Investigación y Posgrado

Centro Universitario
Querétaro, Qro. México.
Septiembre 2015.

REPOSITORIO INSTITUCIONAL DGBSDI-UAQ

La presente obra está bajo la licencia:
https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.es

CC BY-NC-ND 4.0 DEED

Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Usted es libre de:

Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

La licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:

Atribución — Usted debe dar crédito de manera adecuada , brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios . Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.

NoComercial — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales .

SinDerivadas — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — No puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otras a hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Avisos:

No tiene que cumplir con la licencia para elementos del material en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se dan garantías. La licencia podría no darle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

RESUMEN

La presente investigación está centrada en la determinación de parámetros de operación de banco de pruebas de ingeniería de Cilindro Maestro y Booster aplicando diseño de experimentos. El Cilindro Maestro y Booster son componentes del sistema de frenado del automóvil, utilizados para responder eficientemente ante situaciones en las que se debe detener el vehículo rápidamente, mediante la asistencia mecánica de frenado. Debido a que son componentes de un sistema de seguridad, las pruebas que se realizan a los mismos deben llevarse a cabo con los más altos estándares que permitan una confiabilidad total del sistema. La prueba de desempeño que se realiza al Cilindro Maestro y Booster requiere conocer cómo interactúan los factores y su afectación sobre las resultantes, para poder así establecer una configuración de parámetros óptima del banco de pruebas que permita una optimización del proceso y un mayor conocimiento del producto. Primeramente se identifican los factores más importantes dentro del proceso de ejecución de la prueba de desempeño: nivel de vacío, consumo de líquido de frenos circuito primario y consumo de líquido de frenos circuito secundario, posteriormente se valida su significancia así como la de sus interacciones. Una vez identificada la significancia de factores, se modela ecuaciones para las resultantes críticas para la calidad. Se validan datos de los modelos y se concluye la adecuación de los mismos. Se establece una configuración de parámetros para el banco de pruebas, se valida la configuración de parámetros y finalmente se actualiza el proceso de ejecución de prueba. La estandarización de esta configuración óptima de parámetros ha permitido una realización de pruebas con Calidad a la Primera, simplificando su ejecución que podrá ser realizada por un técnico, disminuyendo un 10% del tiempo de realización de pruebas, mayor conocimiento del producto y la capacidad de identificación de fluctuaciones atípicas en el sistema.

(**Palabras clave**: Cilindro Maestro y Booster, Sistema de Frenado, Diseño de Experimentos)

SUMMARY

This research is focused on determining operating parameters of engineering test rig of Booster and Master Cylinder using design of experiments. The Master Cylinder and Booster are components of the car braking system, used to assist efficiently when the vehicle must be stopped quickly by mechanical brake assist. Due to they are components of security system, the test must be performed with the highest standards to assure a total system reliability. The performance test applied on the Master Cylinder and Booster requires knowing how factors interact and its effects on the resulting, in order to establish and set the parameters of the test to permit a process optimization and increased product knowledge. Firstly, the most importance factors involved in the process are identified: Vacuum level, primary circuit of brake fluid and secondary circuit of brake fluid, then validates their significance and their interactions. Having identified the significance of factors, equations for critical quality characteristics are modeled. Modeling is validated and adequacy, concluding its acceptance. Set up for the performance test is established and validated, after acceptance the process is adequate. The standardization of this set up has allowed a first time quality, leading to simplification of process (could be performed by a technician, not necessarily by an engineer), 10% decrease of the time of testing, greater product knowledge and the ability to identify atypical fluctuations in the system.

(Key words: Master Cylinder and Booster, Braking System, Design of Experiments)

El presente proyecto está dedicado

a mis hermanos Laury, Tere y Kevin, a mi sobrina Camila

a mi mamá Charito, mi mamá Aidé y mi papá Santiago,

a mi abuelita Elena y a la Sra. Lupita Escobedo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco la oportunidad brindada por el Ing. Juan Carlos Amaya, de haber podido trabajar con él, así como el haber enriquecido con sus revisiones y acertados comentarios, el presente proyecto. Así mismo agradezco a los ingenieros del área de CASE: David Flores, Eloy Ávila, Ricardo Pérez y Christian Torres, por su colaboración en las diversas actividades para el desarrollo del proyecto.

Cabe mencionar que en la preparación de este proyecto se recogieron las opiniones desinteresadas de mis sinodales, Maestra Lupita López Vallejo, Maestra Alejandra Estrella, Dr. Roberto de la Llata y Maestro Javier García, a quienes también les agradezco el esfuerzo realizado, así como a mi director de tesis el Maestro Guillermo Hiyane.

Mi agradecimiento a mis maestros, coordinador de maestría, personal administrativo y compañeros de clase por todo ese conocimiento compartido, apoyo, dedicación y esfuerzo que pusieron en cada uno de los momentos durante esta experiencia.

Gracias a dios, a mi familia de Chiapas, Querétaro y de la Ciudad de México y a mis amigos por su cariño y apoyo incondicional en todo momento.

Finalmente agradezco a mi jefa, Patricia Jordan, por su apoyo y aprendizaje profesional y humano brindado en todo momento.

TABLA DE CONTENIDOS

Página

RESUMEN ..... **ii**

SUMMARY ..... **iii**

AGRADECIMIENTOS ..... **v**

TABLA DE CONTENIDOS ..... **vi**

ÍNDICE DE TABLAS ..... **viii**

ÍNDICE DE FIGURAS ..... **ix**

ÍNDICE DE ECUACIONES ..... **xi**

1. INTRODUCCIÓN **1**

2. ANTECEDENTES **4**

3. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS Y OBJETIVOS **6**

3.1 Hipótesis 6

3.2 Objetivo General 6

3.3 Objetivos Particulares 6

4. FUNDAMENTO TEÓRICO **7**

4.1 Diseño de Experimentos Clásico 8

4.2 Superficie de Respuesta (MSR) 11

4.3 Cilindro Maestro y Booster 14

4.4 Banco de Pruebas 17

5. METODOLOGÍA **19**

5.1 Definición 19

5.2 Mediciones 23

5.2.1 Gage R&R 23

5.2.2 Estudio de Capacidad. 28

5.3 Análisis estadístico 33

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 46
6.1 Mejorar (Improve)..... 47
6.2 Controlar (Control) 54
7. CONCLUSIONES 56
8. GLOSARIO 58
9. BIBLIOGRAFÍA 59

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Página

5-1 Marco del proyecto. 21

5-2 Cronograma de actividades propuesto vs tiempo real. 22

5-3 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Threshold. 25

5-4 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Jump in. 25

5-5 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Knee point. 25

5-6 Análisis R&R del sistema de medición para Threshold. 26

5-7 Análisis R&R del sistema de medición para Jump in. 27

5-8 Análisis R&R del sistema de medición para Knee point. 27

5-9 Resultados de Técnica de Grupo Nominal Colectiva (TGN) 35

5-10 Actividades más importantes en el Proceso de Operación. 35

5-11 Réplicas requeridas para Diseño de Experimento. 37

5-12 Factores potenciales y sus niveles. 40

5-13 Diseño experimental 3^2 y valores de Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4. 40

6-1 Datos para la evaluación de la solución propuesta. 49

6-2 Comparativo de capacidad de proceso. 54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Página

2-1 Mapa de Localización de la empresa. 5

4-1 Experimento Factorial con y sin interacción. 8

4-2 Experimento determinístico y puntos muestrales. 10

4-3 Superficie de respuesta tridimensional. 13

4-4 Gráfica de contorno de una superficie de respuesta. 13

4-5 Componentes involucrados en el mBA. 15

4-6 Valores de entrada y salida de evento. 16

4-7 Cilindro Maestro. 16

4-8 Banco de Pruebas de Cilindro Maestro y Booster. 17

4-9 Programa de Calibración del Banco de Pruebas. 18

5-1 Diagrama de Flujo de Metodología DMAMC. 19

5-2 Análisis R&R del sistema de medición para Threshold. 23

5-3 Análisis R&R del sistema de medición para Jump in. 24

5-4 Análisis R&R del sistema de medición para Knee point. 24

5-5 Análisis de capacidad de proceso de Threshold. 29

5-6 Análisis de capacidad de proceso de Jump in. 31

5-7 Análisis de capacidad de proceso de Knee point. 32

5-8 Proceso de Operación de Banco de Pruebas. 33

5-9 Proceso de Operación de Banco de Pruebas. 34

5-10 Tablero de configuración de consumo de líquido de frenos. 38

5-11 Vista posterior de tablero de consumo de líquido de frenos..... 39

5-12 Conexión de conjuntos de mangueras. 39

5-13 Diagramas de Pareto para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 (con interacciones). 41

5-14 Diagramas de Pareto para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 (sin interacciones). 42

5-15 ANOVA de las resultantes Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4. 43

5-16 Efectos y Coeficientes estimados para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4. 43

5-17 Gráficas de Residuos para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4..... 44

5-18 Prueba de Igualdad de Varianza para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4..... 45

6-1 Gráficas de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 en nivel bajo..... 46

6-2 Gráficas de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 en nivel alto..... 47

6-3 Gráfica de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 – Área de Soluciones. 48

6-4 Gráfica Optimizador de respuesta para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4. 48

6-5 Capacidad y Control de Proceso de Total Stroke. 50

6-6 Capacidad y Control de Proceso de Threshold. 51

6-7 Capacidad y Control de Proceso de Jump In. 52

6-8 Capacidad y Control de Proceso de Knee Point. 53

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación Página

4.1 $y = \beta 0 + \beta 1x1 + \beta 2\ x2 + \beta 12x1\ x2 + \varepsilon$ **8**

4.2 $y = fx1, x2 + \varepsilon$ **12**

4.3 $E\ y = fx1, x2 = \eta$ **12**

4.4 $\eta = fx1, x2$ **12**

4.5 $y = \beta 0 + \beta 1x1 + \beta 2\ x2 + \ldots\ldots + \beta k\ xk + \varepsilon$ **14**

4.6 $y = \beta 0 + i = 1k\beta ixi + i = 1k\beta iixii + i < j\beta ij\ xixj + \varepsilon$ **14**

5.1 $Y1 = -22 + 0.0461\ Vacío + 0.5171\ Prim + 0.4103\ Sek$ **45**

5.2 $Y2 = 92.2142 - 0.0353\ Vacío$ **45**

5.3 $Y3 = 34.6619 + 0.0067\ Vacío - 0.0856\ Prim$ **45**

5.4 $Y4 = -110.960 + 0.3120\ Vacío - 0.3812\ Prim - 0.2542\ Sek$ **45**

1. INTRODUCCIÓN

La planta TRW El Marqués cuenta con un equipo de Ingeniería de Aplicaciones en sitio para brindar asistencia rápida a validaciones de producto y análisis de problemas que se puedan presentar durante el desarrollo y elaboración del producto, así como los análisis de garantías de los mismos.

Para la realización de validaciones y análisis, el equipo de Ingeniería de Aplicaciones se apoya de un banco de pruebas de Cilindro Maestro y Booster, el cual fue adquirido en Noviembre del 2012 y está compuesto por dos partes hidráulicas (una de entrada y una de salida), una parte mecánica que simula el funcionamiento de los componentes dentro del sistema y una parte eléctrica que cuantifica las magnitudes a través de sensores.

Las pruebas que realiza el equipo de Ingeniería de Aplicaciones, de la planta TRW El Marqués, evalúan el desempeño y comportamiento del Cilindro Maestro y Booster dentro del Sistema de Frenado a través su curva de desempeño, la cual se construye al graficar los valores de salida de ciertas características, las cuales se describen a continuación:

- Total Stroke (mm). Es el desplazamiento del cilindro maestro resultado de la aplicación de una fuerza. Este desplazamiento permite la comunicación o aislamiento entre componentes.
- Threshold (N). Cuando el freno es aplicado, el Booster (amplificador) está en reposo hasta que la fuerza de entrada aplicada al Booster alcanza la fuerza Threshold (umbral), siendo esta la mínima cantidad de fuerza que ha de estar presente para ser registrada por el sistema.
- Jump in (N ó bar). En el momento que se llega al Threshold, el Booster responde con una rápida amplificación de fuerza llamada “Jump in” (el banco de prueba maneja esta resultante en unidad bar, unidad de presión).
- Knee point (bar). Antes del Knee Point, la presión de alimentación en la cámara de alimentación es modulada como se requiere para lograr la

desaceleración deseada del vehículo por el conductor. En el Knee Point, La cámara de alimentación está saturada de presión atmosférica. Ya no hay asistencia de amplificación adicional. Posterior al Knee Point, la fuerza de salida del Booster es la suma de la máxima fuerza amplificada más la presión manual adicional sobre la fuerza ejercida sobre el pedal. La Fuerza de salida del Booster consiste en 2 componentes de fuerza, uno es la fuerza asistida por el Booster y la otra es la presión manual a través de la fuerza ejercida sobre el pedal del freno.

Para la realización de las pruebas algunos de los factores que intervienen en el proceso son constantes, mientras que otros factores son variables dentro de un rango establecido. A continuación se explica un poco más a detalle 3 factores que se configuran para la realización de pruebas de desempeño:

- Presión de vacío. Este parámetro de prueba es importante para lograr la asistencia (amplificación) que requiere el usuario para la aplicación de frenos. La presión de vació es un factor variable dependiente directamente del factor atmosfera, considerado como aceptable a partir de dos terceras partes hasta el máximo alcanzable. En la X Conferencia General de Pesas y Medidas, de 1954, la unidad de presión denominada atmósfera fue definida como igual a 1 013 250 dinas por cm^2 (es decir 101 325 Pa) (Bureau International des Poids et Mesures, 1954).
- Consumo de Líquido de Frenos (circuitos primario y secundario). Este factor determina el desplazamiento del Cilindro Maestro, característica que se evalúa mediante la prueba de desplazamiento. Cuando se logra un desplazamiento aceptable, el arreglo del circuito primario y secundario del consumo de líquido de frenos se convierte en un factor de entrada para otras pruebas. En la prueba de desempeño (performance), se obtienen los valores resultantes de “Threshold”, “Jump in” y “Knee point”, los cuales al graficarse, generan la curva de desempeño. El consumo de líquido de frenos se regula de acuerdo a la cantidad de mangueras abiertas durante la prueba, las cuales simulan el

sistema de flujo de líquido dentro del sistema. Ambos circuitos, primario y secundario tienen hasta 34 mangueras que se regulan a través de 7 llaves que permiten el flujo de líquido de frenos hasta las mangueras. La cantidad de mangueras que abre cada llave es 1, 2, 3, 4, 6, 7 y 11.

- Velocidad de avance y retroceso. Velocidad de aplicación del freno a través del pedal. Este factor es un valor constante determinado por la prueba a realizar. Para la prueba de desempeño y desplazamiento de cilindro maestro BMW F15+ la velocidad usada es 2.5 mm/seg de avance y retroceso.

Cada uno de los factores tiene parámetros ya definidos de acuerdo a diseño (valor único o un rango de valores), sin embargo al momento de interactuar entre sí, es necesario modificar el valor de los factores variables dentro del rango de aceptación para poder obtener una curva de desempeño adecuada. El tiempo invertido en las pruebas puede ser tan corto o tan largo, como repeticiones sean necesarias hasta en encontrar el valor del factor que satisfaga todas las características.

Evaluar el desempeño del Booster y Cilindro Maestro dentro del sistema de frenado es una actividad que no se puede omitir y al haber un solo banco de pruebas para todo el equipo de Ingeniería de Aplicaciones, hacen de vital importancia el **tiempo de evaluación de los componentes**, llevando a la necesidad de **reducir dicho tiempo.**

Esta evaluación debe hacerse con los más altos niveles de calidad en la medición por lo que es indispensable **conocer como los factores y parámetros influyen para determinar las variaciones y errores de medición** y así poder hacer **más eficiente** su uso con resultados válidos y soportados científicamente.

2. ANTECEDENTES

TRW Automotive tiene una orgullosa herencia de 111 años en la industria de la automoción. Se convirtió en una organización independiente de la automoción en 2003 y comenzó a cotizar en la Bolsa de Valores de Nueva York en 2004.

En sus comienzos, TRW y sus empresas fundadoras desarrollaron una amplia gama de productos para la industria automotriz, entre ellos los tornillos y la tecnología de tornillo de cabeza que finalmente se adaptó para crear la primera válvula de motor de dos piezas, así como las ruedas de madera para el Modelo T de Henry Ford en América del Norte, y la iluminación y otros productos eléctricos en Europa. (TRW, 2014).

TRW Automotive es un líder global en seguridad automotriz, produciendo uno de los mayores conjuntos de tecnologías de seguridad activa y pasiva. Sigue estando a la vanguardia de la evolución de la dinámica del vehículo, sistemas de manejo asistido, tecnologías de cinturones de seguridad y avances de electrónica y software que mejorarán la seguridad, la comodidad y el confort de los vehículos del futuro.

Como líder mundial en sistemas de frenado y un pionero en electrónica de frenado, TRW sigue desarrollando sistemas innovadores que combinan la función de freno con funciones avanzadas, para satisfacer los estándares ambientales y de consumo de combustible a nivel mundial.

TRW ha desarrollado uno de los sistemas de actuación más ligero y con mejor rendimiento a nivel mundial, esto mediante la absorción eficiente de la presión proveniente del Booster. Este diseño compuesto por el Cilindro Maestro y el Booster abarca una amplia gama de vehículos, desde coches pequeños hasta camiones y plataformas de SUV, además de ser uno de los componentes más delgados en comparación con muchos diseños de la competencia, ofreciendo un

mayor embalaje y una reducción en el peso, con cilindros maestros de aluminio como un estándar (TRW, 2014).

México tiene una participación importante dentro del grupo TRW en la fabricación de sistemas de frenado a nivel mundial, cuenta con 2 plantas de manufactura en la ciudad de Querétaro dedicadas a la fabricación de Booster, Cilindro Maestro, Frenos de Tambor, Frenos de Disco y ABS.

Una de las plantas en la ciudad de Querétaro es **TRW El Marqués**, ubicada en el parque Tecnológico Innovación, dedicada a la fabricación de Booster (asistencia del sistema de frenado), Cilindro Maestro (dispositivo hidráulico) y ABS (Antilock Braking System). Es proveedor Tier 1 para las más importantes armadoras como GM, Chrysler, Ford, Nissan, Mazda, BMW y Daimler para cubrir mayormente el mercado Norteamericano, Europeo y Australiano.

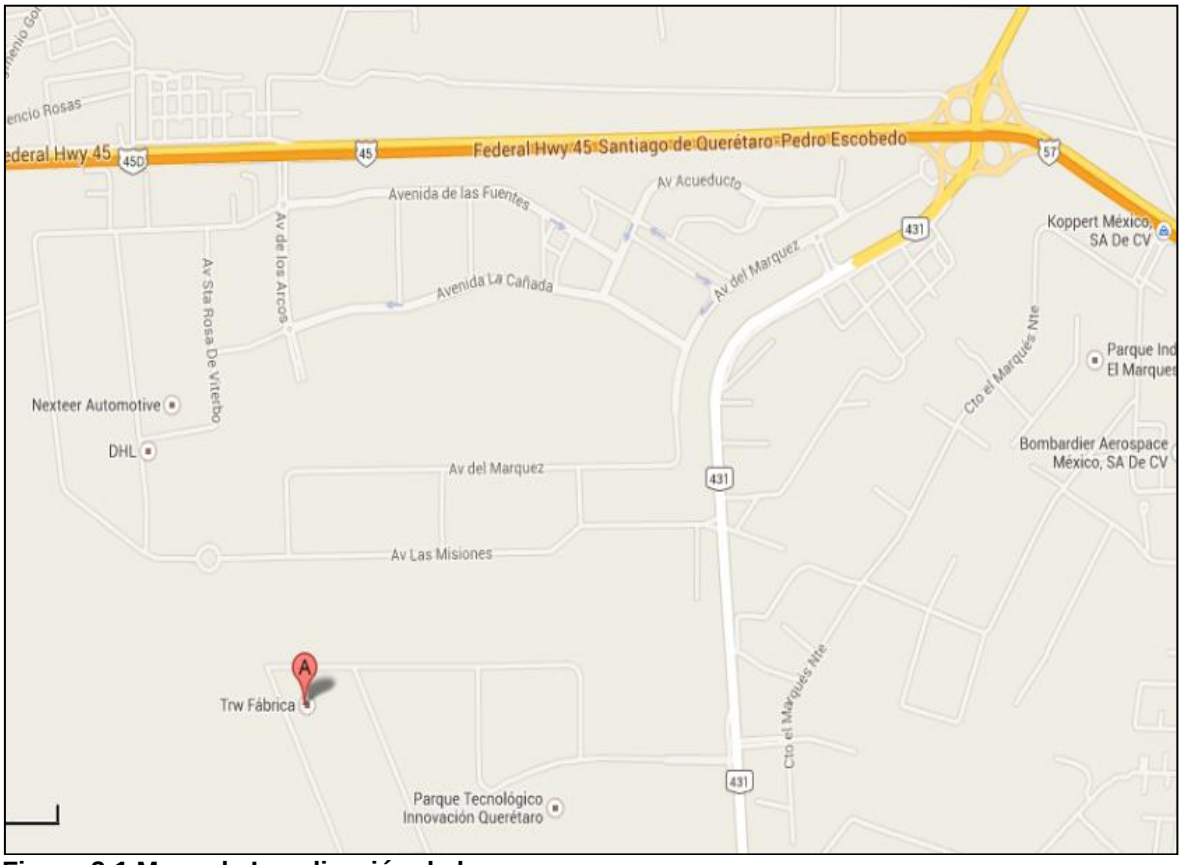

Figura 2-1 Mapa de Localización de la empresa.
Fuente: 2015 Google, INEGI.

3. PLANTEAMIENTO DE HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

3.1 Hipótesis

Es posible modelar la curva de desempeño óptima de Cilindro Maestro y Booster (fuerza y/o presión de salida) del modelo BMW F15+, a partir de los cambios de niveles en los factores presión de vacío, consumo de líquido de frenos circuito primario y consumo de líquido de frenos circuito secundario con base en un Diseño de Experimentos Completo.

3.2 Objetivo General

El objetivo principal del presente proyecto es "**Determinar los parámetros de operación del banco de pruebas de Cilindro Maestro y Booster para obtener una curva de desempeño óptima (presión de salida) para el modelo BMW F15+".**

3.3 Objetivos Particulares

Para el éxito del objetivo principal, los objetivos particulares que se deben lograr, para el modelo BMW F15+ son:

1. Determinar nivel de significancia de los factores de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster.
2. Determinar nivel de significancia de las interacciones entre factores de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster.
3. Identificar factores e interacciones que afectan significativamente en las variables respuesta de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster.
4. Determinar configuración de parámetros de Banco de Pruebas que satisfagan las especificaciones de las resultantes para la generación de una curva de desempeño óptima para Cilindro Maestro y Booster.

4. FUNDAMENTO TEÓRICO

Describir los fenomenos que ocurren a nuestro alrededor, permite entenderlos y en algunos casos predecirlos y controlarlos, para eso es necesario conocer su origen y sus efectos. El manipular factores que producen resultantes ha sido una actividad practicada desde que existe el hombre, claro que ésta se llevaba a cabo de manera inconsiente, la actividad establecida como un método, existe desde el principio de la experimentación científica. La primera teoría formal del diseño de experimentos en un “sentido moderno” fue publicado por Fisher en los 1920s y 1930s, mientras se trabajaba en una mejora en el campo de la agricultura (Trana, 2014).

Desde los 1940s, investigadores han fomentado y desarrollado el uso de estrategias experimentales en muchas áreas. En años 1970s la teoría de Taguchi en la mejora de la Calidad hizo que el diseño de experimento fuera ampliamente usado en el ambiente industrial. En los últimos 20 años, los avances en los sistemas computacionales han permitido estudiar procesos fisicos a traves de experimentos simulados en computadoras (Douthe, 2014).

En la actualidad la experimentación es una actividad necesaria para conocer el comportamiento de cualquier fenomeno y para asegurar su éxito se apoya en el diseño factorial. Por diseño factorial se entiende que en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor. Con frecuencia se llama efecto principal porque se refiere a los factores de interés primario en el experimento (Montgomery, 2004).

En algunos experimentos puede encontrarse que la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma para todos los niveles de los otros factores. Cuando esto ocurre, existe una interacción entre los factores. En la Figura 4-1 se gráfican los datos de las respuestas de dos factores (A y B) con dos niveles cada factor (- y +).

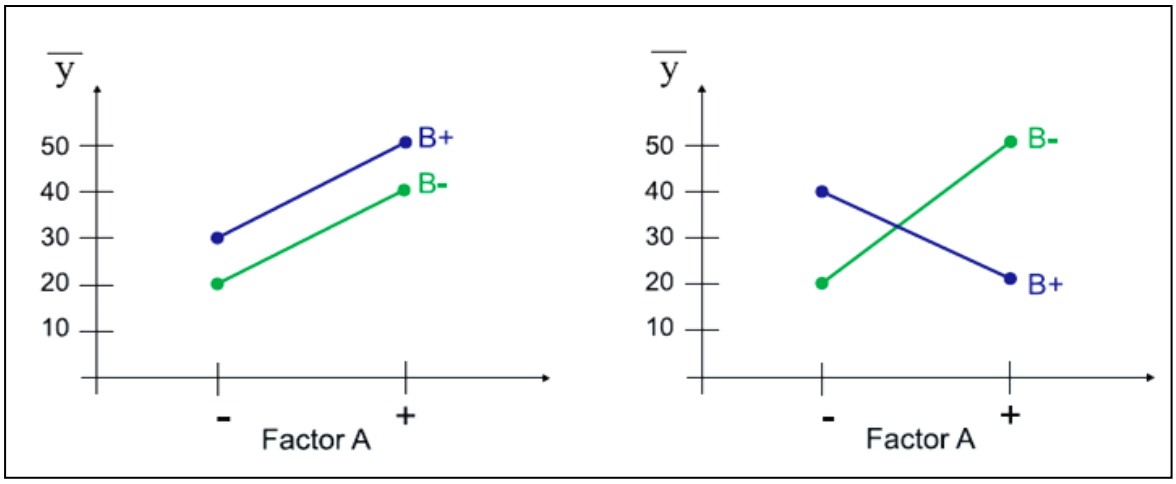

Figura 4-1 Experimento Factorial con y sin interacción.
Fuente: Montgomery, D. C. (2004). Diseño y Análisis de Experimentos (Segunda Ed.). México, D.F.: Limusa Wiley.

Observe que en la figura de la izquierda las rectas B- y B+ son aproximadamente paralelas, lo cual indica la ausencia de interacción entre los factores A y B. De manera similar en la figura de la derecha se observa que las rectas B- y B+ no son paralelas. Esto indica una interacción entre los factores A y B.

El concepto de interacción puede ilustrarse de otra manera. Suponga que los dos factores del diseño tratado son cuantitativos (temperatura, presión, tiempo, etc.). La ecuación 4-1 representa un modelo de regresión del experimento factorial de dos factores,

$$\boldsymbol{y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon} \qquad \textbf{(4-1)}$$

Donde y es la respuesta, las β son parámetros cuyos valores deben determinarse, X_1 es una variable que representa al factor A, X_2 es una variable que representa al factor B, y ε es un término del error aleatorio. Las variables X_1 y X_2 se definen en una escala codificada de -1 a +1 (los niveles bajo y alto de A y B), y X_1 y X_2 representa la interacción entre X_1 y X_2 (Montgomery, 2004).

4.1 Diseño de Experimentos Clásico

El diseño de experimentos (DOE) es una técnica estructurada formal para el estudio de cualquier situación que involucra una respuesta que varía en función de una o más variables independientes. DOE está específicamente diseñado para

resolver problemas complejos donde más de una variable pudiera afectar una respuesta y dos o más variables pudieran interactuar entre ellas. DOE es usado en todas las ramas de investigaciones científicas expandiéndose cada vez más en la ingeniería, manufactura, biología, medicina, economía, sociología, psicología, marketing y agricultura.

El modelo DOE es basado en el principio de posibles modelos de cualquier fenómeno específico real usando herramientas estadísticas (Charles, 2013).

En un diagrama de Causa y Efecto se puede apreciar las entradas que determinan como el proceso opera y tiene salidas que son producidas por el proceso. El propósito de un experimento es determinar cómo las entradas afectan a las salidas.

Los experimentos pueden ser desarrollados para modelar las entradas y sus correspondientes salidas con fines científicos, pero el objetivo de los experimentos de ingeniería es conocer como manipular las variables de entrada para obtener resultantes deseadas. Las entradas son llamadas variables, factores o predictores y las salidas de proceso son llamadas resultantes (Mathews, 2004).

Esquemáticamente, un modelo numérico puede ser considerado como un proceso: el usuario especifica las combinaciones de las variables de entrada al simulador computacional desde el cual la respuesta es generada. En un caso simple donde hay dos variables de entrada (X_1 y X_2) y una resultante, cada variable puede tomar un valor desde “bajo” a “alto” de las “regiones de interés”.

El objetivo del DOE es proveer modelos aproximados (superficies de respuesta) que son lo suficientemente certeros para reemplazar la verdadera respuesta y puede ser usado para facilitar el espacio de exploración de diseño, optimización o análisis de confiabilidad (Dallot, 2014).

Un buen diseño de experimentos debe minimizar el número de corridas necesarias para adquirir información dentro un nivel de confianza dado. Las técnicas de diseño experimental fueron desarrolladas para experimentos físicos.

Debido a la discrepancia asociada con la experimentación física, los DOEs clásicos se enfocaron en la configuración de parámetros cerca del perímetro de la región de interés y se tomaron múltiples puntos (replicas) como se muestra en la Figura 4-2 (izquierda). Experimentos computaciones son determinísticos y no están sujetos a esta necesidad. El objetivo de los experimentos computacionales es mejorar la uniformidad de la distribución de los puntos muestrales en la región de interés (llamado espacio muestral), como se muestra en la Figura 4-2 (derecha) (Davaine, 2014).

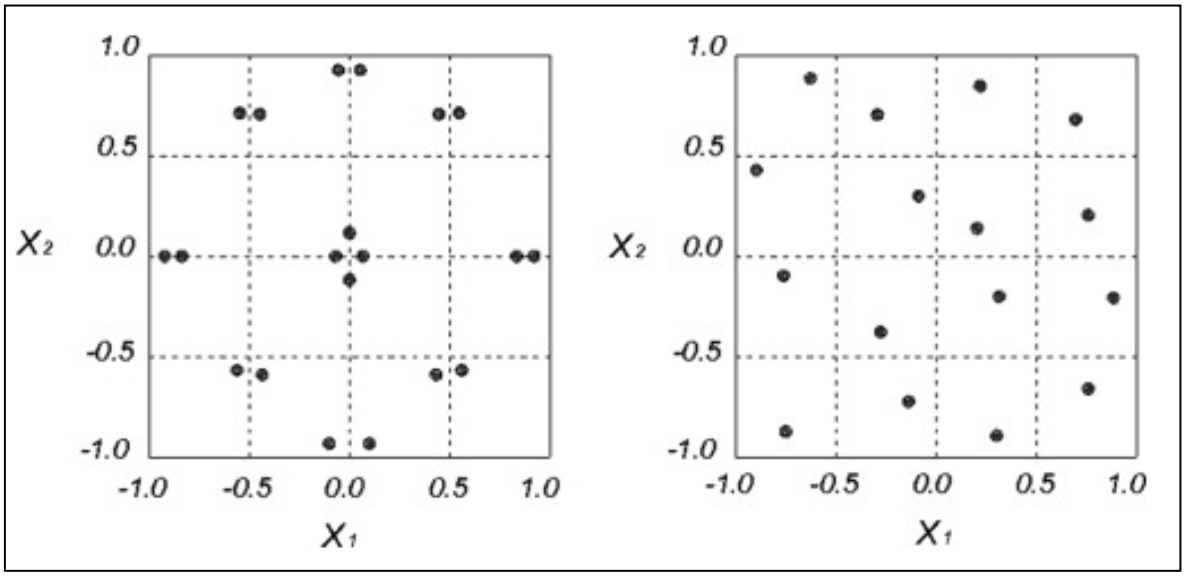

Figura 4-2 Experimento determinístico y puntos muestrales.
Fuente: Tran, K., Douthe, C., Sab, K., Dallot, J., & Davaine, L. (2014). A preliminary design formula for the strength of stiffened curved panels by design of experiment method. *Thin-Walled Structures*, 132.

Para confiar en los resultados que arroja un diseño experimental, se debe tener en cuenta lo siguiente:

a) Los factores son fijos o aleatorios,
b) Los diseños son completamente aleatorizados,
c) Se satisfacen los supuestos de normalidad usuales.

4.2 Superficie de Respuesta (MSR)

Después de haber realizado la experimentación, seleccionar un modelo que se aproxime a nuestro fenómeno es el siguiente paso. El modelo aproximado debe simple y debe representar adecuadamente la respuesta del el problema estudiado.

La metodología de superficie de respuesta es un método estadístico basado en el modelo no lineal multivariantes, el cual ha sido ampliamente usado en la optimización de procesos (Wilson, 1951). Para esta investigación que se requiere encontrar los niveles de los factores X_1, X_2, ... X_k, que maximicen el rendimiento (y) del proceso de la curva de desempeño.

Recientemente mucho trabajo ha sido desarrollado en modelos aproximados: superficie de respuesta polinomial, redes de trabajo neuronales, regresiones multivariadas. A pesar de la variedad de aproximaciones que están disponibles, estudios comparativos de este enfoque son limitados. Dependiendo de la complejidad del problema, uno de los métodos mencionados debe ser adaptado. Sin embargo, el modelo de superficie de respuesta polinomial es el más simple de ellos y ha sido usado eficientemente en una gran variedad de aplicaciones y ha demostrado ser una solución aproximada buena, incluso para problemas complejos. Además, el uso de la superficie de respuesta polinomial para estudios de confiabilidad y optimización es relativamente fácil.

Más allá, el diseño de experimentos MSR proporciona adecuadas y confiables lecturas de la respuesta, desarrollando un modelo matemático que mejor se ha ajustado a la información obtenida del experimento y determina los valores óptimos de las variables independientes que generan las respuestas máximas y mínimas. Es también usado en el estudio de interacciones de los parámetros que afectan al proceso (Myers, Montgomery, & Anderson, 2008).

Revisar la adecuación del modelo es una parte importante del análisis de los datos. Es necesario asegurar que el modelo ajustado proporcione una

adecuada información al sistema real y verificar que ningún precepto haya sido violado.

En la mayoría de los casos el modelo de regresión es una función linear de algunos coeficientes desconocidos, los cuales son identificados gracias al método de mínimos cuadrados, el cual podría ser usado aquí por su simplicidad y confiabilidad (Davaine, 2014).

El rendimiento del proceso es una función de los niveles de los factores involucrados, por ejemplo si se considerara dos factores donde ε representa el ruido o error observado en la respuesta y. La ecuación 4-2 denota la respuesta esperada,

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}) + \boldsymbol{\varepsilon} \qquad \textbf{(4-2)}$$

Entonces la ecuación 4-3 muestra la superficie representada,

$$\boldsymbol{E}\,(\boldsymbol{y}) = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}) = \eta \qquad \textbf{(4-3)}$$

A la ecuación 4-4 se le llama superficie de respuesta,

$$\eta = \boldsymbol{f}(\boldsymbol{x_1}, \boldsymbol{x_2}) \qquad \textbf{(4-4)}$$

Por lo general superficie de respuesta se representa gráficamente como se muestra en la Figura 4-3, donde η se grafica contra los niveles de X1 y X2. Para ayudar a visualizar la forma de una superficie de respuesta, con frecuencia se grafican los contornos de la superficie de respuesta, como se muestra en la Figura 4-4. En la gráfica de contornos se trazan las líneas de respuesta constante en el plano X1, X2. Cada contorno corresponde a una altura particular de la superficie de respuesta.

En la mayoría de los problemas de MSR, la forma de la relación entre la respuesta y las variables independientes es desconocida. Por lo tanto el primer paso de la MSR es encontrar una aproximación adecuada de la verdadera relación

funcional entre y y el conjunto de variables independientes. Por lo general se emplea un polinomio de orden inferior en alguna región de las variables independientes.

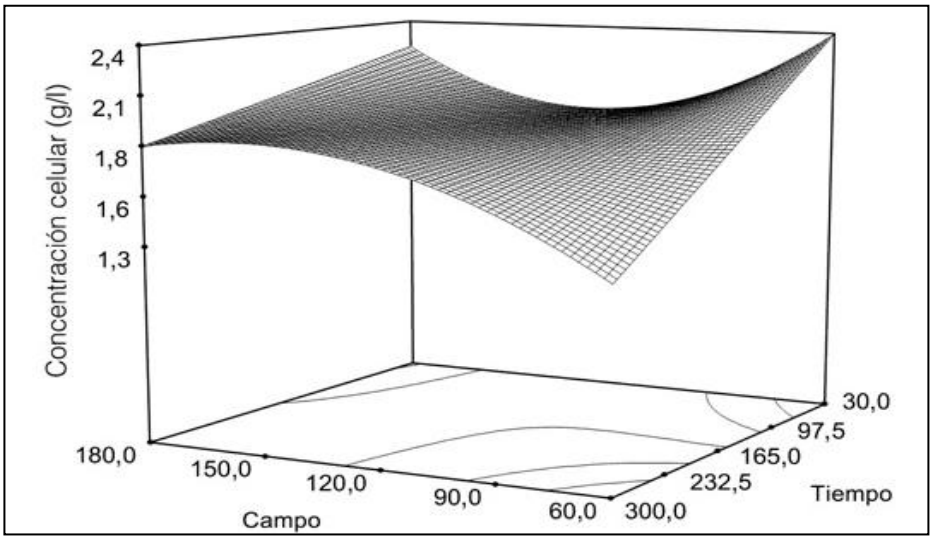

Figura 4-3 Superficie de respuesta tridimensional.
Fuente: Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed.). México, D.F.: Limusa Wiley.

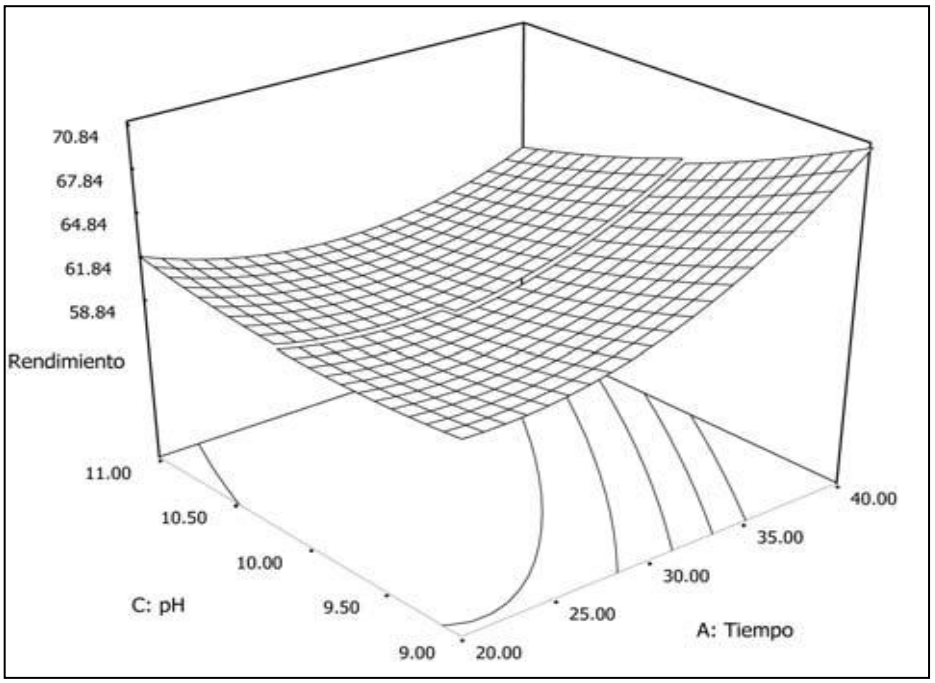

Figura 4-4 Gráfica de contorno de una superficie de respuesta.
Fuente: Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed.). México, D.F.: Limusa Wiley.

Si la respuesta está bien modelada por una función lineal de las variables independientes, entonces la función de aproximación es el modelo de primer orden,

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\beta_0} + \boldsymbol{\beta_1 x_1} + \boldsymbol{\beta_2}\, \boldsymbol{x_2} + \ldots\ldots + \boldsymbol{\beta_k}\, \boldsymbol{x_k} + \boldsymbol{\varepsilon} \qquad \textbf{(4-5)}$$

Si hay una curvatura en el sistema, entonces debe usarse un polinomio de orden superior, tal como el modelo de segundo orden

$$\boldsymbol{y} = \boldsymbol{\beta_0} + \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{\beta_i x_i} + \sum_{i=1}^{k} \boldsymbol{\beta_{ii} x_{ii}} + \sum\sum_{i<j} \boldsymbol{\beta_{ij}}\, \boldsymbol{x_i}\, \boldsymbol{x_j} + \boldsymbol{\varepsilon} \qquad \textbf{(4-6)}$$

En casi todos los problemas de MSR se usa uno de estos modelos, o ambos. Desde luego, es probable que un modelo polinomial sea una aproximación razonable de la verdadera relación funcional en el espacio completo de las variables independientes, pero para una región relativamente pequeña suelen funcionar bastante bien.

El método de mínimos cuadrados, se usa para estimar los parámetros de los polinomios de aproximación. Después se realiza el análisis de la superficie de respuesta utilizando la superficie ajustada. Si la superficie ajustada es una aproximación adecuada de la verdadera función de la respuesta, entonces el análisis de la superficie ajustada será un equivalente aproximado del análisis del sistema real.

Los parámetros del modelo pueden estimarse de manera más eficiente cuando se emplean los diseños experimentales apropiados para recolectar los datos. Los diseños para ajustar superficies de respuesta se denominan diseños de superficie de respuesta (Montgomery, 2004).

4.3 Cilindro Maestro y Booster

El diseño básico y principales componentes de la Asistencia de Frenado Mecánica (mBA por sus siglas en ingles, Mechanical Brake Assist) cumple con el convencional vacio del Booster. El mBA es diseñado para dar al conductor otra

función altamente importante para situaciones de emergencia: provee toda su potencia a un nivel bajo de fuerza desde una velocidad de aplicación predefinida en la actuación del freno. Esto asegura que la potencia de frenado esta siempre disponible para el conductor en casos de emergencia.

La presión del freno es mantenida hasta que el conductor haya reducido la fuerza en el pedal a un nivel relativamente bajo (fuerza de pedal o <20N). Cuando el threshold es alcanzado, la presión del freno es rapidamente reducida. La presión restante en el freno depende de la fuerza que el conductor aplique al pedal despues de haber liberado la mBA.

Entre más bajo el vacío, más pronto la asistencia en el freno es activada. Esto es causado por una energía vacío baja soportando el movimiento relativo necesario para la activación, los cuales son más bajos que la presión de Knee Point al mismo tiempo. Es importante mencionar que debido al diseño, el mBA es automaticamente activado, no importa la rapides con la que el pedal del freno haya sido aplicado, permitiendo reducir la distancia de frenado. En la Figura 4-5 se muestra algunos de componentes involucrados y en la Figura 4-6 se muestra su los valores de entrada y salida.

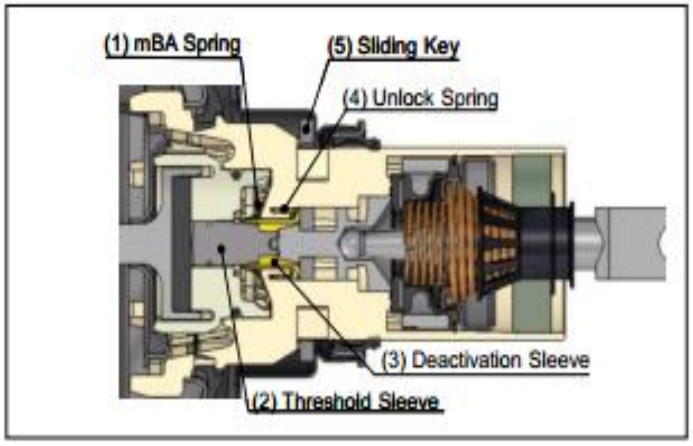

Figura 4-5 Componentes involucrados en el mBA.
Fuente: TRW. (2013). TRW Automotive.

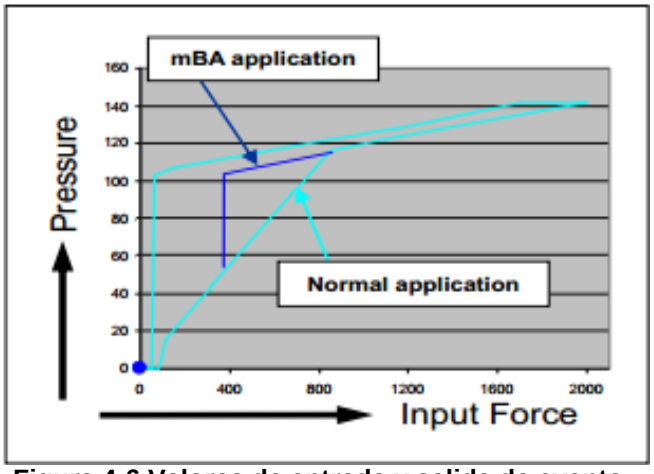

Figura 4-6 Valores de entrada y salida de evento.
Fuente: TRW. (2013). *TRW Automotive*.

El Cilindro Maestro utiliza los sellos para aislar el líquido de frenos en los dos circuitos diferentes ubicados en el alojamiento del Cilindro Maestro. De esta forma el diseño proporciona una proyección más corta del Cilindro Maestro montado en el Booster. Este diseño del sello permite una alta capacidad de aspiración incluso para los movimientos de corte cortos y por lo tanto, proporciona la compatibilidad con la última generación de sistemas. En la Figura 4-7 se puede apreciar el corte transversal de un Cilindro Maestro.

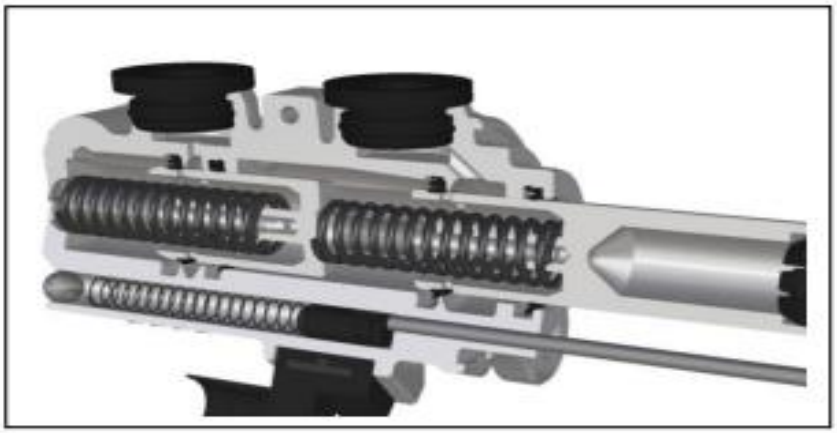

Figura 4-7 Cilindro Maestro.
Fuente: TRW. (2013). *TRW Automotive*.

4.4 Banco de Pruebas

El Banco de Pruebas Hidráulicas y Neumáticas ATW D315A fue elaborado por la compañía Alemana Assembly & Test – Europe GmbH. el cual es usado para evaluar “Brake Booster” y “Master Brake Cylinder” (neumático e hidráulico).

El Banco de Pruebas incluye un banco de perfil de aluminio construido con zinc y acero. Las unidades requeridas como los depósitos de presión o líquido de frenos están ubicadas en la parte baja del banco de pruebas, así como una charola recolectora para recolectar todos los residuos de sustancias que pudieran estarse fugando. La caja de control ha sido separada en gabinetes para la PC y otros dispositivos electrónicos como el medidor de amplificación y en transductor de señal. La presión es suministrada al sistema hidráulico a través de una unidad móvil diseñada para operar con la especificación de líquido de frenos. En la Figura 4-8 se muestra el Banco de Pruebas de Cilindro Maestro y Booster utilizado por el equipo de Ingeniería de Aplicaciones.

Figura 4-8 Banco de Pruebas de Cilindro Maestro y Booster.

El mantenimiento de los componentes del banco de pruebas está basado en periodos de tiempo ya establecidos (anuales principalmente). En la Figura 4-9 se muestra la etiqueta adherida al Banco de Pruebas donde se puede apreciar que la última fecha de calibración fue en Noviembre de 2014.

La temperatura ambiente del lugar donde esté instalado el Banco de Pruebas está entre 15°C y 30°C, sin embargo ésta no es controlada, así como tampoco es controlada la humedad.

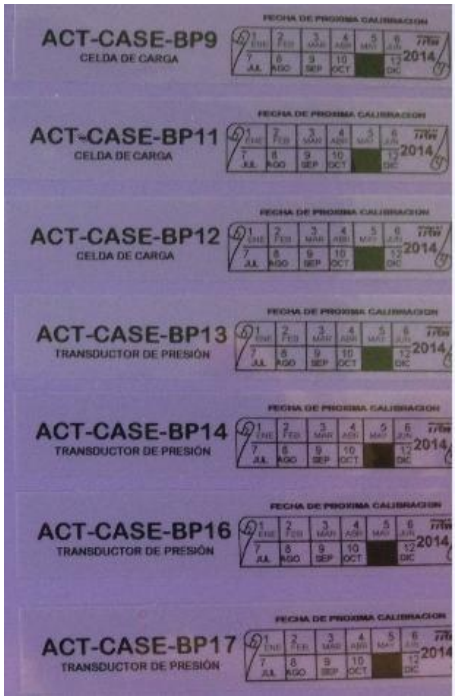

Figura 4-9 Programa de Calibración del Banco de Pruebas.

5. METODOLOGÍA

Basados en la estructura de la **metodología DMAMC** de Seis Sigma, se presenta una metodología desde el punto de vista de la ingeniería, que intenta simplificar la aplicación del DOE, manteniendo el rigor estadístico necesario que conlleva su aplicación, ver diagrama de flujo de metodología en la Figura 5-1.

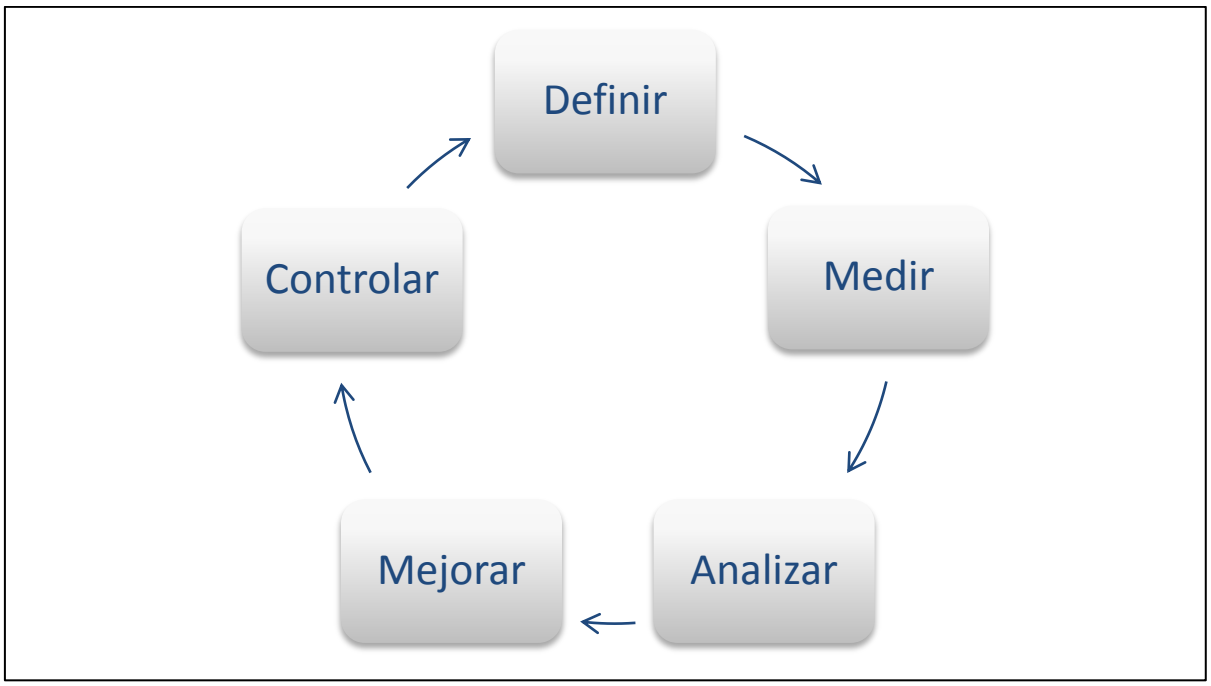

Figura 5-1 Diagrama de Flujo de Metodología DMAMC.

5.1 Definición

En la planta TRW El Marqués, que fabrica Booster (asistencia del sistema de frenado) y Cilindros Maestro (dispositivo hidráulico) se identifica que uno de los aspectos a mejorar es la configuración de parámetros del Banco de Pruebas de Cilindro Maestro y Booster, ya que debido a que no se conoce el efecto y significancia de los factores e interacciones en la prueba de desempeño, ésta se tienen que realizar una indeterminada cantidad de veces, con configuraciones de parámetros empíricas (siempre dentro de las especificaciones de diseño y/o cliente), hasta obtener una curva de desempeño adecuada, generando incertidumbre en los resultados.

El modelo de Cilindro Maestro y Booster F15+ es uno de los productos líderes que se le proporciona al cliente BMW, por ello era prioritario generar un proyecto para la generación de combinación de parámetros a fin de disminuir los tiempos de prueba e incertidumbre y garantizar la satisfacción y lealtad del cliente. Las características críticas para la calidad (CTQs) de la prueba de desempeño son:

- Y_1: Total Stroke (mm). **Esta resultante no se incluye en el apartado 5.2 Mediciones ya que es una resultante y factor de las siguientes resultantes,**
- Y_2: Threshold (N).
- Y_3: Jump in (bar).
- Y_4: Knee point (bar).

El proyecto se desarrolló en el laboratorio del equipo de Ingeniería de Aplicaciones de la planta TRW El Marqués, donde se encuentra instalado el Banco de Pruebas Hidráulicas y Neumáticas ATW D315A. Adicional al banco de pruebas, se utilizaron los siguientes recursos materiales:

- Líquido de Frenos.
- Celdas de Carga.
- LVDT (Linear Voltage Displacement Transducer).
- Sensores de presión (Hidráulica y Neumática).
- Gages para montar Cilindro Maestro y Booster.
- PC.
- Compresor.
- Alcohol.
- Guantes.
- Toallas.

En la Tabla 5-1 se muestra el marco del proyecto, en qué consiste, sus métricas y los beneficios esperados. Ahí se observa que si se cumple con los

objetivos del proyecto se lograrían ahorros cuantificables por $8 500 dólares anuales por modelo y $42 500 dólares en caso de aplicarse a los 5 principales.

Tabla 5-1 Marco del proyecto.

MARCO DEL PROYECTO	FECHA: 14-ABRIL-2014	VERSIÓN 1.0
Título / Propósito: Determinación de parámetros de operación de banco de pruebas de Cilindro Maestro y Booster de ingeniería para modelo BMW F15+.		
Necesidades del negocio a ser atendidas: Como no se conoce el efecto y significancia de los factores e interacciones de factores en las pruebas de desplazamiento y desempeño, estas se tienen que realizar una indeterminada cantidad de veces, con configuraciones de parámetros empíricas hasta obtener una curva de desempeño adecuada. Lo que al final se traduce en aumento del número de realización de prueba, incremento de costos de calidad (reproceso) y posible insatisfacción de los usuarios (incertidumbre).		
Declaración del problema: La alta variación de las combinaciones de los factores presión de vacío y consumo de líquido de frenos para la ejecución de la prueba de desempeño genera un reproceso del 10% del tiempo efectivo de trabajo, lo que implica un costo anual de reproceso de 8500 dólares, más un impacto no cuantificado sobre el desgaste del equipo de pruebas, mantenimiento y consumibles como líquido de frenos, energía eléctrica, alcohol y artículos de limpieza.		
Objetivo: Determinar los parámetros de operación del banco de pruebas de Cilindro Maestro y Booster para obtener una curva de desempeño óptima (fuerza y/o presión de salida) para el modelo BMW F15+.		
Alcance: El proyecto se limitará a abordar la configuración de parámetros para le ejecución de la pruebas en el modelo BMW F15+.		
Propietarios: Ingeniería de Aplicaciones.		
El patrocinador o champion: Gerente de Ingeniería de Aplicaciones.		
Equipo: A. H. (GB, líder), J. A. (Gerente del departamento de Ingeniería de Aplicaciones), D. F. (Ingeniero de Aplicaciones) y E. A. (Ingeniero de Aplicaciones).		
Recursos: Registros de pruebas realizadas por el departamento de Ingeniería de Aplicaciones, apoyo del área de Ingeniería de Aplicaciones, componentes e indirectos.		
Métricas: Desplazamiento, Volumen de líquido de frenos, presión de vacío, Fuerza, y tiempo de reproceso.		
Fecha de inicio del proyecto: 4 de Abril de 2014.		
Fecha planeada para finalizar el proyecto: 31 de Octubre de 2014.		
Entregable del proyecto: Proceso para la ejecución de pruebas de Ingeniería de Cilindro Maestro y Booster modificado y documentado, predecir la variación o error de medición y eliminación de reproceso. Ahorros anuales proyectados de US$8,500; debido a reproceso.		

En la Tabla 5-2 se presenta el Cronograma de actividades y sus tiempos estimados contra los tiempos reales, en color gris esta la propuesta realizada al

principio del proyecto y en color rojo los tiempos reales de ejecución de cada actividad.

La demora más grande se tuvo en la validación del sistema de medición y análisis de capacidad de proceso, debido a que no se contaba con una cantidad suficiente de registros para realizar dichos análisis, lo que requirió la generación de los mismos.

Tabla 5-2 Cronograma de actividades propuesto vs tiempo real.

No.	Mes / Semana / Actividad	Abril					Mayo				Junio				Julio					Agosto				Septiembre				Octubre					Noviembre				December			
		15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53
I	Definir																																							
1	Declaración del problema y CTQ			OK																																				
2	Objetivos			OK																																				
3	Forma de Medición			OK																																				
4	Alcance			OK																																				
5	Recursos y Métricas				OK																																			
6	Beneficios				OK																																			
II	Medir																																							
1	Mapeo del proceso de nivel general y un mapeo detallado del proceso de realización de prueba						OK	OK																																
2	Validar sistema de medición de las métricas involucradas (gage R&R)								OK	OK	OK	OK	OK	OK																										
3	Realizar estudio de capacidad y estabilidad								OK	OK	OK	OK	OK	OK																										
4	Establecer la línea base														OK	OK																								
III	Analizar																																							
1	Identificar causas potenciales (diagrama causa-efecto)																OK	OK	OK																					
2	Identificar X potenciales (agregar dos niveles de la misma, que corresponden a valores alternativos que se pueden tomar y que serán usados para probar cuál de estas X son realmente vitales)																			OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK	OK													
3	Identificar las pocas X vitales (DOE)																											OK	OK	OK	OK	OK								
IV	Mejorar																																							
1	proponer e implementar soluciones que atiendan las causas raíz (las X vitales)																																OK	OK	OK	OK				
2	Evaluar las soluciones propuestas																																				OK			
3	Realizar estudio de capacidad y estabilidad																																				OK			
V	Controlar																																							
1	diseña un sis tema que mantenga las mejoras logradas (controlar las X vitales) (Las acciones de control se dan en tres niveles: proceso, documentación y monitoreo)																																					OK		
2	Implementar cartas de control																																					OK		
3	Cerrar Proyecto																																						OK	

5.2 Mediciones

5.2.1 Gage R&R

Verificar la confiabilidad del sistema de medición, es el primer paso para validar las respuestas a analizar, ésto se verifica a través de un estudio de repetibilidad y reproducibilidad, o mejormente conocido como Gage R&R.

El estudio requirió de 12 partes, 4 para cada resultante (“Threshold”, “Jump in” y “Knee point”) en los niveles bajo, nominal, en especificación y alto; así mismo se requirió 4 ingenieros (máximo disponible), quienes cada uno realizó 5 ensayos (réplicas). Las partes utilizadas fueron identificadas por medio de su número de parte, esto para no dar indicio de la característica presente en cada componente, con un total de 80 lecturas, 10 menos que las recomendadas por la AIAG.

Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 5-2, donde se aprecia mayormente una variación parte a parte.

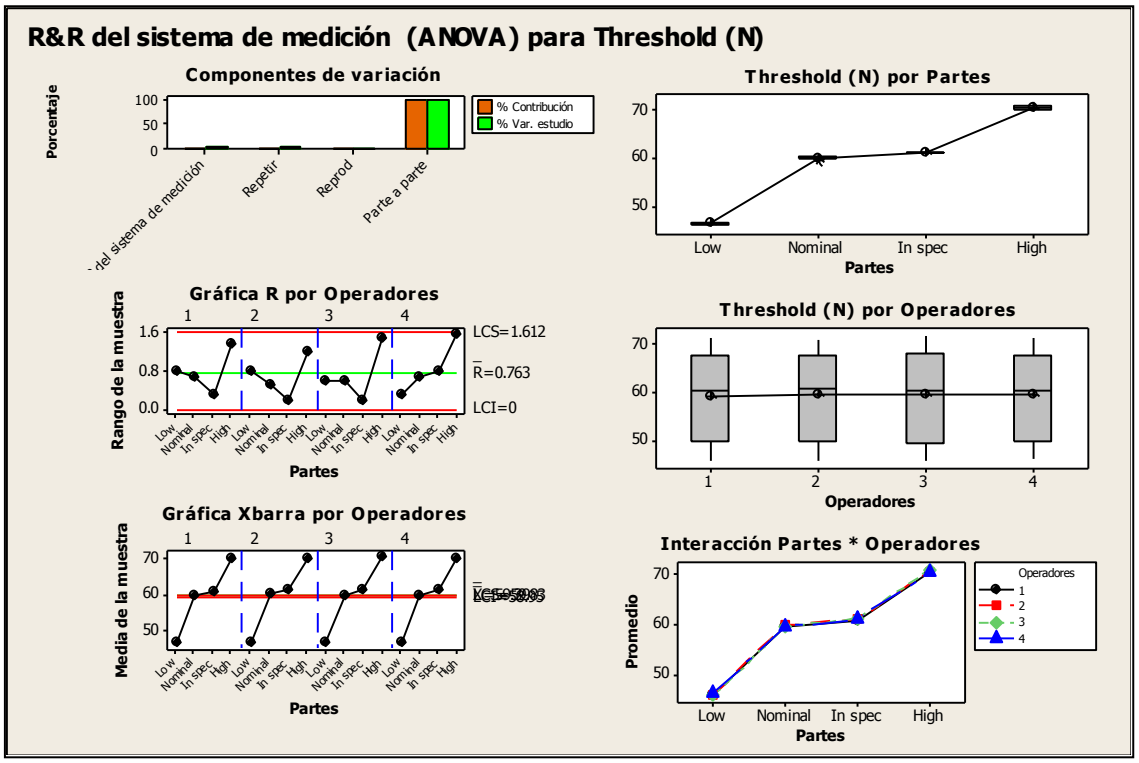

Figura 5-2 Análisis R&R del sistema de medición para Threshold.

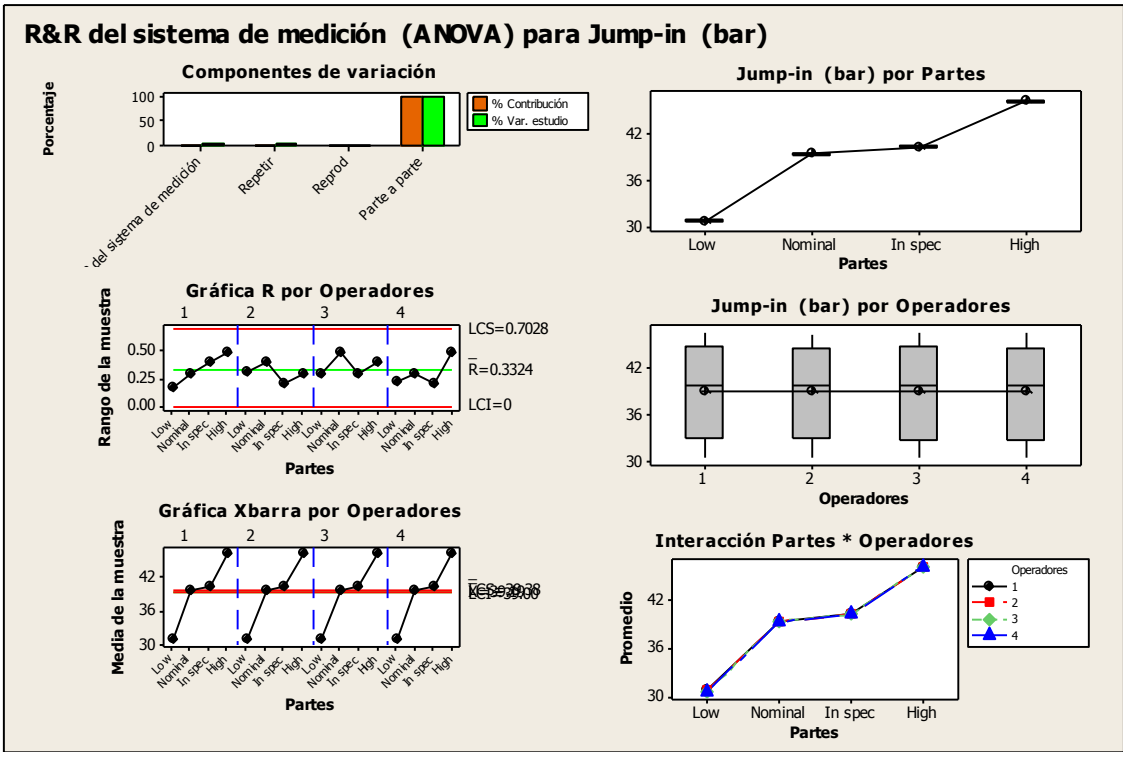

Figura 5-3 Análisis R&R del sistema de medición para Jump in.

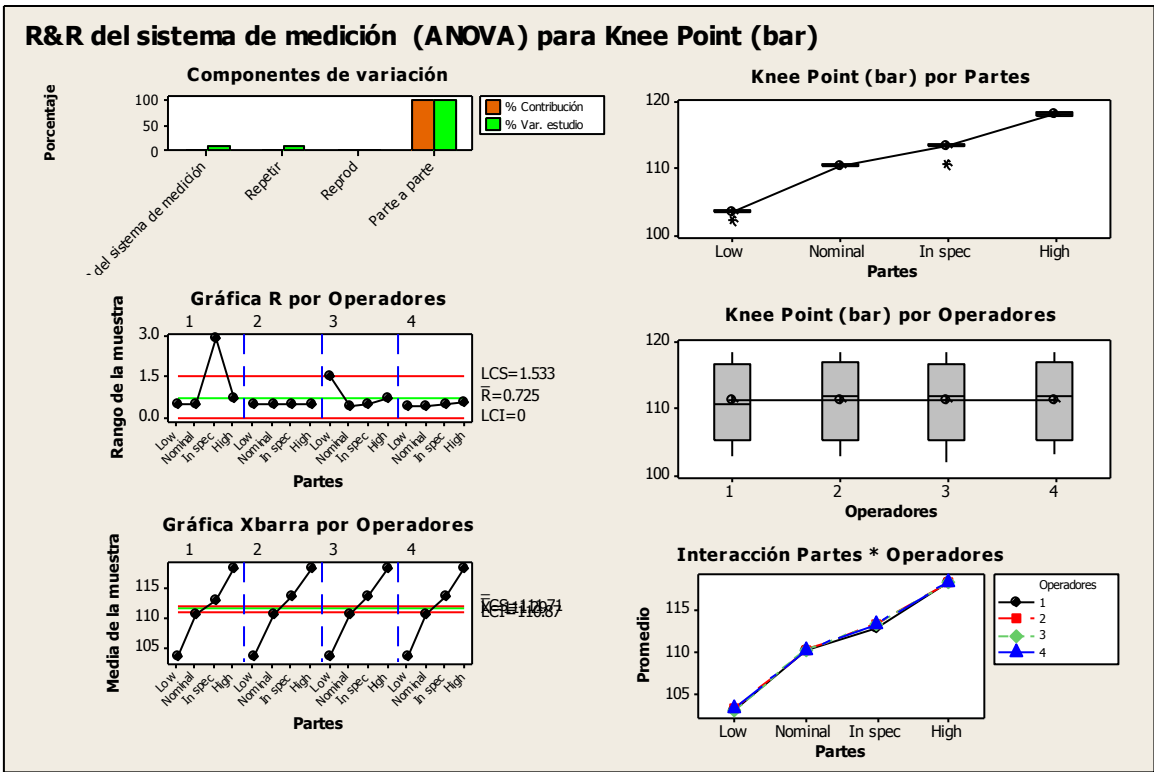

Figura 5-4 Análisis R&R del sistema de medición para Knee point.

En la Tabla 5-3, Tabla 5-4 y **Tabla 5-5** se puede apreciar como el valor P (0.000) del factor “Partes” para ambas resultantes, es menor al valor de alfa (0.05), atribuyendo la variación en las lecturas a las partes.

Tabla 5-3 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Threshold.

Tabla ANOVA de dos factores con interacción

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	3	5980.70	1993.57	11171.1	0.000
Operadores	3	0.27	0.09	0.5	0.692
Partes * Operadores	9	1.61	0.18	1.3	0.239
Repetibilidad	64	8.58	0.13		
Total	79	5991.16			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

Tabla 5-4 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Jump in.

Tabla ANOVA de dos factores con interacción

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	3	2437.90	812.632	51105.2	0.000
Operadores	3	0.03	0.012	0.7	0.563
Partes * Operadores	9	0.14	0.016	0.8	0.661
Repetibilidad	64	1.35	0.021		
Total	79	2439.43			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

Tabla 5-5 ANOVA de análisis R&R del sistema de medición para Knee point.

Tabla ANOVA de dos factores con interacción

Fuente	GL	SC	MC	F	P
Partes	3	2332.94	777.647	7698.42	0.000
Operadores	3	0.29	0.097	0.96	0.451
Partes * Operadores	9	0.91	0.101	0.63	0.770
Repetibilidad	64	10.32	0.161		
Total	79	2344.46			

Alfa para eliminar el término de interacción = 0.25

En la Tabla 5-6, Tabla 5-7 y Tabla 5-8 se muestra que el número de categorías del análisis R&R del sistema de medición es mayor a 5 en los 3 casos, lo que quiere decir que la resolución del sistema es capaz de discernir las características a medir, entre una parte y otra con gran exactitud. En las mismas tablas, se aprecia que el porcentaje de variación del estudio de la fuente "Gage R&R total" de **3.78** para la variable **"Threshold",** de **2.25** para la variable "**Jump in"** y **6.28** para la variable **"Knee point"**, menor al máximo permisible de 10%, lo que indica que el sistema es estable y que tiene la capacidad de ser reproducible y repetible.

De forma general se concluye que el sistema de medición del equipo de Ingeniería de Aplicaciones es adecuado para realizar la experimentación, buena resolución, buena discriminación y constancia en el proceso de ejecución de las pruebas de desempeño.

Tabla 5-6 Análisis R&R del sistema de medición para Threshold.

R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.1430	0.14
Repetibilidad	0.1341	0.13
Reproducibilidad	0.0089	0.01
Operadores	0.0000	0.00
Operadores*Partes	0.0089	0.01
Parte a parte	99.6695	99.86
Variación total	99.8124	100.00

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 * DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.37814	2.2689	3.78
Repetibilidad	0.36623	2.1974	3.67
Reproducibilidad	0.09416	0.5650	0.94
Operadores	0.00000	0.0000	0.00
Operadores*Partes	0.09416	0.5650	0.94
Parte a parte	9.98346	59.9008	99.93
Variación total	9.99062	59.9437	100.00

Número de categorías distintas = 37

Tabla 5-7 Análisis R&R del sistema de medición para Jump in.

R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.0205	0.05
Repetibilidad	0.0205	0.05
Reproducibilidad	0.0000	0.00
Operadores	0.0000	0.00
Parte a parte	40.6306	99.95
Variación total	40.6511	100.00

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 * DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.14320	0.8592	2.25
Repetibilidad	0.14320	0.8592	2.25
Reproducibilidad	0.00000	0.0000	0.00
Operadores	0.00000	0.0000	0.00
Parte a parte	6.37421	38.2453	99.97
Variación total	6.37582	38.2549	100.00

Número de categorías distintas = 62

Tabla 5-8 Análisis R&R del sistema de medición para Knee point.

R&R del sistema de medición

Fuente	CompVar	%Contribución (de CompVar)
Gage R&R total	0.1538	0.39
Repetibilidad	0.1538	0.39
Reproducibilidad	0.0000	0.00
Operadores	0.0000	0.00
Parte a parte	38.8747	99.61
Variación total	39.0285	100.00

Fuente	Desv.Est. (DE)	Var. estudio (6 * DE)	%Var. estudio (%VE)
Gage R&R total	0.39213	2.3528	6.28
Repetibilidad	0.39213	2.3528	6.28
Reproducibilidad	0.00000	0.0000	0.00
Operadores	0.00000	0.0000	0.00
Parte a parte	6.23496	37.4097	99.80
Variación total	6.24728	37.4837	100.00

Número de categorías distintas = 22

5.2.2 Estudio de Capacidad.

Una vez aprobada la calidad de las mediciones se procede a determinar la línea base de las características críticas para la calidad “Threshold”, “Jump in” y “Knee point”. Se planea un estudio de capacidad y estabilidad utilizando una carta de control X–R (también conocida como cartas de control Shewhart), con tamaño de grupo igual a 45 en un periodo de 2 meses, tiempo suficiente como para que se manifieste la variación de largo plazo del proceso. Los resultados de los datos obtenidos se muestran en la Figura 5-5 para la variable “Threshold”, en la Figura 5-6 para la variable “Jump in” y en la Figura 5-6 para la variable “Knee point”.

En la Figura 5-5 se muestra el análisis de la variable “Threshold”:

- La “Gráfica de prob. Normal” muestra visualmente que los datos están distribuidos de forma normal y mediante la prueba Anderson Darling con un estadístico de prueba P=0.097 se verifica estadísticamente que los datos no rechazan su procedencia de una distribución normal.
- El estudio de estabilidad se muestra en la “Gráfica I” y la “Gráfica de rangos móviles”. Se aprecia que el proceso es muy inestable en cuanto a la tendencia central e inestable en cuanto a dispersión.
    - PRUEBA 1. Un punto fuera más allá de 3.00 desviaciones estándar de la línea central. La prueba falló en los puntos: 33, 34, 35.
    - PRUEBA 2. 9 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central. La prueba falló en los puntos: 11.
    - PRUEBA 5. 2 de 3 puntos más de 2 desviaciones estándar de la línea central (en un mismo lado de la LC). La prueba falló en los puntos: 21, 34.
- Las especificaciones o tolerancias para “Threshold” son LEI = 45 y LES = 75. Del Histograma de la Figura 5-5 se observa que los resultados de la variable crítica para la calidad de fuerza “Threshold” están ligeramente cargados hacia la especificación superior. La curva angosta es la distribución potencial (variación de corto plazo, con σ_c = 4.020), que se

tendría si se reduce la variabilidad entre subgrupos a los niveles de la variación dentro de subgrupos, que es típicamente lo que ocurre cuando el proceso se encuentra en control estadístico durante el periodo del muestreo. La variación real (de largo plazo) se obtiene calculando la desviación estándar de los 45 datos, S = 5.744, ligeramente mayor que la variación de corto plazo. De esta manera, se ilustra con la curva punteada la calidad que en realidad se tiene para “Threshold”. Dado que a largo plazo la capacidad es Ppk = 0.52, entonces se tienen 61127 PPM defectuosas. Aún con la variación actual, si el proceso se centrara en el valor nominal (60 N), la capacidad se incrementaría, sin embargo, tener un proceso no estable hace necesario, además de centrar el proceso, buscar la razón de su escaso control. En resumen, la situación inicial del proceso es que no es capaz y es inestable.

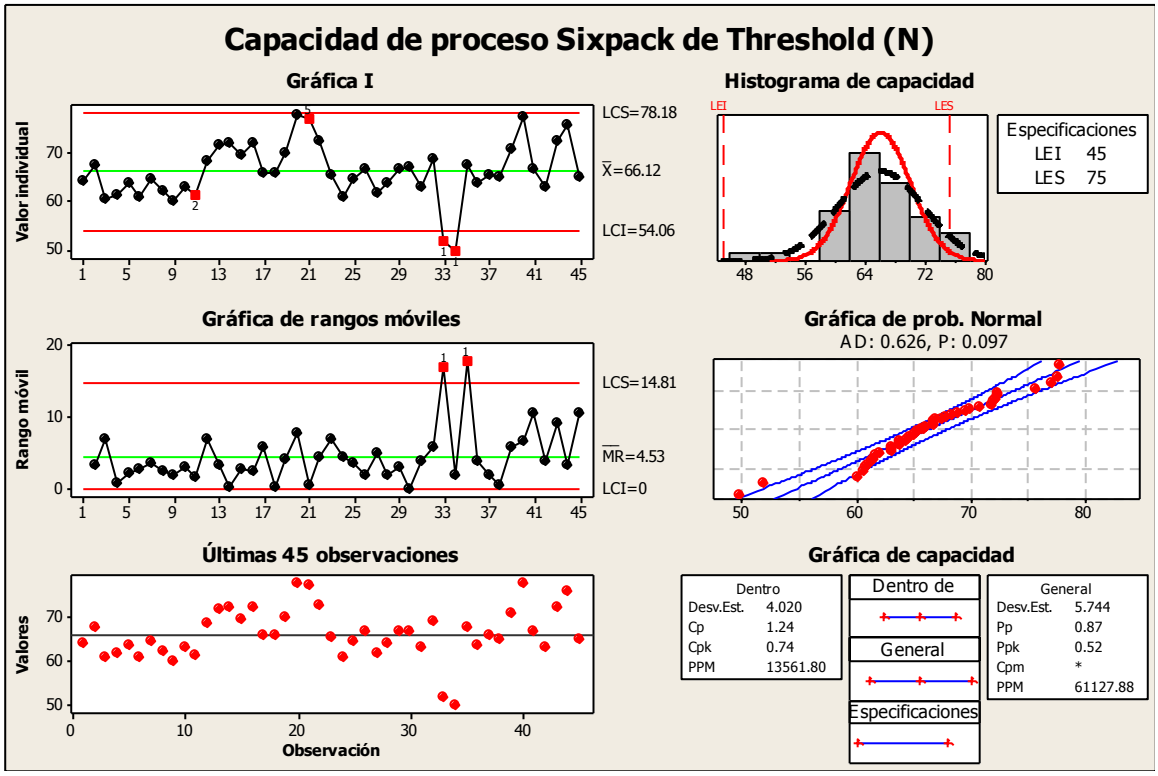

Figura 5-5 Análisis de capacidad de proceso de Threshold.

En la Figura 5-6 se muestra el análisis realizado a la variable “Jump in”:

- La “Gráfica de prob. Normal” muestra visualmente que los datos están distribuidos de forma normal y mediante la prueba Anderson Darling con un estadístico de prueba P=0.229 se verifica estadísticamente que los datos no rechazan su procedencia de una distribución normal.
- El estudio de estabilidad se muestra en la “Gráfica I” y la “Gráfica de rangos móviles”. Se aprecia que el proceso es inestable en cuanto a la tendencia central e inestable en cuanto a dispersión.
    - PRUEBA 1. Un punto fuera más allá de 3.00 desviaciones estándar de la línea central. La prueba falló en los puntos: 33, 34.
- Las especificaciones o tolerancias para “Jump in” son LEI = 35 y LES = 41. Del Histograma de la Figura 5-6 se observa que los resultados de la variable crítica para la calidad presión “Jump in” están ligeramente cargados hacia la especificación superior y con datos fuera de especificación en el límite superior. La curva angosta es la distribución potencial (variación de corto plazo, con σ_c = 0.7717), que se tendría si se reduce la variabilidad entre subgrupos a los niveles de la variación dentro de subgrupos, que es típicamente lo que ocurre cuando el proceso se encuentra en control estadístico durante el periodo del muestreo. La variación real (de largo plazo) de los 45 datos es, S = 0.8455. Con la curva punteada se ilustra la calidad que en realidad se tiene para “Jump in”, la cual es muy similar a la línea continua. Dado que a largo plazo la capacidad es Ppk = 0.43, entonces se tienen 100731 PPM defectuosas. Si el proceso se centrara en el valor nominal (38 bares), la capacidad se incrementaría, pero al tener un proceso inestable hace necesario controlar y centrar el proceso. En resumen, la situación inicial del proceso también es que no es capaz y ligeramente inestable.

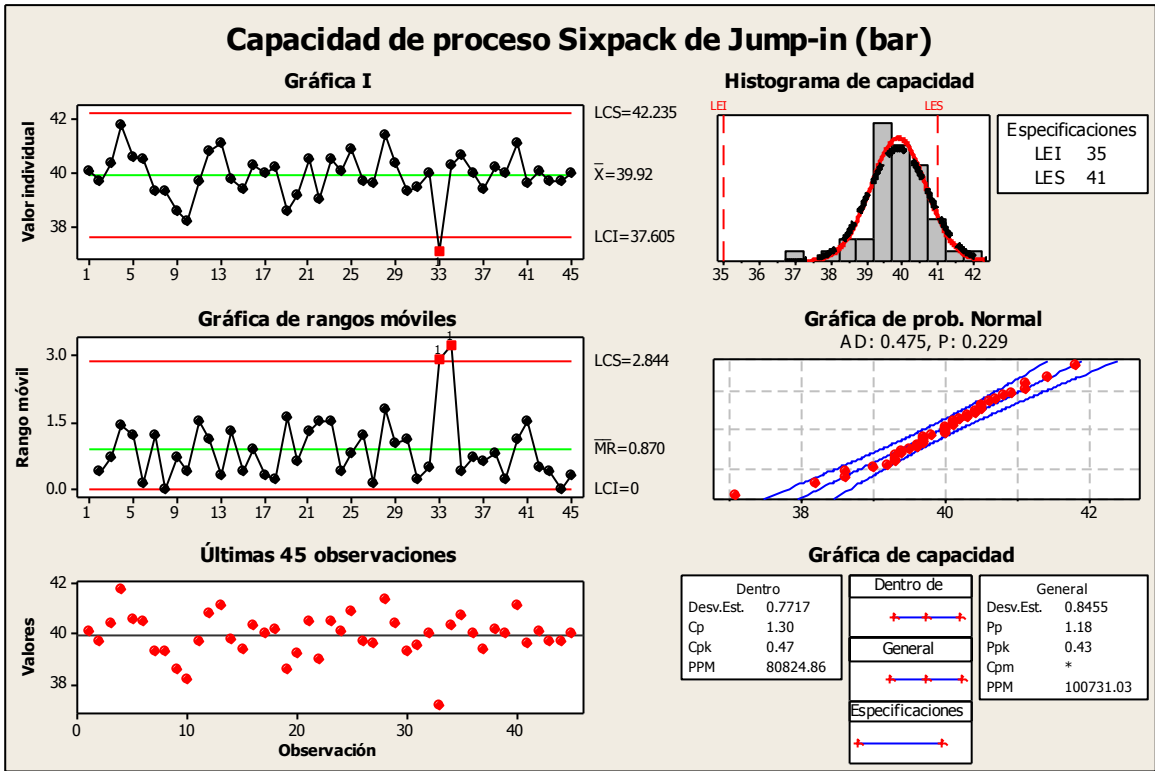

Figura 5-6 Análisis de capacidad de proceso de Jump in.

En la Figura 5-7 se muestra el análisis realizado a la variable “Knee point”:

- La “Gráfica de prob. Normal” muestra visualmente que los datos están distribuidos de forma normal y mediante la prueba Anderson Darling con un estadístico de prueba P=0.153 se verifica estadísticamente que los datos no rechazan su procedencia de una distribución normal.
- El estudio de estabilidad se muestra en la “Gráfica I” y la “Gráfica de rangos móviles”. Se aprecia que el proceso es ligeramente inestable en cuanto a la tendencia central e inestable en cuanto a dispersión.
    - PRUEBA 1. Un punto fuera más allá de 3.00 desviaciones estándar de la línea central. La prueba falló en los puntos: 10, 44.
    - PRUEBA 2. 9 puntos consecutivos en el mismo lado de la línea central. La prueba falló en los puntos: 20, 21
- Las especificaciones o tolerancias para “Knee Point” son LEI = 109.8 (90% del “Knee Point” total, para este análisis se comienza desde 85% - 101 bares) y LES = Máximo alcanzable. Del Histograma de la Figura 5-7 se

observa que los resultados de la variable crítica para la calidad presión "Knee Point" están ligeramente cargados hacia la especificación inferior y con datos fuera de especificación en ambos límites. La curva angosta es la distribución potencial (variación de corto plazo, con σ_c = 6.259), que se tendría si se reduce la variabilidad entre subgrupos a los niveles de la variación dentro de subgrupos, que es típicamente lo que ocurre cuando el proceso se encuentra en control estadístico durante el periodo del muestreo. La variación real (de largo plazo) se obtiene calculando la desviación estándar de los 45 datos, S = 6.7, ligeramente mayor que la variación de corto plazo, de esta manera, se ilustra con la curva punteada la calidad que en realidad se tiene para "Knee Pont", la cual es muy similar a la línea continua. Dado que a largo plazo la capacidad es Ppk = 0.29, entonces se tienen 204174 PPM defectuosas. Aún con la variación actual, si el proceso se centrara en un valor nominal (212 bares), la capacidad se incrementaría, sin embargo, tener un proceso inestabilidad hace necesario controlarlo y centrarlo. Se resume que el proceso no es capaz e inestable.

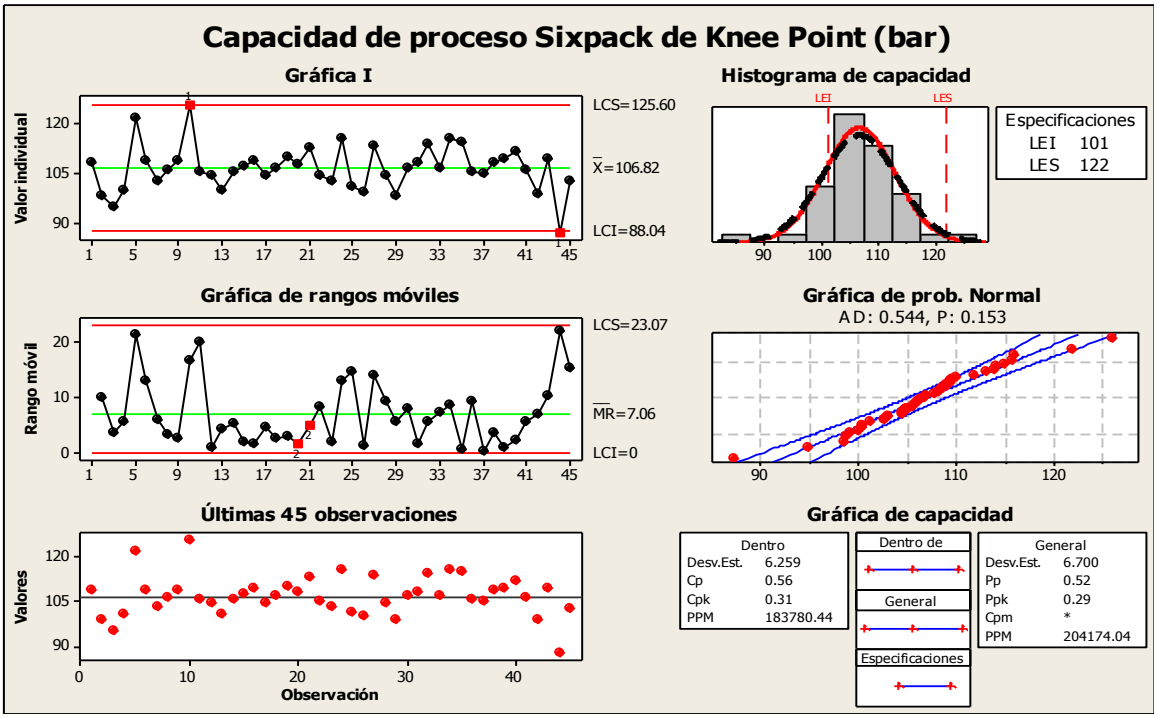

Figura 5-7 Análisis de capacidad de proceso de Knee point.

5.3 Análisis estadístico

En esta etapa se identifican las Xs potenciales que están influyendo en los problemas de las características críticas para la calidad Y_1 (Total Stroke), Y_2 (Threshold), Y_3 (Jump in) y Y_4 (Knee Point), ya que a partir de esto es posible identificar las pocas Xs vitales.

Partiendo de los estudios de la fase anterior, las causas potenciales se generaron mediante la técnica de grupo nominal colectiva (TGN), para lo cual como primer paso se procedió a realizar el mapeo de proceso de la operación del banco de pruebas Hidráulicas y Neumáticas ATW D315A, el cual se muestra en la Figura 5-8 (preparación para la prueba) y Figura 5-9 (realización de la prueba).

Una vez graficado el proceso, se enumeran las actividades en frecuencia de 10 unidades, en orden ascendente, considerando ambas figuras como un solo proceso.

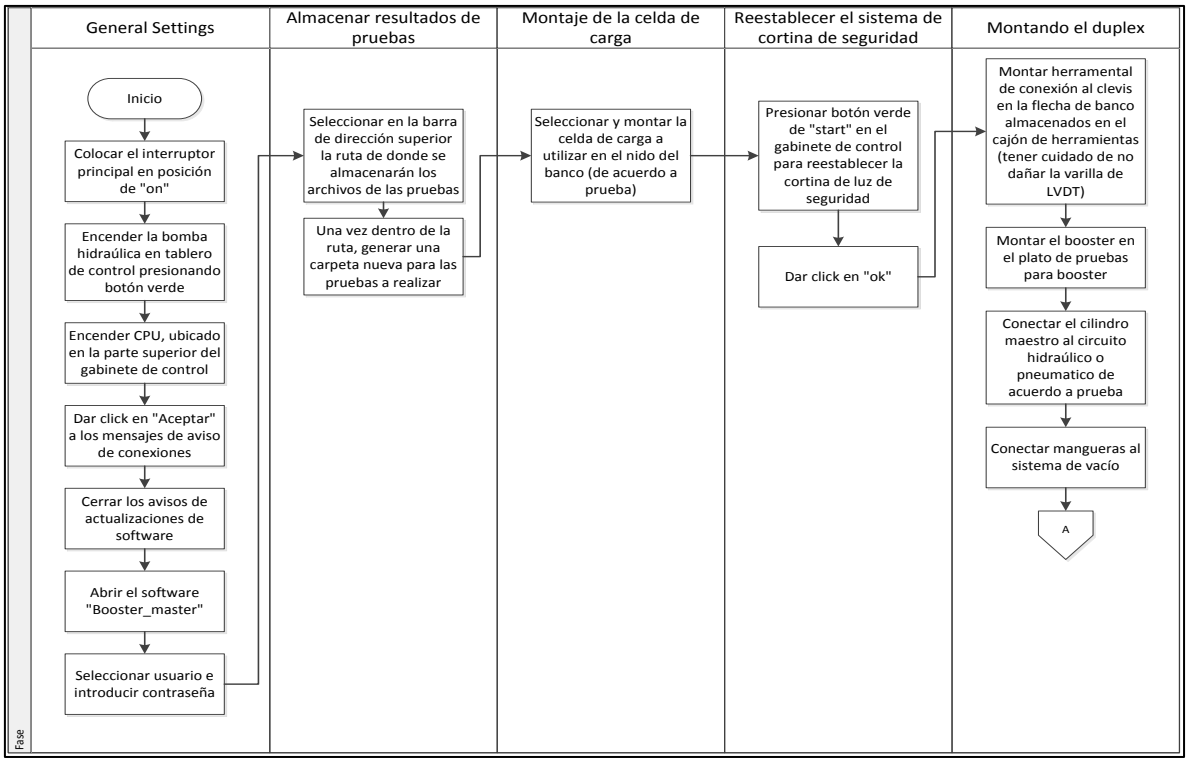

Figura 5-8 Proceso de Operación de Banco de Pruebas.

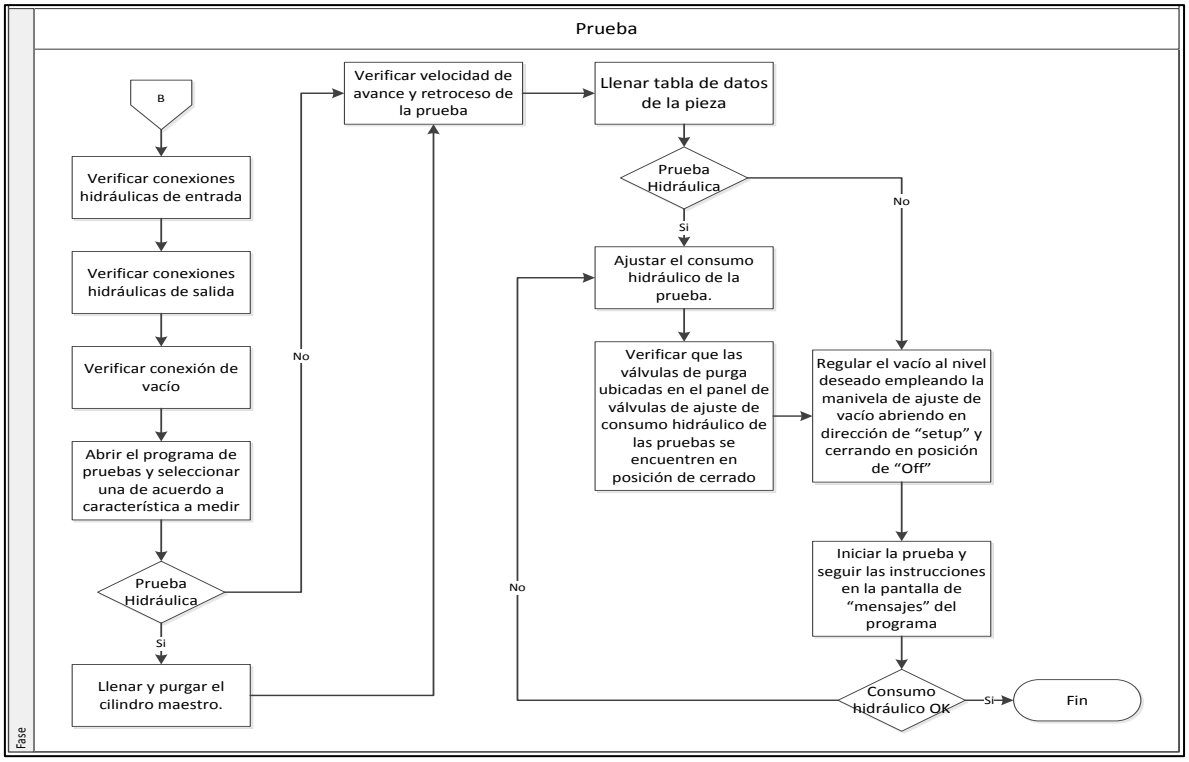

Figura 5-9 Proceso de Operación de Banco de Pruebas.

Después de identificar y numerar las actividades, éstas se vacían en la Matriz de la Técnica de Grupo Nominal colectiva (TGN) en donde se identifican las actividades que potencialmente afectan las variables resultantes de salida, es decir valores de entrada que al ser configurador en niveles diferentes, podrían variar significativamente las resultantes Y_1 (Total Stroke), Y_2 (Threshold), Y_3 (Jump in) y Y_4 (Knee Point).

La Tabla 5-9 muestra los resultados de la Técnica de Grupo Nominal colectiva (TGN) aplicada al equipo de Ingeniería de Aplicaciones de la planta TRW El Marqués para identificar las Xs potenciales que influyen en las variables de salida antes mencionadas.

En color gris, están marcadas celdas con actividades propias de pruebas hidráulicas. En las columnas "M1", "M2", "M3" y "M4" está la percepción de importancia de 4 Ingenieros de Aplicaciones en relación a las actividades con variables de proceso, siendo 13 el valor dado a la actividad más importante y 1 a

la de menor importancia. La columna “Suma” es el valor de sumar las 4 aportaciones realizadas por los 4 diferentes ingenieros acerca de la actividad. En color amarillo están marcadas las actividades que recibieron la mayor cantidad de puntos, en la Tabla 5-10 se resumen las actividades con mayor importancia.

Tabla 5-9 Resultados de Técnica de Grupo Nominal Colectiva (TGN)

				Miembros del equipo y evaluación				
Operación			Variables de Proceso	M1	M2	M3	M4	Suma
Montaje de la celda de carga	100	Seleccionar y montar la celda de carga a utilizar en el nido del banco (de acuerdo a prueba)	Celda de Carga de 5000 N	8	1	9	10	28
Montando el duplex	130	Montar herramental de conexión al clevis en la flecha de banco almacenados en el cajón de herramientas (tener cuidado de no dañar la varilla de LVDT)	Criterio de Ingeniero	3	3	6	6	18
	140	Montar el booster en el plato de pruebas para booster	Puertos de entrada hacia arriba	2	4	1	1	8
	150	Conectar el cilindro maestro al circuito hidraúlico o pneumatico de acuerdo a prueba	Circuito primario a primario y circuito secundario a secundario	1	2	5	2	10
Prueba	190	Verificar conexiones hidráulicas de entrada	Criterio de Ingeniero	6	5	4	3	18
	200	Verificar conexiones hidráulicas de salida	Llaves abiertas	7	7	3	4	21
	210	Verificar conexión de vacío	Criterio de Ingeniero	5	6	2	5	18
	220	Abrir el programa de pruebas y seleccionar una de acuerdo a característica a medir	Programa 02 y 06	4	8	8	7	27
	230	Llenar y purgar el cilindro maestro.	Hasta que no se vean burbujas en las mangueras - Criterio de Ingeniero	9	10	7	9	35
	240	Verificar velocidad de avance y retroceso de la prueba	3.5 mm/s	10	12	13	12	47
	260	Ajustar el consumo hidráulico de la prueba.	Criterio de Ingeniero	12	13	11	13	49
	270	Verificar que las válvulas de purga ubicadas en el panel de válvulas de ajuste de consumo hidráulico de las pruebas se encuentren en posición de cerrado	Criterio de Ingeniero	11	9	10	8	38
	280	Regular el vacío al nivel deseado empleando la manivela de ajuste de vacío abriendo en dirección de “setup” y cerrando en posición de “Off”	670 - 790 Mbar	13	11	12	11	47

Tabla 5-10 Actividades más importantes en el Proceso de Operación.

No.	Operación	Suma
260	Ajustar el consumo hidráulico de la prueba.	49
280	Regular el vacío al nivel deseado empleando la manivela de ajuste de vacío abriendo en dirección de “setup” y cerrando en posición de “Off”	47
240	Verificar velocidad de avance y retroceso de la prueba	47
270	Verificar que las válvulas de purga ubicadas en el panel de válvulas de ajuste de consumo hidráulico de las pruebas se encuentren en posición de cerrado	38
230	Llenar y purgar el cilindro maestro.	35

En color gris, están marcadas celdas con actividades propias de pruebas hidráulicas. En las columnas “M1”, “M2”, “M3” y “M4” está la percepción de importancia de 4 Ingenieros de Aplicaciones en relación a las actividades con

Una vez identificadas las actividades con mayor peso con base en la experiencia del equipo de Ingeniería de Aplicaciones, el equipo del proyecto se inclina por descartar las actividades 230, 240 y 270, debido a que las 3 actividades están relacionadas a parámetros constantes, se debe cuidar que se cumplan, pero no se tienen diferentes niveles permitidos las mismas.

Finalmente se atribuye el problema principalmente al arreglo del consumo hidráulico (líquido de frenos para circuitos primario y secundario) y nivel de vacío, debido a la variación y/o desconocimiento de los efectos en la configuración de parámetros.

A partir de la ponderación de las actividades del proceso de prueba y del conocimiento del proceso por parte del equipo de ingeniería, se considera que las X potenciales que se necesita investigar más a fondo son:

- X_1: Presión de Vacío (mbar).
- X_2: Ajuste de Consumo Hidráulico en Circuito Primario (ccm).
- X_3: Ajuste de Consumo Hidráulico en Circuito Secundario (ccm).

En este tipo de problemas de manufactura en que hay varias X potenciales y que es necesario identificar las que son vitales, la técnica por excelencia es el diseño de experimentos.

La idea de un diseño factorial es estudiar el efecto individual y de interacción de dos o más factores (X) sobre una o más variables de respuesta (Y). Para ello, cada factor a investigar debe tener por lo menos dos niveles, y entonces el diseño factorial consiste en correr en el proceso todas las combinaciones que pueden formarse con los niveles de los factores.

Para el Diseño de Experimentos se contaba con 3 partes, por lo que para determinar el tamaño de la muestra (replicas), de una muestra de datos histórica, se calcula la raíz cuadrada del error de la media de cuadrados (Error de CM) y la diferencia entre las medias de los niveles del factor bajo y del factor alto; así mismo se establece la probabilidad de que se rechace correctamente la hipótesis nula cuando ésta es falsa, para este caso se considera de al menos 95%. En la Tabla 5-11 se muestra el número de réplicas requeridas para la realización del Diseño de Experimentos.

Tabla 5-11 Réplicas requeridas para Diseño de Experimento.

Puntos Centrales	Réplicas	Corridas totales	Potencia	Efecto	Factor	Resultante
0	3	24	0.95	4.040	Vacío	Threshold
0	3	24	0.95	1.790	Vacío	Jump in
0	3	24	0.95	1.100	Vacío	Knee Point
0	3	24	0.95	7.259	Prim	Threshold
0	3	24	0.95	7.370	Prim	Jump in
0	3	24	0.95	6.610	Prim	Knee Point
0	3	24	0.95	7.782	Sek	Threshold
0	3	24	0.95	7.846	Sek	Jump in
0	3	24	0.95	11.520	Sek	Knee Point

El diseño de experimento que se presenta, demanda investigar los tres factores antes mencionados, con dos niveles cada factor y 3 réplicas, generando así al menos 24 corridas. Considerando que el número de corridas es relativamente pequeño, se decide utilizar un diseño factorial completo, para investigar de manera simultánea el efecto individual de los tres factores y sus interacciones. Una vez definida la técnica y los factores a utilizar, se procede a definir los niveles de los mismos.

El factor vacío se basa en la unidad atmosfera, la cual a nivel global equivale a 1.01325 bares. De acuerdo a la especificación de diseño, esta característica debe ser de al menos 2/3 de la atmosfera local, siendo 670 milibares el nivel inferior. Técnicamente, el nivel superior debería ser 1 atmosfera, sin embargo debido a la altura sobre el nivel del mar de la Ciudad de Querétaro y el equipo compresor generador del vacío, este valor se limita a 790 milibares.

Para la determinar el número de mangueras a utilizar en cada uno de los circuitos (primario y secundario), es necesario identificar el volumen de líquido de frenos que contiene cada manguera del banco de prueba, en la Figura 5-10 se muestra el tablero donde se selecciona el número de mangueras para los circuitos primario y secundario.

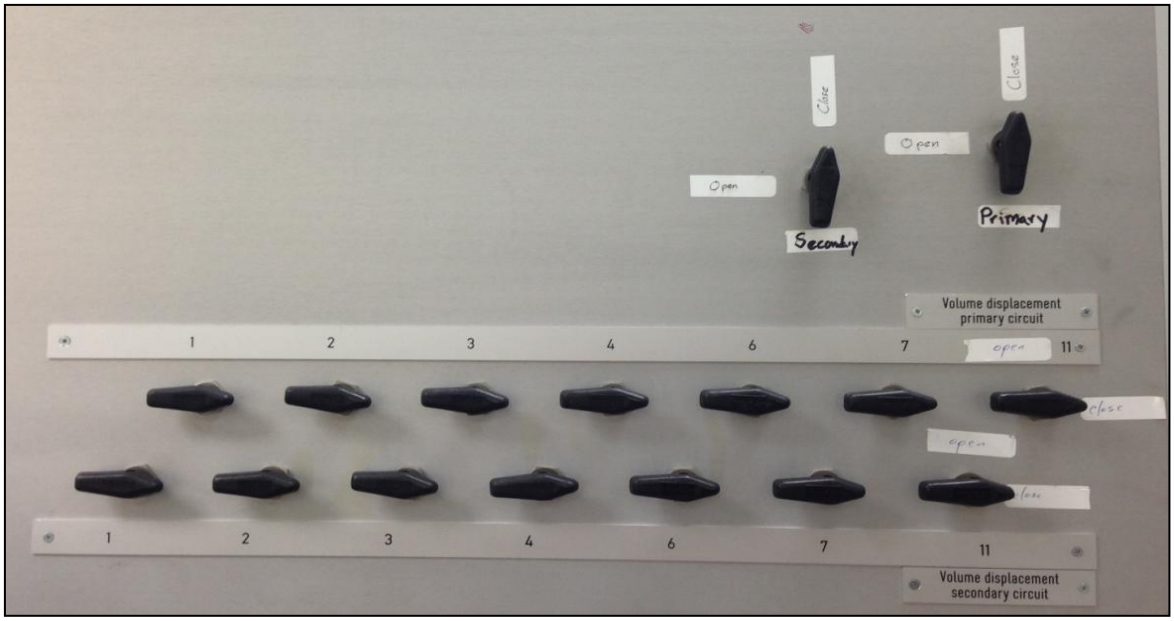

Figura 5-10 Tablero de configuración de consumo de líquido de frenos.

El proveedor del Banco de Pruebas ha evaluado a diferentes fuerzas de salida (Knee Point) cada conjunto de mangueras, el volumen de cada conjunto mangueras varía de acuerdo a la fuerza de salida, resultado de la expansión a la que son sujetas por el material de que están hechas. La relación que se tiene entre la fuerza de salida y volumen es a mayor fuerza, mayor expansión y en consecuencia mayor volumen.

En la Figura 5-11 y Figura 5-12 se aprecia una perspectiva posterior del tablero de selección de mangueras de líquido de frenos, en el cual se puede ver como cada llave está conectada con los diferentes conjuntos de mangueras.

Figura 5-11 Vista posterior de tablero de consumo de líquido de frenos.

Figura 5-12 Conexión de conjuntos de mangueras.

La presión de salida mínima requerida para este modelo es de 109.8 bares, sin tener una restricción de salida máxima establecida. Una vez identificados los valores individuales de volumen de cada conjunto de mangueras, se procede a determinar el volumen para las diferentes combinaciones de las mismas.

De acuerdo al plano del Cilindro Maestro del modelo BMW F15+, el volumen para el circuito primario debe ser mayor o igual a 12 ccm y para el circuito secundario se debe tener al menos 7.2 ccm. De acuerdo a la experiencia de los Ingenieros de Aplicaciones, se determina que 1 manguera de tolerancia superior e inferior es suficiente, concluyendo que los volúmenes para el circuito

primario serían de 11.9 y 14.72 ccm y para el circuito secundario los volúmenes serían 6.73 y 10.04 ccm. En la Tabla 5-12 se resumen los niveles correspondientes a las X potenciales seleccionadas.

Tabla 5-12 Factores potenciales y sus niveles.

Factor (x)	Característica	Niveles	Valores	
Presión de Vacío	Desde 2/3 de la atmosfera local ó -670 mbar hasta lo máximo posible ó -800 mbar.	2	670	790
Consumo Hidráulico en Circuito Primario	1, 2, 3, 4, 6, 7, 11 mangueras (volúmen ≥ 12.00 ccm.).	2	11.90	14.72
Consumo Hidráulico en Circuito Secundario	1, 2, 3, 4, 6, 7, 11 mangueras (volúmen ≥ 7.2 ccm.).	2	6.73	10.04

Una vez determinados los niveles, se procede a realizar la parte experimental. En la Tabla 5-13 se presenta el diseño de experimentos desarrollado, así como las resultantes obtenidas. Las muestras fueron tomadas aleatoriamente y se agregó el factor “Bloques” debido a que las muestras fueron tomadas en días diferentes debido a la disponibilidad del laboratorio. La columna “Ordenest” indica el orden que debieron hacer seguido para no ser aleatorio y la columna “OrdenCorrida”, es el orden en el que se realizaron las corridas. En las columnas de los factores se aprecia el nivel experimentado en la corrida.

Tabla 5-13 Diseño experimental 3^2 y valores de Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

OrdenCorrida	Bloques	Vacío	Prim	Sek	Total Stroke (mm)	Threshold (N)	Jump-in (bar)	Knee Point (bar) OUT	Knee Point (N) IN
1	3	670	11.9	6.73	18.8	70.7	37.6	91.8	598.8
2	3	790	14.72	10.04	27.6	63	38.4	127	847.7
3	3	790	11.9	6.73	23.5	64.9	38.9	128.1	852.1
4	3	670	14.72	10.04	20.8	69.2	38	88.3	575.6
5	3	670	11.9	10.04	19.4	71.3	37.9	90.6	588.7
6	3	670	14.72	6.73	19.6	67.9	37.8	90.1	587
7	3	790	14.72	6.73	25.5	65.2	38.7	127.8	851.6
8	3	790	11.9	10.04	25.1	65.4	39	128.1	850.4
9	1	790	11.9	10.04	23.4	61.2	38	129.2	881.39
10	1	670	14.72	6.73	17.5	64.1	37.4	92.8	618.05
11	1	790	14.72	6.73	23.5	61.8	38	128.9	878.8
12	1	670	11.9	10.04	17.6	64.4	37.5	92.9	617.7
13	1	670	11.9	6.73	16.3	65.4	37.7	94	624.5
14	1	670	14.72	10.04	18.9	65.7	37.1	91.8	612.7
15	1	790	11.9	6.73	21.6	59.4	38.7	129	875
16	1	790	14.72	10.04	25.5	61.2	37.9	128.6	875.6
17	2	670	11.9	10.04	20.3	66.4	37.5	89.3	588
18	2	790	11.9	10.04	24.3	63.3	38.5	128.7	865.9
19	2	670	14.72	6.73	20.1	67.1	37.6	89.4	588.1
20	2	670	14.72	10.04	21.1	66.5	37.5	87.9	579
21	2	670	11.9	6.73	18.8	66.1	38	91.7	602.4
22	2	790	14.72	10.04	26.6	62.1	38.2	127.8	861.7
23	2	790	14.72	6.73	24.5	63.5	38.4	128.4	865.2
24	2	790	11.9	6.73	24.6	62.9	38.6	128.3	864.1

En la Figura 5-13 se muestran los Diagramas de Pareto de los efectos de los factores X1, X2 y X3 sobre las resultantes Y1, Y2, Y3 y Y4. Los 3 factores son estadísticamente significativos sobre las 4 resultantes no de forma simultánea, así mismo se muestra que las interacciones dobles y triples son estadísticamente no significativas sobre las resultantes.

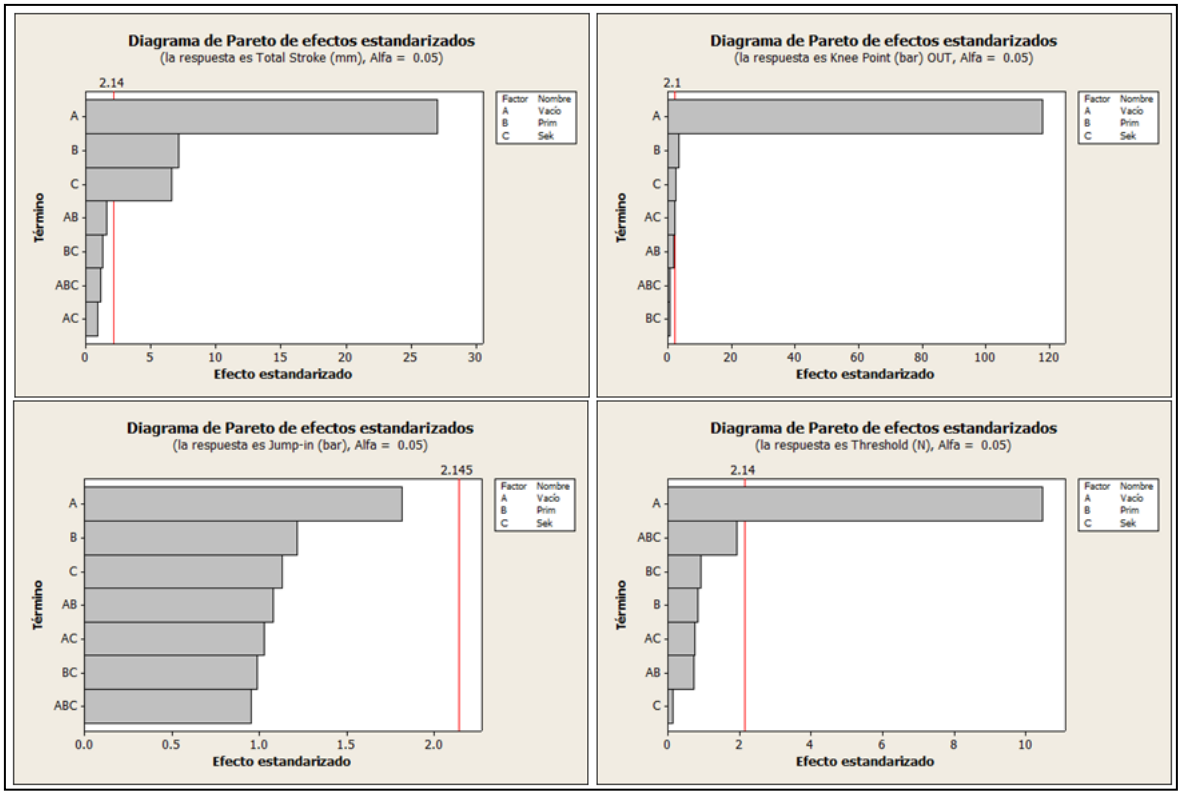

Figura 5-13 Diagramas de Pareto para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 (con interacciones).

En los diagramas de Pareto se puede observar que el factor “Vacío” es el factor más significativo en casi todas las variables respuesta, principalmente para en la resultante “Knee Point”.

Una vez que se conoce la significancia de los efectos y de los factores, se decide descartar las interacciones dobles y triples, esto por fines de parsimonia, es decir la preferencia por la explicación más simple entre varias alternativas. Al hacer más sencillo el modelo sin sacrificar el porcentaje de variación que es explicado por el modelo, lo hace más fácil de entender, aplicar y mejorar.

En la Figura 5-14 se muestran los Diagramas de Pareto de los efectos de los factores X_1, X_2 y X_3 para las resultantes Y_1, Y_2, Y_3 y Y_4 sin considerar las interacciones. Los 3 factores son estadísticamente significativos sobre las resultantes “Total Stroke” y “Knee Point”, sobre la resultante “Threshold” únicamente es significativo el factor vacío y los factores vacío y consumo de líquido de frenos del circuito primario sobre la resultante “Jump in”.

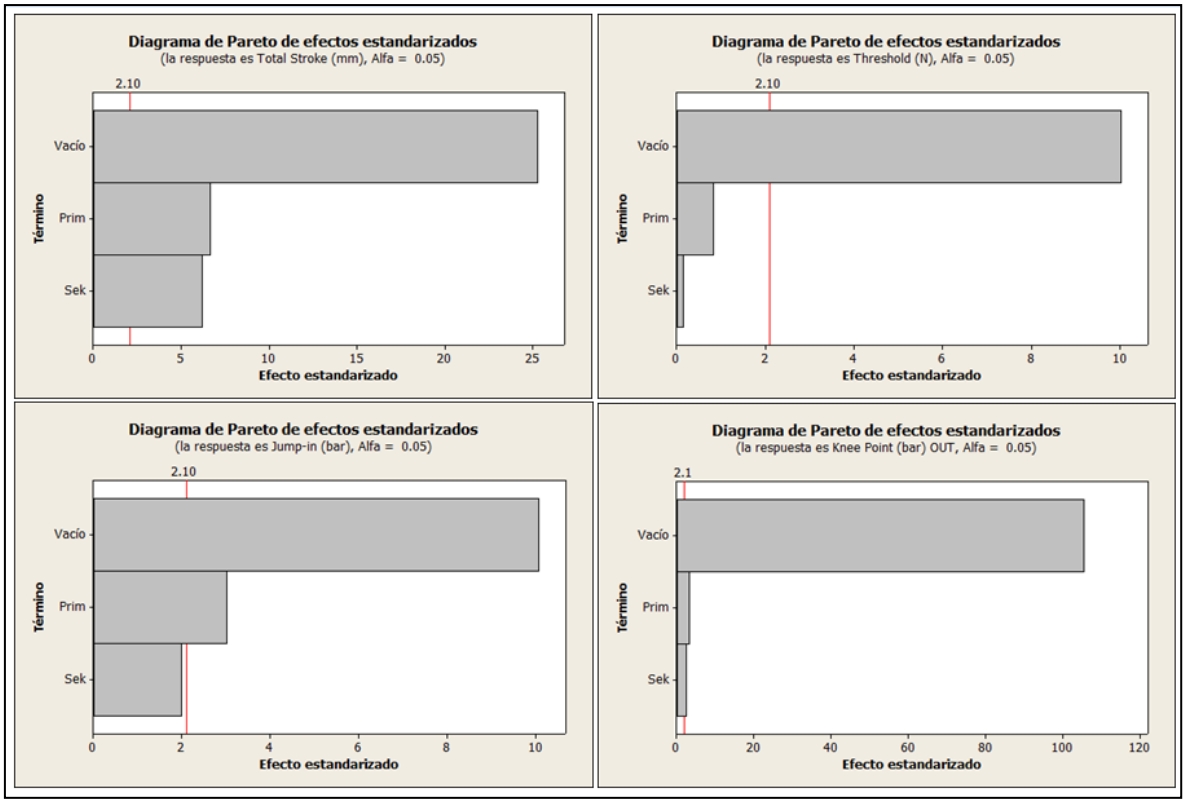

Figura 5-14 Diagramas de Pareto para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 (sin interacciones).

El factor “Vacío” es el factor más significativo en todas las variables respuesta, principalmente en la resultante “Knee Point”. Con el análisis de varianza ANOVA se confirma la significancia de los factores sobre las resultantes, ver Figura 5-15, sin embargo también se muestra que el factor “Bloques” aporta variación importante dentro del experimento. De acuerdo con el estadístico R-cuad. (ajustado), estos 3 términos más los bloques, explican más del 90% de la variación presente en los datos, ver Figura 5-16.

Análisis de varianza para Total Stroke (mm) (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Bloques	2	21.333	21.333	10.667	37.03	0.000
Efectos principales	3	208.091	208.091	69.364	240.80	0.000
Vacío	1	184.260	184.260	184.260	639.67	0.000
Prim	1	12.760	12.760	12.760	44.30	0.000
Sek	1	11.070	11.070	11.070	38.43	0.000
Error residual	18	5.185	5.185	0.288		
Total	23	234.610				

Análisis de varianza para Threshold (N) (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Bloques	2	74.481	74.481	37.240	34.72	0.000
Efectos principales	3	108.671	108.671	36.224	33.77	0.000
Vacío	1	107.950	107.950	107.950	100.64	0.000
Prim	1	0.700	0.700	0.700	0.65	0.430
Sek	1	0.020	0.020	0.020	0.02	0.892
Error residual	18	19.307	19.307	1.073		
Total	23	202.460				

Análisis de varianza para Jump-in (bar) (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Bloques	2	1.0000	1.0000	0.50000	12.95	0.000
Efectos principales	3	4.4212	4.4212	1.47375	38.17	0.000
Vacío	1	3.9204	3.9204	3.92042	101.54	0.000
Prim	1	0.3504	0.3504	0.35042	9.08	0.007
Sek	1	0.1504	0.1504	0.15042	3.90	0.064
Error residual	18	0.6950	0.6950	0.03861		
Total	23	6.1162				

Análisis de varianza para Knee Point (bar) OUT (unidades codificadas)

Fuente	GL	SC Sec.	SC Ajust.	MC Ajust.	F	P
Bloques	2	20.16	20.16	10.08	13.32	0.000
Efectos principales	3	8422.45	8422.45	2807.48	3710.56	0.000
Vacío	1	8411.27	8411.27	8411.27	11116.90	0.000
Prim	1	6.93	6.93	6.93	9.16	0.007
Sek	1	4.25	4.25	4.25	5.62	0.029
Error residual	18	13.62	13.62	0.76		
Total	23	8456.23				

Figura 5-15 ANOVA de las resultantes Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

Efectos y coeficientes estimados para Total Stroke (mm) (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		21.871	0.1096	199.63	0.000
Bloque 1		-1.333	0.1549	-8.61	0.000
Bloque 2		0.667	0.1549	4.30	0.000
Vacío	5.542	2.771	0.1096	25.29	0.000
Prim	1.458	0.729	0.1096	6.66	0.000
Sek	1.358	0.679	0.1096	6.20	0.000

S = 0.536708 PRESS = 9.21778
R-cuad. = 97.79% R-cuad.(pred.) = 96.07% R-cuad.(ajustado) = 97.18%

Coeficientes estimados para Total Stroke (mm) utilizando datos en unidades no codificadas

Término	Coef
Constante	-22.1651
Bloque 1	-1.33333
Bloque 2	0.666667
Vacío	0.0461806
Prim	0.517139
Sek	0.410373

Efectos y coeficientes estimados para Threshold (N) (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		64.946	0.2114	307.21	0.000
Bloque 1		-2.046	0.2990	-6.84	0.000
Bloque 2		-0.208	0.2990	-0.70	0.495
Vacío	-4.242	-2.121	0.2114	-10.03	0.000
Prim	-0.342	-0.171	0.2114	-0.81	0.430
Sek	0.058	0.029	0.2114	0.14	0.892

S = 1.03568 PRESS = 34.3244
R-cuad. = 90.46% R-cuad.(pred.) = 83.05% R-cuad.(ajustado) = 87.81%

Coeficientes estimados para Threshold (N) utilizando datos en unidades no codificadas

Término	Coef
Constante	92.2142
Bloque 1	-2.04583
Bloque 2	-0.208333
Vacío	-0.0353472
Prim	-0.121158
Sek	0.017623

Efectos y coeficientes estimados para Jump-in (bar) (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		38.0375	0.04011	948.33	0.000
Bloque 1		-0.2500	0.05672	-4.41	0.000
Bloque 2		0.0000	0.05672	0.00	1.000
Vacío	0.8083	0.4042	0.04011	10.08	0.000
Prim	-0.2417	-0.1208	0.04011	-3.01	0.007
Sek	-0.1583	-0.0792	0.04011	-1.97	0.064

S = 0.196497 PRESS = 1.23556
R-cuad. = 88.64% R-cuad.(pred.) = 79.80% R-cuad.(ajustado) = 85.48%

Coeficientes estimados para Jump-in (bar) utilizando datos en unidades no codificadas

Término	Coef
Constante	34.6619
Bloque 1	-0.250000
Bloque 2	0.0000000
Vacío	0.00673611
Prim	-0.0856974
Sek	-0.0478348

Efectos y coeficientes estimados para Knee Point (bar) OUT (unidades codificadas)

Término	Efecto	Coef	SE Coef	T	P
Constante		109.604	0.1776	617.30	0.000
Bloque 1		1.296	0.2511	5.16	0.000
Bloque 2		-0.667	0.2511	-2.65	0.016
Vacío	37.442	18.721	0.1776	105.44	0.000
Prim	-1.075	-0.537	0.1776	-3.03	0.007
Sek	-0.842	-0.421	0.1776	-2.37	0.029

S = 0.869839 PRESS = 24.2119
R-cuad. = 99.84% R-cuad.(pred.) = 99.71% R-cuad.(ajustado) = 99.79%

Coeficientes estimados para Knee Point (bar) OUT utilizando datos en unidades no codificadas

Término	Coef
Constante	-110.960
Bloque 1	1.29583
Bloque 2	-0.666667
Vacío	0.312014
Prim	-0.381206
Sek	-0.254280

Figura 5-16 Efectos y Coeficientes estimados para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

El factor “Bloques” está integrado por las condiciones y circunstancias en las que se realizaron de pruebas, durante los diversos días. El periodo de prueba fue de Agosto a Noviembre, presentándose condiciones atmosféricas cálido-secas, húmedas y templadas, impactando sobre la presión atmosférica (atm),

factor no controlable al que se atribuye la variación “Bloques”, descartándose y considerándose como factor ruido, además el sistema de frenado debe responder en todas las condiciones atmosféricas. En la Figura 5-17 se verifica el cumplimiento de los supuestos de normalidad e independencia que pide para su validez el modelo de ANOVA. Se concluye que los residuos siguen una distribución normal, y son independientes.

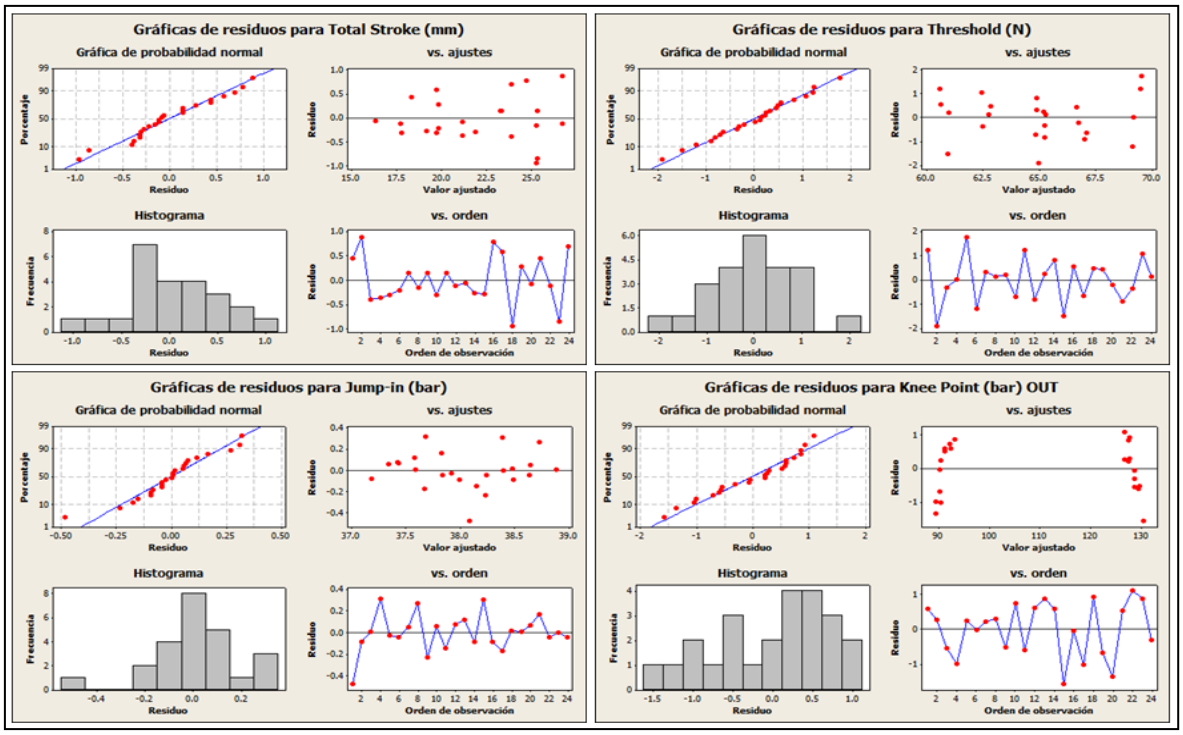

Figura 5-17 Gráficas de Residuos para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

Así mismo se calcula una estadística de prueba y un valor p para la prueba de Bartlett para probar si las muestras analizadas provienen de poblaciones con la misma varianza (se selecciona esta prueba porque sólo hay dos niveles y los datos provienen de distribuciones normales), donde la hipótesis nula corresponde a varianzas iguales, mientras que la hipótesis alternativa corresponde a varianzas que en no todos los casos son iguales. En la Figura 5-18 se muestra los resultados del análisis de varianza y se concluye que las muestras analizadas provienen de poblaciones con la misma varianza (a las varianzas

iguales a través de las muestras se llama homocedasticidad u homogeneidad de varianzas), es decir la varianza de los datos es homogénea para las 4 variables respuestas (considerando los 3 factores en cuestión), el valor p es mayor 0.05, por lo que no hay suficiente evidencia estadística para rechazar Ho, igualdad de varianzas.

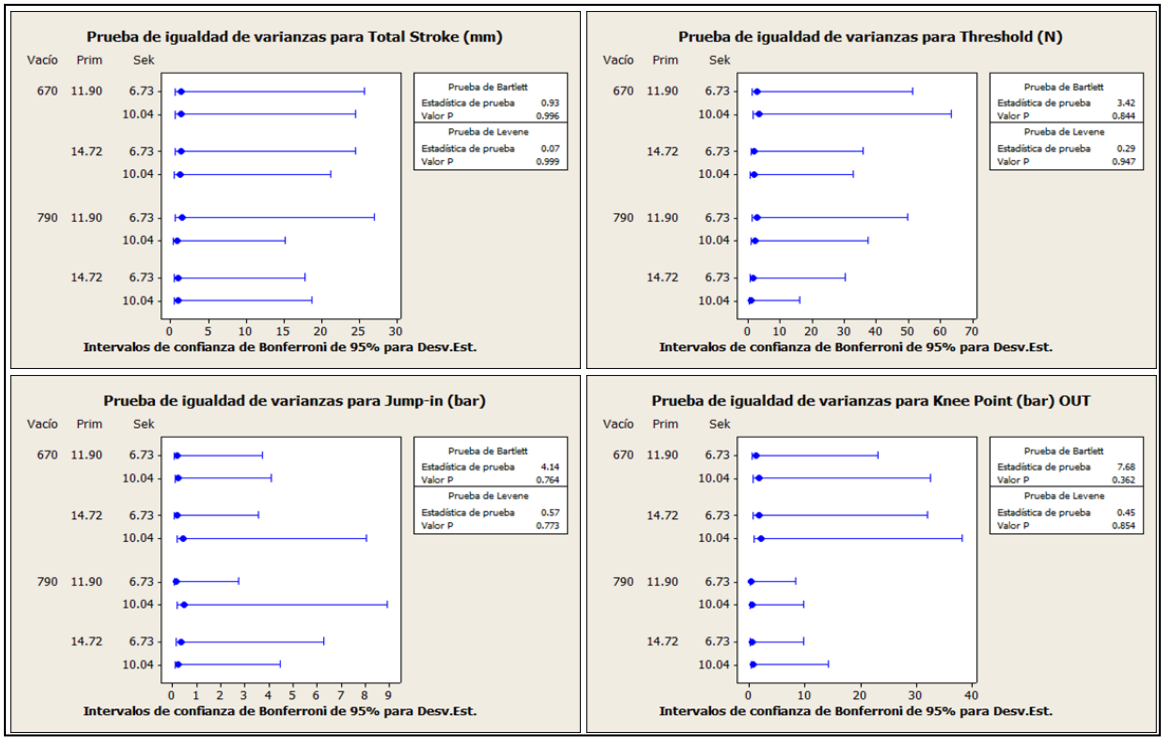

Figura 5-18 Prueba de Igualdad de Varianza para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

Las ecuaciones de regresión o de transferencia para las variables de salida son:

$$\boldsymbol{Y_1 = -22 + 0.0461\, Vacío + 0.5171\, Prim + 0.4103\, Sek} \qquad (5\text{-}1)$$

$$\boldsymbol{Y_2 = 92.2142 - 0.0353\, Vacío} \qquad (5\text{-}2)$$

$$\boldsymbol{Y_3 = 34.6619 + 0.0067\, Vacío - 0.0856\, Prim} \qquad (5\text{-}3)$$

$$\boldsymbol{Y_4 = -110.960 + 0.3120\, Vacío - 0.3812\, Prim - 0.2542\, Sek} \qquad (5\text{-}4)$$

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 6-1se puede observar que el consumo hidráulico en los circuitos primario y secundario (Sek*Prim) no alcanza a generar valores resultantes que estén dentro de los rangos aceptables, a excepción de la resultante “Threshold”, cuando el factor vacío está en su nivel inferior.

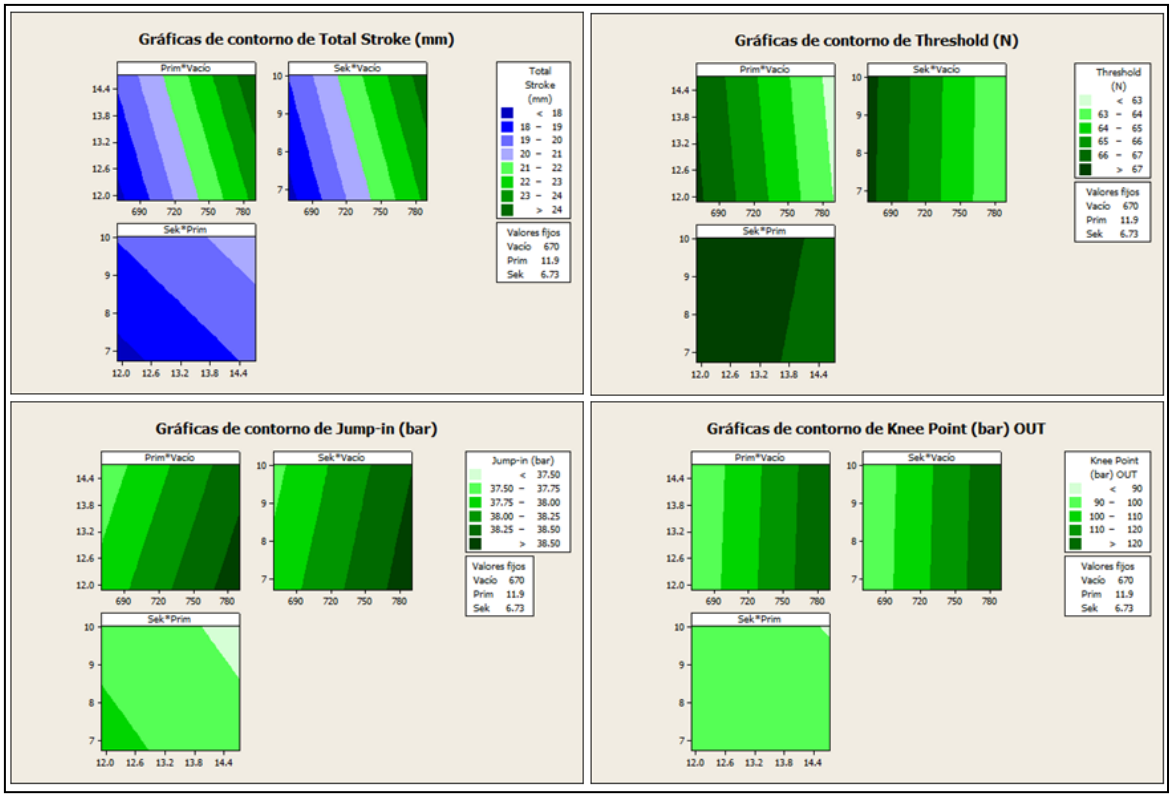

Figura 6-1 Gráficas de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 en nivel bajo.

Por el contrario, en la Figura 6-2 se puede observar que el consumo hidráulico en los circuitos primario y secundario (Sek*Prim) si alcanzan a generar valores resultantes dentro de las especificaciones de diseño, cuando el factor vacío se encuentra en su nivel superior.

El análisis de las gráficas de contorno nos permite encontrar combinaciones de los factores que satisfagan los rangos aceptables de las variables resultantes. El experimento realizado ha dejado clara la importancia de bloquear el factor vacío en su nivel alto, esto para poder tener un rango de valores resultantes dentro de especificación. El tener un rango de valores resultantes dentro de especificación

permite interactuar de forma alterna los 2 factores restantes, generando así más de una solución.

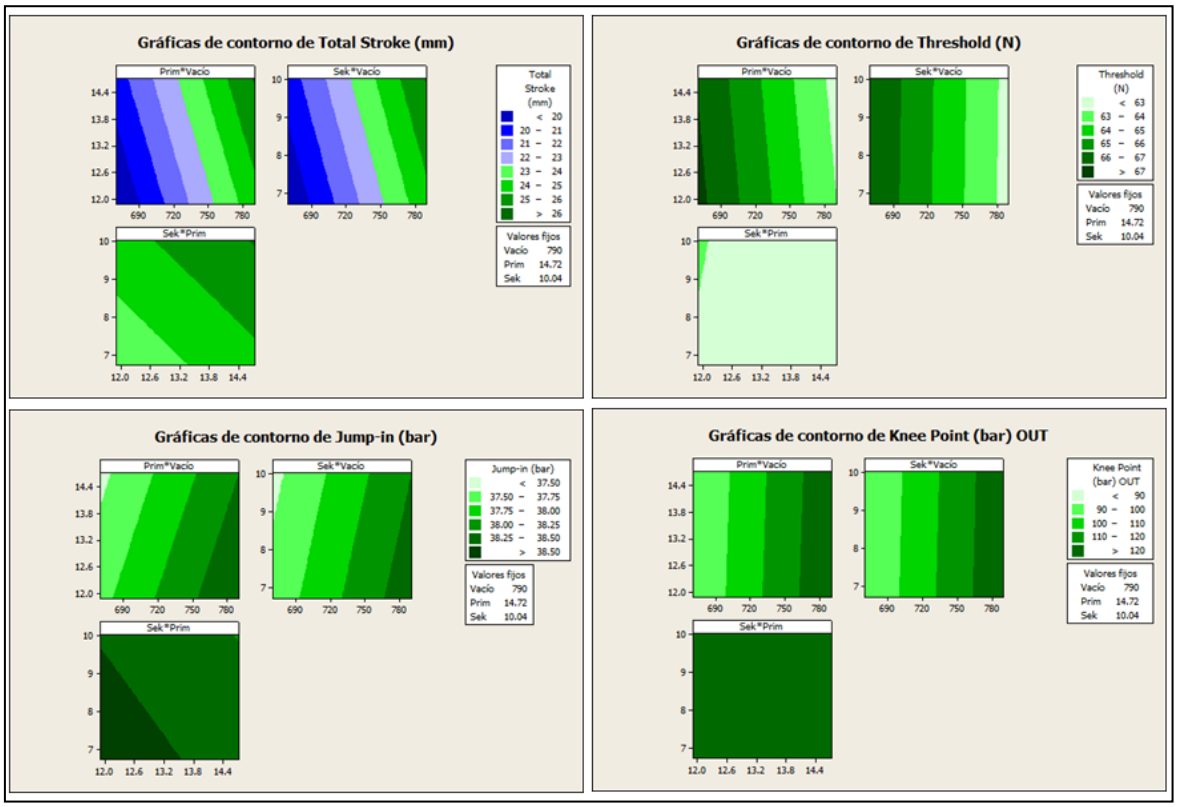

Figura 6-2 Gráficas de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 en nivel alto.

6.1 Mejorar (Improve)

En la Figura 6-3 se bloquea el factor vacío en su nivel superior y se interactúan los factores de consumo hidráulico de circuito primario y circuito secundario, de esta forma se obtiene el área de soluciones que se tiene, en la cual todas las variables respuesta están dentro de los rangos aceptables por las especificaciones de diseño (área blanca).

En la Figura 6-4 se muestra la gráfica del Optimizador de Respuesta, donde se puede apreciar la combinación de los factores que se proponen, en la cual se obtiene una deseabilidad total mayor al 80%.

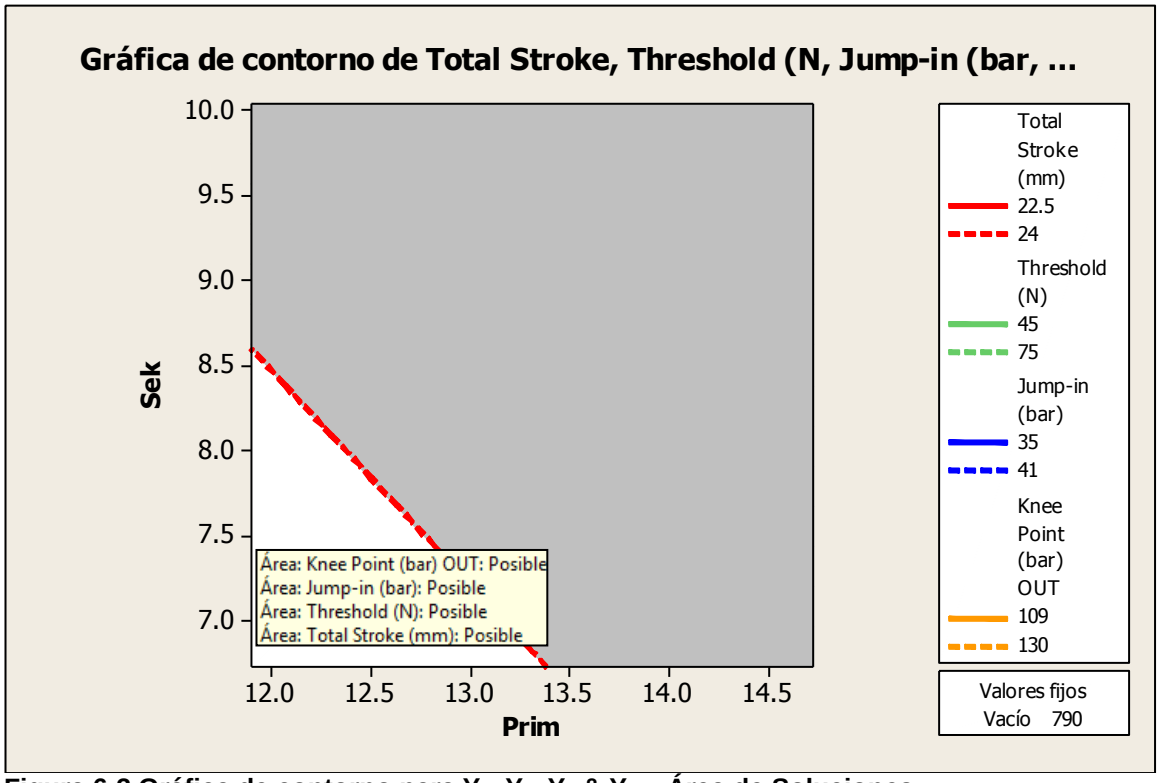

Figura 6-3 Gráfica de contorno para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4 – Área de Soluciones.

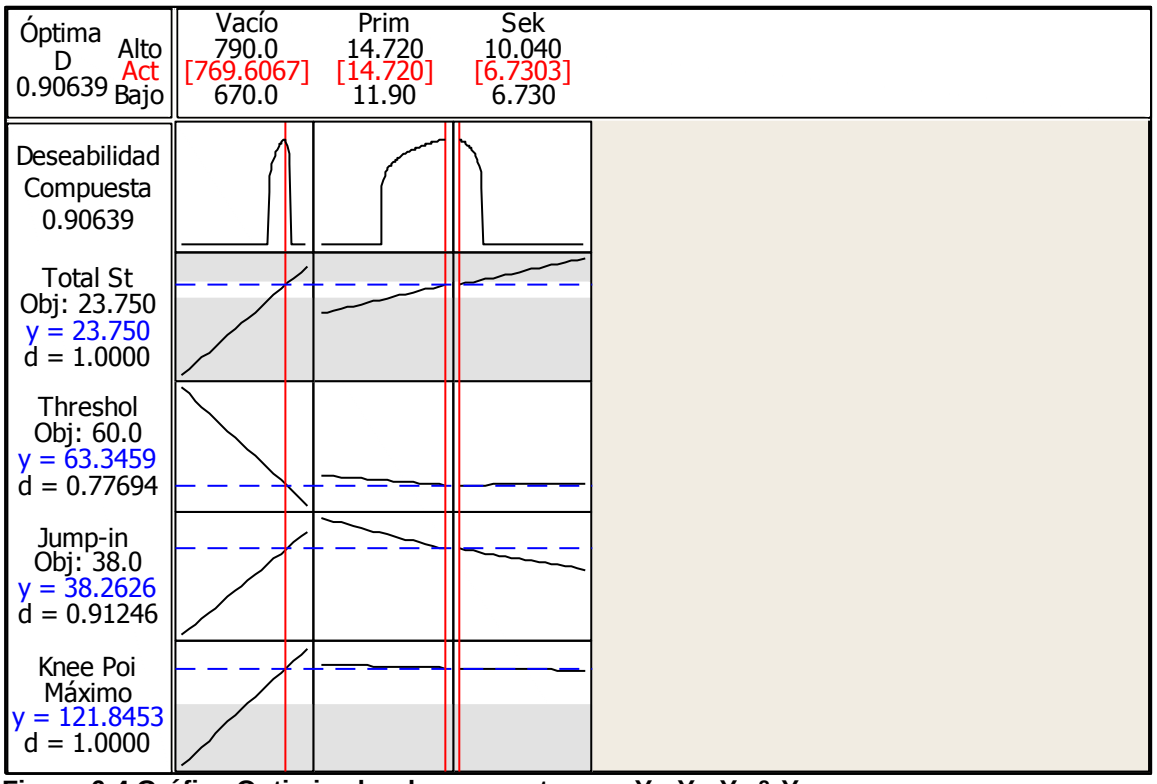

Figura 6-4 Gráfica Optimizador de respuesta para Y_1, Y_2, Y_3 & Y_4.

Para validar la solución propuesta se realizaron corridas confirmatorias. Durante la semana del 1 al 5 de Diciembre se operó el proceso utilizando la configuración de parámetros mostrada en la Figura 6-4 Tabla 6-1. Se evaluaron 10 componentes tomando la lectura 4 veces por cada componente por cada variable de respuesta. Los datos obtenidos se muestran en la Tabla 6-1.

Tabla 6-1 Datos para la evaluación de la solución propuesta.

Parte	Lectura	Total Stroke (mm)	Threshold (N)	Jump-in (bar)	Knee Point (bar) OUT
1	1	22.95	63.10	38.60	121.80
1	2	23.15	63.10	38.40	121.90
1	3	23.25	63.10	38.50	122.10
1	4	23.25	63.10	38.70	121.70
2	1	23.25	63.15	38.70	122.20
2	2	23.15	63.25	38.60	121.90
2	3	23.30	63.20	38.30	122.00
2	4	23.30	63.20	38.80	121.90
3	1	23.15	63.20	38.40	121.80
3	2	23.20	63.30	38.30	121.70
3	3	23.25	63.25	38.40	121.80
3	4	23.35	63.25	38.60	121.80
4	1	23.35	63.35	38.50	121.70
4	2	23.10	63.30	38.50	121.70
4	3	23.25	63.15	38.40	122.00
4	4	23.15	63.15	38.30	121.90
5	1	23.25	63.20	38.40	121.90
5	2	23.20	63.25	38.50	122.10
5	3	23.30	63.30	38.50	121.60
5	4	23.15	63.05	38.60	121.90
6	1	23.20	63.15	38.30	122.00
6	2	23.25	63.15	38.50	122.00
6	3	23.20	63.25	38.50	121.90
6	4	23.30	63.10	38.20	122.00
7	1	23.25	63.25	38.40	121.90
7	2	23.20	63.35	38.40	121.80
7	3	23.15	63.15	38.40	122.00
7	4	23.10	63.15	38.40	121.80
8	1	23.30	63.20	38.50	122.20
8	2	23.25	63.15	38.50	122.10
8	3	23.15	63.15	38.20	121.80
8	4	23.25	63.10	38.80	122.00
9	1	23.20	63.10	38.70	121.90
9	2	23.20	63.05	38.30	121.80
9	3	23.30	63.20	38.60	122.10
9	4	23.20	63.05	38.70	122.10
10	1	23.10	63.20	38.60	122.00
10	2	23.20	63.25	38.60	121.90
10	3	23.10	63.30	38.20	121.60
10	4	23.15	63.20	38.40	121.90

A los datos de la Tabla 6-1 se les analizó para determinar la capacidad del proceso. En la Figura 6-5se muestran los resultados de la variable “Total Stroke”, donde se observó una distribución normal (valor p mayor a 0.05), la cual está centrada en el valor 23.25 mm (el esperado era 23.75). De acuerdo a la especificación de diseño, esta resultante debe estar alrededor de 2/3 de la carrera total. La carrera total es 36 mm y 2/3 de la carrera total son 23.7 mm, con tolerancias 22.1 a 24mm. El proceso está en control, centrado y con una capacidad de proceso mayor a 1.92 a corto plazo y una capacidad de proceso mayor a 1.96 a largo plazo.

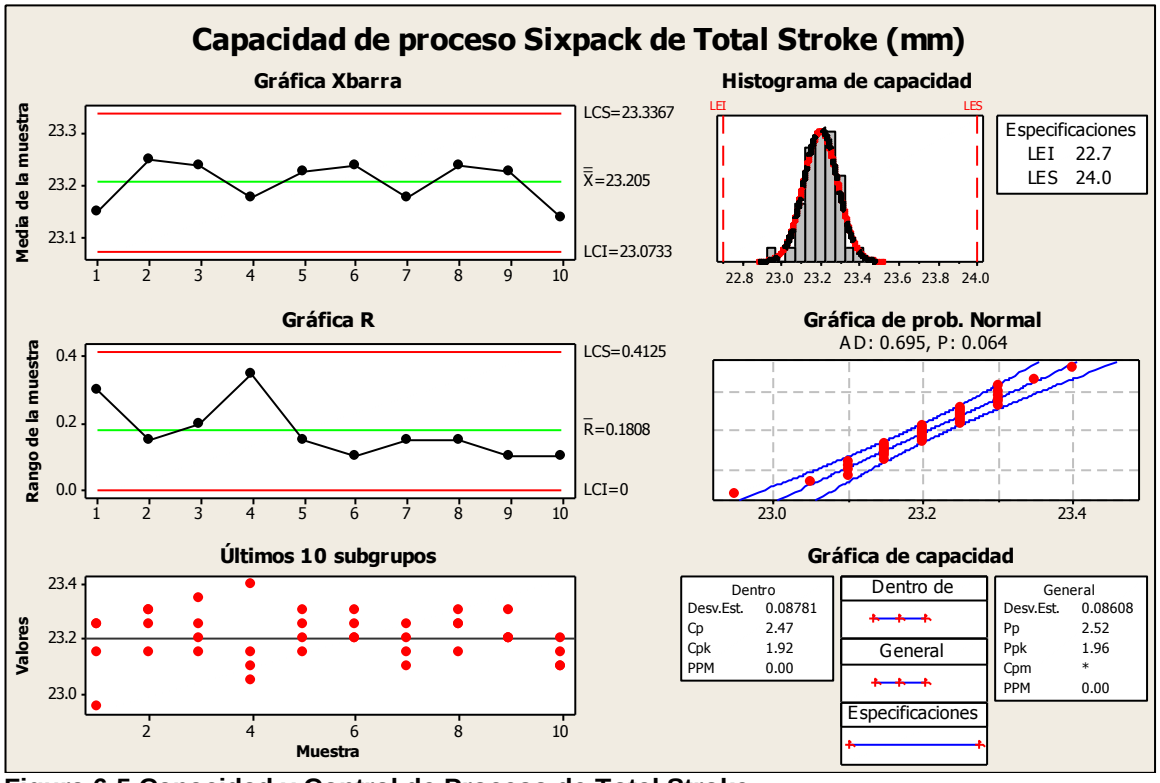

Figura 6-5 Capacidad y Control de Proceso de Total Stroke.

En la Figura 6-6 se muestran los resultados de la variable “Threshold”, donde se observó una distribución normal (valor p mayor a 0.05), la cual está centrada en 63.2N (el valor esperado era 63.3), ligeramente por arriba de la nominal de 60N. En la fase de medición el proceso estaba centrado en 64N con

desfase hacia la derecha, pero la variación y falta de control del mismo, lo hacían tener una capacidad de proceso por debajo de la mínima requerida.

Los límites de tolerancia son 45N en el nivel inferior y 75N en el nivel superior, sin embargo para fines de poder apreciar la gráfica de normalidad, se evaluó el proceso de 62.5 a 64N. En cuanto a los estadísticos reportados, ahora la capacidad de proceso de corto plazo es de cp=3.59 y cpk=3.28, mientras que la evaluación preliminar de la capacidad de proceso de largo plazo es de pp=3.09 y ppk=2.83; mientras que las partes por millón disconformes es cero. El incrementar el rango de tolerancia, mejorará los indicadores de capacidad de proceso también.

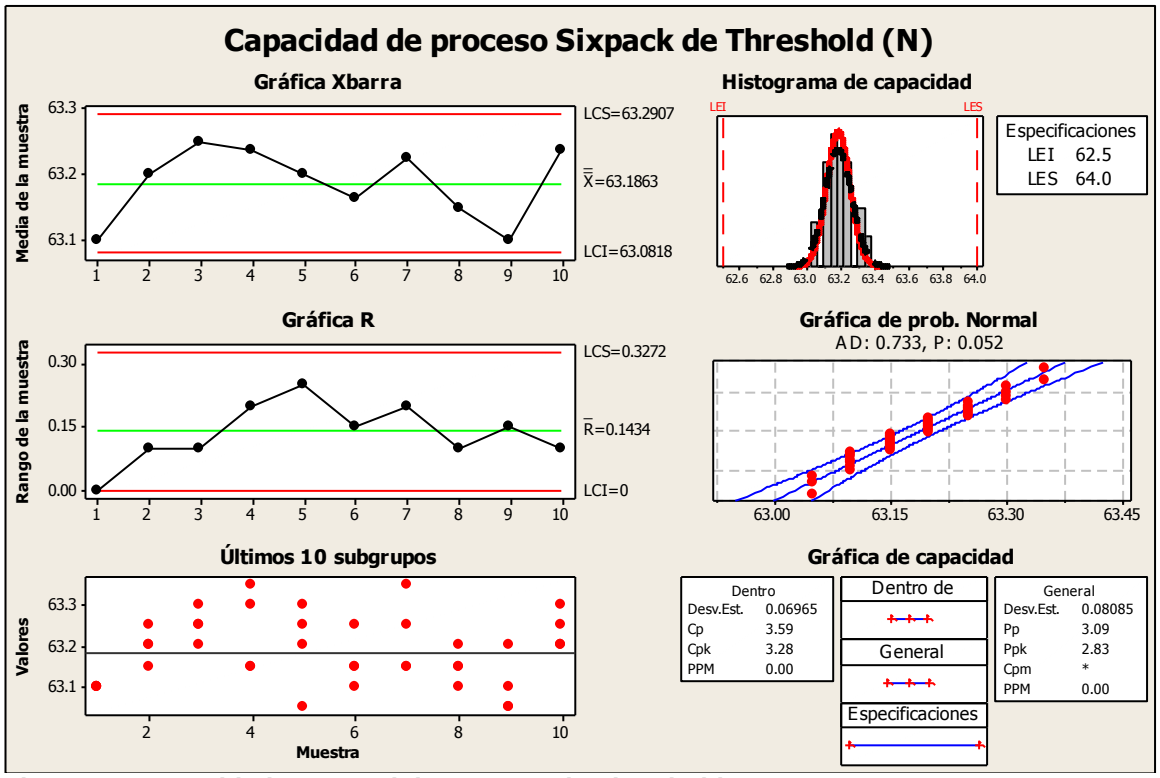

Figura 6-6 Capacidad y Control de Proceso de Threshold.

En la Figura 6-7se muestran los resultados de la variable “Jump in”, donde se observó una distribución normal (valor p mayor a 0.05), la cual está centrada en 38.4 bares (el valor esperado es 32.2), ligeramente por arriba de la nominal de 38 bares. En la fase de medición el proceso estaba centrado en 39.5 bares, con alta

variación, falta de control y capacidad de proceso por debajo de la mínima requerida.

Los límites de tolerancia son 35 bares en el nivel inferior y 41 bares en el nivel superior, sin embargo para fines de poder apreciar la gráfica de normalidad, se evaluó el proceso de 36 a 40 bares. En cuanto a los estadísticos reportados, ahora la capacidad de proceso de corto plazo es de cp=4.18 y cpk=3.18, mientras que la evaluación preliminar de la capacidad de proceso de largo plazo es de pp=4.24 y ppk=3.22; mientras que las partes por millón disconformes es cero. Al incrementar el rango de tolerancia, mejorarán los indicadores de capacidad de proceso también.

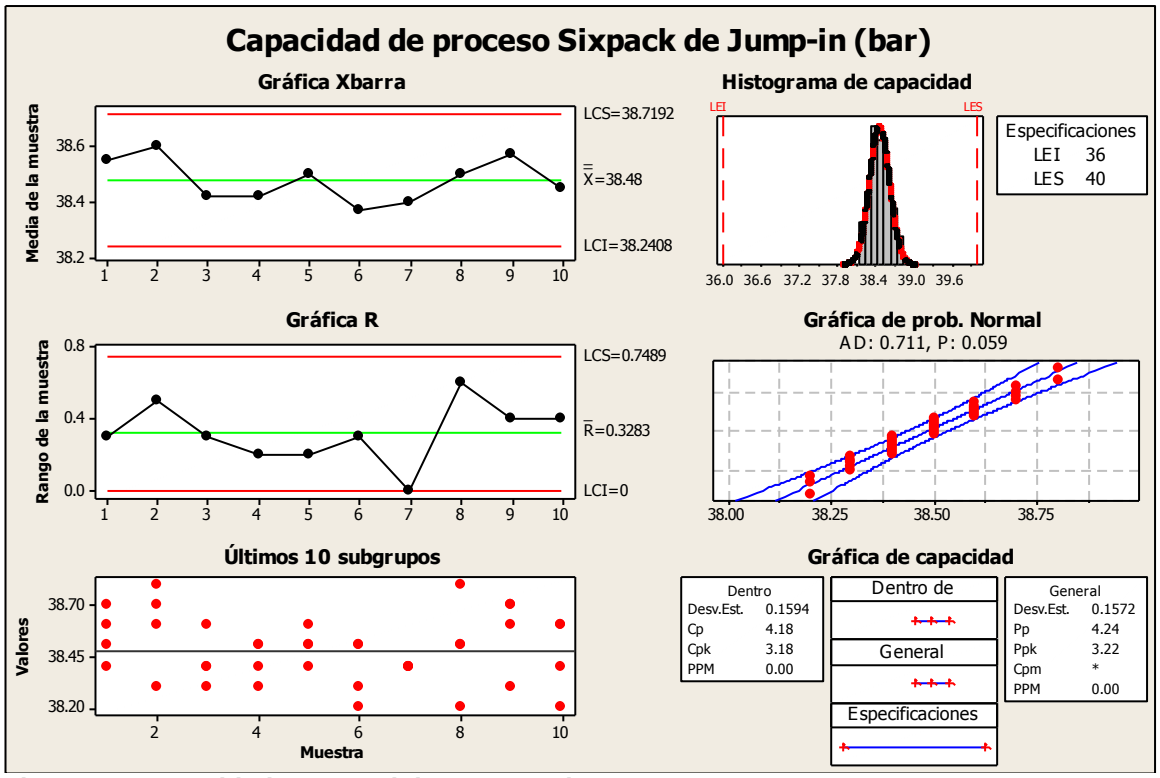

Figura 6-7 Capacidad y Control de Proceso de Jump In.

En la Figura 6-7 se muestran los resultados de la variable “Knee Point”, donde se observó una distribución normal (valor p menor a 0.05), la cual está centrada en 121.8 bares (coincide con el valor esperado).

En la fase de medición el proceso estaba centrado en 105 bares con desfase a la derecha, lo cual era bueno, pero debido a su alta variación y falta de control, la capacidad de proceso se encontraba por debajo de la mínima requerida.

Únicamente se tiene el límite de tolerancia inferior, el cual es de 109 bares, sin embargo para fines de poder apreciar la gráfica de normalidad, se evaluó el proceso de 120 a 123 bares. En cuanto a los estadísticos reportados, ahora la capacidad de proceso de corto plazo es de cp=3.42 y cpk=2.50, mientras que la evaluación preliminar de la capacidad de proceso de largo plazo es de pp=3.33 y ppk=2.43; mientras que las partes por millón disconformes es cero. Al incrementar el rango de tolerancia, mejorarán los indicadores de capacidad de proceso también.

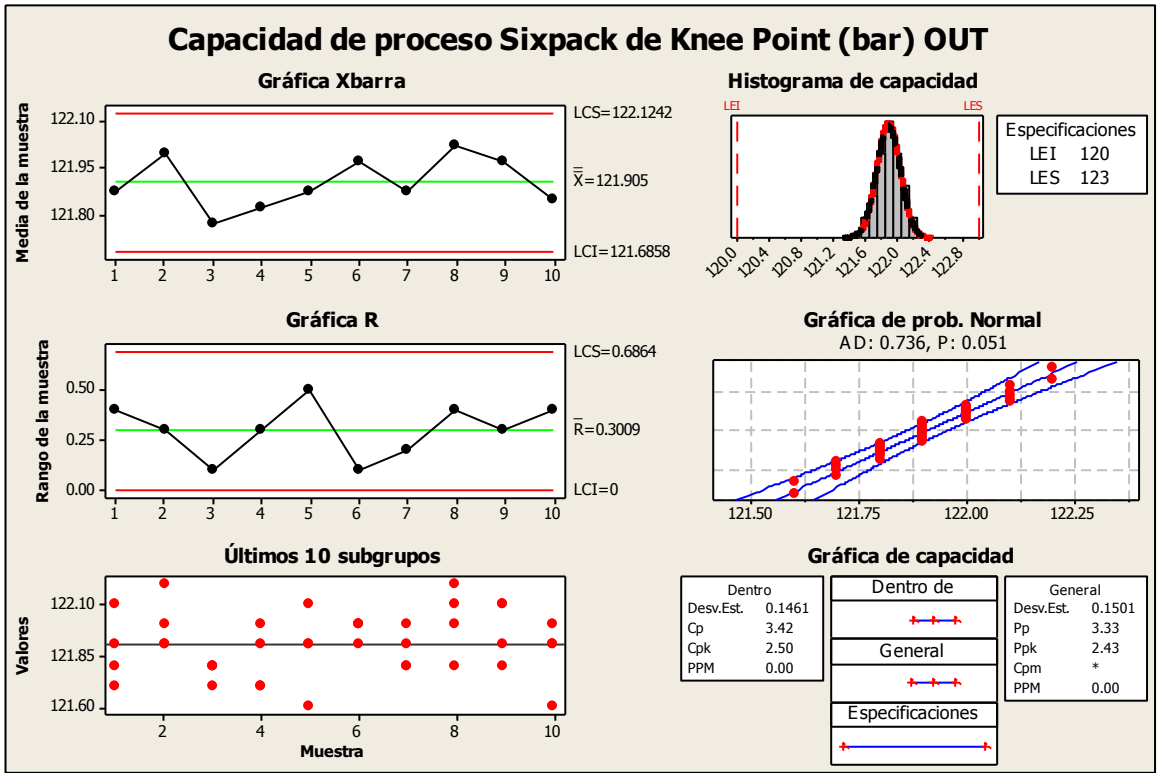

Figura 6-8 Capacidad y Control de Proceso de Knee Point.

En la Tabla 6-2 se resume el antes y después del desempeño del proceso de la variables críticas para la Calidad “Total Stroke”, “Threshold”, “Jump

in” y “Knee Point”. En los casos en los que la capacidad de proceso tuvo una mejoría mayor, la amplitud de la tolerancia jugó un papel muy importante.

Tabla 6-2 Comparativo de capacidad de proceso.

		Antes	Después
Total Stroke	Cp		2.47
	Cpk		1.92
	Pp		2.52
	Ppk		1.96
	PPM		0.00
Threshold	Cp	1.24	3.59
	Cpk	0.74	3.28
	Pp	0.87	3.09
	Ppk	0.52	2.83
	PPM	61127.88	0.00
Jump-in	Cp	1.30	4.18
	Cpk	0.47	3.18
	Pp	1.18	4.24
	Ppk	0.43	3.22
	PPM	100731.03	0.00
Knee Point	Cp	0.56	3.42
	Cpk	0.31	2.50
	Pp	0.52	4.24
	Ppk	0.29	3.22
	PPM	204174.04	0.00

6.2 Controlar (Control)

En esta etapa se diseña un sistema que mantenga las mejoras logradas (controlar las X vitales). Las acciones de control se dan en tres niveles: proceso, documentación y monitoreo.

El Proceso de Operación de Banco de Pruebas Hidráulicas y Neumáticas ATW D315A no fue modificado, únicamente se agrega especificaciones de acuerdo a la solución óptima propuesta en las siguientes operaciones:

Op. 260: Ajustar el consumo hidráulico de la prueba

- Consumo en Circuito Primario = 14.72 ccm. (combinación de mangueras 1+2+3+4)
- Consumo en Circuito Secundario = 6.7303 ccm. (combinación de mangueras 2+4)

Op. 280: Regular el vacío al nivel deseado

- Vacío = -769.6067 Mb

Estas mismas especificaciones se agregaron en la documentación interna del laboratorio para la realización de pruebas de desempeño para el modelo F15+ del cliente BMW.

A partir de Enero del 2015, la configuración de parámetros de operación del banco de pruebas se ha mantenido y ha permitido la detección de nuevos hallazgos que producen variación en las variables respuestas. Estas variaciones han permitido conocer y entender mejor el comportamiento de otros componentes dentro del sistema de frenado, por lo que el estándar se sigue manteniendo.

7. CONCLUSIONES

Retomando la hipótesis planteada al inicio del proyecto, se concluye que si es posible modelar la curva de desempeño óptima de Cilindro Maestro y Booster (fuerza y/o presión de salida) del modelo BMW F15+, a partir de los cambios de niveles en los factores presión de vació, consumo de líquido de frenos circuito primario y consumo de líquido de frenos circuito secundario con base en un Diseño de Experimentos Completo.

El objetivo principal del presente proyecto, se cumple al determinar de los parámetros de operación del banco de pruebas de Cilindro Maestro y Booster para obtener una curva de desempeño óptima para el modelo BMW F15+.

Se cumplen los 4 objetivos específicos de la siguiente forma:

1. Se determinó el nivel de significancia de los factores de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster. Mediante un diagrama de Pareto y ANOVA se estiman el nivel de significancia de los factores. Los 3 factores son importantes en las variables respuesta. Se decide repetir este análisis descartando las interacciones entre los factores para fines de parsimonia.

2. Se determinó el nivel de significancia de las interacciones entre factores de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster. Con un Diagrama de Pareto y ANOVA se definió el nivel de significancia entre las interacciones de los factores sobre las resultantes,

3. Se identificó los factores que afectan significativamente en las variables respuesta de la prueba de desempeño para Cilindro Maestro y Booster. No se identifican interacciones dobles o triples significativas. Los cambios de niveles en los factores presión de vacío, consumo de líquido de frenos circuito primario y consumo de líquido de frenos circuito secundario generan variaciones importantes en las resultantes “Total Stroke” y “Knee

point”, mientras que en la resultante “Threshold” el único factor significativo es la presión de vacío y para la resultante “Jump in”, el consumo de líquido de frenos en el circuito primario y la presión de vacío. Una vez que se conoció la significancia de las interacciones, se decide descartarlas por fines de parsimonia.

4. Se determinó la configuración de parámetros de Banco de Pruebas que satisfagan las especificaciones de las resultantes para la generación de una curva de desempeño óptima para Cilindro Maestro y Booster. Una vez determinado los factores que generan variación de un nivel bajo a un nivel alto, o viceversa, sobre las resultantes, se identifican la magnitud en la que deben ser aplicadas para predecir resultados. Se modela cada una de los eventos que derivan en variables respuesta y se identifica la combinación óptima para la obtención de resultados específicos entre las variables respuestas.

Si bien es cierto, las mejoras económicas en los procesos son muy atractivas, sin embargo en el presente proyecto, independientemente de la mejora económica que se tuvo y la mejora en cuanto al desempeño del proceso, el conocimiento que se obtuvo acerca de la interacción y significancia de los factores involucrados en el proceso sobre las resultantes críticas para la calidad, ha permitido poder entender mejor el producto, confirmar matemáticamente teorías que se tenían y rechazar información equivoca del mismo, lo que conlleva a poder identificar fluctuaciones atípicas del funcionamiento del componente que pudieran generar fallas futuras durante el ensamble o uso del automóvil, que si bien le podrían costar mucho dinero a la empresa, podrían llegar a causar la muerte al usuario final.

8. GLOSARIO

mBA = Mechanical Brake Assist

DOE= Diseño de Experimento (Design of Experiment)

MSR= Método de Superficie de Respuesta (Surface Response Methodology)

Ccm = Centímetros cúbicos

MSE = Cuadrado Medio de Error (Mean Square Error)

LVDT = Transductor de Voltaje (Linear Voltage Displacement Transducer).

PC = Equipo de Cómputo (Personal Computer)

TGN = Técnica de grupo nominal

9. BIBLIOGRAFÍA

Beránek, L., & Kolařík, K. (2014). Surface integrity analysis of duplex steel by design of experiment. *ScienceDirect* , 630 – 637.

Bureau International des Poids et Mesures. (1954). Définition de l'atmosphère normale. *Résolution 4 de la CGPM (1954)* (pág. 79). Francia: BIPM metrology.

Dittrich, M., Dix, M., Kuhl, M., Palumbo, B., & Tagliaferri, F. (2014). Process Analysis of Water Abrasive Fine Jet Structuring of Ceramic. *ScienceDirect* , 442-447.

Farooq, M. A., Nóvoa, H., Araújoa, A., & Tavares, S. M. (2014). An innovative approach for planning and executionof pre-experimental runs for Design of Experiments. *Investigaciones Europeas de Dirección y Economía de la Empresa* , 1-7.

Graf, B., Ammer, S., Gumenyuk, A., & Rethmeier, M. (2013). Design of experiments for laser metal deposition in maintenance, repair and. *ScienceDirect* , 245-248.

Gutierrez Pulido, H., & De la Vara Salazar, R. (2009). *Control Estadístico de Calidad y Seis Sigma* (Segunda ed.). México D.F.: Mc Graw Hill.

Hinkelmann, K. (2012). *Design and Analysis of Experiments, Specials Designs and Applications.* New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.

Kleijnen, J. (2010). Design and analysis of computational experiments: overview. *Exp Methods Anal Optim Algorithms* , 51-77.

Kuehl, R. (2000). Design of Expetiments: Statistical Principles of Research. *Design and Analysis Duxbury-Thomson Learning* .

Mathews, P. (2004). *Design of Experiments with MINITAB.* ASQ.

Montgomery, D. C. (2004). *Diseño y Análisis de Experimentos* (Segunda ed.). México, D.F.: Limusa Wiley.

Morris, M. (2010). *Design of Experiments: An Introduction Based on Linear Models* (Ilustrated ed.). Taylos & Francis.

Myers, R., Montgomery, D., & Anderson, C. (2008). *Response Surface Methology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments* (Tercer ed.). New York: John Wiley and Sons.

Panneerselvam, R. (2012). *Design and Analysis of Experiments.* (E. E. Edition, Ed.) New Delhi: PHI Learning Private Limited.

Prontazo, L., & Pázman, A. (2014). *Design of Experiments in Nonlinear Models.* Lecture Notes in Statistics 212.

Radhika, N., & Raghu, R. (2014). Three body abrasion wear behaviour of functionally graded. *ScienceDirect* , 713 – 722.

Roux, W., Stander, N., & Haftka, R. (1998). *Response surface approximations for structural optimization.* Int J Numer Methods Eng.

Simpson, T., Lin, D., & Chen, W. (2001). *Sampling strategies for computer experiments: design and analysis.* Int J Reliable Appl.

Taguchi, G., Chowdhury, S., & Wu, Y. (2005). *Taguchi´s quality engineering handbook.* NJ: John Wiley and Sons Hoboken.

Trana, K., Douthe, C., Sab, K., Dallot, J., & Davaine, L. (2014). A preliminary design formula for the strength of stiffened curved panels by design of experiment method. *Thin-Walled Structures* , 132.

TRW. (2013). *TRW Automotive*. Obtenido de http://www.trw.com/sites/default/files/TRW_mechanicalbrakeassist_en.pdf

TRW. (2013). *TRW Automotive*. Obtenido de http://www.trw.com/sites/default/files/TRW_fsmastercylinder_en.pdf

TRW. (2014). *TRW Automotive*. Obtenido de http://www.trw.com/braking_systems

TRW. (2014). *TRW Automotive*. Obtenido de http://www.trw.com/braking_systems/actuation

Zheng, Y., & Das, P. (2000). *Improved response surface method and its applications to siffened plate reliability analysis.* Eng Struct.