



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
UNIDAD DE ALTA TECNOLOGÍA

CARACTERIZACIÓN DEL FENÓMENO DINÁMICO  
DE INESTABILIDAD SÚBITA EN LAVADORAS DE  
CARGA SUPERIOR

**TESIS**  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**JUAN LUIS CAMPOS CHORA**

DIRECTORES DE TESIS:  
DR. MARCELO LÓPEZ PARRA / Facultad de Ingeniería  
UNAM  
DR. ROBERTO ZARATE ESPINOSA / Instituto Tecnológico  
de Celaya

QUERÉTARO, NOVIEMBRE 2022



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## LISTADO DE NOMENCLATURA

<i>UB</i>	Carga de desbalanceo.
<i>RD</i>	Carga de rápida deshidratación.
<i>DL</i>	Carga distribuida.
<i>m</i>	Masa de la carga (lb).
<i>x, y</i>	Desplazamientos sobre plano ortogonal al eje de rotación (in).
<i>z</i>	Desplazamiento pico a pico sobre el eje de rotación (in).
$\omega$	Velocidad de rotación de la canasta (rpm).
<i>h</i>	Altura de masas de desbalanceo dentro de la canasta (in).
<i>s</i>	Desviación estándar.
<i>k</i>	Número de factores de DOE.
<i>n</i>	Número de réplicas experimentales.
$\alpha$	Nivel de significancia estadístico.

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Corte de lavadora automática de carga superior [1].	6
Figura 2. Patente US 2005/0155159A1 [2]. (a) Diagrama esquemático de lavadora. (b) Algoritmo de funcionamiento.	7
Figura 3. Patente US 2016/0348294A1 [3]. (a) Sensor de velocidad. (b) Algoritmo de detección de desbalanceo.	8
Figura 4. Patente US 2008/0178398A1 [4]. (a) Condición de agua atrapada. (b) Lógica de sensado.	10
Figura 5. Diagrama de cuerpo libre para lavadora vertical [6]. (a) DCL de la carga, (b) DCL de la lavadora.	11
Figura 6. Modelo multicuerpo para estudio de efectos rotodinámicos [13]. (a) Canasta elástica. (b) Inercia asimétrica.	12
Figura 7. Resultados de estudio con canasta flexible y asimetría en inercia [13].	13
Figura 8. Fuerza generada por deshidratación rápida [14].	14
Figura 9. Burbuja de agua atrapada en cubre colchón.	16
Figura 10. Diagrama de bloques simple de un proceso [18].	20
Figura 11. Gráfica de Diseño Factorial $2^2$ [18].	24
Figura 12. Gráfica de Diseño Factorial $2^3$ [18].	25
Figura 13. (a) Factores principales en Diseños $2^3$ . (b) Efectos de interacción de dos factores. (c) Efectos de interacción de tres factores [18].	27
Figura 14. Región de dos colas para un nivel de significancia de 0.05.	29
Figura 15. Diagrama de Pareto.	30
Figura 16. Corte de lavadora de carga superior para estudio.	33
Figura 17. Explosionado simple de ensamble lavadora.	33
Figura 18. Diagrama de bloques de lavadora de eje vertical.	34
Figura 19. Perfil de aceleraciones de la lavadora.	35
Figura 20. Diagrama de flujo de metodología propuesta.	36
Figura 21. Diagrama de parámetros del centrifugado.	37
Figura 22. Cargas al interior de la canasta.	39
Figura 23. Configuración para pruebas exploratorias con carga RD.	40
Figura 24. Sistema de ignición a distancia por radiofrecuencia.	41
Figura 25. Recipiente con orificios para reservorio de agua.	41

Figura 26. Carga RD al interior de la canasta. ....	42
Figura 27. Carga UB al interior de la canasta. ....	42
Figura 28. Gráfica de desplazamientos en réplicas exploratorias.....	43
Figura 29. Distancia crítica entre Sublavadora y Cubierta. ....	45
Figura 30. Orientación de sistema coordinado para medición de desplazamiento. ....	45
Figura 31. Zona de medición para tacómetro.....	46
Figura 32. Corte frontal en lavadora para rastreo con cámara rápida. ....	47
Figura 33. Configuración de prueba para DOE.....	47
Figura 34. Lavadora dentro de jaula de contención.....	48
Figura 35. Gráfica de desplazamientos en pruebas de DOE. ....	50
Figura 36. Desplazamiento de unidad dentro de jaula en el tiempo. (a) $t = 0$ s, (b) $t = 2.13$ s, (c) $t = 4.26$ s, (d) $t = 6.40$ s. ....	50
Figura 37. Diagrama de Pareto de los efectos. ....	52
Figura 38. Gráfica de efectos principales. ....	52
Figura 39. Gráfica de interacciones.....	53
Figura 40. Gráfica de cubos de z. ....	54
Figura 41. Diagrama de Pareto para elementos de tercer orden. ....	55
Figura 42. Diagrama de Pareto para elementos de primer y segundo orden.....	56
Figura 43. Resultados de desplazamientos en corrida de validación. ....	60
Figura 44. Desplazamiento de unidad en prueba de validación número 5. (a) $t = 0$ s, (b) $t = 0.46$ s, (c) $t = 0.93$ s, (d) $t = 1.40$ s, (e) $t = 1.86$ s, (f) $t = 2.33$ s.....	60
Figura 45. Daño en unidad provocado por falla súbita en corrida de validación. ....	61
Figura 46. Desplazamiento súbito de carga en sentido del aro de balance.....	65
Figura 47. Medición de velocidad contra desbalanceo.....	68

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa de desplazamientos simulados y experimentales [14].	14
Tabla 2. Resumen de casos de falla.	15
Tabla 3. Pasos en el diseño de experimentos [18].	21
Tabla 4. Combinaciones de un Diseño Factorial $2^2$ [18].	24
Tabla 5. Combinaciones de un Diseño Factorial $2^3$ [18].	25
Tabla 6. Combinaciones de cargas con calificación crítica.	39
Tabla 7. Combinación de factores para réplicas exploratorias.	42
Tabla 8. Resultados de desplazamiento en réplicas exploratorias.	43
Tabla 9. Factores de estudio para DOE.	43
Tabla 10. Combinaciones para DOE Factorial Completo.	44
Tabla 11. Resultados de desplazamiento en pruebas de DOE.	49
Tabla 12. DOE con mediciones de variable de respuesta.	51
Tabla 13. Tabla de coeficientes para elementos de tercer orden.	54
Tabla 14. Tabla de coeficientes para elementos de segundo y primer orden.	56
Tabla 15. Valor de $R^2$ para primer modelo.	57
Tabla 16. Tabla de coeficientes reducida.	57
Tabla 17. Valor de $R^2$ para segundo modelo.	58
Tabla 18. Combinaciones de prueba para corrida de validación.	59
Tabla 19. Resultados de desplazamiento para corrida de validación.	59
Tabla 20. Correlación de modelos empíricos.	61

## CONTENIDO

RESUMEN .....	1
INTRODUCCIÓN .....	4
OBJETIVOS .....	5
Objetivo general .....	5
Objetivos específicos .....	5
HIPÓTESIS .....	5
ANTECEDENTES .....	6
La lavadora automática .....	6
Patentes relevantes .....	7
Publicaciones científicas .....	10
Métodos actuales de detección de desbalanceo .....	15
Casos de falla .....	15
Conclusiones de la revisión de antecedentes .....	16
DEFINICIÓN DEL PROBLEMA .....	18
Alcances .....	18
Contribuciones .....	19
1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS .....	20
1.1. Principios básicos .....	20
1.2. Proceso para el diseño de experimentos .....	21
1.3. El Diseño Factorial $2^k$ .....	23
1.4. Efectos principales y de interacciones .....	25
1.5. Valor p y significancia estadística .....	28
1.6. Diagrama de Pareto .....	30
1.7. Ecuación de regresión .....	31
1.8. Software de análisis estadístico .....	31
2. METODOLOGÍA .....	33
2.1. Caso de estudio .....	33
2.2. Variable de respuesta .....	35
2.3. Propuesta metodológica .....	35

2.4. Identificación de factores: Diagrama de parámetros .....	37
2.5. Identificación de cargas críticas .....	38
2.6. Mediciones exploratorias con carga de rápida deshidratación .....	39
2.7. Planteamiento de DOE .....	43
2.8. Configuración de método de prueba para DOE .....	46
3. RESULTADOS .....	49
3.1. Gráficas de desplazamiento .....	49
4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO .....	51
4.1. Efectos principales e interacciones .....	52
4.2. Obtención del modelo .....	54
5. VALIDACIÓN .....	59
5.1. Correlación del modelo .....	61
TRABAJO FUTURO .....	62
CONCLUSIONES .....	64
REFERENCIAS .....	66
ANEXOS .....	68

## RESUMEN

El presente trabajo parte de la necesidad de las empresas productoras de lavadoras automáticas de ofrecer un producto seguro a sus usuarios. En los últimos años diferentes compañías se han encontrado, con mayor o menor frecuencia, con un fenómeno al que se ha optado por denominar “inestabilidad súbita”. Se trata de un fenómeno que ocurre a altas velocidades de la etapa de centrifugado, en el cual las lavadoras parecieran entrar en una condición excesiva de desbalanceo súbitamente, causando un “brinco” repentino de la sublavadora, y por consiguiente daños irreparables en los componentes de la unidad, convirtiéndose así en un riesgo de seguridad para el usuario, su persona y/o patrimonio, y al mismo tiempo un riesgo financiero para el fabricante al poder derivar en un *recall* de producto con pérdidas millonarias, así como una afectación a su imagen. El tiempo a la falla varía de caso en caso y no existe a la fecha manera de predecir cuándo se presentará un evento.

Las lavadoras actuales cuentan con métodos de detección capaces de identificar la condición de desbalanceo al inicio del centrifugado y durante las rampas de aceleración, así como condiciones máximas de desbalanceo permitidas que, en conjunto, permiten proteger la unidad al prevenir una condición de desbalanceo excesivo a alta velocidad. Esto lleva a pensar que la aparición del fenómeno no está relacionada con una falla de los sistemas de detección o los límites definidos, sino un cambio repentino en las condiciones de la carga de lavado o del comportamiento dinámico a las velocidades más altas.

Por ello, el presente trabajo comienza explorando los antecedentes relacionados a la falla y el tema de desbalanceo en lavadoras, los métodos de detección y el análisis de inestabilidades por medio de modelos teóricos y computacionales. Esta primer búsqueda y análisis aborda patentes, publicaciones científicas y métodos actuales de detección de desbalanceo al interior de la compañía patrocinadora, así como información de casos de falla reportados en los últimos años.

De la información recopilada se presenta una hipótesis inicial para el acercamiento al fenómeno y se plantean los alcances y contribuciones del trabajo.

El Capítulo 1 hace un breve resumen introductorio de la teoría concerniente al diseño de experimentos y los conceptos estadísticos a tener en cuenta para el presente desarrollo. Aquí se incluyen principios básicos del diseño experimental, la descripción del proceso general a seguir desde la definición del problema, la selección de la variable de respuesta y los factores de estudio,

la selección del diseño experimental, su ejecución y análisis. Se aborda también una descripción más detallada del diseño experimental seleccionado (diseño experimental factorial  $2^k$  completo), el cálculo de los efectos e interacciones de los factores, y su significancia estadística de forma numérica por medio del valor  $p$ , y de forma gráfica por medio del diagrama de Pareto. La última parte menciona la ecuación de regresión, que servirá como modelo estadístico, y para cuya obtención se hará uso del software estadístico Minitab.

El Capítulo 2 parte describiendo el caso de estudio para la lavadora seleccionada, plantea el desplazamiento vertical de la sublavadora como variable de respuesta, y presenta una propuesta metodológica para el desarrollo del trabajo bajo el enfoque del diseño de experimentos. Haciendo uso del diagrama de parámetros del centrifugado, en conjunto con las conclusiones de la sección anterior y la ejecución de pruebas exploratorias, se plantea un diseño experimental y su correspondiente método de prueba. En general, el método experimental propuesto consiste en la adición de un elemento de rápida deshidratación a través de reservorios de agua y un sistema de ignición a distancia que permiten burlar los mecanismos de detección de desbalanceo y ocasionar la falla a las velocidades más altas del sistema.

En el Capítulo 3 se reportan los resultados de desplazamiento vertical obtenidos de las pruebas del diseño experimental, se tabulan y muestran de forma gráfica permitiendo identificar similitudes en el comportamiento para los casos en los cuáles se presentó un comportamiento de falla.

El análisis estadístico de los resultados se detalla en el Capítulo 4. Se identifican y descartan gráfica y numéricamente los factores e interacciones con menor significancia estadística para la variable de respuesta, permitiendo llegar a dos modelos, cada uno correspondiente a una ecuación de regresión. El análisis deja ver que el factor de estudio cuyo efecto tiene mayor significancia estadística corresponde a la altura del desbalanceo al interior de la canasta.

Ambos modelos se utilizan para predecir el valor de la variable de respuesta en una nueva corrida experimental de 5 combinaciones de prueba, que posteriormente se comparan contra los resultados obtenidos de forma experimental. Ambos modelos presentan una buena correlación, y se logra llevar la lavadora al desbalanceo súbito que desencadena un comportamiento agresivo en un tiempo de alrededor de 2 segundos.

Con todo lo anterior, se identifican y describen cinco oportunidades de trabajo futuro sobre esta línea de investigación que podrían contribuir al mejor entendimiento del fenómeno.

Finalmente se enuncian las conclusiones alrededor de los objetivos planteados en el presente trabajo y se describe una hipótesis complementaria acerca del comportamiento de la carga de lavado al interior de la canasta que puede estar derivando en la falla reportada en campo.

## INTRODUCCIÓN

El fenómeno de inestabilidad súbita es de especial preocupación para las compañías productoras de electrodomésticos por diversas razones, entre las que destacan seguridad, pérdidas financieras y comerciales importantes.

Algunos productores de lavadoras en los años recientes se han enfrentado ya a estas consecuencias, derivado de modelos puestos en venta que han presentado dicha anomalía con una frecuencia importante, teniendo que retirar del mercado cerca de 2.8 millones de lavadoras al reportar hallazgos en más de 700 unidades.

A partir de ello el fenómeno ha cobrado especial importancia, dirigiendo la mirada de los equipos de diseño, investigación y desarrollo al entendimiento de las causas detrás de la falla y su reproducción para el establecimiento de métodos de prueba.

El fenómeno, sin embargo, se trata de uno poco estudiado en el Estado del arte. Históricamente los esfuerzos de estudio han dirigido su atención al fenómeno vibratorio con especial enfoque a problemáticas de ruido y desplazamiento. La teoría tradicional hace uso de modelos con cuerpos rígidos, pero algunas aportaciones más recientes dejan ver que ciertas características elásticas en los componentes de la lavadora influyen en el comportamiento vibratorio a altas velocidades, lo que podría, al menos en parte, explicar el origen del fenómeno.

El esfuerzo descrito en el presente trabajo pretende acercar el fenómeno de inestabilidad súbita al campo de conocimiento, así como sentar bases para el desarrollo de métodos de prueba a partir de la identificación de factores que propicien su aparición y permitan, en un trabajo futuro, generar posibles conceptos de solución.

El trabajo se desarrolla bajo una metodología experimental alrededor del diseño de experimentos para obtener un modelo estadístico.

Para ello se cuentan con recursos de estudio bajo el patrocinio de la compañía productora de electrodomésticos Mabe. El análisis se centra en lavadoras de carga superior, las cuales corresponden al tipo de lavadora que la compañía desarrolla, produce y comercializa en diferentes países alrededor del mundo.

## OBJETIVOS

### Objetivo general

Desarrollar un modelo estadístico bajo el enfoque de diseño de experimentos que permita acercar al campo de conocimiento la comprensión del fenómeno de inestabilidad súbita en la lavadora automática de carga superior, con lavado por infusor, durante la etapa de centrifugado.

### Objetivos específicos

Los objetivos específicos del trabajo se listan a continuación:

- I. Plantear hipótesis inicial para acercamiento al fenómeno.
- II. Identificar condiciones que propician la aparición del fenómeno.
- III. Establecer método experimental para desarrollo de mediciones.
- IV. Desarrollar diseño de experimentos para identificación de efecto estadístico de factores y sus interacciones.
- V. Obtener el modelo estadístico asociado a los factores de estudio.
- VI. Listar conclusiones derivadas del estudio que permitan desarrollar trabajo futuro alrededor del entendimiento del fenómeno.

## HIPÓTESIS

Es posible identificar condiciones que propician la aparición del fenómeno de inestabilidad súbita y su significancia estadística bajo la metodología del diseño de experimentos.

## ANTECEDENTES

### La lavadora automática

En general, una lavadora automática consiste en un gabinete, una tina soportada dentro del gabinete, y una canasta al interior para contener una carga de lavado. De acuerdo con la etapa del ciclo de lavado se moverán: (i) un agitador o infusor al interior de la canasta para la etapa de lavado, (ii) la canasta para la etapa de centrifugado.

Durante la etapa de centrifugado la canasta gira por acción de un motor ubicado al fondo de la tina. Este movimiento aprovecha la fuerza centrífuga para retirar la mayor cantidad de agua posible de la carga. A mayor velocidad, menor será el agua residual de la carga. Un valor máximo típico de velocidad de centrifugado en lavadoras comerciales se encuentra en el rango de 600 a 1600 rpm.

De acuerdo con la orientación del eje de giro de la canasta podemos subdividir la lavadora en dos categorías: (i) eje horizontal, también llamadas de carga frontal; (ii) eje vertical, también llamadas de carga superior.

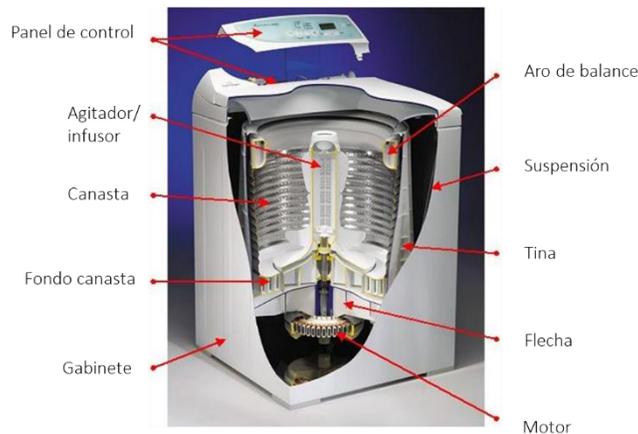


Figura 1. Corte de lavadora automática de carga superior [1].

La *Figura 1* ilustra de manera general algunos componentes de una lavadora vertical, que se definen en [1].

La literatura sobre lavadoras, en especial respecto al fenómeno de inestabilidad súbita, es limitada, probablemente debido a la secrecía derivada de la competencia entre fabricantes y el bajo índice de incidencia de la falla.

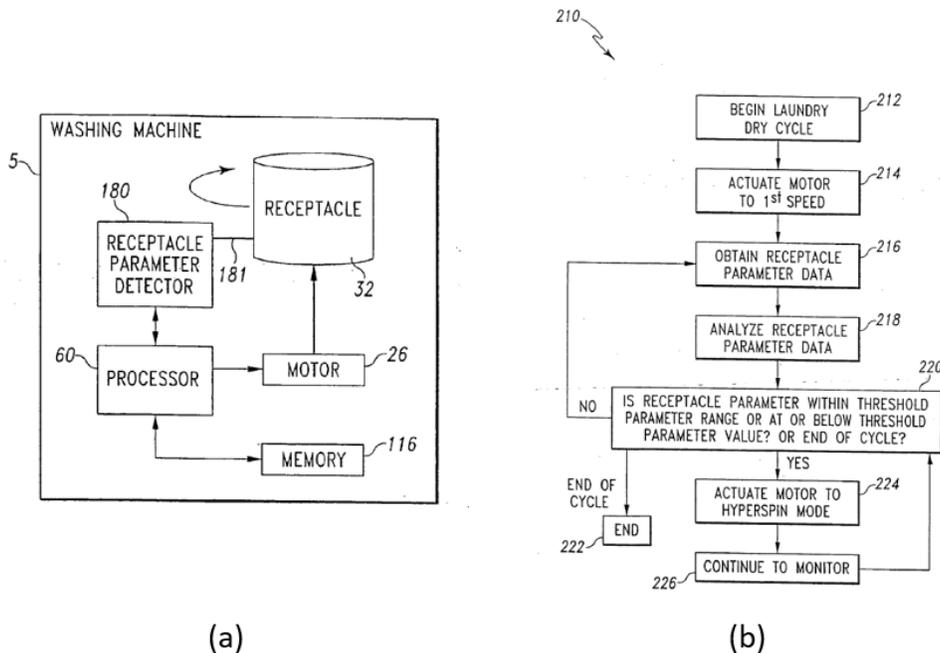
Para revisar el estado del arte alrededor del tema se abordan 3 campos: (i) patentes relevantes, (ii) publicaciones científicas y (iii) métodos actuales de detección de desbalanceo.

**Patentes relevantes**

Patente 2005/0155159A1 [2]

Parte de una lavadora con dos velocidades de centrifugado: la primera de 600 rpm, y una segunda a la que denomina velocidad "hyper", que se sitúa entre las 800 a 850 rpm. Resalta la ventaja de las altas velocidades en el secado de la carga y contrasta con los riesgos asociados al desbalanceo. Por ello propone el uso de un control para decidir, por medio de la comparación de parámetros medidos en la canasta contra un valor de disparo, si la condición de balanceo de la carga es segura para llevar la unidad a la última velocidad, previniendo así una posible falla. Sugiere diferentes soluciones de medición: sensores de vibración acoplados a la tina, sensor de efecto hall acoplado a la flecha del motor o un encoder optoelectrónico.

La *Figura 2(a)* muestra un diagrama esquemático simple de la lavadora con el método de sensado incorporado. La *Figura 2(b)* ilustra el funcionamiento del algoritmo descrito.



\*

Figura 2. Patente US 2005/0155159A1 [2].  
 (a) Diagrama esquemático de lavadora. (b) Algoritmo de funcionamiento.

Patente US 2016/0348294A1 [3]

Describe un método por medio de algoritmo para monitorear el balance de carga en la lavadora. Consiste en acelerar el giro de la canasta alrededor de su eje central dentro de la tina de una primera velocidad a una segunda mayor que la primera. El algoritmo detecta una multitud de cambios en la velocidad durante la transición, y suma los valores absolutos para obtener un valor de velocidad desplegado. Un valor mayor de velocidad desplegado indica un mayor desbalanceo. El valor desplegado se compara contra un valor de disparo, lo que determina si la condición de desbalanceo es segura. En la *Figura 2(a)* el elemento señalado corresponde al sensor utilizado en la medición de velocidad de giro. En la *Figura 2(b)* se muestra la lógica del algoritmo para la detección de desbalanceo.

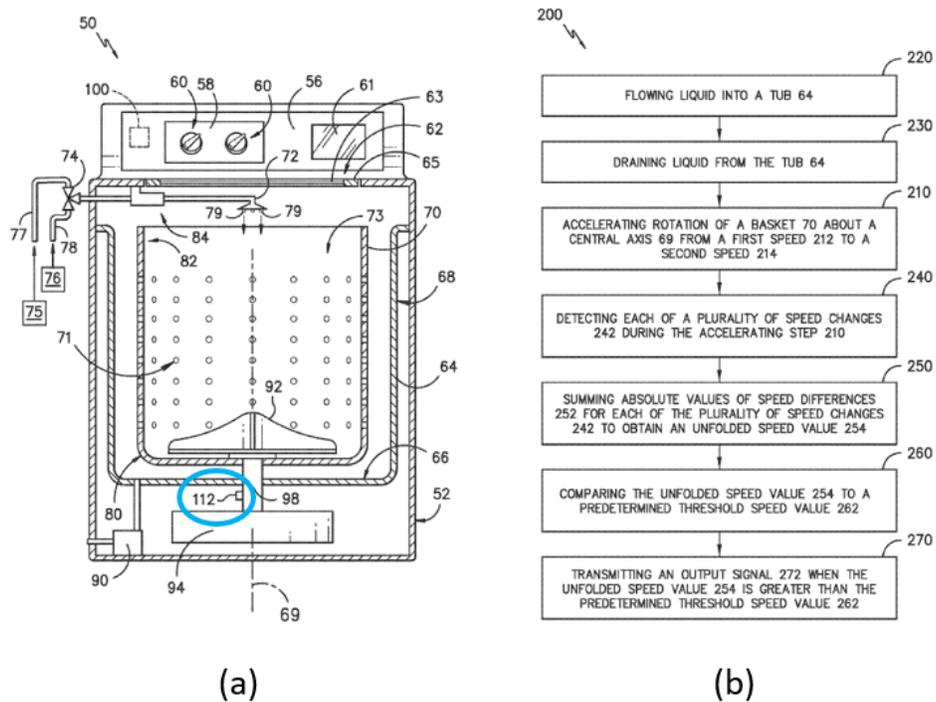


Figura 3. Patente US 2016/0348294A1 [3].

(a) Sensor de velocidad. (b) Algoritmo de detección de desbalanceo.

Patente US 2008/0178398A1 [4]

Consiste en la adaptación de un control para detectar agua atrapada en la carga de lavado durante la etapa de centrifugado de la lavadora. Esto se logra midiendo un primer parámetro indicativo de la inercia rotacional de la canasta a una primera velocidad, llevando la canasta a una velocidad

mayor para retirar parte del agua de la carga, y volviendo a medir un segundo parámetro indicativo de la inercia rotacional tras la deshidratación. Con la comparativa de estos dos valores el sistema decide si existe o no una condición de agua atrapada. La *Figura 4(a)* ilustra la condición de agua atrapada, una prenda impermeable atrapa al resto de prendas impidiendo la salida de agua durante el centrifugado.

Para cada sensado de inercia la lavadora lleva la canasta a una  $\omega = 45$  rpm por un tiempo de 2 segundos, desenergiza el motor y mide el tiempo de desaceleración desde  $\omega = 35$  rpm hasta  $\omega = 15$  rpm. Esta secuencia se ejecuta 2 veces y se obtiene un primer valor promedio, la *Figura 4(b)* ilustra esta lógica. El motor usa sensores de efecto Hall para obtener la información de velocidad de la canasta.

Posteriormente, el control lleva la canasta a una  $\omega = 330$  rpm durante 30 segundos para retirar parte del agua de la carga, y procede a detenerle. Un segundo sensado igual al primero se ejecuta y se obtiene un segundo valor promedio.

Un segundo valor mayor que el primero indica una mayor inercia rotacional tras la deshidratación, lo que denota la presencia de agua atrapada en la carga. En este caso, el controlador limita la velocidad máxima de centrifugado a un valor por debajo de 500 a 700 rpm.

Un segundo valor menor que el primero indica una menor inercia rotacional tras la deshidratación, lo que el controlador identifica como una condición segura, permitiendo el centrifugado a la velocidad máxima.

Esta patente hace un comentario interesante argumentando que se ha encontrado que, al llevar la canasta a una cierta velocidad crítica, el agua atrapada en la carga de lavado repentinamente cambia de posición, causando una súbita y violenta condición de desbalance, aunque no se tiene certeza de cómo ocurre este fenómeno.

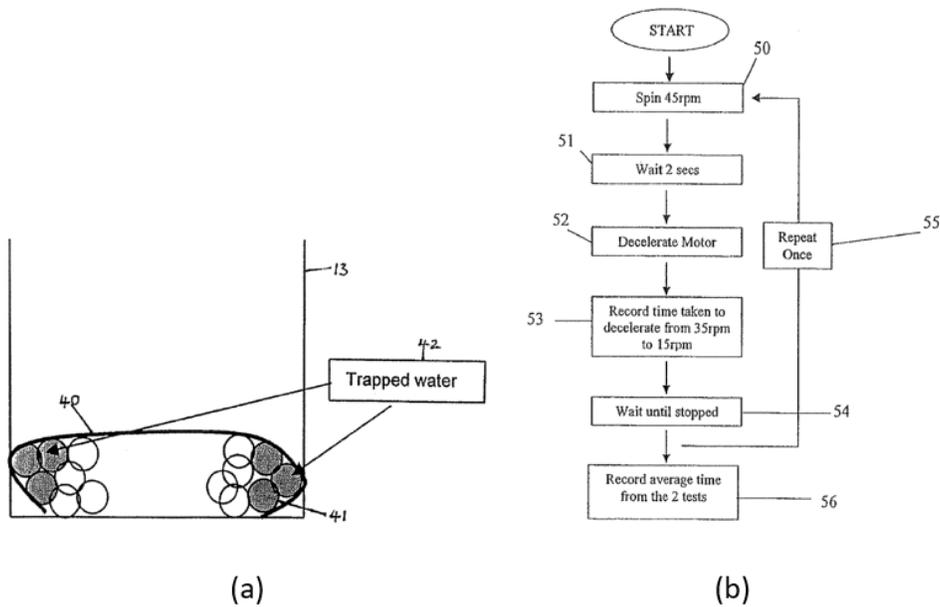


Figura 4. Patente US 2008/0178398A1 [4].  
 (a) Condición de agua atrapada. (b) Lógica de sensado.

#### Publicaciones científicas

La investigación se centra en la revisión de artículos y publicaciones relacionados al tema de desbalanceo en lavadoras automáticas. En general, se puede encontrar que la mayoría de las publicaciones dirigen su atención al análisis vibratorio para la prevención del ruido y el fenómeno denominado *walking* o desplazamiento. Trabajos más recientes dirigen su atención a la inestabilidad a altas velocidades.

El fenómeno de desplazamiento se entiende como el movimiento de la lavadora de una posición inicial a una posición nueva como consecuencia del movimiento dinámico al interior. Este fenómeno, de acuerdo con [5], puede describirse como deslizamiento, *tipping* o salto. El deslizamiento se define como el desplazamiento traslacional o rotacional de la unidad sobre el piso. El *tipping* se define como la elevación de al menos uno de los soportes de la lavadora del suelo. Y el salto se define como la elevación, al mismo tiempo, de todos los soportes de la lavadora del piso.

Conrad, D. en [5] desarrolla y analiza modelos teóricos de lavadora horizontal y vertical con el fin de dar una guía al diseñador de la suspensión que permita encontrar las limitantes durante la etapa de diseño. A través de estos modelos determina las características fundamentales del sistema de suspensión y muestra una buena correlación con los sistemas reales. En [6] desarrolla modelos teóricos simplificados de lavadora de carga frontal y lavadora de carga superior partiendo de sus

diagramas de cuerpo libre con el fin de predecir el desplazamiento. En la *Figura 5* se muestran los diagramas de cuerpo libre de la carga y la lavadora, de los cuales parte para generar una ecuación para encontrar la velocidad de giro crítica para la condición de tipping.

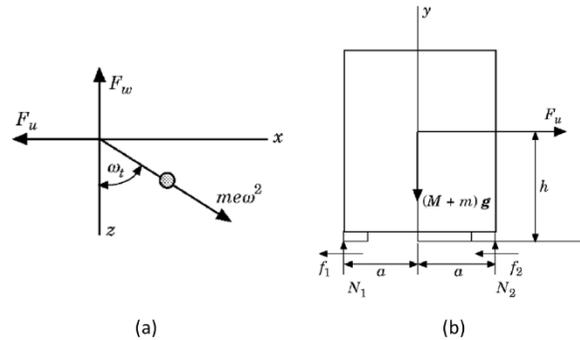


Figura 5. Diagrama de cuerpo libre para lavadora vertical [6].  
(a) DCL de la carga, (b) DCL de la lavadora.

Existen otros trabajos de modelación, como el descrito en [7] que presenta un modelo dinámico tridimensional simplificado de una lavadora portátil de eje horizontal para predecir la ocurrencia del fenómeno de desplazamiento y sugerir soluciones al mismo. [8] parte de una lavadora de eje horizontal para realizar el análisis vibratorio causado por la masa de desbalanceo en la canasta, plantea las ecuaciones de movimiento y resuelve de forma numérica. Los resultados experimentales para  $\omega = 800$  rpm muestran buena correlación en el trazado de trayectorias de desplazamiento para los ejes X y Y en el plano ortogonal al eje de giro. De manera similar, [9] desarrolla un modelo dinámico para el análisis de vibración en el espacio tridimensional durante los estados transitorio y estable de la lavadora con una canasta y tina elásticas. Señala el riesgo de resonancias que se desplazan hacia el rango de velocidades de operación como consecuencia de grandes cargas y baja rigidez en la tina y canasta.

En el campo de la ingeniería asistida por computadora, [10] muestra el desempeño de un modelo multicuerpo de una lavadora de eje horizontal con el objetivo de predecir el comportamiento vibratorio y la emisión acústica potencial. [11] emplea una metodología consistente en el uso de simulación con multicuerpos y datos validados de forma experimental para analizar el fenómeno vibratorio por cargas desbalanceadas al interior de la lavadora de eje horizontal durante el ciclo de centrifugado, y muestra que algunos cuerpos rígidos son influenciados por el efecto giroscopio y cambian su frecuencia natural con la velocidad de giro. [12] reconoce que un cambio en la

elasticidad de la canasta puede causar un fenómeno vibratorio diferente, al cual denominan “inestabilidad” sin ahondar al respecto.

Más recientemente, Drüke, S. [13] y Jang, J. [14] exploran el fenómeno de la inestabilidad súbita haciendo uso de herramientas de simulación multicuerpo.

[13] aborda los incidentes de “lavadoras que explotan” en la etapa final del centrifugado y plantea una hipótesis basada en la teoría rotodinámica. Comúnmente, los fenómenos vibratorios en la lavadora se analizan considerando cuerpos rígidos. Los desbalances al interior de la canasta generan vibración durante todo el recorrido de velocidades del centrifugado, pasando por resonancias de cuerpo rígido. Sin embargo, estas resonancias ocurren a velocidades por debajo de 500 rpm, lo que no explica el fenómeno de inestabilidad súbita en las velocidades más altas de operación. Es posible que cambios en el diseño, tales como incremento de capacidad, disminución de espesores o uso de materiales alternos, desplacen los fenómenos vibratorios al rango superior de velocidades de operación. La investigación se centra en la lavadora horizontal y parte de un modelo multicuerpo simple conformado por tina y canasta. Con el propósito de investigar los efectos rotodinámicos, a dicho modelo inicial se agregan: (i) dos grados de libertad rotatorios para simular una canasta elástica, como se ilustra en la *Figura 6(a)*, en la cual se evalúa también la influencia de agregar amortiguamiento interno y asimetría en su rigidez; (ii) dos cargas de desbalanceo iguales colocadas en posiciones opuestas al interior de la canasta para simular inercia asimétrica sin generar desbalanceo residual, según se muestra en la *Figura 6(b)*. Esta última condición puede presentarse, según se menciona, como consecuencia de prendas impermeables al interior de la carga de lavado.

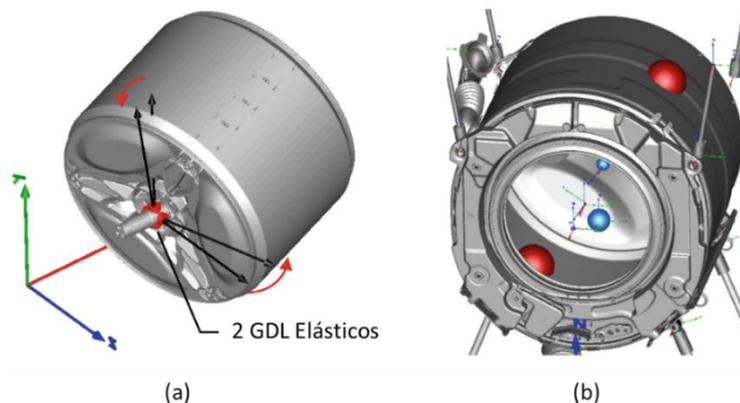


Figura 6. Modelo multicuerpo para estudio de efectos rotodinámicos [13].  
(a) Canasta elástica. (b) Inercia asimétrica.

El análisis de los resultados teóricos muestra que diferentes fenómenos vibratorios pueden ocurrir en la lavadora derivado de las condiciones planteadas en el modelo, y que la elasticidad es un factor clave en ello. La *Figura 7* recopila los resultados de las diferentes condiciones simuladas. La asimetría en inercia se identifica como un riesgo potencial al presentar un rango inestable de velocidades cercano al rango de velocidades de operación.

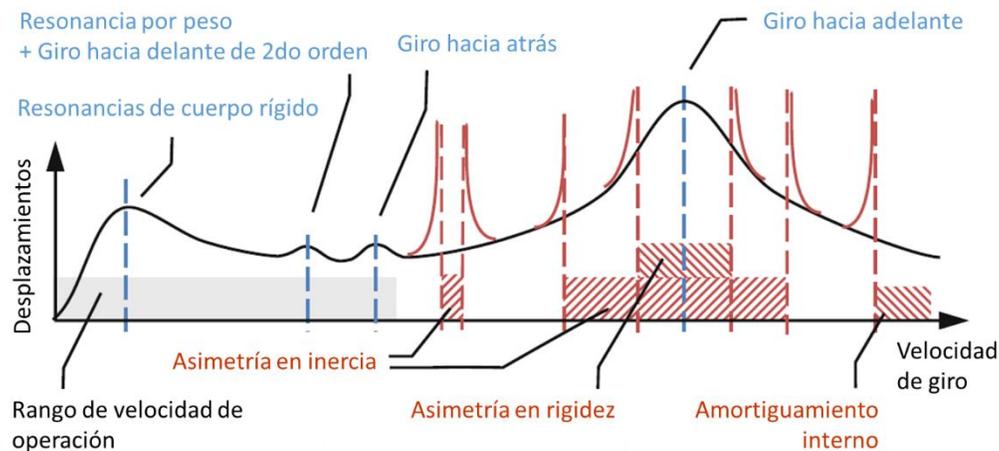


Figura 7. Resultados de estudio con canasta flexible y asimetría en inercia [13].

Por su parte [14] aborda el incidente similar de “lavadoras rotas” durante el centrifugado a causa de colisiones derivadas de vibraciones inusuales. Dirige su análisis a la lavadora de carga superior y plantea una hipótesis basada en agua atrapada por prendas impermeables que se libera a altas velocidades rápidamente y no linealmente.

Este estudio hace uso de software multicuerpo para simular las órbitas de movimiento de la sublavadora durante el proceso de deshidratación de la ropa a 650 rpm, con una carga de 3 kg de desbalanceo inicial y 3 a 4 kg de pérdida de masa por deshidratación. Realiza además un método experimental utilizando una cámara rápida para medir las órbitas de movimiento y realizar una comparativa. Las órbitas se analizan en 3 puntos del plano ortogonal al eje de giro, esto es, la vista superior de la sublavadora. El método experimental agrega reservorios de agua al interior de la canasta que se detonan a la velocidad de 650 rpm. En la *Figura 8* se ilustra la condición de desbalanceo tras la desaparición de la masa RD.

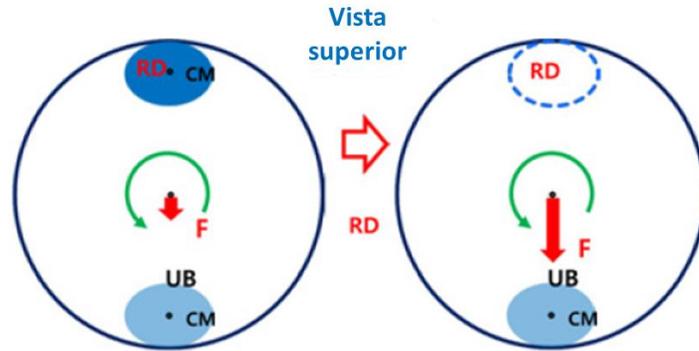


Figura 8. Fuerza generada por deshidratación rápida [14].

Los resultados muestran una buena correlación en el trazado de las órbitas.

Tabla 1. Comparativa de desplazamientos simulados y experimentales [14].

		Experimento	Simulación	Error
Caso 1 UB:3kg RD:3kg	P1 (mm)	39.3	44.6	-13.5%
	P2 (mm)	76.6	78.1	-2.0%
	P3 (mm)	110.6	99.8	9.8%
	Promedio	75.5	74.1	1.9%
Caso 2 UB:3kg RD:4kg	P1 (mm)	63.7	51.8	18.7%
	P2 (mm)	81.9	86.2	-5.3%
	P3 (mm)	100.4	104.2	-3.8%
	Promedio	82	80.7	1.6%

[15] también realiza un método experimental con cámara rápida para dimensionar el tamaño de las órbitas en un rediseño de suspensión. El método también mide las órbitas en el plano ortogonal al eje de giro.

En otro campo del conocimiento, [16] propone un método estadístico experimental para secadora de venteo, donde explora el impacto de factores relevantes y sus interacciones en el proceso de secado de la ropa. Establece una correlación entre Consumo de energía y Tiempo de secado tomando como factores: Condiciones de aire entrante (flujo de masa y potencia provista), condiciones de la carga (cantidad y humedad inicial) y condiciones de aire de salida (restricción del ducto). La relevancia de este estudio radica en que el método propuesto permite entender la influencia de las condiciones en el proceso y contar con un modelo estadístico. El método estadístico experimental que se emplea en este trabajo es el denominado *Diseño de experimentos*.

### Métodos actuales de detección de desbalanceo

En general, podrá encontrarse que las lavadoras actuales cuentan con un método de detección de desbalanceo en la etapa de centrifugado con límites propios de desbalanceo permitido de acuerdo con el criterio del fabricante. Estos métodos pueden consistir en monitoreo de señales de control, como la corriente del motor, para determinar posibles condiciones de desbalance, o componentes dedicados como acelerómetros de estado sólido.

Históricamente, la condición máxima de desbalanceo a la que una lavadora puede centrifugar sin provocar fallas se ha determinado por métodos experimentales.

Las plataformas actuales del patrocinador emplean el método de detección de desbalanceo durante el centrifugado descrito en el *Anexo I*, utilizando un sensor de velocidad de efecto Hall acoplado al motor. Este método es eficiente para las rampas de aceleración y escalones de velocidad del perfil de centrifugado de la lavadora, exceptuando la primera rampa, que utiliza el método descrito en la patente [3].

### Casos de falla

Como se ha mencionado anteriormente, la ocurrencia del fenómeno para el patrocinador tiene una muy baja incidencia, existiendo apenas un par de casos identificados en los años recientes.

En la Tabla 2 se muestra el resumen de cuatro casos. Los casos A, B y C corresponden a modelos de mercado norteamericano, mientras que el caso D corresponde a un caso de mercado nacional.

Tabla 2. Resumen de casos de falla.

<b>Caso</b>	<b>Tipo de lavado</b>	<b>Carga de lavado</b>	<b>Ciclo de lavado</b>
A	Infusor	Sábanas y toallas.	Desconocido
B	Infusor	Desconocida	Desconocido
C	Infusor	Desconocida	Desconocido
D	Infusor	Ropa de bebé, sábanas y cubre colchón sintético.	Prendas voluminosas

Como puede verse, la información es poca y el tipo de carga y ciclo de lavado utilizado son desconocidos para algunos casos. Sin embargo, observamos una frecuencia de ocurrencia

dominante en lavadoras de tipo infusor, y lo que pareciera una tendencia a suceder en cargas conformadas de prendas voluminosas.

Una serie de pruebas realizadas al interior de la compañía con cargas de lavado que buscan replicar las condiciones del caso D arrojó algunos resultados interesantes. En estas pruebas se emplearon combinaciones de prendas de bebé, sábanas y cubre colchones de composición sintética con diferentes acomodos, en repeticiones de diez ciclos.

En tres de las diez repeticiones que involucran al cubre colchón se encontró una burbuja de agua atrapada en la prenda al final de la etapa de centrifugado, como ilustra la *Figura 9*.



Figura 9. Burbuja de agua atrapada en cubre colchón.

#### Conclusiones de la revisión de antecedentes

El interés en el fenómeno de inestabilidad súbita es relativamente reciente, motivado principalmente por los incidentes de los últimos años que, en conjunto con la mejora continua en el desempeño de los productos y su reducción de costos en materiales, le convierten en un riesgo latente.

En la primera parte de la revisión de antecedentes se resaltan tres patentes relativas a la detección de desbalanceo en lavadoras de carga superior. Las primeras dos patentes abordan algoritmos de detección y permiten entender los sistemas actuales, mientras que la tercera patente deja ver, indirectamente, una posible causa de desbalanceo súbito: agua atrapada en prendas impermeables.

No parece que exista una falla en los sistemas actuales de detección de desbalanceo, sino un cambio en las condiciones de distribución de la carga durante las velocidades más altas.

Las publicaciones científicas referidas en la segunda parte de la revisión contextualizan el estudio histórico alrededor del tema de desbalanceo, dirigido en su mayor parte al fenómeno vibratorio y de desplazamiento. Publicaciones más recientes comienzan a tratar el fenómeno de inestabilidad súbita a través de hipótesis que incluyen elasticidad en componentes, agua atrapada en prendas impermeables que causan asimetría en la inercia, y agua atrapada en prendas impermeables que se libera a altas velocidades del centrifugado.

Curiosamente, a pesar de que los incidentes que han motivado el estudio reciente del fenómeno de inestabilidad súbita han tenido su aparición en lavadoras de eje vertical, únicamente una de las publicaciones reportadas analiza el problema en una lavadora de este tipo, mientras que el resto se enfocan en lavadoras de eje horizontal. Cabe mencionar que los desplazamientos estudiados se miden en el plano ortogonal al eje de giro, sin tomar en cuenta el efecto a lo largo de este último.

En resumen:

- 1) La hipótesis de agua atrapada en prendas impermeables es recurrente en las publicaciones revisadas.
- 2) Los estudios se han enfocado en su mayoría en lavadoras de eje horizontal, a pesar de que la mayor ocurrencia del fenómeno se ha dado en lavadoras de eje vertical.
- 3) El análisis experimental de los desplazamientos se enfoca en el plano ortogonal al eje de giro, pero no mide el desplazamiento sobre este último.

## DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La lavadora, al tratarse de un producto dinámico destinado a estar en interacción constante con un usuario, está sometida a condiciones de operación variables, entre ellas el tamaño, tipo y acomodo de la carga de lavado en la canasta. Diferentes tipos y tamaños de cargas de lavado retendrán mayor o menor cantidad de agua. Un acomodo irregular en la carga se traducirá en una condición de desbalanceo que la lavadora buscará distribuir durante la etapa de lavado, previo a la etapa de centrifugado, cuando la condición de desbalanceo aún no es crítica.

De la información recopilada y los casos de falla registrados en la sección anterior se plantea como una causa potencial del fenómeno de inestabilidad súbita la posibilidad de agua atrapada en prendas impermeables que funcionan como un reservorio que desbalancea la unidad, o bien, durante la etapa de centrifugado liberan el agua ocasionando un cambio súbito en la condición de distribución de la carga.

Dado que una de las salidas esperadas del trabajo es el desarrollo de un método de prueba para la evaluación de lavadoras ante este fenómeno, se define desarrollar el estudio bajo una metodología experimental.

Lo anterior lleva a establecer un importante requerimiento de estudio:

- La reproducción del fenómeno ha de buscarse con los algoritmos de detección de desbalanceo actuales activos.

Se define además utilizar una lavadora con las siguientes características:

- Lavadora con configuración de carga superior (eje vertical).
- Lavado por infusor.
- Ciclo de prueba "Prendas voluminosas".

### Alcances

- El estudio se enfoca en una lavadora automática doméstica de eje vertical.
- El estudio se desarrolla bajo una metodología experimental.
- Se analiza la influencia de factores potenciales que propicien la aparición del fenómeno.

### Contribuciones

- Se desarrolla un método de prueba experimental.
- Se analiza el efecto del desbalanceo súbito a lo largo del eje de rotación de la sublavadora (desplazamiento vertical).
- Se plantea un modelo estadístico con efectos de factores potenciales e interacciones.

## 1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS

La experimentación es una parte esencial del método científico y la ingeniería. Existen ciertas situaciones donde el fenómeno es tan bien entendido que resultados útiles pueden obtenerse a partir de modelos matemáticos. Sin embargo, la mayoría de los problemas de ciencia e ingeniería requieren observación del sistema y experimentación para recabar información sobre su funcionamiento. Experimentos bien diseñados permiten llevar a un modelo el desempeño del sistema. Los modelos obtenidos a través de estos experimentos son denominados modelos empíricos [18].

De acuerdo con [17], diseñar estadísticamente un experimento es realizar una prueba o una serie de pruebas buscando caracterizar las variables explicativas o factores independientes de mayor influencia en un ensayo de interés, evaluado a través de una o varias variables respuesta, tal que, si deliberada o sistemáticamente se introducen cambios controlados en algunas de las variables explicativas del proceso, sea posible observar o cuantificar los cambios que estos generan en la respuesta.

En general, los experimentos son usados para estudiar el desempeño de procesos y sistemas, los cuales pueden ser representados por el modelo mostrado en la *Figura 10*.

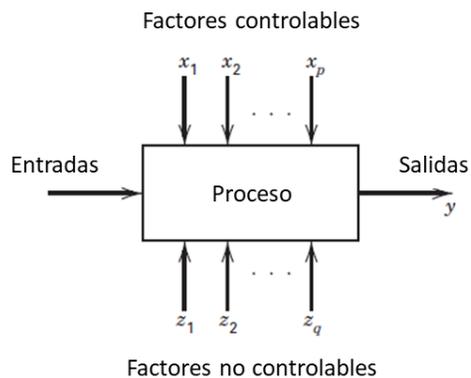


Figura 10. Diagrama de bloques simple de un proceso [18].

### 1.1. Principios básicos

Los tres principios básicos del diseño estadístico de experimentos son, de acuerdo con [18]: aleatorización, replicación y bloqueo.

La aleatorización se refiere a que tanto el orden en que se realizarán las mediciones experimentales como su asignación han de determinarse aleatoriamente. Aleatorizar adecuadamente el experimento permite disminuir la influencia de factores extraños que pudieran estar presentes y afectar el experimento.

La replicación es la reproducción independiente de cada combinación de factores. Las réplicas permiten determinar si las diferencias estadísticas son significativas y minimizar el error de muestreo. Es esencial dejar claro que existe una diferencia importante entre réplica y repetición. La repetición no exige una manipulación en la combinación de factores y, por tanto, permite observar variación inherente únicamente a la medición, mientras que la réplica exige la manipulación de factores de tal suerte que la variación observada incluye la propia del proceso.

En el bloqueo, un bloque es una variable categórica que permite explicar la variación en la variable de respuesta que no es causada por los factores de estudio. Aunque cada medición debe realizarse bajo condiciones experimentales consistentes, esto no siempre es posible. El uso de bloques en los diseños experimentales y en el análisis permite minimizar la variación debido a factores extraños. Por ejemplo, dos lotes de materia prima pueden presentar cierta variación entre ellos, pero se espera que la variación dentro de cada lote sea menor y por lo tanto, si no es de interés al experimento, pueda despreciarse considerando cada uno de los lotes como un bloque.

Estos tres principios son clave en el diseño experimental, y estarán definidos en función del fenómeno o proceso a analizar, los factores de estudio y los recursos disponibles destinados al estudio.

## 1.2. Proceso para el diseño de experimentos

Para usar el enfoque estadístico en el diseño y análisis de un experimento, es necesario tener una idea clara de lo que se va a estudiar, la manera en que se recopilarán los datos y una comprensión de cómo serán analizados. La Tabla 3 lista el proceso general descrito en [18] a seguir en el diseño de experimentos.

Tabla 3. Pasos en el diseño de experimentos [18].

Guía general en el diseño de experimentos.
1. Reconocimiento y definición del problema.
2. Selección de la variable de respuesta.

3. Selección de factores, niveles y rangos.
4. Selección del diseño experimental.
5. Ejecución del experimento.
6. Análisis estadístico de la información.
7. Conclusiones y recomendaciones.

**1. Reconocimiento y definición del problema.** Hay varias razones para realizar experimentos y cada tipo de experimento generará su propia lista de preguntas específicas que deben abordarse, por ello es indispensable tener una definición clara del problema que contribuya a una mejor comprensión previa del estudio.

**2. Selección de la variable de respuesta.** Al seleccionar la variable de respuesta se debe estar seguro de que realmente proporciona información útil sobre el fenómeno o proceso a estudiar.

**3. Selección de factores, niveles y rangos.** Al considerar factores que pueden influir en el comportamiento de un sistema o proceso se deben identificar los factores potenciales, es decir, aquellos con mayor influencia en el comportamiento del sistema o proceso. Cuando el objetivo del estudio es la caracterización de un proceso, es generalmente mejor mantener un número bajo de factores de estudio.

**4. Selección del diseño experimental.** La elección del diseño experimental debe considerar el tamaño de muestra, número de réplicas, y determinación de restricciones como bloqueo o aleatorización. Esta elección también involucra la elección del modelo empírico tentativo que describa los resultados. En muchos casos, una ecuación polinomial de primer orden es apropiada para este fin y típicamente usada en experimentos de caracterización. El modelo de primer orden también se denomina a veces modelo de efectos principales.

**5. Ejecución del experimento.** Durante la ejecución debe monitorearse el proceso para asegurar que la experimentación se realice correctamente. También es recomendable realizar corridas de prueba para obtener información preliminar de la efectividad del experimento. El cálculo de la desviación estándar en la variable de respuesta es útil en esta etapa.

De [20] se tiene la ecuación 1 para el cálculo de la desviación estándar, donde  $n$  corresponde al número de muestras y  $\mu$  a la media muestral.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n - 1}} \quad (1)$$

**6. Análisis estadístico de la información.** Se deben utilizar métodos estadísticos para analizar los datos. Los elementos gráficos juegan un rol importante en el análisis e interpretación, y será muy útil presentar los datos en forma de un modelo empírico o ecuación que permita expresar la interacción de los factores en la variable de respuesta.

**7. Conclusiones y recomendaciones.** Una vez analizados los resultados será importante arrojar conclusiones prácticas y recomendaciones al respecto. Realizar corridas de validación ayuda en la retroalimentación de esta etapa.

El *Anexo II* ilustra una guía general más detallada para la selección del DOE. La selección final dependerá además de factores como el tiempo y recursos disponibles destinados a la realización del experimento.

### 1.3. El Diseño Factorial $2^k$

El diseño factorial es utilizado ampliamente en experimentos que involucran varios factores donde es necesario estudiar el efecto conjunto sobre la respuesta.

En el caso del diseño  $2^k$ , cada factor es tratado como un factor de dos niveles que pueden ser cuantitativos (ej. 10 u, 100 u) o cualitativos (ej. atributo X, atributo Y), es decir, se asume un comportamiento cercano a la linealidad. Así un diseño factorial completo requiere  $2^k$  corridas, donde  $k$  corresponde al número de factores, y es particularmente útil en la identificación de factores principales y sus interacciones.

El diseño factorial más simple es el denominado  $2^2$  que incluye únicamente dos factores, esto es, cuatro combinaciones de dos niveles para completar una corrida experimental completa. La Tabla 4 ejemplifica este esquema con dos factores  $A$  y  $B$ , cada uno con dos niveles.

Tabla 4. Combinaciones de un Diseño Factorial  $2^2$  [18].

Factor		Combinación
A	B	
-	-	A bajo, B bajo
+	-	A alto, B bajo
-	+	A bajo, B alto
+	+	A alto, B alto

Gráficamente pueden ilustrarse las cuatro combinaciones como un cuadrado de dos dimensiones, correspondientes a los dos niveles de los dos factores estudiados. La *Figura 11* muestra la distribución de las combinaciones sobre los ejes de cada factor.

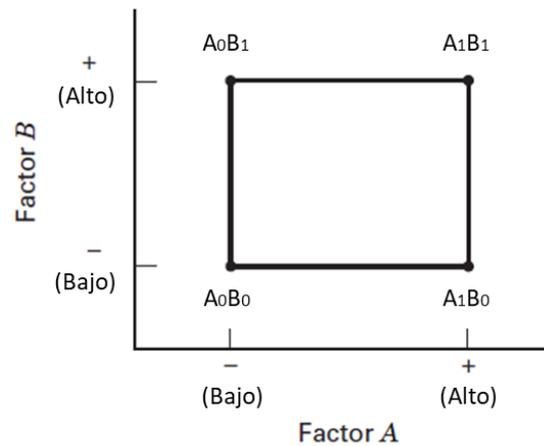


Figura 11. Gráfica de Diseño Factorial  $2^2$  [18].

Similarmente, para un diseño factorial con tres factores se tienen  $2^3 = 8$  combinaciones para completar una corrida completa. La Tabla 5 muestra el esquema de combinaciones correspondiente.

Tabla 5. Combinaciones de un Diseño Factorial  $2^3$  [18].

Comb.	Factor		
	A	B	C
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

De manera análoga, las ocho combinaciones del diseño  $2^3$  pueden ilustrarse gráficamente en un cubo de tres dimensiones correspondientes a los tres factores de estudio. La Figura 12 muestra el acomodo de los factores y sus niveles sobre las aristas del cubo.

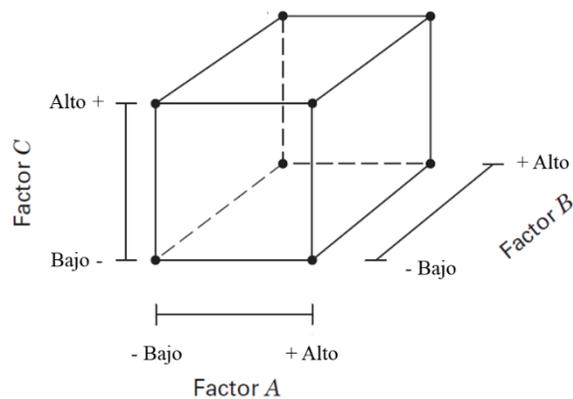


Figura 12. Gráfica de Diseño Factorial  $2^3$  [18].

El diseño  $2^k$  puede extenderse a tantos factores como se deseen estudiar y ser gráficamente representado como cubos anidados en dimensiones superiores.

#### 1.4. Efectos principales y de interacciones

La parte central del diseño experimental factorial es el análisis de los efectos principales y sus interacciones. A grandes rasgos, se trata de cuantificar la influencia de cada factor de estudio, primero individualmente, y después en conjunto con el resto de los factores, sobre la variable de respuesta.

### Efecto principal

El efecto principal de un factor se define como el promedio del cambio en la variable de respuesta debido al cambio en el nivel del factor.

Por ejemplo, para un factor en el diseño  $2^2$  se calcula el efecto principal según la ecuación 2. Se puede notar que para cada uno de los niveles de B se varía A en sus dos niveles y se obtiene una diferencia. En la ecuación, la variable de respuesta contempla los valores totales o sumados para todas las réplicas, por lo que se promedia dividiendo entre  $2n$ .

$$A = \frac{[(\sum A_1B_1 - \sum A_0B_1) + (\sum A_1B_0 - \sum A_0B_0)]}{2n} \quad (2)$$

De forma similar, para un factor en el diseño  $2^3$  se puede calcular el efecto principal como se muestra en la ecuación 3. La *Figura 13(a)* ilustra gráficamente los efectos principales.

$$A = \frac{1}{4n} [(\sum A_1B_1C_1 - \sum A_0B_1C_1) + (\sum A_1B_1C_0 - \sum A_0B_1C_0) + (\sum A_1B_0C_1 - \sum A_0B_0C_1) + (\sum A_1B_0C_0 - \sum A_0B_0C_0)] \quad (3)$$

Como puede verse, para cada una de las combinaciones formadas por los factores B y C, se obtiene la diferencia en la variable de respuesta al variar el nivel de A.

En general, se puede denotar el efecto de A para  $n$  factores de acuerdo con la ecuación 4.

$$A = \bar{y}_{A_1} - \bar{y}_{A_0} \quad (4)$$

### Efecto de interacción

El efecto de interacción puede entenderse como un efecto cruzado, su cálculo permite entender la influencia conjunta de diferentes factores sobre la variable de respuesta. Consiste en calcular la diferencia promedio de los cambios en la variable de respuesta al cambiar los niveles de cada factor.

Para un diseño  $2^2$ , se calcula el efecto de interacción de acuerdo con la ecuación 5. Se puede visualizar este efecto de interacción como un cruce de los vértices del cuadrado mostrado en la *Figura 11*.

$$AB = \frac{\sum A_1B_1 + \sum A_0B_0}{2n} - \frac{\sum A_1B_0 + \sum A_0B_1}{2n} \quad (5)$$

De manera análoga, para el diseño  $2^3$  los efectos de interacción se pueden visualizar como efectos cruzados que ocurren, entre dos variables como muestra la *Figura 13(b)*, o bien, tres variables conjuntas, como muestra la *Figura 13(c)*.

El cálculo entre dos variables es similar al de la ecuación 5, con la adición de la variable adicional que duplica el número de interacciones, obteniendo así la ecuación 6, que corresponde a los escenarios de la *Figura 13(b)*.

$$AB = \left[ \frac{\sum A_1B_1C_1 + \sum A_0B_0C_1}{4n} - \frac{\sum A_1B_0C_1 + \sum A_0B_1C_1}{4n} \right] + \left[ \frac{\sum A_1B_1C_0 + \sum A_0B_0C_0}{4n} - \frac{\sum A_1B_0C_0 + \sum A_0B_1C_0}{4n} \right] \quad (6)$$

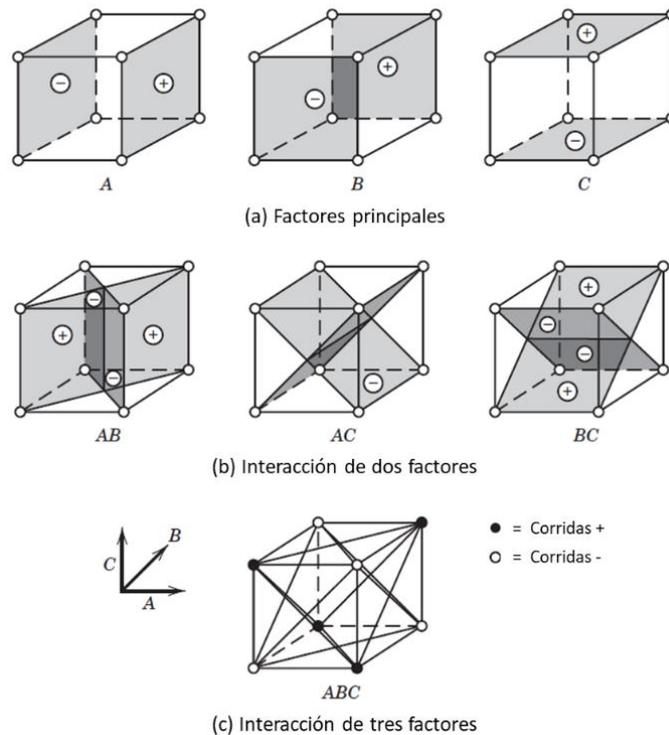


Figura 13. (a) Factores principales en Diseños  $2^3$ . (b) Efectos de interacción de dos factores. (c) Efectos de interacción de tres factores [18].

Finalmente, la interacción entre tres factores puede entenderse como la diferencia de la interacción *AB* bajo los dos diferentes niveles de *C*, resultando la ecuación 7 y la *Figura 13(c)*.

$$ABC = \left[ \frac{\sum A_1 B_1 C_1 + \sum A_0 B_0 C_1}{4n} - \frac{\sum A_1 B_0 C_1 + \sum A_0 B_1 C_1}{4n} \right] - \left[ \frac{\sum A_1 B_1 C_0 + \sum A_0 B_0 C_0}{4n} - \frac{\sum A_1 B_0 C_0 + \sum A_0 B_1 C_0}{4n} \right] \quad (7)$$

En diseños experimentales de niveles superiores el cálculo de interacciones sigue la misma regla.

### 1.5. Valor p y significancia estadística

Tomar decisiones sobre supuestos es parte esencial de la ciencia e ingeniería. Si bien algunas veces la respuesta a un problema o cuestión pareciera clara, la formación de un procedimiento de decisión que se base en datos y pueda producir una conclusión permite actuar con confianza. En estadística, estos supuestos son denominados hipótesis, y los procedimientos que conducen a la aceptación o al rechazo de hipótesis estadísticas se denominan pruebas de hipótesis.

De acuerdo con [20] una hipótesis estadística es una aseveración o conjetura respecto a una o más poblaciones.

La verdad o falsedad de una hipótesis estadística nunca se sabe con absoluta certeza, a menos que se examine toda la población, lo cual es imposible en la gran mayoría de procesos. En su lugar, se toma una muestra aleatoria de la población de interés y se utilizan los datos para obtener suficiente evidencia que respalde o rechace la hipótesis propuesta. La evidencia de la muestra que es inconsistente con la hipótesis planteada conduce a su rechazo.

La estructura de la prueba de hipótesis se establece usando la denominada hipótesis nula, la cual corresponde a la hipótesis que se somete a prueba y se denota con  $H_0$ . El rechazo de la hipótesis nula conduce a la aceptación de una hipótesis alternativa, que se denota con  $H_1$ . El análisis de los datos estadísticos permite llegar, por lo tanto, a una de las siguientes dos conclusiones:

- **Rechazar  $H_0$**  a favor de  $H_1$  debido a evidencia suficiente en los datos.
- **No rechazar  $H_0$**  debido a la falta de evidencia en los datos.

Dado el riesgo permanente de rechazar la hipótesis nula siendo cierta, se hace indispensable contar con un parámetro que permita tomar la decisión con cierto nivel de confianza.

Hasta este punto se han descrito los principios básicos del diseño de experimentos y el cálculo de los efectos de los factores de estudio y sus interacciones sobre la variable de respuesta, sin embargo, dicha información por sí sola no basta para decidir si los factores seleccionados son suficientemente relevantes para el proceso estudiado o, dicho de otra forma, probar la hipótesis de que causan una diferencia significativa en el proceso al variar.

Para ello se hace uso de dos valores clave en las pruebas de hipótesis:

- Nivel de significancia estadístico  $\alpha$  (alfa).
- Valor  $p$ .

El nivel de significancia estadístico  $\alpha$  es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando es verdadera, situación conocida como error tipo I o falso positivo. Por ejemplo, un nivel de significancia estadístico típico de 0.05 indica un riesgo de 5% de concluir que existe una diferencia estadísticamente significativa cuando en realidad no la hay.

El nivel de significancia estadístico determina qué tan lejos del valor de la hipótesis nula se encuentra dicho riesgo. La *Figura 14* ilustra la región correspondiente a un nivel de significancia estadístico de 0.05 en la gráfica de normalidad.



Figura 14. Región de dos colas para un nivel de significancia de 0.05.

Las dos áreas sombreadas, simétricas entre sí y a la misma distancia de la hipótesis nula, corresponden al 5% de probabilidad de la gráfica de normalidad, esto es 2.5% por lado. Al conjunto de ambas áreas sombreadas se le conoce como región crítica para la prueba de dos colas.

Gráficamente, la media muestral que cae dentro de la región crítica el 5% de las veces indica que existe suficiente evidencia para rechazar la hipótesis nula, y por lo tanto aceptar que la media es

estadísticamente significativa al nivel de significancia estadístico de 0.05. En caso contrario, si la media muestral cae fuera de la región crítica, se dice que no se tiene suficiente evidencia estadística para rechazar la hipótesis nula.

Numéricamente, el valor  $p$  es el valor estadístico que corresponde a la probabilidad de que la media muestral caiga dentro del valor de significancia estadístico establecido. Es decir:

- Un valor  $p \leq \alpha$  permite rechazar  $H_0$  a favor de  $H_1$ .
- Un valor  $p > \alpha$  no permite rechazar  $H_0$ .

Por eso se dice que un valor  $p$  menor o igual al nivel de significancia estadístico indica un resultado estadísticamente significativo.

### 1.6. Diagrama de Pareto

Como se mencionó en el paso 6 de la sección 1.2, los elementos gráficos juegan un rol importante en el análisis e interpretación de los resultados. Uno de los recursos más útiles en el resumen de resultados del diseño de experimentos es el diagrama de Pareto.

El diagrama de Pareto muestra los valores absolutos de los efectos estandarizados desde el efecto más grande hasta el efecto más pequeño en forma de barras horizontales. El diagrama también muestra una línea de referencia, correspondiente a  $\alpha$ , para indicar qué factores tienen efectos que son estadísticamente significativos.

La *Figura 15* ilustra esta herramienta. Los factores e interacciones que cruzan la línea de referencia tienen efectos estadísticamente significativos.

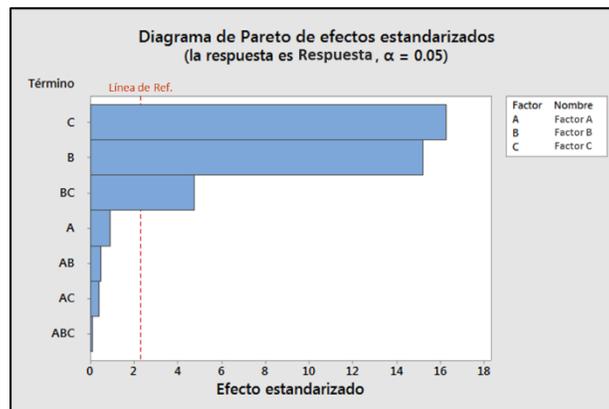


Figura 15. Diagrama de Pareto.

### 1.7. Ecuación de regresión

La obtención de un modelo estadístico o ecuación de regresión en el diseño experimental  $2^k$ , permite expresar en forma numérica la función que describe el comportamiento del fenómeno o proceso estudiado. Para ello hace uso de los factores de estudio ya sea, en unidades codificadas (asignando un valor de -1 a 1 de acuerdo con el nivel del factor), o bien, unidades de ingeniería.

El modelo de regresión en unidades codificadas tiene la forma de la ecuación 8.

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \beta_kx_k + \epsilon \quad (8)$$

Los términos  $x$  representan los factores codificados estadísticamente significativos, y los términos  $\beta$  representan sus coeficientes de regresión correspondientes.

### 1.8. Software de análisis estadístico.

Minitab es un software estadístico ampliamente utilizado a nivel mundial para la ejecución e interpretación de análisis estadísticos. Cuenta con herramientas útiles para realizar funciones básicas y avanzadas, dentro de las cuáles se encuentra el asistente para diseño de experimentos (DOE). Gracias a sus bondades y amplia gama de opciones convenientemente organizadas en un proceso secuencial e intuitivo, su uso simplifica el proceso de crear y analizar diseños experimentales.

Dentro del catálogo del asistente se encuentran las opciones de crear diseños factoriales completos y fraccionados de 2 niveles con hasta 15 factores. El asistente cuenta con opciones que permiten la personalización de cada factor y sus respectivos niveles, aleatorización, réplicas y bloques.

Cuenta también una herramienta de análisis que se encargará de analizar los datos en función de los datos introducidos correspondientes a la variable de respuesta. Desde esta sección es posible seleccionar los factores e interacciones a incluir en el análisis, las gráficas resultantes y la generación de una ecuación de regresión representativa del proceso analizado.

En relación con la ecuación de regresión, Minitab utiliza de forma predeterminada unidades codificadas durante el análisis del diseño experimental. Las unidades codificadas (-1, +1) permiten comparar el tamaño de los coeficientes (en una escala común) para determinar qué factor tiene el mayor impacto en la respuesta.

Cabe mencionar que, si bien Minitab utiliza unidades codificadas para el análisis, la salida del mismo indicará que la ecuación de regresión está en unidades no codificadas, lo que significa que Minitab pudo transformar los coeficientes codificados en coeficientes no codificados, permitiendo el uso de las unidades de ingeniería concernientes al proceso o fenómeno.

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Caso de estudio

Para el desarrollo del presente estudio se cuenta, de acuerdo con la información presentada en la definición del problema, con una unidad de lavadora de eje vertical con tipo de lavado por infusor. Un corte simplificado de la unidad en cuestión se muestra en la *Figura 16*.

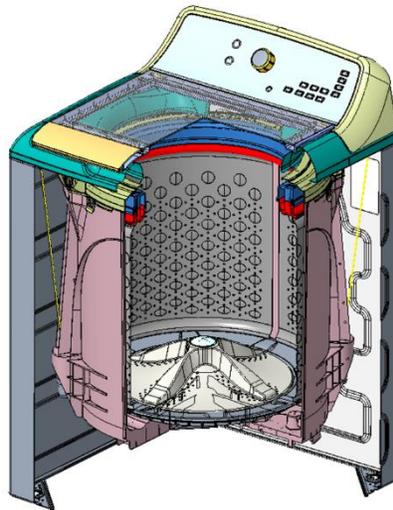


Figura 16. Corte de lavadora de carga superior para estudio.

De manera general, para establecer un entendimiento inicial de la interacción en los componentes y subensambles de la lavadora, podemos explosionar el producto como se muestra en la *Figura 17*.

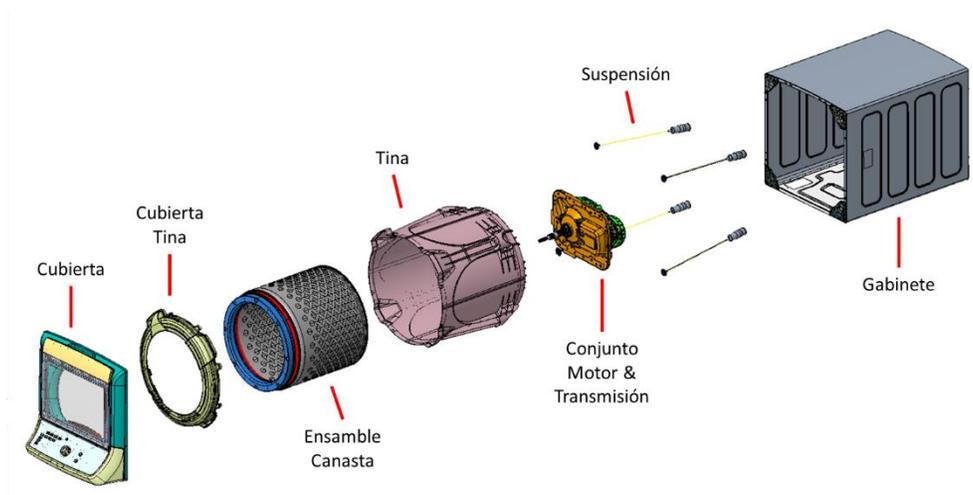


Figura 17. Explosionado simple de ensamblaje lavadora.

El sistema está compuesto en esencia por el ensamble canasta y fondo encargados de alojar la carga de lavado. A este conjunto se añade el aro de balance, que reacciona a las fuerzas ocasionadas por el desbalanceo generando un contrapeso que compensa el centro de inercia del sistema.

El ensamble canasta puede considerarse parte del ensamble sublavadora que incluye a la tina, encargada de contener el agua, y al sistema impulsor, conformado por el motor y el sistema de transmisión.

La sublavadora se soporta a través de cuatro ensambles suspensión consistentes en un sistema de rótula y varilla, un elemento rigidizante (resorte) y un conjunto amortiguante (cilindro y pistón). El ensamble gabinete soporta la rótula de la suspensión por medio de esquineros denominados soporte rótula que permiten el movimiento del sistema.

Un diagrama más claro de estas interacciones se muestra en la *Figura 18*.

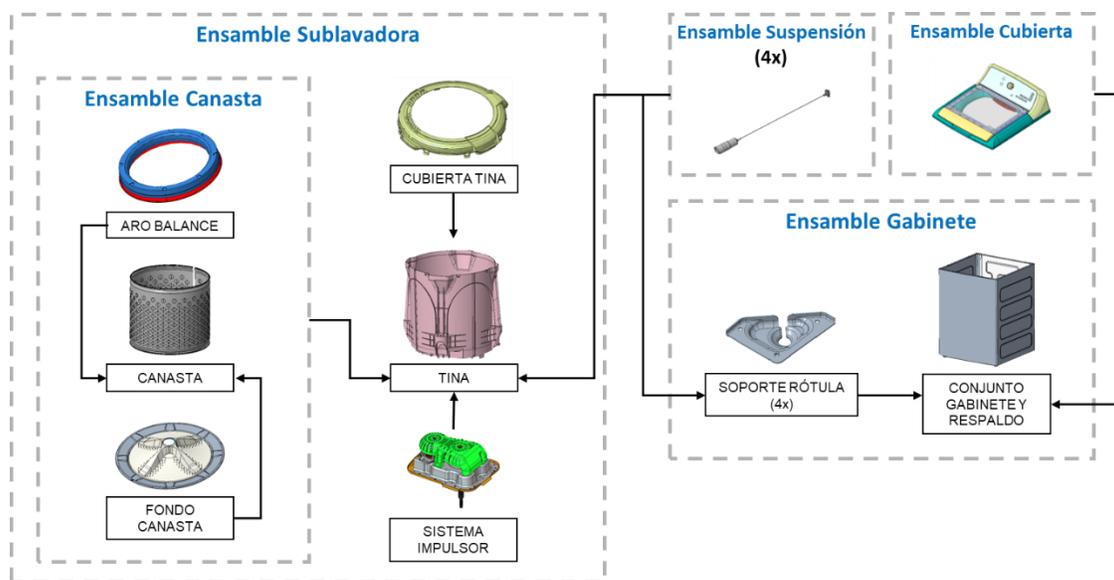


Figura 18. Diagrama de bloques de lavadora de eje vertical.

El sistema impulsor se encarga de llevar la canasta durante la etapa de centrifugado desde su velocidad inicial a una velocidad final, pasando por una serie de rampas de aceleración y valles mostrados en la *Figura 19*.

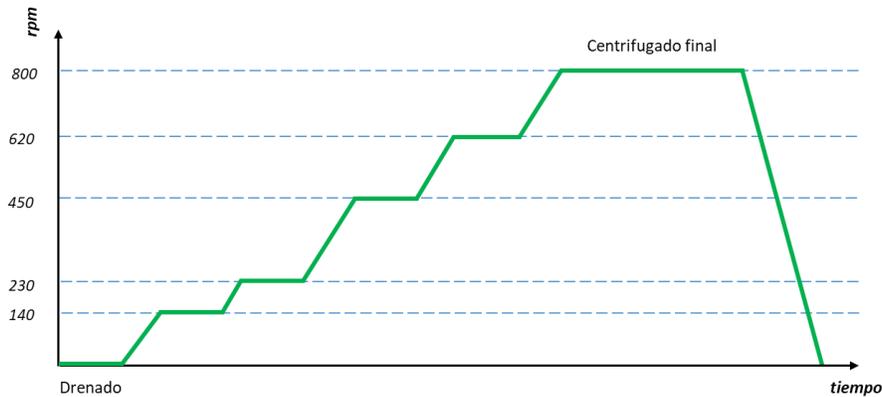


Figura 19. Perfil de aceleraciones de la lavadora.

## 2.2. Variable de respuesta

Se establece como variable de respuesta el desplazamiento  $z$  del ensamble sublavadora. Una justificación más detallada de esta selección se describe en la sección 2.7.

Dado que el estudio a realizarse es de carácter experimental, se colocará un punto de rastreo en la zona frontal de la tina para monitorear el desplazamiento.

La variable de respuesta a observar en el estudio será:

- Valor pico a pico de desplazamiento de la sublavadora en el eje Z.

## 2.3. Propuesta metodológica

La propuesta consiste en un estudio experimental bajo la metodología de Diseño de Experimentos. La *Figura 20* ilustra el diagrama de flujo de la metodología propuesta.

La metodología parte del estudio del Estado del arte tal que se puedan:

- (i) Ejecutar pruebas exploratorias para la hipótesis planteada.
- (ii) Desarrollar un diagrama de parámetros para el proceso de centrifugado de la lavadora. Esta información será de utilidad en la selección de los factores de estudio para el diseño experimental.
- (iii) Establecer un método de prueba experimental.
- (iv) Complementar las pruebas exploratorias con la identificación de cargas críticas utilizando un método de prueba actual.

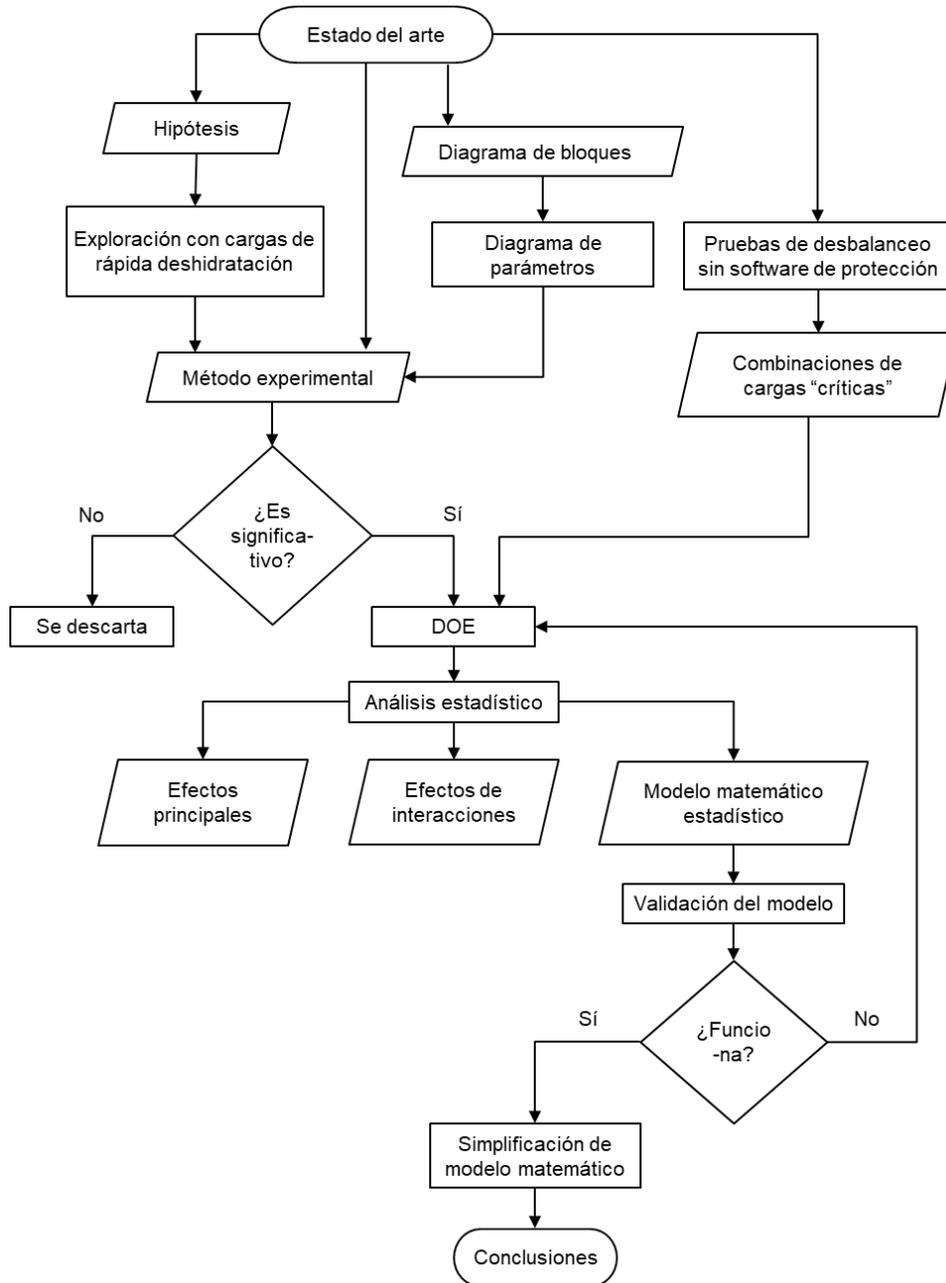


Figura 20. Diagrama de flujo de metodología propuesta.

Los resultados significativos adquiridos a través del método de prueba experimental, así como del método de prueba actual, pasan a formar parte del DOE.

El DOE permite la obtención de 3 elementos importantes:

- a. Efectos principales de los factores de estudio.
- b. Efectos de las interacciones.
- c. Modelo matemático estadístico o empírico.

#### 2.4. Identificación de factores: Diagrama de parámetros

La *Figura 21* ilustra el diagrama de parámetros planteado para el proceso de centrifugado. La entrada al sistema es la carga húmeda y la salida es la carga con un bajo porcentaje de humedad. Dentro de los posibles errores del proceso se listan el desbalanceo en general y el fenómeno de inestabilidad súbita.

Las variables de control son aquellas que pueden controlarse dentro de un rango de variación apropiado para el diseño. Las variables de ruido son aquellas que no pueden ser controladas, y en general se encuentran relacionadas a las condiciones de operación a las que se somete el diseño, tales como condiciones de instalación, condiciones medioambientales, hábitos de uso, etc.

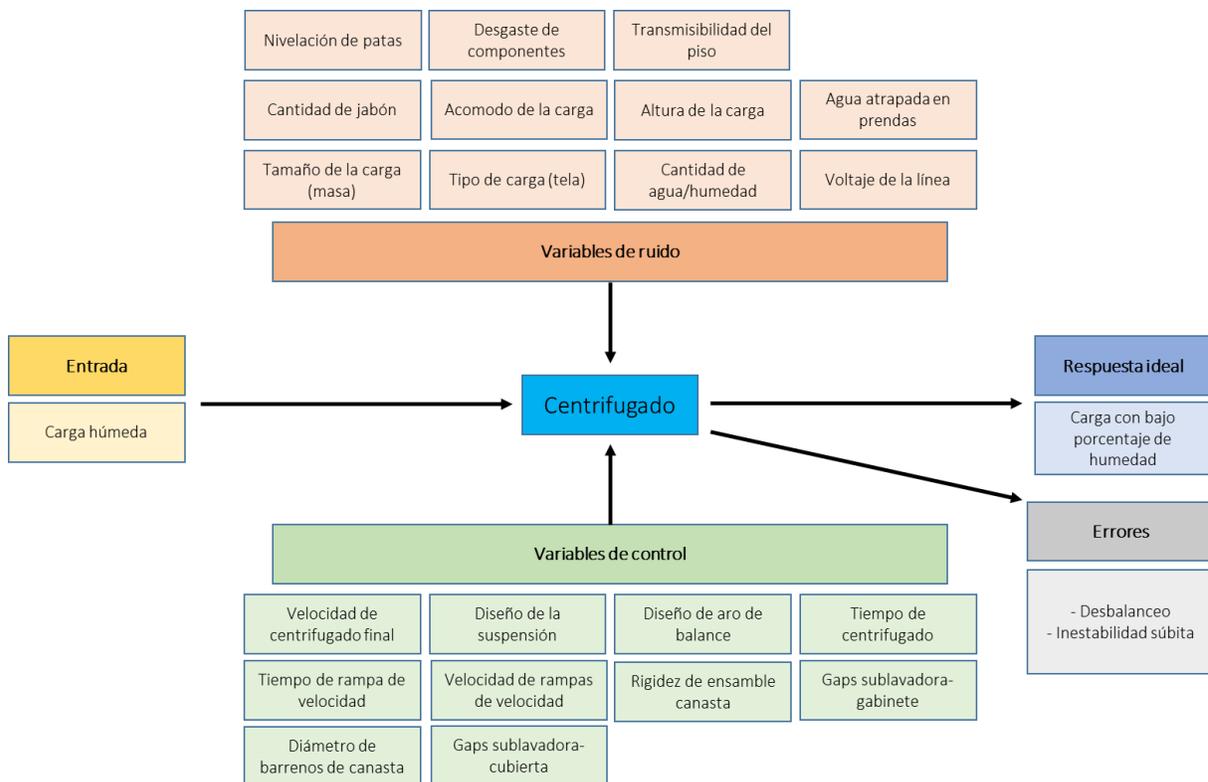


Figura 21. Diagrama de parámetros del centrifugado.

El diseño factorial completo en esta investigación será usado para determinar la importancia de los factores de interés, sus interacciones y cómo afectan a la variable de respuesta.

Se identifican como variables potenciales de estudio:

- Tamaño de la carga.
- Altura de la carga.
- Acomodo de la carga.
- Velocidad final de centrifugado.
- Velocidad de rampas de aceleración.
- Cantidad de agua.
- Agua atrapada en prendas.
- Rigidez de ensamble canasta.
- Diámetro de barrenos de canasta.
- Transmisibilidad del piso.

Una vez definidos, cada factor de estudio será probado a 2 niveles: un nivel bajo y un nivel alto. Por definición, el diseño experimental factorial completo implica que todas las posibles combinaciones serán evaluadas.

#### 2.5. Identificación de cargas críticas

Con el objetivo de identificar combinaciones de cargas críticas DL y UB que signifiquen una condición excesiva de desbalanceo para la unidad, se evaluaron 66 combinaciones de carga durante la etapa de centrifugado, mostradas en el Anexo II. Las cargas consisten en anillos de caucho uniformes colocados al interior de la canasta para simular DL y, de manera similar, elementos de caucho de 1 y 2 lb para simular UB. Una fotografía del interior de la canasta con las cargas de caucho se muestra en la *Figura 22*.

Para estas pruebas se utilizó el software de seguridad desactivado, a fin de evitar la detección del desbalanceo y consecuente protección del sistema.



Figura 22. Cargas al interior de la canasta.

La prueba es de carácter cualitativo, siendo una condición crítica aquella donde el desbalanceo en el producto resulta tan excesivo que la unidad comienza a desplazarse con riesgo de daño. En la Tabla 6 se recopilan cuatro combinaciones de DL y UB calificadas como críticas.

Tabla 6. Combinaciones de cargas con calificación crítica.

Combinación	DL	UB
6	0	7
11	10	7
35	30	5
44	45	4

## 2.6. Mediciones exploratorias con carga de rápida deshidratación

Esta etapa tiene como objetivo desarrollar un método experimental que permita agregar la carga de rápida deshidratación al sistema y observar su efecto de manera preliminar en la configuración de prueba.

Como se explicó anteriormente, el fenómeno de inestabilidad súbita ocurre a altas velocidades, cuando los filtros de detección de desbalanceo ya han sido superados, por lo que podemos asumir que no existe desbalanceo al inicio del centrifugado. Siendo así, es necesario replicar el cambio en la distribución de la masa al interior de la canasta a altas velocidades sin agregar masa al sistema una vez iniciado el experimento.

Algunas restricciones importantes para lograrlo satisfactoriamente son:

- No se debe agregar masa al sistema una vez iniciado el experimento.
- La lavadora debe contar con todos sus mecanismos de protección activados (condición final de usuario).
- La distribución de cargas debe pasar con éxito los filtros de detección de desbalanceo hacia la velocidad final de centrifugado.
- El cambio de distribución de la masa debe ocurrir durante la velocidad o rampa de aceleración finales de la etapa de centrifugado.

Con estas restricciones, se propone la configuración para prueba ilustrada en la *Figura 23*.

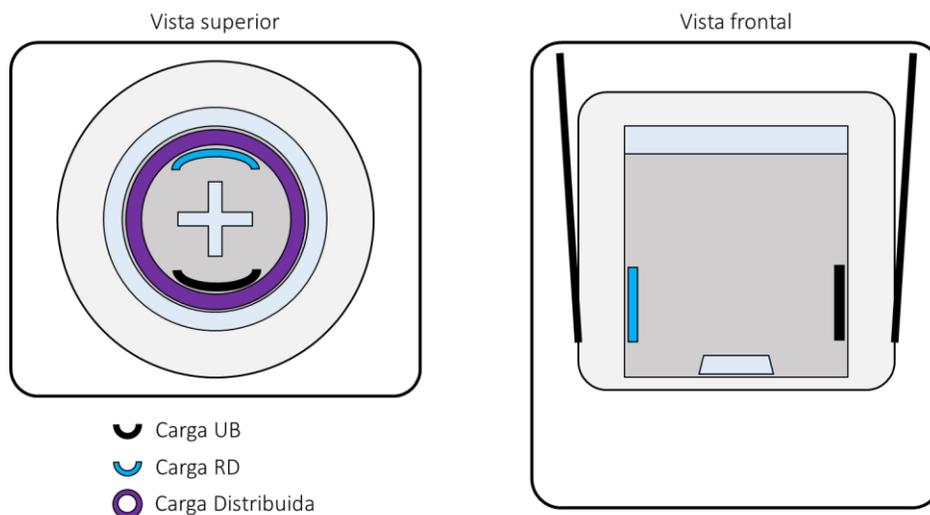


Figura 23. Configuración para pruebas exploratorias con carga RD.

La configuración de la prueba incluye:

- Anillos de caucho como los empleados en la identificación de cargas críticas, para la simulación de la carga distribuida DL.
- Elementos de caucho para la simulación de la carga de desbalanceo UB.
- Carga de desbalanceo RD.

#### **Inclusión de factor RD**

Para la inclusión de la carga RD se propuso emplear reservorios de agua colocados en la posición opuesta a la carga UB, y un sistema detonador a distancia accionado por radiofrecuencia conectado

a cerillos electrónicos para realizar la ruptura de los reservorios a alta velocidad. Este sistema se ilustra en la *Figura 24*.



Figura 24. Sistema de ignición a distancia por radiofrecuencia.

El objetivo principal de la prueba exploratoria es validar que el método de cambio de distribución de la carga propuesto funciona. Las configuraciones y elementos mostrados a continuación son el resultado de varias iteraciones de prueba y error con diferentes propuestas para lograr llevar el reservorio de agua a la máxima velocidad de centrifugado y lograr su ignición satisfactoriamente.

Para la colocación de los reservorios se optó por desarrollar recipientes con orificios de salida para permitir el escape del agua tras la ignición. La *Figura 25* muestra uno de estos recipientes.



Figura 25. Recipiente con orificios para reservorio de agua.

Las *Figuras 26* y *27* muestran la configuración de las cargas RD y UB al interior de la canasta durante el experimento, respectivamente.



Figura 26. Carga RD al interior de la canasta.



Figura 27. Carga UB al interior de la canasta.

Utilizando este método propuesto se realizaron varias iteraciones de prueba bajo diferentes cargas DL, UB y RD a diferentes alturas de la canasta durante el desarrollo del método.

Dentro de las evaluaciones exploratorias se decide evaluar la combinación de prueba mostrada en la Tabla 7 bajo 3 réplicas. El capítulo 2.8 describe con mayor detalle el equipo y configuración utilizados para realizar la medición de  $\omega$  y  $z$ .

Tabla 7. Combinación de factores para réplicas exploratorias.

UB & RD	h	DL	$\omega$
3	12	10	800

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de las tres réplicas. Como puede observarse, el desplazamiento  $z$  entre las tres réplicas resulta bastante similar.

Tabla 8. Resultados de desplazamiento en réplicas exploratorias.

Réplica	z [mm]
1	33.72
2	34.14
3	35.58

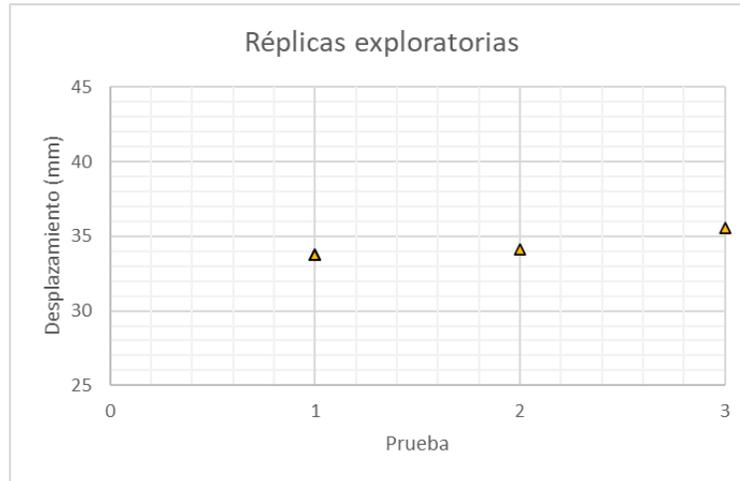


Figura 28. Gráfica de desplazamientos en réplicas exploratorias.

La desviación estándar de acuerdo con la ecuación 1 es:

$$s = 0.97 \text{ mm} \quad (9)$$

Se espera que las mediciones realizadas en el DOE conserven este comportamiento.

## 2.7. Planteamiento de DOE

Partiendo de la información reportada en [4] y [14] del Estado del arte, así como los resultados obtenidos en las secciones 2.4, 2.5 y 2.6, se seleccionan como factores de estudio los relacionados a la hipótesis de agua atrapada en prendas. Los factores de interés se listan en la Tabla 9.

Tabla 9. Factores de estudio para DOE.

Parámetro	Variable	Valor bajo	Valor alto	Unidades
Masa de cargas de desbalanceo	UB, RD	2	4	lb
Masa de carga distribuida	DL	0	30	lb
Altura de cargas de desbalanceo	h	0	12	in
Velocidad de centrifugado	$\omega$	700 (rampa)	800 (valle)	rpm

El primer parámetro corresponde a las masas de desbalanceo mostradas en la sección 2.6 y dada la hipótesis planteada son la parte medular del experimento. Se espera que a mayor cantidad de masa en UB y RD el cambio en la variable de respuesta sea mayor.

El segundo parámetro concierne a la carga distribuida. El interés en su estudio deriva de las condiciones finales de uso a las que se somete la lavadora, en las que un usuario puede llegar a colocar un amplio rango de tamaños de carga que al final del enjuague han de estar apropiadamente distribuidas en la periferia de la canasta, incrementando la fuerza de esta durante el centrifugado.

El tercer parámetro tiene que ver con la cercanía al aro de balance, encargado de compensar las fuerzas ocasionadas por los desbalances. Se espera que al acercar las cargas al aro de balance éste disponga de un tiempo menor para responder al cambio en la distribución, disminuyendo su capacidad de generar un contrapeso satisfactorio.

El cuarto parámetro denominado velocidad de centrifugado viene dado por el perfil de aceleraciones mostrado previamente en la *Figura 19*. Se desea entender si la respuesta del sistema al desbalanceo súbito varía de manera importante cuando el sistema impulsor se encuentra en la rampa final de aceleración en contraste con el momento cuando ya ha alcanzado la velocidad final.

El DOE a estudiar es de tipo factorial completo e incluye 4 factores de 2 niveles. La Tabla 10 lista las combinaciones generadas automáticamente por el software descrito en la sección 1.8 para el diseño experimental.

Tabla 10. Combinaciones para DOE Factorial Completo.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	UB [lb]	DL [lb]	h [in]	$\omega$ [rpm]
6	1	1	1	4	0	12	700
1	2	1	1	2	0	0	700
9	3	1	1	2	0	0	800
10	4	1	1	4	0	0	800
4	5	1	1	4	30	0	700
2	6	1	1	4	0	0	700
15	7	1	1	2	30	12	800
14	8	1	1	4	0	12	800
13	9	1	1	2	0	12	800
7	10	1	1	2	30	12	700
5	11	1	1	2	0	12	700
8	12	1	1	4	30	12	700
16	13	1	1	4	30	12	800
11	14	1	1	2	30	0	800
12	15	1	1	4	30	0	800
3	16	1	1	2	30	0	700

La variable de respuesta, de acuerdo con lo listado en la definición del problema, corresponde al desplazamiento vertical de la sublavadora. La selección de esta variable se justifica por el movimiento oscilatorio de la sublavadora que ocurre en dirección del eje de giro durante la etapa de centrifugado. La distancia que queda entre la cubierta y la sublavadora se vuelve crítica durante la etapa de diseño, y múltiples pruebas se realizan para validar la funcionalidad de este espacio durante el comportamiento dinámico del producto, ya que una colisión entre las partes mencionadas a alta velocidad puede causar daños estructurales a la unidad. La *Figura 29* ilustra esta distancia crítica.

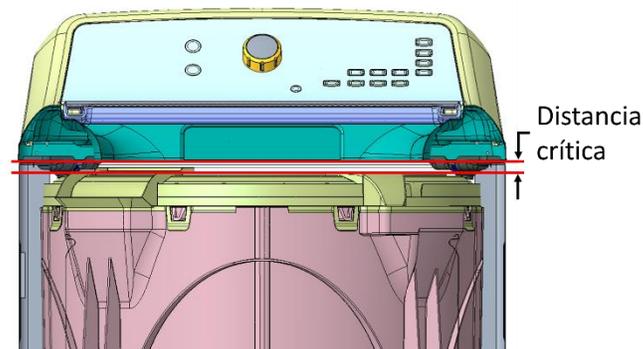


Figura 29. Distancia crítica entre Sublavadora y Cubierta.

La orientación del sistema coordinado de referencia para la medición del desplazamiento vertical ( $z$ ) queda como se ilustra en la *Figura 30*.

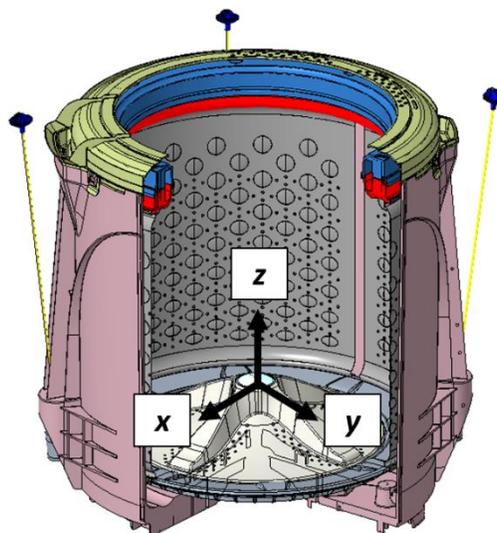


Figura 30. Orientación de sistema coordinado para medición de desplazamiento.

## 2.8. Configuración de método de prueba para DOE

Partiendo de la configuración mostrada previamente en la *Figura 23*, se adicionan al método de prueba un punto de medición para tacómetro y un punto de rastreo para cámara rápida.

El punto de medición para tacómetro corresponde a una cinta reflejante cuadrada de 0.500 in de lado colocada en la cara interna del aro de balance, tal que sea posible realizar la medición a una distancia segura. La *Figura 31* ilustra la zona de medición, no así la distancia de medición.

El tacómetro cuenta con una resolución de 0.1 rpm debajo de 1000 rpm, suficiente para asegurar la lectura de 700 y 800 rpm definidas en el DOE.



Figura 31. Zona de medición para tacómetro.

Para la inclusión del punto de rastreo de cámara rápida se realizó un corte frontal sobre el gabinete de la lavadora y se colocó el punto de rastreo sobre la tina. Varios puntos de rastreo fueron probados para identificar el más útil en el posterior procesamiento de la información. La *Figura 32* muestra el corte frontal en el gabinete y una de estas configuraciones.



Figura 32. Corte frontal en lavadora para rastreo con cámara rápida.

Con lo anterior, la configuración de prueba para el DOE queda de acuerdo con la Figura 33.

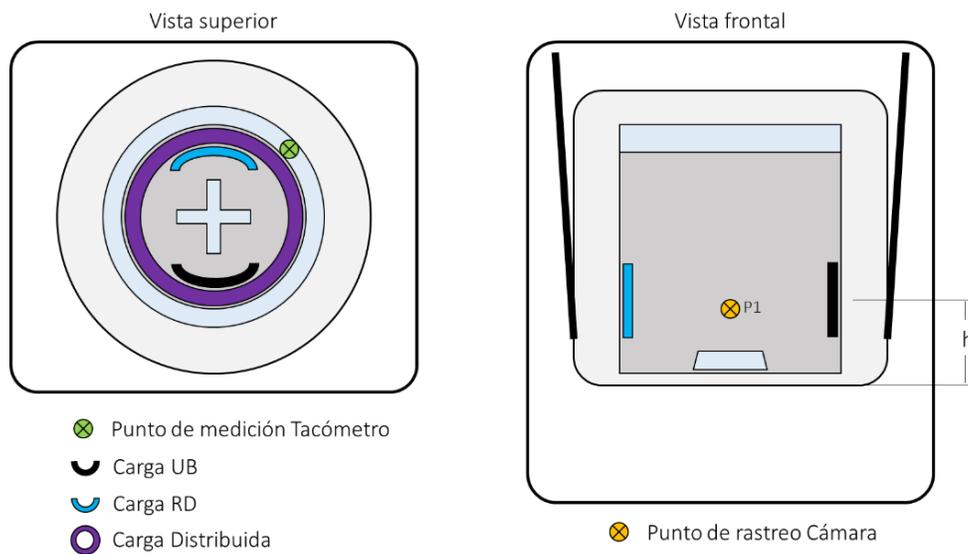


Figura 33. Configuración de prueba para DOE.

La lavadora se coloca dentro de una jaula de contención para protección del usuario (Figura 34).



Figura 34. Lavadora dentro de jaula de contención.

La configuración de la cámara rápida se establece a un muestro de 120 tomas por segundo, durante un total de 35 segundos. La cámara es capaz de almacenar un tiempo de grabación previo a la señal de disparo, que se establece en 5 segundos.

Tras la realización de las pruebas del DOE, las tomas realizadas por la cámara rápida pasan a un software de post-procesamiento propio del patrocinador. El capítulo siguiente detalla los resultados obtenidos.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. Gráficas de desplazamiento

A continuación, se presentan las gráficas de desplazamiento para cada uno de los 16 casos de prueba establecidos en el DOE, de acuerdo con el orden establecido por Minitab.

La Tabla 11 resume los resultados de desplazamiento  $z$  obtenidos de las evaluaciones del DOE. En la tabla se resaltan los casos en los cuales el desbalanceo súbito causó el desplazamiento violento de la unidad: pruebas 1, 7, 8, 10, 12 y 13. Para estos casos, los valores registrados corresponden al comportamiento instantáneo previo al inicio del desplazamiento de la lavadora.

Tabla 11. Resultados de desplazamiento en pruebas de DOE.

Prueba	$z$ [in]
1	1.756
2	0.284
3	0.418
4	0.560
5	0.593
6	0.360
7	1.498
8	1.971
9	0.715
10	1.045
11	0.573
12	1.143
13	2.094
14	0.192
15	0.652
16	0.494

Los resultados obtenidos se ilustran gráficamente en la *Figura 35*. Los casos identificados como un desbalanceo súbito suficiente para desplazar la unidad se identifican con  $\Delta$ . Se puede observar que los desplazamientos por encima de un valor de alrededor de aproximadamente 1 in resultan en este comportamiento.

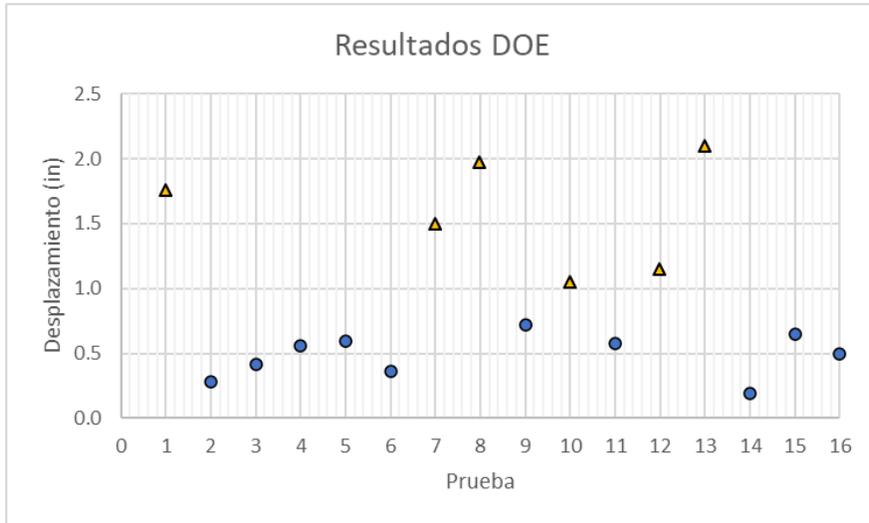


Figura 35. Gráfica de desplazamientos en pruebas de DOE.

Para ilustrar de mejor manera dicho comportamiento la *Figura 36* resume el desplazamiento de la lavadora en el tiempo.



Figura 36. Desplazamiento de unidad dentro de jaula en el tiempo.  
(a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 2.13$  s, (c)  $t = 4.26$  s, (d)  $t = 6.40$  s.

#### 4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Las réplicas exploratorias y las pruebas del DOE dejan ver que el método propuesto logra reproducir un comportamiento cercano al esperado de la inestabilidad súbita bajo la condición final de usuario, a continuación, se describe el análisis para la caracterización del comportamiento observado. Para el análisis de los datos se registran en la Tabla 12 los resultados de desplazamiento obtenidos en la sección anterior.

Tabla 12. DOE con mediciones de variable de respuesta.

OrdenEst	OrdenCorrida	PtCentral	Bloques	UB [lb]	DL [lb]	h [in]	$\omega$ [rpm]	z [in]
6	1	1	1	4	0	12	700	1.756
1	2	1	1	2	0	0	700	0.284
9	3	1	1	2	0	0	800	0.418
10	4	1	1	4	0	0	800	0.560
4	5	1	1	4	30	0	700	0.593
2	6	1	1	4	0	0	700	0.360
15	7	1	1	2	30	12	800	1.498
14	8	1	1	4	0	12	800	1.971
13	9	1	1	2	0	12	800	0.715
7	10	1	1	2	30	12	700	1.045
5	11	1	1	2	0	12	700	0.573
8	12	1	1	4	30	12	700	1.143
16	13	1	1	4	30	12	800	2.094
11	14	1	1	2	30	0	800	0.192
12	15	1	1	4	30	0	800	0.652
3	16	1	1	2	30	0	700	0.494

Haciendo uso del asistente para diseño de experimentos se establecen para análisis la respuesta y los factores de estudio, que en este caso corresponden a cuatro factores principales, seis interacciones de segundo orden, cuatro interacciones de tercer orden y una interacción de cuarto orden.

La nomenclatura para los factores empleados en el modelo se verá a lo largo del análisis como sigue:

- A: Factor UB.
- B: Factor DL.
- C: Factor h.
- D: Factor  $\omega$ .

#### 4.1. Efectos principales e interacciones

El primer paso consistió en la identificación gráfica de los términos con efectos despreciables que pudieran ser eliminados del análisis, lo cual puede hacerse apoyándose en la gráfica de Pareto mostrada en la *Figura 37*, así como las gráficas de efectos principales y de interacción, *Figura 38* y *Figura 39* respectivamente.

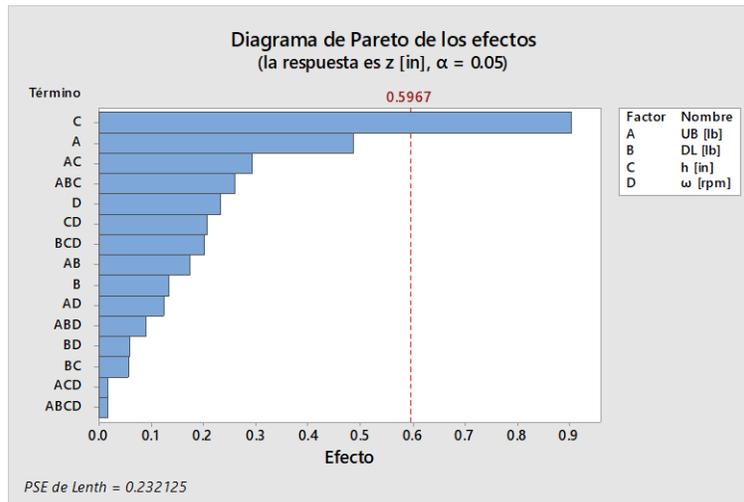


Figura 37. Diagrama de Pareto de los efectos.

De la gráfica de Pareto que involucra todos y cada uno de los efectos e interacciones concernientes a los factores implicados en el modelo, podemos ver que la interacción de cuarto orden ABCD, compuesta por los cuatro factores, resulta no significativa y que, por lo tanto, se puede prescindir de ella, quedándonos únicamente con los factores lineales, las interacciones de segundo y tercer orden.

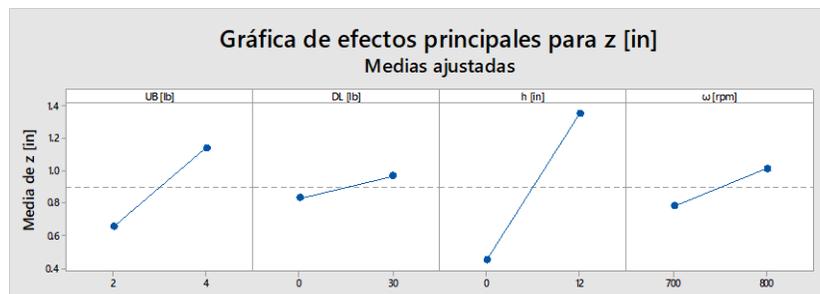


Figura 38. Gráfica de efectos principales.

De manera similar, la gráfica de efectos principales es útil para ver que al menos dos de los cuatro factores principales tienen un efecto significativo en la respuesta, estas son el valor de las cargas de

desbalanceo UB y su altura h, mientras que no queda claro si el valor de la carga DL y la velocidad  $\omega$  de la canasta son significativas o no significativas, por lo que han de mantenerse en el modelo durante el refinamiento.

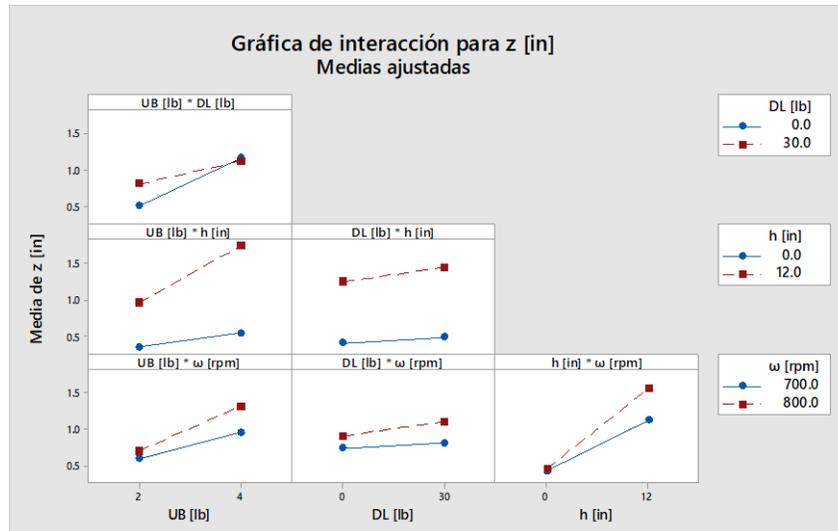


Figura 39. Gráfica de interacciones.

Algo similar pasa en la gráfica de interacciones, donde se observa una interacción aparentemente significativa entre UB y DL sin ser concluyente.

La *Figura 40* muestra la gráfica de cubos de z, que revela algo de información interesante: aparentemente la influencia de  $\omega$  en el fenómeno tiene un efecto menor al propio de los factores UB y h, aunque mayor al del factor DL, lo cual puede confirmarse también con la gráfica de efectos principales.

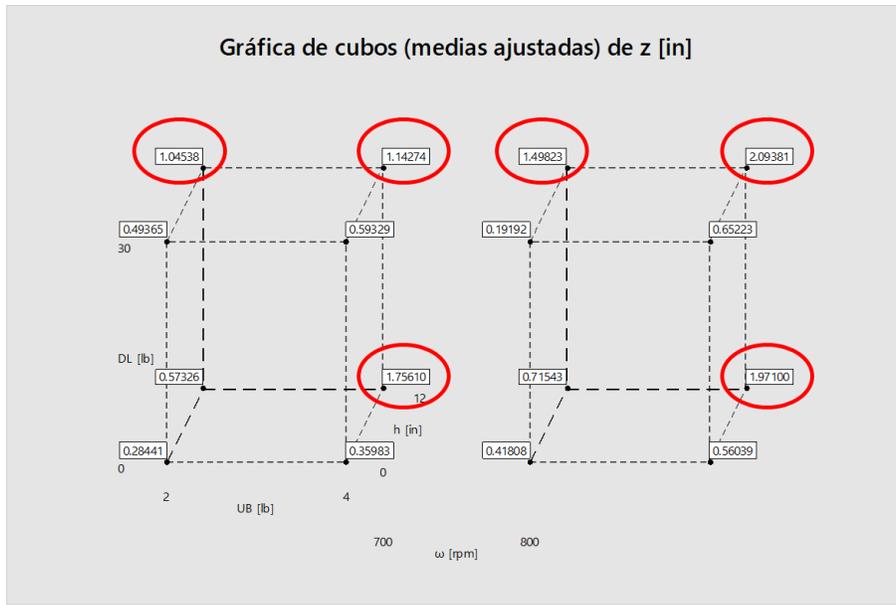


Figura 40. Gráfica de cubos de z.

#### 4.2. Obtención del modelo

De la ventana de sesión de Minitab resulta la Tabla 13, que proporciona información sobre la significancia estadística de los efectos de los factores a través del valor p. De acuerdo con el capítulo 1.5, un valor  $p < 0.05$  es indicativo de significancia estadística.

En principio, para las interacciones de tercer orden señaladas en la Tabla 13, se observan tres elementos aparentemente no significativos: la interacción ACD, la interacción ABD y la interacción BCD, quedando esta última en un valor muy cercano al nivel de significancia estadística  $\alpha = 0.05$ .

Tabla 13. Tabla de coeficientes para elementos de tercer orden.

#### Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.89686	0.00823	108.95	0.006	
UB [lb]	0.48863	0.24432	0.00823	29.68	0.021	1.00
DL [lb]	0.13410	0.06705	0.00823	8.14	0.078	1.00
h [in]	0.90527	0.45263	0.00823	54.98	0.012	1.00
ω [rpm]	0.23155	0.11578	0.00823	14.06	0.045	1.00
UB [lb]*DL [lb]	-0.17540	-0.08770	0.00823	-10.65	0.060	1.00
UB [lb]*h [in]	0.29421	0.14710	0.00823	17.87	0.036	1.00
UB [lb]*ω [rpm]	0.12482	0.06241	0.00823	7.58	0.083	1.00
DL [lb]*h [in]	0.05700	0.02850	0.00823	3.46	0.179	1.00
DL [lb]*ω [rpm]	0.05873	0.02937	0.00823	3.57	0.174	1.00
h [in]*ω [rpm]	0.20869	0.10435	0.00823	12.68	0.050	1.00
UB [lb]*DL [lb]*h [in]	-0.26096	-0.13048	0.00823	-15.85	0.040	1.00
UB [lb]*DL [lb]*ω [rpm]	0.08991	0.04495	0.00823	5.46	0.115	1.00
UB [lb]*h [in]*ω [rpm]	0.01792	0.00896	0.00823	1.09	0.473	1.00
DL [lb]*h [in]*ω [rpm]	0.20298	0.10149	0.00823	12.33	0.052	1.00

Lo anterior se puede observar gráficamente en el diagrama de Pareto correspondiente mostrado en la *Figura 41*, donde la interacción BCD se encuentra muy cerca de la línea de referencia.

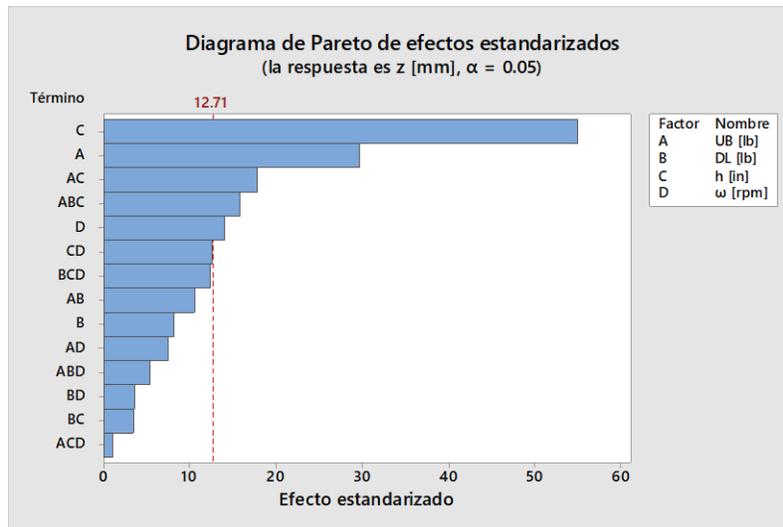


Figura 41. Diagrama de Pareto para elementos de tercer orden.

Partiendo de ello se eliminan del análisis las interacciones ABD y ACD.

El análisis actualizado del modelo eliminando los elementos identificados arroja los resultados mostrados en la Tabla 14, donde BCD presenta un valor  $p = 0.033$ , con un efecto estadísticamente significativo para la reproducción del fenómeno.

La Tabla 14 mantiene cuatro elementos con efectos estadísticamente no significativos, el factor de primer orden B (factor DL), las interacciones de segundo orden AD (interacción de UB y  $\omega$ ), BD (interacción DL y  $\omega$ ) y BC (interacción de DL y h). Instintivamente podría pensarse en su eliminación del análisis, pero como se podrá notar, existen casos en los que interacciones de orden superior contienen alguna de estas interacciones de segundo orden o factor individual.

Por ejemplo, el factor B (DL) parece no ser significativo por sí mismo, pero su interacción de tercer orden con los factores C y D (h y  $\omega$ , respectivamente) resulta estadísticamente significativa. Mismo caso para las interacciones de segundo orden BC y BD que, al interactuar con D o C, respectivamente, generan la interacción mencionada.

Tabla 14. Tabla de coeficientes para elementos de segundo y primer orden.

**Coeficientes codificados**

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.8969	0.0269	33.35	0.000	
UB [lb]	0.4886	0.2443	0.0269	9.09	0.003	1.00
DL [lb]	0.1341	0.0670	0.0269	2.49	0.088	1.00
h [in]	0.9053	0.4526	0.0269	16.83	0.000	1.00
$\omega$ [rpm]	0.2316	0.1158	0.0269	4.31	0.023	1.00
UB [lb]*DL [lb]	-0.1754	-0.0877	0.0269	-3.26	0.047	1.00
UB [lb]*h [in]	0.2942	0.1471	0.0269	5.47	0.012	1.00
UB [lb]* $\omega$ [rpm]	0.1248	0.0624	0.0269	2.32	0.103	1.00
DL [lb]*h [in]	0.0570	0.0285	0.0269	1.06	0.367	1.00
DL [lb]* $\omega$ [rpm]	0.0587	0.0294	0.0269	1.09	0.355	1.00
h [in]* $\omega$ [rpm]	0.2087	0.1043	0.0269	3.88	0.030	1.00
UB [lb]*DL [lb]*h [in]	-0.2610	-0.1305	0.0269	-4.85	0.017	1.00
DL [lb]*h [in]* $\omega$ [rpm]	0.2030	0.1015	0.0269	3.77	0.033	1.00

El diagrama de Pareto ilustrado en la *Figura 42* muestra los cuatro casos mencionados.

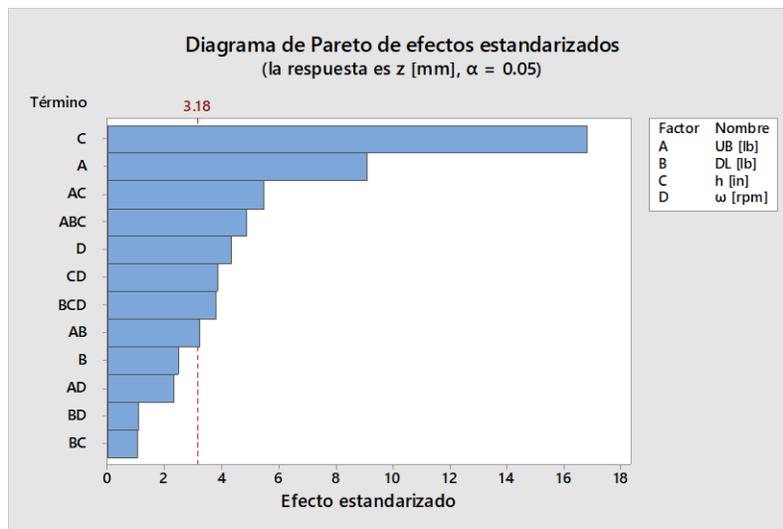


Figura 42. Diagrama de Pareto para elementos de primer y segundo orden.

Hasta este punto, la ventana de sesión del asistente para diseño de experimentos muestra un modelo con un error  $R^2$  mayor al 95%, valor típicamente aceptado que indica que el modelo explica de forma aceptable la variabilidad de los datos observados. El resumen se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15. Valor de R<sup>2</sup> para primer modelo.

Resumen del modelo			
S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.107555	99.39%	96.97%	82.75%

La ecuación de regresión que describe este primer modelo, expresada en unidades de ingeniería, corresponde a la ecuación 10.

$$\begin{aligned}
 z[in] = & 1.80 - 0.882(UB) + 0.0661(DL) - 0.0752(h) - 0.00207(\omega) \\
 & + 0.00285(UB)(DL) + 0.04626(UB)(h) + 0.001248(UB)(\omega) \\
 & - 0.01225(DL)(h) - 0.000096(DL)(\omega) + 0.000010(h)(\omega) \\
 & - 0.001450(UB)(DL)(h) + 0.000023(DL)(h)(\omega)
 \end{aligned} \tag{10}$$

No obstante, para el caso de la interacción AD (interacción entre UB y  $\omega$ ) no se presentan interacciones de orden superior que le contengan, por lo que se puede proceder a su eliminación del análisis, quedando la Tabla 16 como la tabla de coeficientes reducida, con el error mostrado en la Tabla 17.

Tabla 16. Taba de coeficientes reducida.

### Coeficientes codificados

Término	Efecto	Coef	EE del coef.	Valor T	Valor p	FIV
Constante		0.8969	0.0389	23.03	0.000	
UB [lb]	0.4886	0.2443	0.0389	6.27	0.003	1.00
DL [lb]	0.1341	0.0670	0.0389	1.72	0.160	1.00
h [in]	0.9053	0.4526	0.0389	11.63	0.000	1.00
$\omega$ [rpm]	0.2316	0.1158	0.0389	2.97	0.041	1.00
UB [lb]*DL [lb]	-0.1754	-0.0877	0.0389	-2.25	0.087	1.00
UB [lb]*h [in]	0.2942	0.1471	0.0389	3.78	0.019	1.00
DL [lb]*h [in]	0.0570	0.0285	0.0389	0.73	0.505	1.00
DL [lb]* $\omega$ [rpm]	0.0587	0.0294	0.0389	0.75	0.493	1.00
h [in]* $\omega$ [rpm]	0.2087	0.1043	0.0389	2.68	0.055	1.00
UB [lb]*DL [lb]*h [in]	-0.2610	-0.1305	0.0389	-3.35	0.029	1.00
DL [lb]*h [in]* $\omega$ [rpm]	0.2030	0.1015	0.0389	2.61	0.060	1.00

Tabla 17. Valor de R<sup>2</sup> para segundo modelo.

**Resumen del modelo**

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0.155740	98.31%	93.64%	72.88%

Este modelo mantiene un ajuste a los datos observados con un R<sup>2</sup> mayor al 95% buscado, aunque ligeramente menor que el caso anterior, y con un R<sup>2</sup> pronosticado del 72.88%, menor en comparación al 82.75% del caso anterior, denotando una mejor capacidad del primer modelo para predecir la respuesta de observaciones no incluidas en el estudio.

La ecuación de regresión que describe el segundo modelo, expresada en unidades de ingeniería, corresponde a la ecuación 11.

$$\begin{aligned}
 z[in] = & -1.01 + 0.0544(UB) + 0.0661(DL) - 0.075(h) + 0.00167(\omega) \\
 & + 0.00285(UB)(DL) + 0.04626(UB)(h) - 0.01225(DL)(h) \\
 & - 0.000096(DL)(\omega) + 0.000010(h)(\omega) - 0.001450(UB)(DL)(h) \\
 & + 0.000023(DL)(h)(\omega)
 \end{aligned} \tag{11}$$

## 5. VALIDACIÓN

Con el objetivo de validar los modelos empíricos obtenidos en las ecuaciones 10 y 11 se realizó una corrida de 5 pruebas, cuyas combinaciones de valores para cada uno de los factores de estudio se encuentran listadas en la Tabla 18.

Tabla 18. Combinaciones de prueba para corrida de validación.

Prueba	UB & RD [lb]	h [in]	DL [lb]	$\omega$ [rpm]
Prueba 1	3	12	10	800
Prueba 2	5	0	0	800
Prueba 3	5	6	10	800
Prueba 4	5	12	30	800
Prueba 5	6	12	30	800

Los resultados de desplazamiento obtenidos de las 5 combinaciones se resumen en la Tabla 19. La primera columna lista los valores de predicción del primer modelo, la segunda columna lista los valores de predicción del segundo modelo, y la tercera columna lista los resultados obtenidos a través del método experimental. Los casos de prueba 1, 3, 4 y 5 presentaron desplazamiento de la unidad a causa de la inestabilidad súbita generada.

Tabla 19. Resultados de desplazamiento para corrida de validación.

Prueba	Modelo 1 z [in]	Modelo 2 z [in]	Experimental z [in]
Prueba 1	1.55	1.55	1.40
Prueba 2	0.73	0.60	0.57
Prueba 3	1.68	1.55	1.13
Prueba 4	2.41	2.28	1.72
Prueba 5	2.64	2.45	2.27

En la *Figura 43* se muestra gráficamente la discrepancia entre los modelos predictivos obtenidos y el comportamiento real observado.

Por su parte, la *Figura 44* ilustra el desplazamiento de la lavadora fuera de su posición durante la prueba 5. El tiempo de desplazamiento desde su posición inicial a la posición final fue de apenas 2.33 segundos, con un comportamiento violento, esperado de la inestabilidad súbita provocada a altas velocidades.

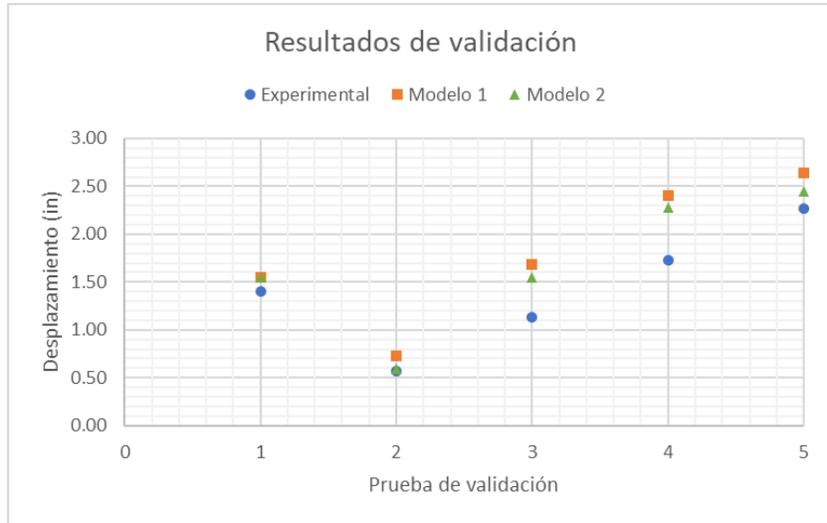


Figura 43. Resultados de desplazamientos en corrida de validación.

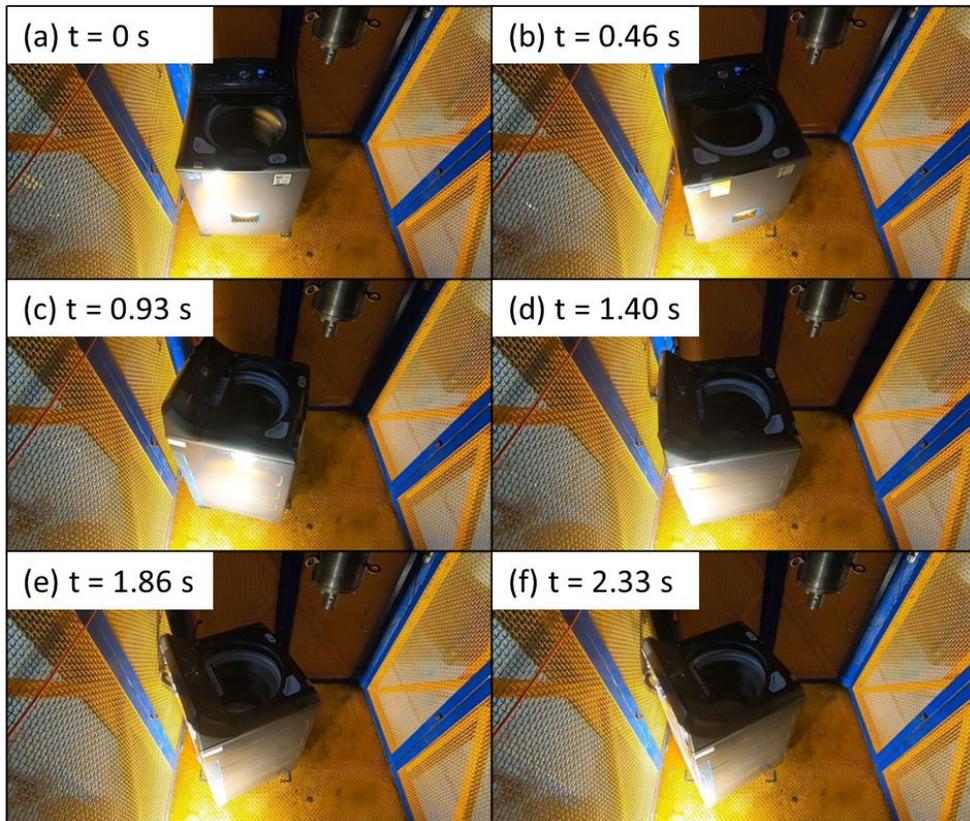


Figura 44. Desplazamiento de unidad en prueba de validación número 5. (a)  $t = 0$  s, (b)  $t = 0.46$  s, (c)  $t = 0.93$  s, (d)  $t = 1.40$  s, (e)  $t = 1.86$  s, (f)  $t = 2.33$  s

La *Figura 45* muestra un ejemplo de daño visualmente apreciable en la sublavadora derivado del “brinco” súbito, y por ende la colisión de la sublavadora contra la cubierta metálica.



Figura 45. Daño en unidad provocado por falla súbita en corrida de validación.

### 5.1. Correlación del modelo

Con los datos obtenidos de la corrida de validación, el valor de correlación para cada uno de los modelos se muestra en la Tabla 20. Ambos modelos presentan prácticamente el mismo valor de correlación contra los valores observados en la experimentación.

Tabla 20. Correlación de modelos empíricos.

Prueba	Modelo 1	Modelo 2	Error 1	Error 2
Prueba 1	1.55	1.55	10.40	10.29
Prueba 2	0.73	0.60	26.55	4.24
Prueba 3	1.68	1.55	48.06	36.89
Prueba 4	2.41	2.28	39.59	32.30
Prueba 5	2.64	2.45	16.52	8.24
<b>Correlación</b>	<b>96%</b>	<b>96%</b>		

## TRABAJO FUTURO

El estudio alrededor del fenómeno de inestabilidad súbita es, como se ha visto, aún bastante limitado. Ello abre las puertas a cantidad importante de trabajos futuros a realizar sobre esta línea de investigación.

Es de mi interés listar cinco oportunidades de trabajo que permitirán un mayor entendimiento del fenómeno, su reproducibilidad, y su dependencia de factores externos y de diseño:

1. El desarrollo de productos conectados y el denominado Internet de las cosas ofrecen numerosas ventajas en relación con el entendimiento de los hábitos de uso y registro de fallas de todo tipo de productos, y la lavadora doméstica no es la excepción. Hoy en día las fallas en electrodomésticos son atendidas a través de centros de servicio que proveen su asistencia en un primer acercamiento vía telefónica, o más recientemente medios digitales, para posteriormente programar una visita donde un técnico realizará cuestionamientos y una revisión del producto, pero que no deja de ser un medio en el que mucha información se pierde o tiene poca fidelidad con la realidad.

Contar con un sistema dentro de la lavadora que, permita registrar las condiciones y parámetros de operación previos a una falla, daría al diseñador importantes entradas con las cuáles mejorar sus intenciones de diseño, métodos de simulación y de prueba.

2. Históricamente es bien sabido que los costos de producción y materias primas suelen jugar en contra del desarrollo de productos con introducción de nuevas tecnologías. Sin embargo, es también una realidad que componentes que hace algunos años eran poco viables han visto su precio disminuido como una consecuencia natural del avance tecnológico.

Siendo así, resulta lógico pensar en lavadoras con un mejor sistema de sensado al que se tiene actualmente. Un sistema de sensado por acelerómetro o giroscopio incorporados a la sublavadora son un buen ejemplo de esta oportunidad.

3. El presente trabajo se dedicó al desarrollo de un método experimental bajo la hipótesis de agua atrapada en prendas que se libera a altas velocidades del centrifugado, sin embargo, la variable de mayor influencia resultó ser la altura de la carga dentro de la canasta. ¿Es posible que el fenómeno ocurra no como consecuencia de la liberación de agua atrapada, sino de un cambio en la distribución de las prendas dentro de la canasta, que al cambiar de posición golpeen cerca del aro de balance causando un desbalance súbito? El desarrollo de un método de prueba donde se pueda replicar esta condición podría ayudar a contestar la pregunta.

4. En el DOE presentado se incluyeron principalmente factores denominados “de ruido” relativos a la carga de lavado. Esto se hizo así porque se pretendía, en un modelo actual de lavadora similar a los que han presentado fallas en el pasado, cuantificar la influencia de factores externos. Una siguiente iteración experimental podría incluir factores concernientes al diseño de la suspensión, la rigidez de la canasta y el diámetro de sus barrenos, el llenado del aro de balance y la geometría de sus aletas internas, etc.
5. El desarrollo de una simulación multicuerpo que reproduzca el método experimental desarrollado en el presente estudio estadístico arrojaría información importante, y con un nivel de correlación adecuado permitiría el ahorro de tiempo y recursos en el diseño.

## CONCLUSIONES

Al inicio del estudio se plantearon los objetivos a alcanzar. Al respecto:

- I. Se planteó una hipótesis de causa del fenómeno sobre la cual se estableció el DOE.
- II. Se identificaron condiciones que propician la aparición del fenómeno.
- III. Se desarrolló un método experimental de acuerdo con la hipótesis.
- IV. Se desarrolló un DOE para la identificación de los efectos estadísticos de los factores de estudio y sus interacciones.
- V. Se obtuvo el modelo estadístico asociado a los factores de estudio.
- VI. Se listaron oportunidades de trabajo futuro derivados del trabajo realizado.

Con lo anterior, se puede indicar que los objetivos planteados en un inicio se satisfacen. El método experimental planteado y el modelo empírico obtenido proporcionan un primer acercamiento al fenómeno, dando pistas relevantes sobre una forma en que puede estar ocurriendo el fenómeno de inestabilidad súbita reportado en campo.

Al respecto, el efecto de la variable de altura  $h$  de las cargas UB y RD resultó tener una mayor significancia que la masa de estas. Si bien la deshidratación agresiva de la carga resulta en un desbalanceo súbito que, según lo que pudo comprobarse, lleva a la lavadora a un comportamiento violento e inestable, el daño mostrado en la *Figura 43* todavía dista de la falla crítica reportada en campo, e incrementar la cantidad de agua atrapada en la carga pareciera una condición poco probable, pues estaríamos hablando de liberar súbitamente cantidades superiores a las 6 lb de agua.

Un efecto combinado entre la liberación y el desplazamiento de la carga en dirección y sentido del aro de balance podrían dar origen a un comportamiento notablemente más agresivo. Para ilustrar esta idea refiérase a la *Figura 46*. En conjunto, un acomodo particular de la carga, los materiales textiles de las prendas y las características mecánicas de la suspensión, el aro de balance y la canasta podrían estar causando este desplazamiento súbito de la carga causando un golpe y desbalanceo drásticamente que, de no ser apropiadamente mitigado por los componentes de la lavadora, concluyan en el modo de falla que nos atañe.

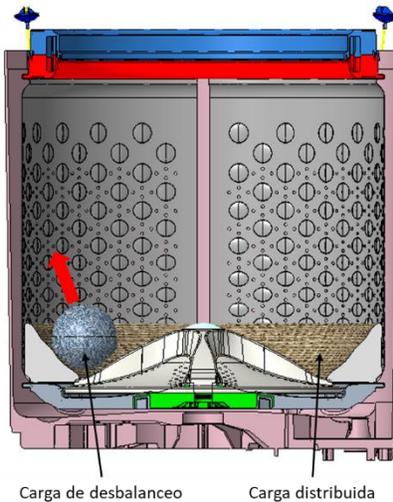


Figura 46. Desplazamiento súbito de carga en sentido del aro de balance.

Lo anterior lleva a pensar que existen una multitud de factores, tanto del propio diseño como externos, que se podrían incluir en los modelos para lograr acercarse aún más al entendimiento del fenómeno y llevar a la lavadora a una condición de falla total. De momento, sin embargo, el método experimental y los resultados encontrados nos otorgan la oportunidad de trabajar en diseños orientados a prevenir la condición de agua atrapada en la ropa.

No cabe duda de que este tema cobrará una especial importancia en el futuro cercano, en parte derivado de los incidentes de algunos fabricantes en los años recientes, pero también como una consecuencia natural de las mejoras en desempeño y las reducciones en costos de materiales. Lograr un mejor entendimiento del fenómeno marcará una diferencia importante para el fabricante de lavadoras con respecto a su posición en el mercado.

## REFERENCIAS

- [1] Ortega, M. (2008). *Caracterización, Evaluación, Simulación, Optimización y Diseño de una suspensión de lavadora*. UNAM, Facultad de Ingeniería, 4-5.
- [2] Peterson, G. (2005). *Method for controlling a hyperspin mode in an appliance*. Patent US 2005/0155159A1.
- [3] Davis, P. O., & Brena, M. O. (2017). *Methods for monitoring load balance in washing machine appliances*. Patent US 2016/0348294A1.
- [4] Darby, A. J., & Cheung, M. K. (2008). *Fluid entrapment detection*. Patent US 2008/0178398A1.
- [5] Conrad, D. C. (1994). *The fundamentals of automatic washing machine design based upon dynamic constraints*. Doctoral dissertation, Purdue University.
- [6] Conrad, D. C., & Soedel, W. (1995). *On the problem of oscillatory walk of automatic washing machines*. Journal of Sound and Vibration, 188(3), 301-314.
- [7] Papadopoulos, E., & Papadimitriou, I. (2001). *Modeling, design and control of a portable washing machine during the spinning cycle*. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 2, 899-904.
- [8] Buśkiewicz, J., Pittner, G., & Barczewski, R. (2012). *Numerical and experimental vibration analysis of domestic washing machine drum*. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, 17(3), 765-777.
- [9] Lim, H. T., Jeong, W. B., & Kim, K. J. (2010). *Dynamic modeling and analysis of drum-type washing machine*. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 11(3), 407-417.
- [10] Agnani, A., Cannella, F., Martarelli, M., Merloni, G., Tomasini, E. P., & Spa, A. M. (2008). *Dynamic characterization of a washing machine: numerical multi-body analysis and experimental validation*. IMAC-XXVI Conference and Exposition on Structural Dynamics, USA, 4-7.
- [11] Nygåards, T., & Berbyuk, V. (2012). *Multibody modeling and vibration dynamics analysis of washing machines*. Multibody System Dynamics, 27(2), 197-238.
- [12] Gödecker, H., von Wagner, U., & Heubner, A. (2009). *Dynamical behavior of washing machines*. PAMM: Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 9(1), 109-110.
- [13] Drüke, S., Bicker, R., Schuller, B., Henke, C., & Trächtler, A. (2018). *Rotordynamic Instabilities in Washing Machines*. International Conference on Rotor Dynamics, 383-397.

- [14] Jang, J. S., Jin, J. H., Jung, H. Y., Park, J. H., Lee, J. W., & Yoo, W. S. (2016). *Multibody dynamic analysis of a washing machine with a rapid change of mass during dehydration*. International journal of precision engineering and manufacturing, 17(1), 91-97.
- [15] Salinas, A. T., Flores, S. M., Breña, M. O., & TyP, M. (2009). *Mejora de diseño de suspensión de lavadora automática de carga vertical*. MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM 23 al 25 DE SEPTIEMBRE.
- [16] Plata, S., Vicente, W., & Salinas-Vazquez, M. (2019). *Statistical analysis of clothing drying in a venting type dryer*. Drying Technology, 37(8), 1013-1027.
- [17] Melo, O., & Lopez, L. (2020). *Diseño de Experimentos: Métodos y Aplicaciones*. Universidad Nacional de Colombia: Facultad de Ciencias.
- [18] Montgomery, D. (2013) *Design and Analysis of Experiments*. John Wiley & Sons Inc.
- [19] Schdmit, S. (1994) *Understanding Industrial Designed Experiments*. Air Academy.
- [20] Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2007). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México: Pearson educación.
- [21] Minitab 18, <https://support.minitab.com/es-mx/minitab/18/getting-started/designing-an-experiment>, Abril 2022.

## ANEXOS

### I. Método actual de detección de desbalanceo.

El método consiste en emplear un sensor de velocidad de efecto hall acoplado al motor. La señal del sensor de velocidad es un tren de pulsos generados por un disco magnético en la polea del motor.

Esta señal es procesada por el control, que mide la cantidad de tiempo entre pulsos ascendentes. Con este dato se calcula la velocidad en revoluciones por minuto.

La curva azul de la *Figura 47* representa la velocidad medida utilizando el método descrito arriba para una UB = 5 lb. Como podrá observarse, existen ligeras ondulaciones cuando se presenta un desbalance en la carga.

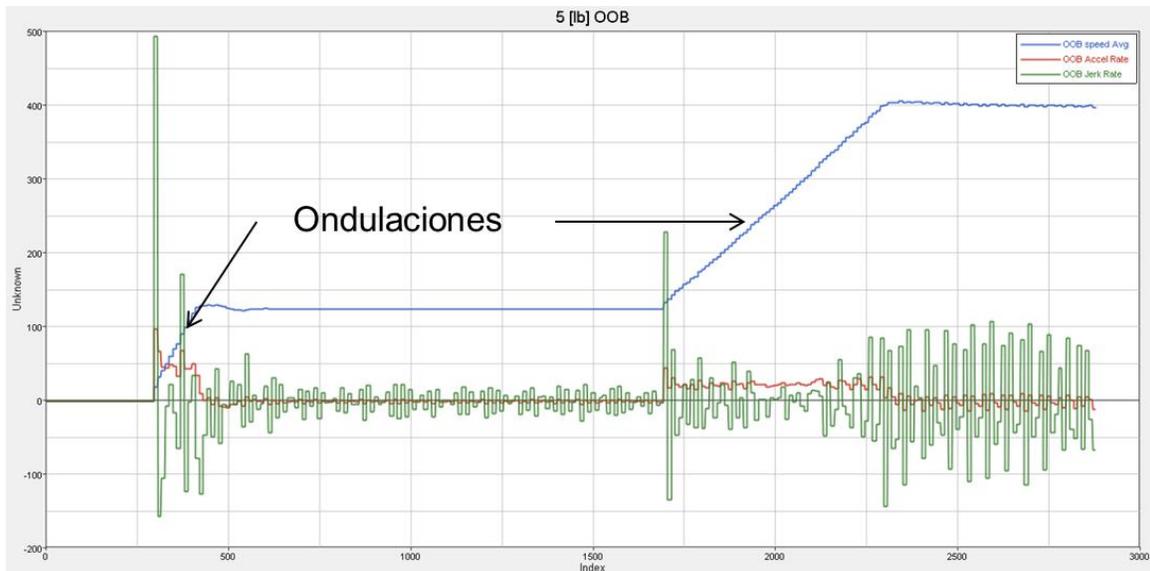
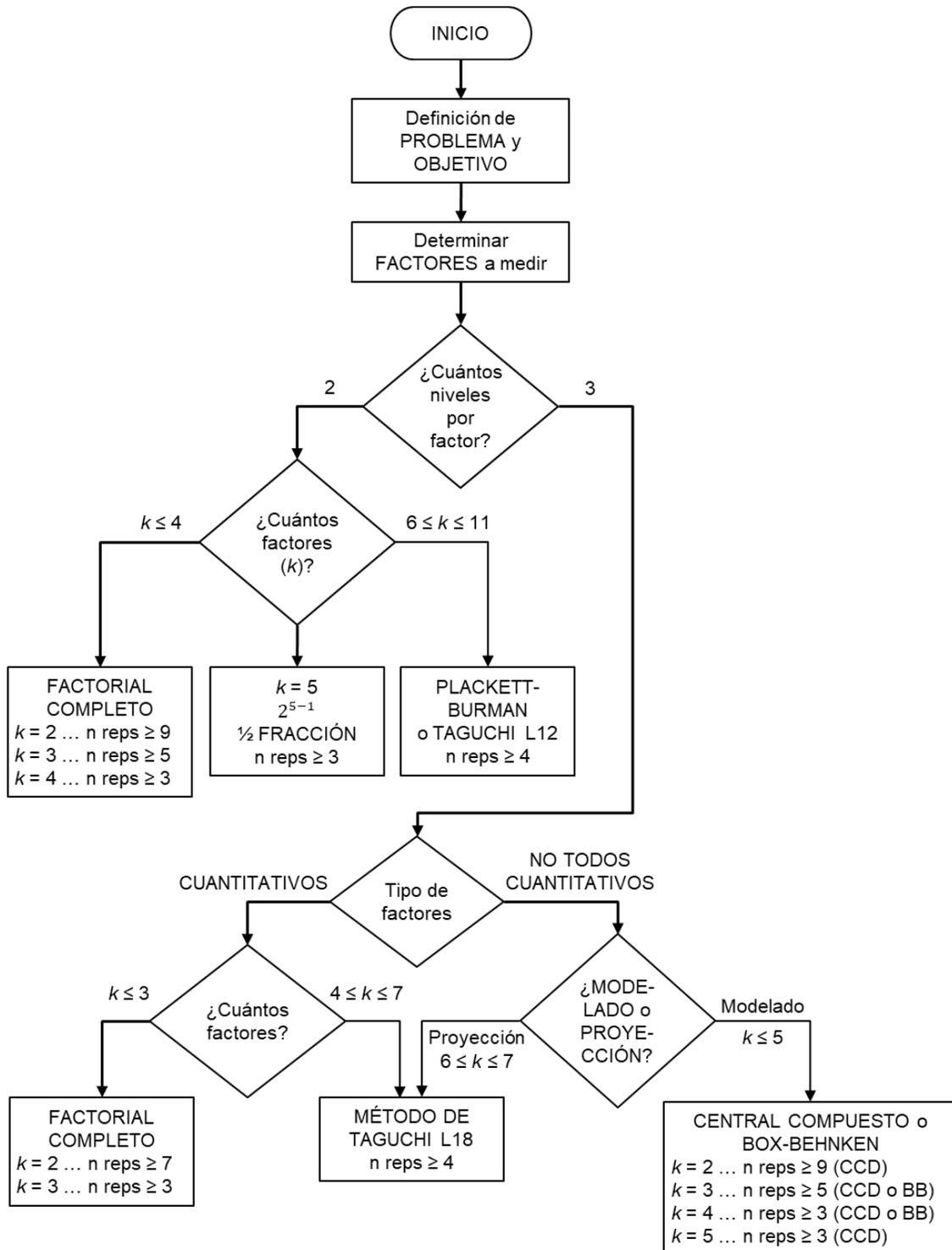


Figura 47. Medición de velocidad contra desbalanceo.

Para medir la variación en la señal de velocidad se puede derivar respecto al tiempo, obteniendo la curva roja que representa la aceleración. Sin embargo, esta señal tiene el inconveniente de verse fuertemente afectada por la cantidad de masa a centrifugar, por lo que un aumento en la carga provoca una disminución de aceleración, que puede confundirse con un desbalance.

La curva verde corresponde a la derivada de la aceleración denominada *jerk*, y permite observar la variación en la aceleración de la canasta con alta sensibilidad y menor susceptibilidad a la carga de lavado. Como se puede notar en la figura, la velocidad de centrifugado incrementa siguiendo un patrón de rampas y escalones, con valores de revoluciones por minuto previamente definidos.

II. Guía para selección de DOE [19].



### III. Matriz de combinaciones de DL y UB.

Índice	DL	UB	Altura UB
1	0	0	0
2	0	3	3
3	0	4	3
4	0	5	3
5	0	6	3
6	0	7	3
7	10	0	0
8	10	4	3
9	10	5	3
10	10	6	3
11	10	7	3
12	10	8	3
13	10	4	5
14	10	5	5
15	10	6	5
16	10	7	5
17	10	8	5
18	20	0	0
19	20	4	3
20	20	5	3
21	20	6	3
22	20	7	3
23	20	8	3
24	20	4	5
25	20	5	5
26	20	6	5
27	20	7	5
28	20	8	5
29	20	3	9
30	20	4	9
31	20	5	9
32	20	6	9
33	30	0	0
34	30	4	3
35	30	5	3
36	30	6	3
37	30	7	3
38	30	8	3
39	30	3	9
40	30	4	9
41	30	5	9
42	30	6	9
43	45	3	3
44	45	4	3
45	45	5	3
46	45	6	3
47	45	7	3
48	45	3	9
49	45	4	9
50	45	5	9
51	45	6	9
52	59	3	3
53	59	4	3
54	59	5	3
55	59	6	3
56	59	3	9
57	59	4	9
58	59	5	9
59	71	3	3
60	71	4	3
61	71	5	3
62	71	6	3
63	71	2	9
64	71	3	9
65	71	4	9
66	71	5	9