



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL PROCESO DE EXTRACCIÓN DE AGUA EN CARGAS DE
ROPA MEDIANTE FUERZA CENTRÍFUGA EN UNA LAVADORA DE EJE VERTICAL

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:

MTA. BLANCA ARLETTE SERRATO ESPINO

TUTOR PRINCIPAL

DR. WILLIAM VICENTE Y RODRÍGUEZ

FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM

CIUDAD UNIVERSITARIA, CDMX. ABRIL 2024



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Marcelo López Parra
Secretario: Dr. Jesús Manuel Dorador González
Vocal: Dr. William Vicente y Rodríguez
1^{er} Suplente: Dr. Alejandro C. Ramírez Reivich
2^{do} Suplente: Dr. Jorge Alfredo Ferrer Pérez

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

Unidad de Alta Tecnología – Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla.
Fray Antonio de Monroy e Híjar 260, Villas de Mesón, Juriquilla, Querétaro, C.P. 76230, México.

TUTOR DE TESIS:

Dr. William Vicente y Rodríguez.

FIRMA

ÍNDICE DE CONTENIDO

NOMENCLATURA.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS.....	8
ÍNDICE DE ECUACIONES	10
1. INTRODUCCIÓN.....	11
1.1. ANTECEDENTES	11
1.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA LAVADORA.....	12
1.1.1.1. TIPOS DE LAVADORA	12
1.1.1.2. CICLO DE LAVADO	14
1.1.2. PROCESO DE CENTRIFUGADO	15
1.2. OBJETIVO GENERAL.....	18
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.4. HIPÓTESIS.....	19
2. ESTADO DEL ARTE	20
2.1. OTROS MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA LAVADORA	24
3. MARCO TEÓRICO	26
3.1. CLASIFICACIÓN DE LA ROPA.....	26
3.2. PROPIEDADES DE LA ROPA	26
3.3. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO	27
3.4. BASES ESTADÍSTICAS PARA EL ANÁLISIS	28
3.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS.....	28
3.4.2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS	30
5. METODOLOGÍA.....	33
5.1. DEFINICIÓN.....	35
5.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	35
5.1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LAVADO.....	35
5.2. MEDICIÓN.....	37
5.2.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE LAVADO.....	37
5.2.2. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA.....	37
5.2.3. CTQ FLOW DOWN	41

5.2.4.	DIAGRAMA DE PARÁMETROS.....	42
5.2.5.	GAGE R&R	43
5.2.6.	PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS	47
5.3.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	48
5.4.	MEJORAR LA RESPUESTA DEL SISTEMA	54
5.5.	CONTROL DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA.....	66
5.6.	ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO	75
5.6.1.	MEJORAR LA RESPUESTA DEL CONSUMO ENERGÉTICO	83
5.6.2.	CONTROL DE LA RESPUESTA DEL CONSUMO ENERGÉTICO	86
5.7.	ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL TIPO DE ROPA	90
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO	93
	REFERENCIAS.....	95

NOMENCLATURA

D_E	es la energía eléctrica requerida por ciclo para retirar la humedad de la carga de prueba [kWh/ciclo]
DEF	es la energía nominal que requiere una secadora de ropa para retirar la humedad de las prendas [kWh/kg]
DUF	es el factor de uso de secado, por ciento de secado de cargas lavadas en una secadora de ropa [0.2%]
E_{TE}	es el consumo de energía total, para un ciclo normal, asumiendo que se utiliza un calentador de agua eléctrico externo [kWh/ciclo]
FE	es el factor de energía [l kWh/ciclo]
LAF	es el factor de ajuste de carga [0.52]
RMC	es el contenido de humedad remanente [%]
TLW_{max}	es el peso máximo de la carga de prueba [kg/ciclo]
V_C	es la capacidad volumétrica del contenedor de ropa [l]
ε	es la porosidad [adimensional]
S	es la saturación [adimensional]
RMC	Contenido de humedad residual (%)
α	Error tipo I: Nivel de significancia
β	Error tipo II
H_0	Hipótesis nula
H_a	Hipótesis alternativa
P	Probabilidad de rechazar la hipótesis nula
$SMER$	Tasa de extracción de humedad (kg/kWh)

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Modelos de secado ajustados a los datos experimentales, "t" = tiempo y "y"=humedad [19].	22
Tabla 2. Resultados obtenidos del Gage R&R.	44
Tabla 3. Estudio Gage R&R con interacción.	46
Tabla 4. Estudio Gage R&R sin interacción.	46
Tabla 5. Evaluación del Gage R&R.	47
Tabla 6. Diseño de experimentos.	48
Tabla 7. Resultados del diseño de experimentos para el RMC.	48
Tabla 8. Análisis de Diseño de Experimentos.	50
Tabla 9. Análisis de Diseño de Experimentos sin la interacción de las tres variables.	50
Tabla 10. Análisis de diseño de experimentos sin interacciones.	54
Tabla 11. Puntos centrales de medición del RMC.	54
Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) de la respuesta RMC.	55
Tabla 13. Análisis de puntos estrella en la respuesta del sistema.	58
Tabla 14. Análisis estadístico con puntos estrella.	60
Tabla 15. Análisis estadístico del RMC con puntos estrella y variables significativas.	62
Tabla 16. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.	67
Tabla 17. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.	68
Tabla 18. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.	69
Tabla 19. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.	70
Tabla 20. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.	71
Tabla 21. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.	72
Tabla 22. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 19 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.	73
Tabla 23. Resultados del diseño de experimentos para el SMER.	76
Tabla 24. Análisis de Diseño de Experimentos para el SMER.	77
Tabla 25. Análisis de Diseño de Experimentos para el SMER sin la interacción de las tres variables.	77
Tabla 26. Análisis de diseño de experimentos con variables significativas para el SMER.	80
Tabla 27. Puntos centrales del SMER.	83
Tabla 28. Análisis de curvatura para el SMER.	84
Tabla 29. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 620 rpm.	86
Tabla 30. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 800 rpm.	87
Tabla 31. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 800 rpm.	88

Tabla 32. Resultados del diseño de experimentos para el RMC.....	90
Tabla 33. Análisis de diseño de experimentos para el RMC respecto al tipo de ropa.....	91
Tabla 34. Análisis de varianza (ANOVA) de la respuesta RMC.	92

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Clasificación de las lavadoras.	13
Figura 2. Lavadora de carga superior [6].	13
Figura 3. Lavadora carga frontal [7].	14
Figura 4. Ciclo de lavado.	15
Figura 5. Esquema general de la lavadora.	16
Figura 6. Centrifugado de la ropa [10].	17
Figura 7. Diseño factorial 2^3	31
Figura 8. Diagrama de bloques funcionales del sistema de lavado.	36
Figura 9. Diagrama del sistema impulsor.	36
Figura 10. Descripción del ciclo de lavado.	37
Figura 11. Ropa tipo DOE.	38
Figura 12. Báscula para medir la carga de ropa.	38
Figura 13. Secadora de ropa universal.	39
Figura 14. Carga de ropa acomodada en la canasta de la lavadora.	39
Figura 15. Sistema instrumentado.	40
Figura 16. Carga de ropa pesada en la báscula al término de la prueba.	40
Figura 17. Resultados obtenidos por el software.	41
Figura 18. CTQ Flow Down del sistema.	42
Figura 19. Diagrama de Parámetros del sistema.	43
Figura 20. Gráfica del perfil de deshidratación y de velocidad.	45
Figura 21. Gráfica de prueba de normalidad para los resultados de RMC.	49
Figura 22. Gráfica de efectos principales para el RMC.	51
Figura 23. Gráfica de interacción de variables para el RMC.	52
Figura 24. Gráfica de Pareto para los efectos.	53
Figura 25. Gráfica de cubo de las variables del sistema para el RMC.	53
Figura 26. Gráfica de cubo con puntos centrales.	56
Figura 27. Gráfica de efectos principales con puntos centrales.	56
Figura 28. Gráfica de interacción entre variables con puntos centrales.	57
Figura 29. Puntos estrella representados en el cubo del diseño de experimentos.	57
Figura 30. Gráfica de normalidad para los datos con puntos centrales y puntos estrella.	59
Figura 31. Gráfica de Pareto de los efectos con puntos estrella.	60
Figura 32. Gráfica de efectos principales.	61
Figura 33. Gráfica de contorno del RMC respecto a velocidad y tamaño de carga.	63
Figura 34. Gráfica de contorno del RMC respecto a tiempo y tamaño de carga.	63
Figura 35. Gráfica de contorno del RMC respecto a tiempo y velocidad.	64
Figura 36. Superficie de respuesta del RMC respecto a tamaño de carga y velocidad.	64
Figura 37. Superficie de respuesta del RMC respecto a tiempo y velocidad.	65
Figura 38. Superficie de respuesta del RMC respecto a tiempo y tamaño de carga.	65
Figura 39. Optimización de la respuesta del sistema.	65
Figura 40. Optimización del RMC para una carga de 13.05 lb	66

Figura 41. Optimización del RMC para una carga de 5.9 lb.	66
Figura 42. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.....	67
Figura 43. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.....	68
Figura 44. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.....	69
Figura 45. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.....	70
Figura 46. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.....	71
Figura 47. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.....	72
Figura 48. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 19 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.....	73
Figura 49. Correlación del perfil de deshidratación de la ropa experimentalmente vs calculado.	74
Figura 50. Defectos en la canasta de la lavadora.	75
Figura 51. Gráfica de prueba de normalidad para los resultados de SMER.	76
Figura 52. Gráfica de efectos principales para el SMER.....	78
Figura 53. Gráfica de interacción de variables para el SMER.....	79
Figura 54. Gráfica de Pareto para los efectos en el SMER.....	79
Figura 55. Gráfica de cubo de las variables del sistema para el SMER.	80
Figura 56. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tiempo (min), Velocidad (rpm).	81
Figura 57. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tamaño (lb), Velocidad (rpm).....	82
Figura 58. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tiempo (min), Tamaño (lb).	82
Figura 59. Optimización del RMC y SMER para una carga de 16 lb.	85
Figura 60. Optimización del RMC y SMER para una carga de 13.05 lb.	85
Figura 61. Optimización del RMC y SMER para una carga de 6.5 lb.	86
Figura 62. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm.	87
Figura 63. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm.	88
Figura 64. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm.	89
Figura 65. Gráfica de prueba de normalidad para el RMC respecto al tipo de ropa.	91
Figura 66. Gráfica de efectos principales para el RMC respecto al tipo de ropa y tamaño.....	92

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Consumo de energía eléctrica por ciclo para retirar la humedad de la carga.....	17
Ecuación 2. Factor de energía.....	18
Ecuación 3. Porosidad de un material.....	26
Ecuación 4. Saturación.....	27
Ecuación 5. Planteamiento de hipótesis nula.....	29
Ecuación 6. Planteamiento de hipótesis alternativa.....	29
Ecuación 7. Efectos principales.....	32
Ecuación 8. Efectos de interacción de variables.....	32
Ecuación 9. Contenido de Humedad Residual.....	37
Ecuación 10. Ecuación lineal de predicción del RMC.....	53
Ecuación 11. Distancia para los puntos estrella.....	57
Ecuación 12. Ecuación de predicción del RMC.....	61
Ecuación 13. Ecuación para la tasa de extracción de agua por consumo de energía.....	75
Ecuación 14. Ecuación para predecir el SMER.....	80

1. INTRODUCCIÓN

1.1. ANTECEDENTES

El tener ropa limpia siempre ha sido una necesidad desde hace mucho tiempo, de tal forma que, en los inicios, antes de que existiera algún dispositivo para la limpieza de la ropa, las personas limpiaban sus prendas golpeándolas contra las rocas o frotándolas con arenas abrasivas y usando el agua de los arroyos para quitar la suciedad. Más tarde se introdujo el uso de cepillos hasta llegar a la tabla de fregar; posteriormente, en 1858, Hamilton Smith patentó la lavadora rotativa y fue hasta 1874 que se diseñó la primera lavadora para uso doméstico construida por William Blackstone. Después, en 1908 se introdujo la primera lavadora eléctrica, tiempo más tarde, en 1949, se registró la invención de las tarjetas de control para lavadoras y en 1951 se fabricó la primera lavadora automática [1].

La lavadora es una máquina diseñada para lavar ropa y, como se mencionó anteriormente, a lo largo de los años ha ido evolucionando; de tal forma que, las personas puedan ahorrar tiempo y esfuerzo, logrando así tener su carga de ropa limpia [1]. En la actualidad, dichos electrodomésticos, deben cumplir con ciertas regulaciones gubernamentales, tales como: eficiencia energética y consumo de agua, entre otros, los cuales juegan un papel importante tanto para la comercialización como para lograr que sea un producto atractivo económicamente [2].

En la lavadora, la limpieza de la ropa se alcanza a través de la mezcla de ésta y el agua con detergente, y otros aditivos, los cuales se someten a movimiento o agitación dentro de un tambor a determinada velocidad de giro [3]. Posteriormente, el agua de lavado se bombea para extraerse hacia el drenaje, y nuevamente se agrega agua fresca y se agita la ropa de nuevo por un tiempo determinado para eliminar los restos de detergente; a este proceso se le conoce como enjuague. Después se bombea el agua y la ropa se exprime haciéndola girar rápidamente [1]; así, mediante el efecto de fuerza centrífuga, durante un tiempo determinado hasta lograr el nivel de deshidratación deseado [4].

Por lo tanto, el proceso de lavado conlleva la acción química a través del uso de detergentes y otros aditivos para el lavado de ropa, así como acción mecánica, a través del uso de algún tipo de agitador: de aspas, impulsor o propela o infusor para lavadoras de eje vertical, que permiten el movimiento del agua y de la carga de ropa. Además, energía térmica [4], donde, por ejemplo, el incremento de la temperatura en el agua contribuye en ablandar los tejidos y, por tanto, facilitar la remoción de la mugre, así como la eliminación de bacterias.

1.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA LAVADORA

Las características principales de las lavadoras son:

- Panel de control que le permite al usuario programar el ciclo de lavado de acuerdo con sus necesidades dependiendo de la cantidad y tipo de ropa, suciedad, temperatura del agua, nivel de centrifugado, etc.
- Dispensador de detergente y aditivos de lavado (líquido y/o en polvo), así como para cloro.
- Canasta que sirve de contenedor para la carga de ropa.
- Infusor u otro sistema de lavado para generar la acción mecánica.
- Conexiones tanto para suministrar agua de la red, así como para descarga del agua sucia.
- Sistema impulsor que incluye la transmisión de potencia de engranes planetarios y transmisión de banda-poleas y el motor de inducción.
- Tina que aloja a la canasta concéntricamente por el lado interior y por la parte inferior externa se aloja el sistema impulsor y las bombas de recirculación de agua y de extracción de agua al drenaje.

1.1.1.1. TIPOS DE LAVADORA

En la Figura 1 se muestra un diagrama de la clasificación de la lavadora ([3] y [5]), de acuerdo con su tipo de carga: superior (eje vertical) u frontal (eje horizontal).

Las lavadoras que se denominan como de carga superior son aquellas cuya canasta es de eje vertical y por ende la carga de ropa sucia se hace por la parte superior del producto. En la Figura 2 se muestra la posición de los principales componentes de la lavadora: Panel de control, puerta, aro de balance, canasta e infusor. El infusor, impulsado por el sistema impulsor (motor, transmisión de potencia) producen el movimiento de la ropa y solución de lavado durante el proceso de limpieza. Para generar un buen movimiento de la ropa (energía mecánica) se requiere de la combinación de varios parámetros; tales como, el arco de giro del infusor hacia ambos lados (sentido horario y antihorario), la frecuencia de agitación, el nivel de agua, etc. El resultado del desempeño de lavado depende del balance de estos parámetros. Este modelo de lavadoras es mayormente utilizado debido a la comodidad ergonómica que ofrece.

Por su parte, las lavadoras de carga frontal son aquellas máquinas donde la carga de ropa sucia se hace por la parte frontal. En la Figura 3 se muestra la colocación de los principales componentes de la lavadora: Panel de control, puerta, compartimientos para el detergente y aditivos, tambor, panel para mantenimiento, correa de transmisión. La limpieza de la ropa se hace mientras se va girando el tambor interno, en ambos sentidos (horario y antihorario); el tambor externo sirve para retener el agua.

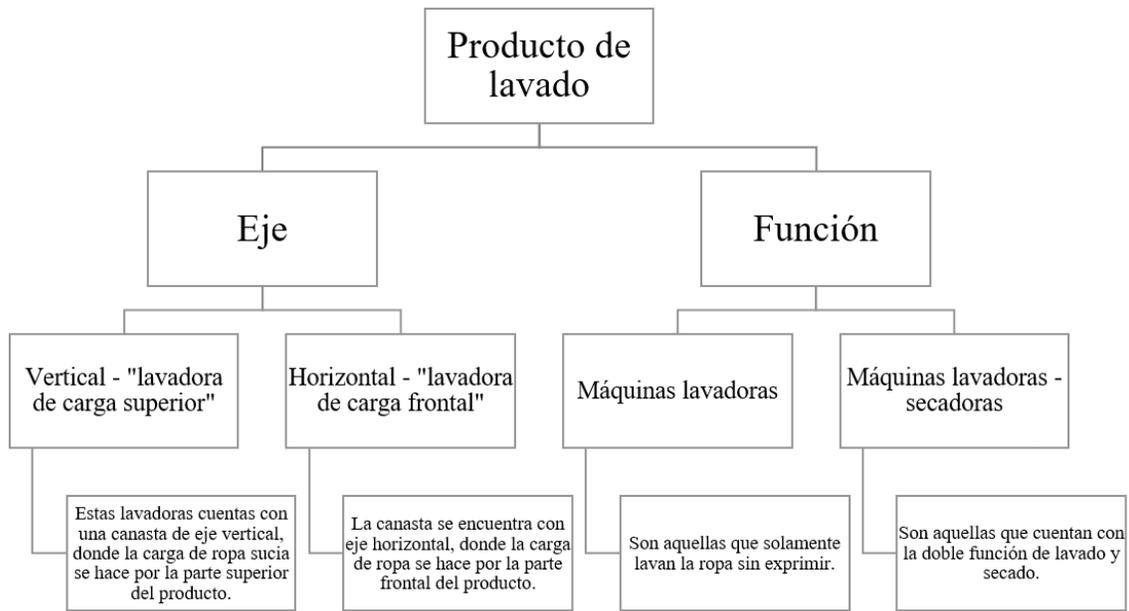


Figura 1. Clasificación de las lavadoras.

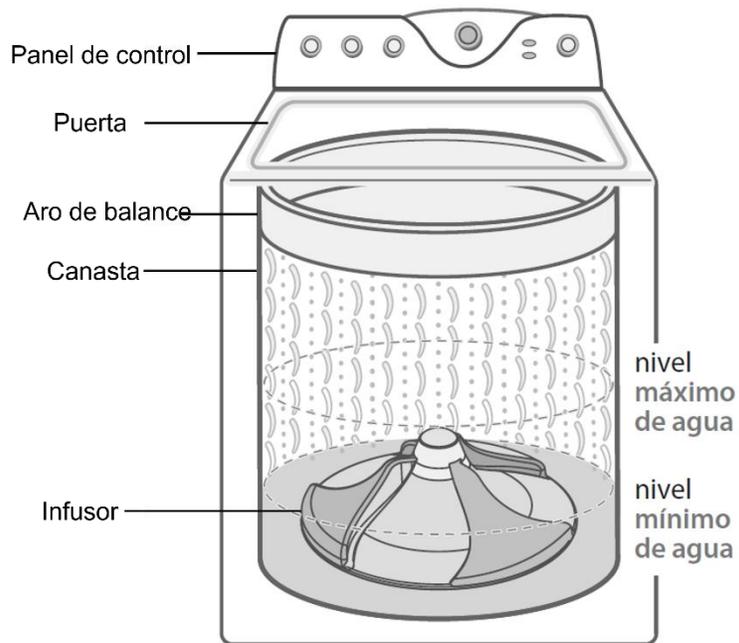


Figura 2. Lavadora de carga superior [6].

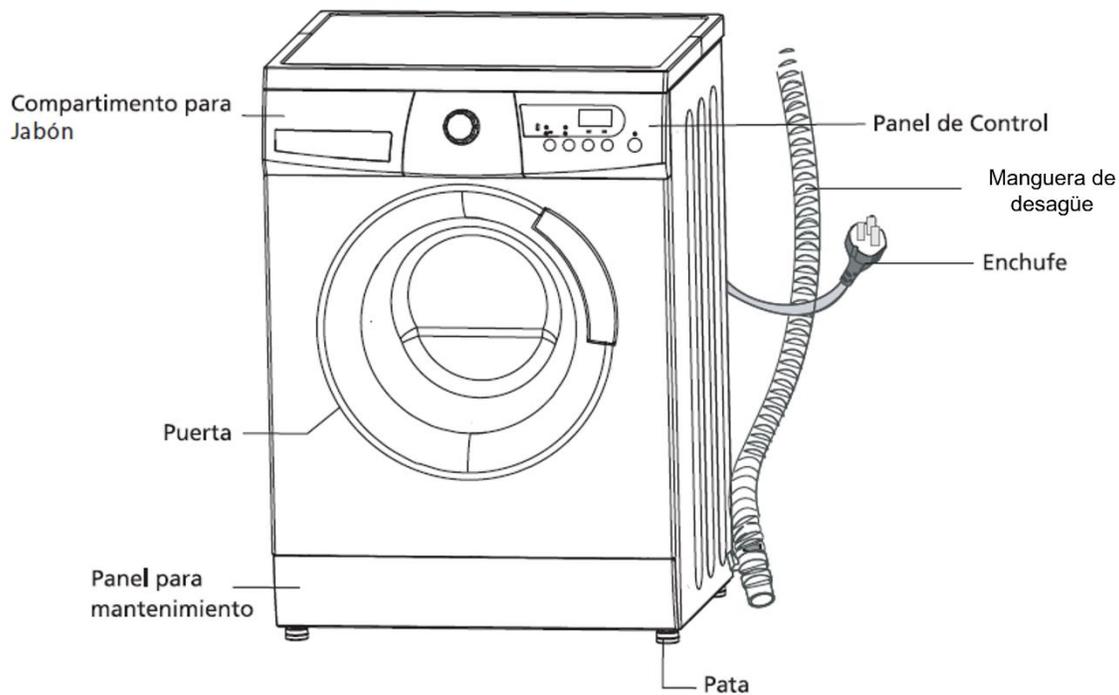


Figura 3. Lavadora carga frontal [7].

1.1.1.2. CICLO DE LAVADO

El ciclo de lavado consta de varias etapas, como se muestra en la Figura 4: lavado, enjuague y exprimido. El usuario interviene al inicio colocando en la lavadora la carga de ropa a ser lavada, se agregan los aditivos de lavado (detergente, suavizante y otros), se selecciona el programa de lavado adecuado, se configuran las funciones que debe ejecutar la lavadora y se da inicio al programa de lavado.

- Fase de lavado: el ciclo de lavado comienza con el llenado de agua. Una vez que se alcanza el nivel de agua correspondiente al tamaño y tipo de la carga, el motor que mueve al infusor se acciona y comienza a homogeneizar la mezcla entre el agua, el detergente y la ropa; la acción de este movimiento y la acción química empiezan a desprender la suciedad de la ropa y mantenerla suspendida en la solución. Una vez terminado la fase de lavado, se drena la solución de lavado.
- Fase de enjuague: después se agrega agua limpia al mismo nivel del que se lavó para realizar el enjuague. Éste consiste en agitar durante un tiempo determinado para reducir la concentración de detergente de entre las fibras a un nivel aceptable. Después se extrae la solución hacia el drenaje.
- Fase de exprimido: el exprimido es una de las fases muy importantes en un ciclo de lavado; ya que, es muy valorado por los usuarios que la lavadora entregue la carga

exprimida. Por otro lado, el nivel de exprimido es uno de los parámetros que más contribuye en la ecuación del factor de consumo de energía (FE) de acuerdo con la norma NMX-J-585. El parámetro de contenido de humedad remanente de la carga de ropa se representa con el RMC (Remaining Moisture Content), que es el porcentaje de humedad objetivo al finalizar el ciclo de centrifugado y debe ser cuantificado. Esta fase cuenta con unas rampas de velocidad que permiten extraer el agua de enjuague paulatinamente hasta llegar a la velocidad final de exprimido, donde la canasta va girando a ciertas revoluciones por minuto en función del tipo de ciclo seleccionado y durante determinado tiempo.

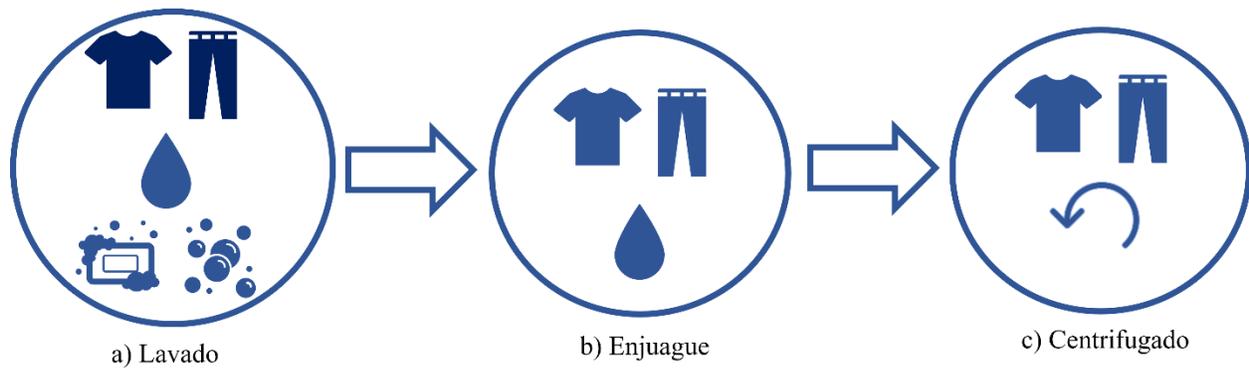


Figura 4. Ciclo de lavado.

1.1.2. PROCESO DE CENTRIFUGADO

El proceso de centrifugado se basa en el principio de hacer girar una masa alrededor de un eje central sometida a una fuerza centrífuga, donde dicha fuerza centrífuga ejercida sobre la masa es equivalente al peso de la masa por su tasa de aceleración en la dirección de la fuerza [8].

Como se ha mencionado anteriormente, el centrifugado es una etapa relevante en el proceso de secado de la ropa, así como, para una gran variedad de propósitos relacionados a la separación de materiales sólido-líquido [9]:

- Alimentación y agroindustria: recuperación de cristales de azúcar, deshidratación de ensaladas y verduras, procesamiento de la leche, zumo de naranja sin pulpa, limpieza de aceite de fritura, etc.
- Farmacéutica y biotecnología: recuperación de células (levaduras, bacterias), clarificación de caldos de fermentación, etc.
- Industrias medioambientales: recuperación de sólidos de aguas residuales, tratamiento de aguas residuales, eliminación de rebaba de los lubricantes de corte industrial, etc.

- Industrias químicas: separación de carbón negro de los lodos, aislamiento de productos sintéticos, separación de isótopos en fase gaseosa, etc.

Existen dos tipos generales de centrifugas [8]:

- Centrifugas de sedimentación: en las que una fase pesada se separa de una fase más ligera, por lo que se requiere una diferencia de densidad.
- Centrifugas de filtración: en las que la fase sólida es retenida por un medio como, por ejemplo, una tela filtrante, que permite el paso de la fase líquida.

Particularmente, el proceso de centrifugado en una lavadora constituye una centrifuga de tipo filtración, ya que la canasta sirve como filtro, cuya función principal es contener la carga de ropa, además de permitir el flujo del agua proveniente de la carga de ropa a través de un arreglo de barrenos sobre la pared de ésta, como se muestra en la Figura 5. En este esquema interior de la lavadora se muestra que, la canasta cuenta con barrenos que permiten la salida del agua durante el centrifugado. La tina contiene a la canasta, el infusor y el tubcover que le da rigidez en la parte superior, y por la parte inferior aloja al sistema impulsor y bombas de drenado y recirculado, así como contiene toda el agua de lavado.

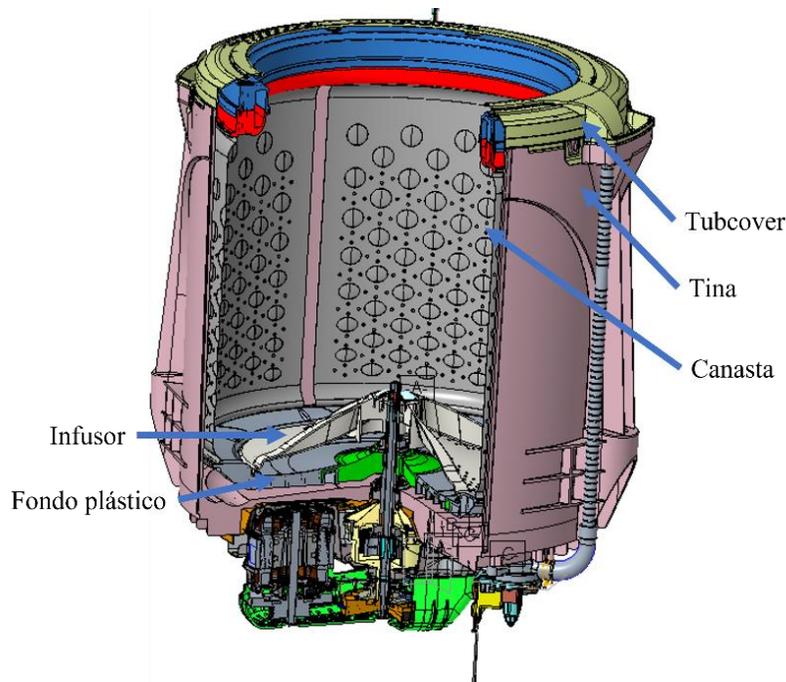


Figura 5. Esquema general de la lavadora.

Después del drenado, el agua remanente que se queda en las prendas por efecto de tensión superficial. Al iniciar el centrifugado el agua también empieza a fluir en la dirección radial a través de la carga hasta llegar a la pared de la canasta, donde el agua encuentra salida a través de los barrenos, como se muestra en la Figura 6. El agua cae por gravedad al fondo de la tina y una bomba la expulsa al drenaje.



Figura 6. Centrifugado de la ropa [10].

Como se mencionó en la sección de Ciclo de lavado, una de las razones importantes del estudio del RMC es que, el consumo de energía por ciclo requerido para retirar la humedad de la carga de ropa es uno de los principales contribuyentes que afectan el factor de energía (FE). Este factor es una medida global de la eficiencia de una lavadora de ropa, que se expresa como la relación del volumen del contenedor de ropa y la suma del consumo de energía de la lavadora de ropa. El consumo de energía total, para un ciclo normal, asumiendo que se utiliza un calentador de agua eléctrico externo en kilowatts hora por ciclo (E_{TE}) y la energía eléctrica requerida por ciclo para retirar la humedad de la carga de prueba en kilowatts hora por ciclo (D_E) de acuerdo con la norma NMX-J-585 [11].

En la norma se especifica cómo se calcula el consumo de energía eléctrica por ciclo que se requiere para retirar la humedad de la carga de prueba, de acuerdo con [11]:

$$D_E = LAF \times TLW_{\max} \times (RMC - 4\%) \times DEF \times DUF \quad (1)$$

donde:

- D_E es la energía eléctrica requerida por ciclo para retirar la humedad de la carga de prueba, en kilowatts hora por ciclo.
- LAF es el factor de ajuste de carga, igual a 0.52.
- TLW_{\max} es el peso máximo de la carga de prueba, en kilogramos por ciclo.
- RMC es el contenido de humedad remanente, en porciento.
- DEF es igual a 1.1; que es la energía nominal que requiere una secadora de ropa para retirar la humedad de las prendas, en kilowatts hora por kilogramo de agua removida.
- DUF es el factor de uso de secado, por ciento de secado de cargas lavadas en una secadora de ropa, que es igual a 0.2.

El factor de energía se calcula de acuerdo con [11]:

$$FE = \frac{V_C}{(E_{TE} + D_E)} \quad (2)$$

donde:

- FE es el factor de energía, en litros por kilowatts hora por ciclo.
- V_C es la capacidad del contenedor de ropa en litros.
- E_{TE} es el consumo de energía total, para un ciclo normal, asumiendo que se utiliza un calentador de agua eléctrico externo en kilowatts hora por ciclo.
- D_E es la energía eléctrica requerida por ciclo para retirar la humedad de la carga de prueba en kilowatts hora por ciclo.

Así, este trabajo busca determinar un modelo estadístico-experimental que permita estudiar el proceso de deshidratación a través de la variable RMC, que ayudará a tener una mejor comprensión de la física de extracción de agua en cargas de ropa. Con esto se podrá determinar virtualmente el tiempo de centrifugado para alcanzar el RMC objetivo, así como la velocidad final de centrifugado para diferentes programas de lavado. Así, estos resultados son de gran utilidad en etapas tempranas de proyectos de diseño, de tal manera que, se podría disminuir el uso de recursos y tiempo al caracterizar una lavadora.

Por todo lo anterior, los objetivos y la hipótesis de la presente tesis se muestran a continuación.

1.2. OBJETIVO GENERAL

Describir el proceso de deshidratación de la ropa durante el centrifugado en una lavadora de eje vertical mediante un modelo estadístico-experimental que permita identificar las variables que impactan significativamente en la respuesta del sistema para contar con una herramienta de predicción del ciclo de centrifugado.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener los valores de RMC mediante las pruebas experimentales con base en la norma IEC 60456-5 y metodología Seis Sigma para determinar los parámetros principales que afectan el proceso de secado.

- Definir la función de transferencia que describa el RMC mediante el análisis del impacto de las variables y sus interacciones que sirva como herramienta de predicción del porcentaje de humedad residual.
- Definir un parámetro que permita el estudio de la eficiencia del sistema mediante las pruebas experimentales con base en la norma IEC 60456-5 y metodología Seis Sigma para determinar los parámetros principales que afectan el consumo de energía.
- Definir la función de transferencia que describa la eficiencia del sistema mediante el análisis del impacto de las variables y sus interacciones que sirva como herramienta de predicción de parámetros de operación óptimos en el centrifugado de la lavadora.

1.4. HIPÓTESIS

Es posible desarrollar un modelo estadístico-experimental que permita entender el proceso de deshidratación de la ropa durante el proceso de centrifugado en una lavadora de eje vertical, a través de la identificación de variables cuyo impacto es significativo en la respuesta del sistema. De esta manera, se podrá contar con una herramienta útil para predecir y/u optimizar el ciclo de centrifugado, ahorrando tiempo y recursos.

2. ESTADO DEL ARTE

Actualmente, los fabricantes de electrodomésticos compiten día a día por ofrecer en el mercado productos más eficientes y fáciles de usar. De ahí la importancia de entender la complejidad de los procesos que experimenta una lavadora durante un ciclo de lavado, incluyendo la variedad de tipos de tejidos, materiales, peso y su geometría, mismas que existen en las diferentes prendas a ser lavadas. Específicamente, durante el exprimido mediante centrifugado, dichas características complican de sobremanera el entendimiento del fenómeno. Sin embargo, en la literatura algunas investigaciones sobre el centrifugado en las que se han obtenido algunas aproximaciones sobre deshidratación de materiales.

Específicamente, estudios sobre el secado de textiles es limitado, sin embargo, existen numerosos estudios sobre la técnica de secado de alimentos [12], [13]. Por otro lado, principalmente se ha estudiado el secado de medios porosos incluyendo tanto la transferencia de masa como de calor, donde la incorporación de los conocimientos de la termodinámica básica y los fenómenos de transporte para la descripción del secado ha sido uno de los grandes retos para investigar [14]. Se han llevado a cabo estudios teóricos y experimentales sobre el secado [15], para predecir y determinar la transferencia de humedad, en particular, los perfiles de secado de diversos productos, además, en la literatura existen algunos modelos sobre los parámetros de transferencia de humedad [16], con una gran variación de valores debido a la complejidad de los productos y los métodos de estimación [17]. Adicionalmente, para cierto modelo de secadoras domésticas para ropa, se han desarrollado las ecuaciones de gobierno a partir de balances de masa y energía de cada una de las etapas de la secadora mediante el uso del principio de conservación de masa y la primera ley de la termodinámica, donde se aprovecharon también las pruebas experimentales para el desarrollo y validación del modelo con el propósito de entender los fenómenos presentes en el secado de ropa y generar propuestas de mejora [18].

El proceso físico de interés aquí es la deshidratación de la ropa durante el ciclo de centrifugado, el cual, es un fenómeno en el que se produce la transferencia de humedad desde un medio poroso (la ropa) hacia el entorno que induce cambios en el producto.

Zambonin et.al. [19], presentan dos métodos basados en la regresión para determinar el contenido de humedad de la ropa que es introducida en un aparato de secado de ropa doméstica. Ese trabajo tiene el objetivo de desarrollar sensores blandos (SS por sus siglas en inglés, Soft Sensors) para una lavadora-secadora doméstica con bomba de calor para proporcionar una estimación de la señal deseada, es decir, la humedad de la ropa durante el secado, evitando el uso de sensores físicos adicionales, para mejorar el rendimiento actual y el consumo de energía del ciclo de secado.

La transferencia de algún fluido en los medios porosos es un fenómeno complicado, se ha afirmado que la estructura de los medios porosos es demasiado compleja para ser descrita con precisión tanto en microescala como en macro escala [20], así como que dicho proceso es tan sofisticado, que los fenómenos de transporte se atribuyen a los efectos de la temperatura, el contenido de humedad y la presión desde el punto de vista del macro fenómeno [21].

Zambonin et.al [19] desarrollaron un método de regularización de programación genética a partir de una regresión de datos experimentales con el propósito de encontrar modelos adecuados para lograr una aproximación con respecto a los datos reales. También, ellos describen métodos utilizados para modelar la transferencia de humedad durante el secado, primeramente, a través del modelo de difusión y principios desarrollados anteriormente, así como después a través de un modelo propuesto de adquisición de datos.

El proceso de difusión mencionado por Zambonin et.al. [19] [22], ha sido tratado como el principal fenómeno implicado en la transferencia de humedad a través de medios porosos como la ropa. De hecho, en varios casos, el fenómeno de transferencia de humedad por advección también debe considerarse en el contexto de los medios porosos, donde la advección de humedad es el transporte de vapor de agua por el aire.

Adicionalmente, Berger et.al. [23] muestran la inclusión de un término advectivo en el modelo y los resultados en el contexto de la transferencia de humedad en elementos de construcción porosos, mientras que, Gasparin et.al. [24] discuten métodos numéricamente eficientes para la difusión de la humedad, con un esfuerzo computacional reducido. Por otro lado, Azeem et.al. [25], se centran en una revisión sobre el comportamiento de transporte de humedad líquida de la tela, afirmando que el transporte de agua líquida en la tela no se puede definir en una sola condición, sino en un rango de condiciones que deben medirse con respecto a la capacidad de transportar humedad líquida.

La consideración de estos trabajos y otros en la literatura refuerza que, describir en detalle el mecanismo de transferencia de humedad en medios porosos es complejo, porque los modelos físicos precisos implican una gran cantidad de parámetros y otras suposiciones. Por estas razones, la descripción física simple proporcionada en [19] se ha utilizado como punto de partida para estudiar el proceso de interés e interpretar los resultados de los modelos basados en datos.

Zambonin et.al. [19] propusieron tres métodos para lograr una aproximación de los datos estimados con respecto a los datos reales:

- Regresión lineal regularizada (método 1): se ha aprovechado para evaluar el rendimiento de la estimación utilizando dependencias lineales simples entre las señales de entrada (disponibles en línea) y la salida (serie temporal de humedad de la ropa).
- Programación Genética para Regresión Simbólica (Método 2): con las mismas entradas y salidas del método anterior. Este procedimiento ha sido adoptado para explorar diferentes dependencias no lineales junto con rendimientos de estimación.
- Modelo polinomial para la predicción del ciclo de secado (Método 3): aquí se procesan las señales disponibles para obtener las características. Estas características luego se usan como entradas para estimar los parámetros de un modelo (seleccionado fuera de línea), que usa el tiempo transcurrido como entrada adicional para determinar la humedad de la ropa. A diferencia de los métodos anteriores, proporciona una curva suave que es más adecuada.

Como conclusión del trabajo [19], se estableció que los mejores modelos no lineales seleccionados por regresión simbólica (Método 2) siempre involucran señales principales de temperatura y par del motor, que confirman el resultado obtenido usando regularización dispersa y regresión lineal (Método 1), donde la estructura del modelo es fija y siempre lineal. Este tipo de señales son, por tanto, las más útiles para ese fin. Los modelos proporcionados por los métodos 1 y 2 utilizan las señales disponibles como predictores, que afectan la estimación con su ruido. Además, con base al parámetro R^2 , que es el parámetro que indica el ajuste de un modelo de regresión a los datos reales, donde el valor más cercano a 1 indica el mayor ajuste, entonces, el mejor modelo para la descripción del contenido de humedad de la ropa como una serie de tiempo durante los ciclos de secado según los datos reales disponibles, es el modelo polinomial de tercer grado (Método 3), y proviene de una comparación entre varios modelos mostrados en la Tabla 1.

Tabla 1. Modelos de secado ajustados a los datos experimentales, "t" = tiempo y "y"=humedad [19].

Model	Expression	RMSE [%]	R^2 Index	#Params
Lewis	$y = e^{-at}$	9.069	0.781	2
Henderson & Pabis	$y = ae^{-bt}$	1.147	0.996	3
quadratic	$y = a + bt + ct^2$	1.051	0.997	3
poly3	$y = a + bt + ct^2 + dt^3$	0.399	0.999	4
rational	$y = \frac{a + bt}{1 + ct + dt^2}$	6.564	0.897	4
gaussian	$y = ae^{\frac{-(t-b)^2}{2c^2}}$	0.417	0.999	4
sigmoid	$y = a + b \frac{1}{(1 + ce^t)}$	0.496	0.999	3
two exp	$y = ae^{-bt} + ce^{-dt} + e$	0.746	0.998	5
mixed	$y = ae^{-bt} + ct^2 + dt + e$	0.453	0.999	5

Por su parte, B&C Technologies [26] han profundizado en el conocimiento de la retención de la humedad. Además, en el cómo esta medida influye en la eficacia general y el rendimiento de las lavadoras comerciales, así como en la manera en que afecta a las operaciones de secado y vida útil de la ropa. También, ellos describen la retención de humedad como el agua que permanece en la ropa una vez finalizado el proceso de lavado. Este proceso consiste en mojar la ropa, aplicar los productos químicos adecuados, enjuagar dichos químicos y, por último, extraer el agua. Este último paso de extracción determina la retención final de humedad de los productos y está directamente relacionado con la fuerza G con la que se extraen los productos. Finalmente, concluyen que, en cuanto mayor sea la fuerza de extracción, menor será la retención de humedad. Inclusive, es importante tener en cuenta que este proceso no es lineal, ya que duplicar la fuerza G no reducirá automáticamente la retención de humedad a la mitad.

Por ejemplo, 100 libras de toallas de felpa secas contendrán alrededor de 98 libras de agua después de ser lavadas y centrifugadas a 100G. Ahora, si se toman esas toallas todavía muy húmedas y se colocan en una secadora, esas 98 libras de agua tendrán que ser evaporadas, es decir, lo equivalente a 11.75 galones de agua retenida que debe ser evaporada [26].

Por lo tanto, un buen centrifugado (una mayor fuerza G de centrifugación), podría reducir la capacidad total de una secadora en un 20%, ya que, al tener menos agua que evaporar implica

menos tiempo total para secar, aumentando la eficiencia de la secadora. Así como menos tiempo de secado significa menos combustible consumido en el proceso, reduciendo los costos directos y el desgaste de la secadora [26], [27].

Además, en la literatura también se pueden encontrar un par de trabajos relacionados al estudio del proceso de deshidratación de la ropa, uno de ellos es presentado por Momen et. al. [28] donde se habla sobre la importancia de mejorar el proceso de secado para una reducción del consumo de energía en las secadoras de ropa, mejorando la tecnología existente y desarrollando alternativas diferentes. Se hace énfasis en el secado mecánico, tales como métodos vibratorios, centrífugos y basados en prensas. Se llevaron a cabo diversos experimentos en una muestra de tejido estándar conocido como carga DOE (50% algodón, 50% poliéster) especificada por el Departamento de Energía de Estados Unidos. A partir de experimentos de porosimetría con mercurio se determinó la distribución del tamaño de los poros, densidad aparente y porosidad de la tela. Así como se combinaron los datos resultantes de estos experimentos con modelos matemáticos desarrollados para calcular los límites máximos teóricos de rendimiento para el secado mecánico de tela estándar.

Este estudio muestra que los procesos de secado mecánico, incluido el secado a presión, el secado centrífugo y el secado vibratorio, suelen ser mucho más eficientes que los procesos convencionales de secado por evaporación térmica. El documento comparó las eficiencias energéticas teóricas y las tasas de secado que pueden lograrse mediante diferentes procesos de secado mecánico. Este estudio también muestra experimentalmente que el secado a presión puede lograr las mayores eficiencias, seguido del secado por centrifugado y el secado por vibración.

Por otro lado, Battistela et. al. [29] presentan un estudio experimental donde se propone un modelo empírico sobre el contenido de agua residual de una carga de algodón durante la fase de extracción de agua en lavadoras. Se menciona que la literatura carece de datos sobre el rendimiento de deshidratación de los textiles y, por lo tanto, se propone un método para medir y predecir la retención de agua con respecto a los principales parámetros que afectan el proceso de lavado. El documento primero proporciona una encuesta sobre los modelos de retención desarrollados para diferentes aplicaciones. Luego presenta una nueva metodología para estimar el contenido de humedad residual en función del tiempo y los parámetros centrífugos, lo que evita llevar a cabo mediciones que consumen mucho tiempo. La metodología se propone con respecto a un ciclo de lavado personalizado, lo que permite una validación experimental con lavadoras comerciales. Finalmente, se realiza un análisis de escala para verificar la influencia de la forma del tambor en los rendimientos de retención. Los resultados confirman la validez y versatilidad del modelo propuesto en una amplia gama de lavadoras profesionales.

Sin embargo, también en la literatura se pueden encontrar trabajos que estudian otros fenómenos presentes en la lavadora, que claramente tienen que ver con la etapa de centrifugado, pero enfocado a otros fenómenos físicos. Por ejemplo, en [30] se presenta un estudio con el objetivo de mejorar la eficiencia de un diseño antivibración para lavadoras/secadoras de carga frontal y proponer un modelo de dinámica de deshidratación que combina un modelo mecánico con un algoritmo aleatorio.

Joko & Honda [30] comentan que, durante la deshidratación, a medida que gira el tambor, la ropa experimenta una fuerza centrífuga y es presionada contra la pared interior del tambor. En ese momento, si la distribución de la ropa está desequilibrada dentro del tambor, la fuerza centrífuga desequilibrada provoca una fuerza de excitación, y el tambor y la tina exterior que lo rodea vibran juntos. Debido a esto, las lavadoras/secadoras de carga frontal están equipadas con control de inicio de deshidratación para reducir la vibración durante la deshidratación. El modelo propuesto en [30] se enfoca en la distribución de probabilidad del comportamiento de la ropa durante la deshidratación.

En cambio, otro enfoque para evaluar la deshidratación de la tela es a través de una investigación experimental de la relación entre la tensión superficial líquida y la retención de agua de la tela en procesos como centrifugado. En [31] se utilizaron tensioactivos con diferentes tensiones superficiales y se realizaron experimentos de deshidratación de tejido de algodón. Los resultados mostraron que una tensión superficial más baja es beneficiosa para reducir la retención de agua de la tela al centrifugar y mejorar la eficiencia de secado. Se asumió que el agua con baja tensión superficial es fácil de separar de la tela, mejorando así la eficiencia de deshidratación y secado.

2.1. OTROS MODELOS PARA EL ESTUDIO DE LA LAVADORA

Por otro lado, Bae et.al. [5], han hecho desarrollos en torno a modelos matemáticos respecto al proceso de centrifugado, pero con enfoque al balance hidráulico en condiciones de estado estacionario. Todo esto a partir de un modelo de giro de una lavadora de eje vertical, con el objetivo de implementar un análisis dinámico de una lavadora automática durante el modo de centrifugado. Dicho modelo fue validado por el resultado experimental de la fuerza centrífuga.

Además, Bae et.al. [5], presentan las formulaciones analíticas de un balanceador hidráulico y una lavadora de eje vertical. A partir de un modelo giratorio de una lavadora, la fuerza centrífuga del equilibrador hidráulico se puede calcular a partir de la excentricidad de la masa desequilibrada y la distancia centroidal del equilibrador de fluido.

Comparando la simulación con el experimento, el modelo matemático presentado en [5], muestra una buena concordancia con el comportamiento real de la lavadora. Para investigar qué parámetros tienen efecto sobre la vibración de la lavadora, se realizó un estudio de parámetros. De este estudio. Se observó que la vibración se reduciría aumentando la masa, disminuyendo la relación volumétrica y aumentando el radio interior del balanceador hidráulico. Por lo tanto, el efecto del equilibrador hidráulico puede maximizarse cuando la densidad del fluido en el equilibrador hidráulico debe ser grande. Esta es la razón por la que el agua salada es más eficaz como fluido de trabajo que el agua dulce o el aceite. Para mejorar el rendimiento de la lavadora, en ese trabajo se presentó el diseño adecuado del balanceador hidráulico.

También, en [32], se presenta un modelo simplificado tridimensional del comportamiento dinámico de una lavadora de eje horizontal. Dicho modelo se utilizó para predecir la inestabilidad del sistema durante el ciclo de centrifugado, del cual resultaron dos métodos de estabilización. El método basado en el diseño reduce la inestabilidad y es rentable, mientras que, el método basado

en el control elimina la inestabilidad y las vibraciones y se asocia con el equilibrio activo. Ambos métodos satisfacen la tendencia actual de las lavadoras con todas sus funciones.

Por su parte, en [33] se presenta el desarrollo de un modelo matemático que considera las respuestas dinámicas de los componentes de un sistema combinado de lavadora y secadora, utilizando los datos suministrados para una máquina en específico con el objetivo de eliminar el sistema de equilibrado mecánico para los modelos en producción de ese tiempo. Dicho modelo, que representa una técnica de autoequilibrio basado en el método de redistribución ordenada, fue simulado por computadora, dando como resultado una coincidencia con las ejecuciones realizadas en el sistema físico real.

Adicionalmente, Wulandari & Abdullah [34], trabajaron en el diseño y simulación de un sistema de control de lógica difusa en una lavadora con el fin de facilitar su uso, reducir el tiempo, el consumo de electricidad y el agua de lavado. Se determinó el valor de la velocidad de lavado en base a cuatro entradas diferentes y la estabilidad de la velocidad del motor de la lavadora en base a tres entradas. El ajuste de la estabilidad de la velocidad del motor de la lavadora se controla para tener una velocidad constante a pesar de los cambios de carga.

Como se mencionó anteriormente, la transferencia de masa y calor ha sido estudiada para el entendimiento del fenómeno de secado y la deshidratación de la ropa en secadoras domésticas. Sin embargo, con el presente trabajo se busca, estudiar el fenómeno de secado, a través de la deshidratación de la ropa incluyendo solamente el transporte de masa en medios porosos. Donde se deja a un lado la transferencia de calor, ya que no se está utilizando una secadora, sino más bien, una lavadora en la etapa de centrifugado.

La presente tesis se enfoca en el desarrollo de un modelo experimental que permita el entendimiento del proceso de deshidratación de cargas de ropa en una lavadora de uso doméstico a través de la obtención del RMC para establecer rangos de operación óptimos; identificando las variables cuyo impacto es significativo en la respuesta del sistema, así como obtener una función de transferencia capaz de predecir el RMC.

3. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presentan los conceptos y temas relevantes para poder llevar a cabo el desarrollo del modelo experimental, tales como las propiedades de la ropa, el contenido de humedad, y bases estadísticas para el análisis, entre otros.

3.1. CLASIFICACIÓN DE LA ROPA

Es importante mencionar la clasificación de la ropa en función del origen de los tejidos que se utilizan, los cuales pueden ser:

- Telas vegetales, como el algodón.
- De origen animal, como la lana.
- Artificiales, como el poliéster.

Pero también se pueden clasificar en función de los materiales que se utilicen para crear tejidos, como puede ser: batista, brocada, fieltro, lona, encaje, crepe y seda. [18]. Para este trabajo se considera un tipo de ropa compuesto por poliéster y algodón para estudiar el RMC durante el proceso de centrifugado, donde las principales propiedades a considerar son la porosidad y la saturación de las mismas.

3.2. PROPIEDADES DE LA ROPA

La ropa tiene gran variedad de propiedades, entre las principales se encuentra:

- Porosidad: la relación entre el vacío total en el material o volumen de poros, y el volumen total del material se conoce como la porosidad de un material [35], la cual se muestra en la Ecuación 3:

$$\varepsilon = \frac{\text{volumen}_{\text{poros}}}{\text{volumen}_{\text{total}}} \quad (3)$$

Existen otro tipo de fracciones que son utilizadas y se deducen a partir del concepto de porosidad, por ejemplo, una fracción de volumen que utiliza el líquido y otra para el gas, donde en el dominio higroscópico, son de cero para el líquido y para el vapor es igual que la porosidad total. Existen diferentes métodos para medir la porosidad de un material, ya que ésta se obtiene experimentalmente, por ejemplo, a través del método de porosimetría de mercurio [35].

- Saturación: es la fracción de volumen de espacios llenos por el líquido o por el gas, como se muestra en la Ecuación 4, la cual es adimensional y puede tomar valores desde cero hasta uno, donde el cero significa un medio completamente seco, y el uno significa un medio completamente saturado [35].

$$S = \frac{\text{volumen}_{\text{líquido}}}{\text{volumen}_{\text{vacío}}} \quad (4)$$

- Permeabilidad: es una medida que indica la capacidad del medio para transmitir fluido y depende de las propiedades físicas del medio poroso, pero es independiente del fluido saturante. La permeabilidad tiene unidades de longitud al cuadrado y se mide en Darcy ($1D \approx 10^{-12} \text{ m}^2$) [36].

3.3. CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO

El contenido de humedad de equilibrio (CHE) es una propiedad del material independiente de la velocidad de secado. Si se expone un textil húmedo al aire que contiene humedad, dicho textil alcanzará el CHE. Éste depende de la temperatura y humedad relativa del aire, así como de la estructura del textil; por lo tanto, si la temperatura del aire disminuye y la humedad relativa se mantiene constante, el CHE aumentará [18].

Cuando se busca eliminar el agua, puede ser a través de la evaporación o vaporización. Cuando se evapora el líquido, la temperatura del agua debe llegar al punto de ebullición, mientras que, en el secado a través del aire, el agua se transfiere de líquido a vapor en función de las condiciones del aire. Además, la transferencia del agua se puede observar en tres fases: agua libre, agua ligada y vapor de agua [18].

El agua libre es todo el exceso de agua, debido a que el textil ya no puede absorber más agua. Mientras que, el agua ligada, es la cantidad de agua en los textiles conocido también como CHE, y es el agua absorbida por las fibras de los textiles. Por debajo del punto de saturación de la fibra, solamente se tiene agua ligada y vapor de agua entre los espacios, por ello, el contenido de humedad en esa zona se rige por la isoterma de sorción, donde se tiene un efecto de las fuerzas físicas y químicas de enlace entre el agua absorbida y las fibras del textil [18].

Haghi [37] presenta la humedad como aquella que es transportada a través de los textiles durante el proceso de secado mediante el flujo capilar de agua no ligada, el movimiento de agua ligada y la transferencia de vapor. Donde el agua no ligada en un textil principalmente se transporta por flujo capilar [35] y, a medida que el agua va transportándose hacia fuera del material, el agua en los poros es reemplazada por el aire. Lo cual, deja áreas aisladas de humedad donde el flujo capilar continúa [38].

Por su parte, en [38] se dice que la humedad en un textil puede ser transferida en fases líquida y gaseosas a través de varios modos de transporte, tales como: difusión líquida y de vapor, efusión, termofusión, el gradiente de presión, fuerzas capilares y presión osmótica. Además, el movimiento de la humedad en una fibra como la textil, no solo depende de la diferencia de concentración sino también de las características del textil, es decir, de la densidad del sólido [39].

3.4. BASES ESTADÍSTICAS PARA EL ANÁLISIS

La estadística es una herramienta que permite el diseño de productos y sistemas, así como la optimización de los ya existentes, además del desarrollo y mejora de procesos de producción a través de la recopilación, presentación y análisis de datos para la toma de decisiones y resolución de problemas; donde su participación en la industria busca el aumento de la calidad, ya que las técnicas estadísticas pueden emplearse para describir y comprender la variabilidad [40].

La variación es producto de los cambios en las condiciones bajo las cuales se hacen las observaciones. Por ejemplo, considerando temas de manufactura, estos cambios podrían ser diferencia en los materiales utilizados, forma de trabajo de cada obrero, factores ambientales como la humedad relativa y el proceso en sí, como la temperatura, tiempo, presión, etc. Por otro lado, la variación se puede deber al sistema de medición y al muestreo.

En el campo de la estadística existen métodos que describen y modelan la variabilidad para la toma de decisiones. Por ejemplo, la estadística inferencial es utilizada para la toma de decisiones acerca de una población en particular, donde población hace referencia a la recolección de mediciones de todos los elementos del universo bajo estudio; sin embargo, muchas veces solamente se tienen disponibles datos de una muestra de la población, es decir, solo se cuenta con un subconjunto de observaciones seleccionadas de una población. Otro método utilizado es la estadística descriptiva, que sirve para resumir y organizar datos; donde cabe mencionar que la mayor parte del uso de la estadística va dirigido a la estadística inferencial. En este proyecto se lleva a cabo un análisis estadístico inferencial, así como un diseño de experimentos, que se describirán más a detalle a continuación.

3.4.1. PRUEBA DE HIPÓTESIS

En muchas ocasiones es necesario tomar una decisión sobre aceptar o rechazar una proposición sobre algún parámetro. Dicha proposición se conoce como hipótesis; y el procedimiento de toma de decisiones sobre la hipótesis se conoce como prueba de hipótesis. Es importante mencionar que las hipótesis son proposiciones sobre la población o distribución bajo estudio [40]. El planteamiento de una hipótesis se puede especificar dependiendo del objetivo de la prueba:

- Para determinar si el valor del parámetro ha cambiado.
- Para verificar una teoría o modelo.
- Para probar el cumplimiento de alguna especificación.

Por otro lado, en una prueba de hipótesis, si la información es consistente con la hipótesis, se concluye que ésta es verdadera; por el contrario, si la información no es consistente con la hipótesis, se concluye que ésta es falsa.

La hipótesis nula es la hipótesis que se desea probar. El rechazo de la hipótesis nula conduce a la aceptación de la hipótesis alternativa. La hipótesis nula (H_0) se debe plantear de modo que se especifique el valor del parámetro, se establezca como que los datos siguen un comportamiento normal, que una variable no sea significativa, etc.; mientras que la hipótesis alternativa (H_a) permite que el parámetro tome varios valores, que los datos no se comporten como una normal, que la variable sea significativa.

Por ejemplo, suponiendo que se tiene interés en la rapidez de combustión de un agente utilizado en procesos de manufactura. La rapidez de combustión es una variable aleatoria que puede describirse con una distribución de probabilidad, donde se está interesado en decidir si la rapidez de combustión promedio es o no 40 cm/s. Lo cual puede expresarse como:

$$H_0: \mu = 50 \frac{cm}{s} \quad (5)$$

$$H_a: \neq 50 \frac{cm}{s} \quad (6)$$

Se debe considerar que el procedimiento de decisión puede conducir a una conclusión errónea, donde se tienen dos tipos de errores:

- Error tipo I: es el rechazo de la hipótesis nula cuando ésta es verdadera. Este error se denota como α y recibe el nombre de nivel o tamaño de significancia de la prueba; y representa la probabilidad de que todas las muestras aleatorias conduzcan al rechazo de la hipótesis nula cuando es verdadera. Por ejemplo, posiblemente el valor verdadero de la rapidez promedio de combustión del agente sea igual a 40 cm/s, sin embargo, para todos los especímenes bajo prueba, se observa un valor del estadístico de prueba \bar{x} que cae en la región crítica. Entonces, se rechaza la hipótesis nula favoreciendo la alternativa, cuando de hecho, la hipótesis nula es verdadera.
- Error tipo II: es la aceptación de la hipótesis nula cuando ésta es falsa; dicha probabilidad se denota como β . Por ejemplo, suponiendo que la verdadera rapidez promedio de combustión es diferente de 40 cm/s, aunque la media muestral \bar{x} caiga dentro de la región de aceptación.

Ya que el analista puede controlar directamente la probabilidad de rechazar de manera errónea H_0 , siempre puede considerarse el rechazo de H_0 como una conclusión fuerte. Por el contrario, la probabilidad del error tipo II no es constante porque depende del valor verdadero del parámetro, así como del tamaño de la muestra seleccionada. Por lo que considerar la decisión de aceptar H_0 es una conclusión débil, a menos que se sepa que es β aceptablemente pequeño. Dicho esto, más que concluir que se “acepta H_0 ”, se prefiere concluir que “se es incapaz de rechazar H_0 ”.

La potencia de una prueba estadística es la probabilidad de rechazar la hipótesis nula cuando la hipótesis alternativa es verdadera, es decir, la probabilidad de rechazar correctamente una hipótesis nula falsa; y se calcula como $1-\beta$. La potencia es una medida muy descriptiva y concisa de la sensibilidad de una prueba, donde la sensibilidad es la capacidad de una prueba para detectar diferencias.

Una manera de notificar los resultados de una prueba de hipótesis es a través del valor P, que es la probabilidad de que el estadístico de prueba tome un valor que sea al menos tan extremo como el valor observado del estadístico de prueba cuando la hipótesis nula es verdadera. Donde el estadístico de prueba es una variable aleatoria calculada a partir de datos de muestra y que mide el grado de concordancia entre una muestra de datos y la hipótesis nula. Entonces, el valor P contiene mucha información sobre el peso de la evidencia contra H_0 , y se puede definir como el nivel de significancia más pequeño que conduce al rechazo de la hipótesis nula.

3.4.2. DISEÑO Y ANÁLISIS DE EXPERIMENTOS

Los experimentos son una parte fundamental de la toma de decisiones, y llevarlos a cabo con las técnicas de diseño experimental basadas en la estadística son muy útiles para [40]:

- Mejorar el rendimiento de un proceso.
- Disminuir la variabilidad de un proceso.
- Reducir el tiempo de diseño y desarrollo.
- Reducir el costo de la operación.
- Evaluar y comparar configuraciones de diseño
- Evaluar materiales.
- Seleccionar parámetros de diseño para el funcionamiento adecuado del producto bajo ciertas condiciones.
- Determinar parámetros de diseño importantes del producto que tienen impacto sobre el funcionamiento de éste.

Además, todo experimento implica una serie de pasos a seguir:

1. Conjetura: plantear la hipótesis que motiva el experimento.
2. Experimento: llevar a cabo la prueba correspondiente.
3. Análisis: analizar estadísticamente los datos obtenidos.
4. Conclusión: lo que se ha aprendido de la conjetura original con la realización del experimento.

Es importante considerar el papel de la aleatorización; ya que, al llevar a cabo un experimento de manera aleatoria, el efecto que cualquier variable de poca importancia podría tener sobre la respuesta de la prueba, queda cancelado. Cada variable aleatoria obtenida, es resultado de la suma de una media global, el efecto del nivel del factor y el error aleatorio; donde se supone que los errores están distribuidos de manera normal e independiente con media cero y varianza σ^2 .

El análisis de varianza divide la variabilidad total de los datos contenidos en la muestra en dos componentes. La variabilidad total de los datos está descrita por la suma total de cuadrados (SS por sus siglas en inglés). Además, la media de cuadrados (MS por sus siglas en inglés) es un estimador insesgado de la varianza si la hipótesis nula es verdadera; mientras que estima un valor de varianza más un término positivo que incorpora la variación debida a la diferencia sistemática en las medias de los niveles si la hipótesis alternativa es verdadera.

Por otro lado, el error cuadrático medio es un estimador insesgado de la varianza sin importar si la hipótesis nula es verdadera o no. Si la hipótesis nula es verdadera, el cociente entre la media de cuadrados y el error cuadrático tiene una distribución F con ciertos grados de libertad.

Un experimento factorial se entiende aquél donde en cada ensayo o réplica completa del experimento se investigan todas las combinaciones posibles de los niveles de los factores. El efecto de un factor está definido como el cambio en la respuesta producido por un cambio en el nivel del factor, conocido como efecto principal. Así como, en algunos experimentos la diferencia en la respuesta entre los niveles de un factor no es la misma para todos los niveles de los otros factores. Cuando sucede esto entonces existe una interacción entre los factores.

Un caso especial del diseño factorial es el de 2^k , donde cada factor k tiene solo dos niveles. Éste es útil cuando se están investigando muchos factores, y así se proporciona el número más pequeño de corridas para las que pueden estudiarse k factores en un diseño factorial completo. En este tipo de diseño se acostumbra a denotar los niveles bajo y alto con los signos $-$ y $+$ respectivamente.

Considerando tres factores, se tiene un diseño factorial 2^3 que consiste en ocho corridas o combinaciones de niveles. Geométricamente, el diseño es un cubo como el que se muestra en la Figura 7, donde las ocho corridas forman las aristas del cubo. Este diseño permite estimar los efectos principales de los tres factores (A, B y C), junto con las tres interacciones entre dos factores (AB, AC y BC) y una interacción entre los tres factores (ABC). Así como, las letras minúsculas (1), a, b, c, ab, ac, bc y abc representan el total de todas las n réplicas en cada una de las ocho corridas.

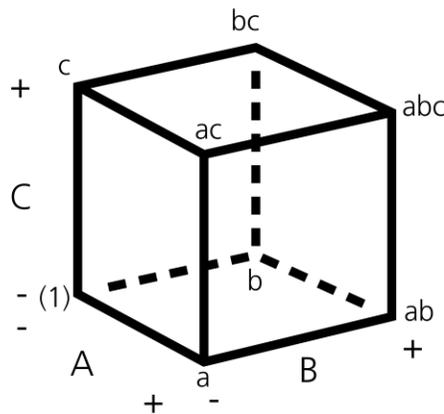


Figura 7. Diseño factorial 2^3 .

Los efectos principales se pueden calcular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 A &= \overline{y_{A+}} - \overline{y_{A-}} = \frac{1}{4n} [a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] \\
 B &= \overline{y_{B+}} - \overline{y_{B-}} = \frac{1}{4n} [b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] \\
 C &= \overline{y_{C+}} - \overline{y_{C-}} = \frac{1}{4n} [c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab]
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

Los efectos de interacción se pueden calcular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned}
 AB &= \frac{1}{4n} [bc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] \\
 AC &= \frac{1}{4n} [(1) - a + b - ab - c - bc + ac - bc + abc] \\
 BC &= \frac{1}{4n} [(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] \\
 ABC &= \frac{1}{4n} [abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)]
 \end{aligned}
 \tag{8}$$

5. METODOLOGÍA

Para llevar a cabo el modelo experimental de este proyecto, se usará la metodología Seis Sigma. Primeramente, se define Seis Sigma como un sistema empresarial que permite lograr y mantener el éxito por medio de la orientación al cliente, la gestión y mejora de procesos, así como la utilización analítica de los hechos y datos [41]; es un enfoque revolucionario de gestión que mide y mejora la calidad, dando además otros enfoques, ya que también corrige los problemas antes de que se presenten [42].

La metodología Seis Sigma permite identificar la capacidad de los procesos para reducir los defectos por millón de éstos, para lo cual, se utilizan otras metodologías como la DMAIC, por sus siglas en inglés: Define, Measure, Analyze, Improve and Control. Dicha metodología es un proceso iterativo que sigue un formato estructurado y disciplinado, la realización de experimentos y su consecuente evaluación [43], consta de cinco fases, donde cada una utiliza diferentes herramientas para dar respuesta a ciertas preguntas específicas que dirigen el proceso de mejora [44].

La metodología DMAIC comprende las siguientes fases [41], [42], [43], [44]:

- **Definir:** se establece el problema describiendo el efecto que provocó, o se selecciona el proyecto de mejora que se desea realizar, con la finalidad de poder entender la situación y definir los objetivos. Una vez seleccionado el proyecto, se preparan los objetivos y se selecciona el equipo adecuado. Se utilizan herramientas como diagramas de Pareto, diagramas de flujo, histogramas, lluvia de ideas, entre otras.

Se deben responder a preguntas como: ¿por qué se necesita resolver esto ahora?, ¿cómo es el flujo de proceso general del sistema?, ¿qué se busca lograr con el proceso?, ¿cuáles beneficios cuantificables se podrían obtener del proyecto?, ¿cómo saber el éxito del proyecto?, ¿qué se necesita para completar exitosamente el proyecto?

- **Medir:** se define y describe el proceso de medición a través de la determinación de los elementos, fases, entradas, salidas y características. Se identifican los requisitos clave de los clientes, las características primordiales del producto y los parámetros que afectan el proceso o variables determinantes; para definir el sistema de medida y capacidad del proceso. Se utilizan herramientas como diagramas de entrada-proceso-salida, análisis de capacidad de proceso, gráfico de Pareto, gráficos de control, etc.

Se deben responder a preguntas como: ¿cuál es el proceso por desarrollar y cómo se lleva a cabo?, ¿cuáles pasos componen el proceso?, ¿cuáles son los indicadores y variables del proceso?, ¿cómo se obtiene la información necesaria?, ¿qué exactitud o precisión tiene el sistema de medición?, ¿cómo funciona el proceso actualmente?

- **Analizar:** se determinan las variables significativas, las cuales deben ser validadas por medio de un diseño de experimentos para medir la contribución de estos factores en la

variabilidad del proceso. Se desarrollan y comprueban hipótesis sobre posibles relaciones causa-efecto utilizando las herramientas estadísticas pertinentes. Adicionalmente, se utilizan herramientas como diagramas de causa efecto, matriz de relación, correlación y regresión, análisis de varianza, muestreo, y más.

También, se deben responder a preguntas como: ¿qué variables de proceso afectan más la calidad del proceso y cuáles se pueden controlar?, ¿qué es de valor para el cliente?, ¿cuáles son los pasos detallados del proceso?, ¿cuántas observaciones se necesitan para obtener conclusiones?

- **Mejorar:** se optimiza y robustece el proceso a través de herramientas de calidad como son el diseño de experimentos, análisis de regresión y superficies de respuesta, para después validar la mejora. El equipo trata de determinar la relación causa-efecto entre las variables de entrada y la variable respuesta, para predecir, mejorar y optimizar el funcionamiento del proceso. Además, se utilizan herramientas como técnicas analíticas, pruebas piloto, etc.

Adicionalmente, se deben responder a preguntas como: ¿cuáles opciones se tienen?, ¿cuáles de las opciones podrían tener mayor posibilidad de éxito?, ¿cuál es el plan para implementar el nuevo proceso?, ¿qué variables de desempeño se podrían usar para mostrar la mejora?, ¿cómo se podrían implementar los cambios?

- **Controlar:** se controla y efectúa un seguimiento del proceso para mantenerlo bajo un control estadístico, buscando mejoras en las condiciones de operación, procedimientos, etc., que conduzcan a un mejor desempeño del proceso. Se documentan los controles necesarios para asegurar que lo conseguido se mantenga una vez que se hayan implementado los cambios. Se utilizan herramientas como planes de control, gráficos de control, capacidad de proceso, entre otras.

Se deben responder a preguntas como: ¿los resultados obtenidos están relacionados con los objetivos, entregables definidos y criterios de salida del proyecto?, ¿cómo se puede monitorear y documentar el proceso?

El presente proyecto involucra el desarrollo del modelo experimental que permite lograr un entendimiento del fenómeno de extracción de agua en el proceso de centrifugado a través del planteamiento y desarrollo de un diseño de experimentos, con el que se obtiene una función de transferencia representativa del proceso de deshidratación exclusivamente para las condiciones experimentadas y de las características geométricas de la lavadora.

5.1. DEFINICIÓN

5.1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El proceso de deshidratación de la ropa es un fenómeno cuyo resultado final depende de diversas variables y condiciones presentes, por lo cual, se requiere un entendimiento a detalle de dicho fenómeno, ya que, como se mencionó anteriormente, el contenido de humedad residual es uno de los factores más influyentes en cuanto al Factor de Energía de la lavadora en sí; por lo tanto, el entendimiento de este fenómeno permitirá generar ciclos adaptivos de centrifugado con base a las necesidades presentes y buscando el óptimo.

5.1.2. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LAVADO

A continuación, en la Figura 8 se muestra un diagrama de bloques funcionales, el cual es una gráfica que representa un proceso funcional a través de un diagrama con bloques específicos para una interpretación y entendimiento del sistema de manera más sencilla.

El sistema se divide en varios subsistemas, se tiene el principal, la cubierta, el impulsor y el gabinete. Para el sistema principal se contemplan varios elementos, que van desde cómo surtir agua a través de válvulas y regaderas, así como la manera en surtir el detergente a través de la cajonera; también, se cuenta con un sistema de recirculado de agua a través de bombas y mangueras, que después permiten el drenaje del agua. Además, se involucra la tina que contiene el agua de lavado y recirculado, y a su vez a la canasta, la cual contiene la ropa y permite la extracción de agua durante el centrifugado; así como también se cuenta con un infusor que es parte del sistema impulsor y permite el movimiento de la canasta para llevar a cabo el lavado, enjuague y centrifugado de la ropa. Por otro lado, se tiene la cubierta, que aloja varios componentes como arneses, tarjeta electrónica y las cajoneras que surten el detergente.

Además, en la Figura 9 se muestra un diagrama de bloques del sistema impulsor. Con dicho diagrama se busca la identificación de componentes críticos o relevantes, es decir, aquellos componentes que tienen una influencia significativa en la respuesta final del sistema, es decir, aquellos componentes que afecten el contenido de humedad residual, tales como la canasta y el motor. La canasta porque es el componente que aloja a la ropa, es decir, directamente está interactuando con la respuesta del sistema, y la geometría de esta canasta, tal como su diámetro y altura, así como los barrenos que tiene, tanto la cantidad, como diámetros y el arreglo de los mismos, tienen influencia en la respuesta final del sistema. Por otro lado, también lo tiene el motor, ya que este componente nos permite llevar a cabo cambios en la velocidad de centrifugado a través de la relación de poleas.

5.2. MEDICIÓN

5.2.1. DESCRIPCIÓN DEL CICLO DE LAVADO

En la Figura 10 se muestra un diagrama que describe el ciclo de lavado dividido por etapas.

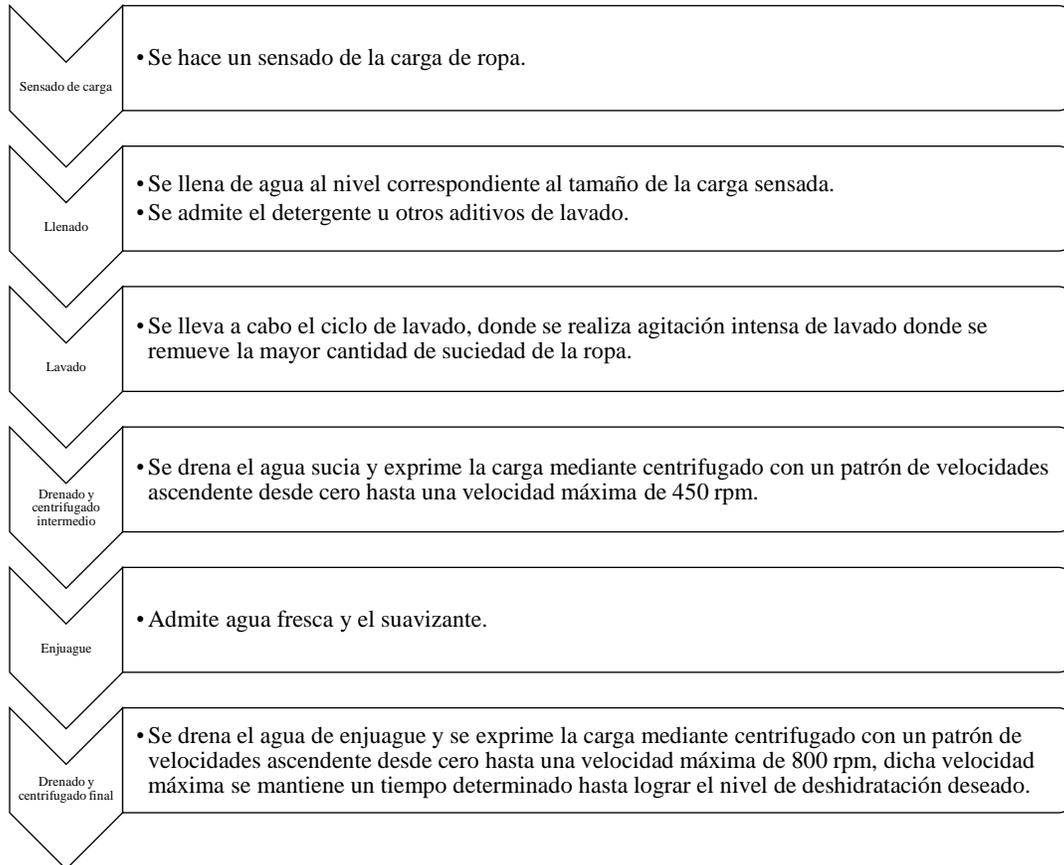


Figura 10. Descripción del ciclo de lavado.

5.2.2. PROCEDIMIENTO DE LA PRUEBA

Como se mencionó anteriormente, el RMC representa el contenido de humedad residual (adimensional), y es una relación entre la masa inicial de la carga de ropa (M) y la masa final (M_r) de la misma al final del proceso de centrifugado en una lavadora de carga superior [45], [11], como se muestra en la Ecuación 9.

$$RMC = \frac{M_r - M}{M} \times 100 \quad (9)$$

Dicho procedimiento definido en la norma IEC 60456-5 [45] para obtener el RMC de un tamaño de carga de ropa tipo DOE establece lo siguiente:

1. Pesar la carga de ropa en una báscula añadiendo o quitando los trapos tipo DOE (como se muestra en la Figura 11) hasta alcanzar la carga deseada, por ejemplo, para una carga de 11 lb aproximadamente se necesitan 48 trapos de tela (ver Figura 12). Cabe mencionar que, la carga tipo DOE es ropa mixta, es decir, fabricado con un tejido tipo “granite” que corresponde a una composición 50% algodón y 50% poliéster.



Figura 11. Ropa tipo DOE.



Figura 12. Báscula para medir la carga de ropa.

2. Secar la carga de ropa en una secadora universal (ver Figura 13) hasta que el contenido de humedad restante se haya reducido a un nivel que se conoce como “bone dry”, es decir, donde hay muy poca humedad libre. La secadora se establece en la temperatura más alta (no menor a 75°C); se mete la carga de ropa y se pone a secar durante 30 minutos, revisando cada 10 minutos que la ropa no se haya enredado y genere acumulación de humedad.



Figura 13. Secadora de ropa universal.

3. Al terminar el secado, antes de que la ropa se enfríe se determina la masa de la carga de ropa utilizando una báscula. Si la masa de la carga de ropa está dentro del 1% de la medición anterior, se establece que está en la condición de “bone dry” y se procede a acomodar la carga de ropa en la canasta de la lavadora, de lo contrario, se mete nuevamente la carga de ropa a la lavadora.
4. Tomar un trapo de la parte central y acomodarlo en la canasta de la lavadora, de tal forma que se vayan colocando cuatro trapos orientados en la misma dirección por cada nivel hasta terminar de acomodar toda la carga de ropa de manera uniforme, como se muestra en la Figura 14.



Figura 14. Carga de ropa acomodada en la canasta de la lavadora.

5. La lavadora se encuentra sobre una báscula que irá registrando el cambio en el peso durante todo el proceso, así como se cuenta con un software que va registrando el RMC, consumos de energía, peso, velocidad, tiempo, etc., como se muestra en la Figura 15. La cámara donde se llevan a cabo estas pruebas está instrumentada para llevar el registro del peso de la báscula, medir la humedad de la cámara, etc. Mientras que, para medir la velocidad y el tiempo de centrifugado, se utilizó un programa en LabVIEW y una tarjeta de adquisición de datos conectada a la tarjeta de la lavadora. Se comienza el ciclo de enjuague y un posterior drenado.



Figura 15. Sistema instrumentado.

6. Se lleva a cabo el centrifugado de la ropa bajo las condiciones especificadas, y al finalizar se pesa nuevamente la ropa (ver Figura 16).



Figura 16. Carga de ropa pesada en la báscula al término de la prueba.

- Este valor de peso obtenido se ingresa al software, el cual calcula el contenido de humedad residual (ver Figura 17).

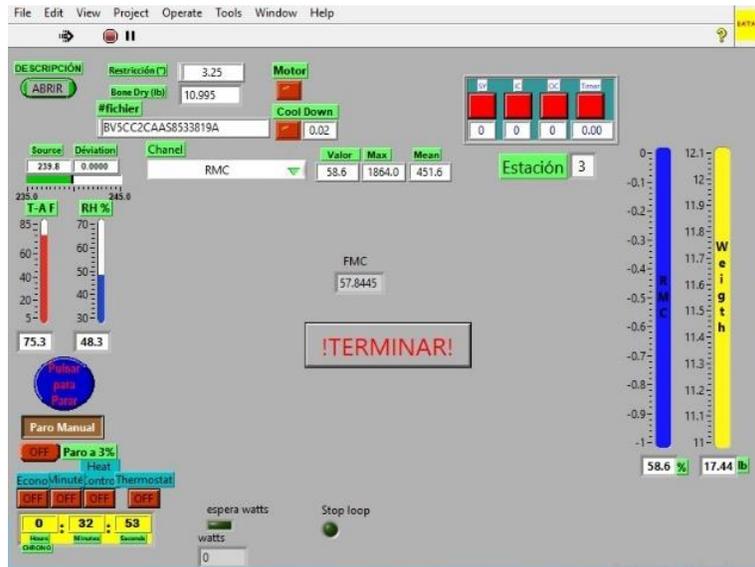


Figura 17. Resultados obtenidos por el software.

5.2.3. CTQ FLOW DOWN

En la Figura 18 se muestra un diagrama conocido como CTQ Flow Down (por sus siglas en inglés Critical-To-Quality) que es una herramienta que proporciona una ayuda a los equipos de mejora de la calidad para identificar funciones, procesos, tareas y principales factores, entre otros; que ejercen mayor influencia en los requerimientos críticos del sistema; con lo que se permite abordar diferentes niveles en los procesos y/o subensambles, así como en componentes principales. La especificación de estas características permite la identificación de los principales parámetros que se deben definir para analizar el sistema posteriormente.

Para generar el CTQ Flow Down de este sistema se parte con la definición de la variable de interés, es decir, la respuesta del sistema, que en este caso es el valor de RMC. Dicha respuesta está condicionada por tres factores principales:

- Los programas de lavado con los que la lavadora cuenta: estos programas están definidos en función del tipo de ropa y tamaño de carga. Estos son parámetros independientes, es decir, se puede decidir qué condición o valor tomar, por lo tanto, se especifican en color azul como se muestra en la Figura 18, ya que se puede tomar el control de dichos parámetros y servirán para estudiar la variable de respuesta del sistema.
- El motor que permite el giro de la canasta de la lavadora: está definido por la transmisión de banda y los escalones de aceleración; los cuales permiten determinar

el tiempo y velocidad de centrifugado, los cuales también se definen como parámetros independientes.

- Las características de la canasta de la lavadora: que está definida por su altura y diámetro, así como la cantidad de barrenos que tiene, el arreglo de éstos y su diámetro; los cuales son parámetros independientes.

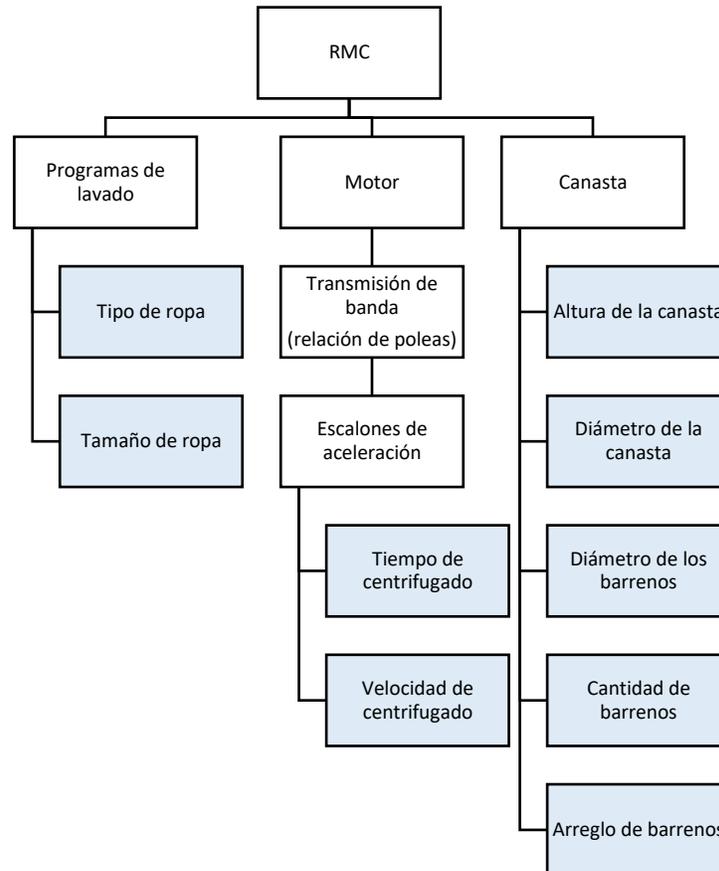


Figura 18. CTQ Flow Down del sistema.

5.2.4. DIAGRAMA DE PARÁMETROS

En la Figura 19, se muestra el diagrama de Parámetros del sistema, es decir, contiene los parámetros de entrada, control, ruido y salida. De manera general, los parámetros de control son aquellos que se pueden establecer y, controlar dentro un rango de variación específico. Por otro lado, los parámetros de ruido son aquellos que no se pueden controlar. En cambio, los parámetros de entrada son aquellos parámetros que van a entrar al sistema y se van a analizar, para obtener la respuesta del sistema, conocido como parámetro de salida.

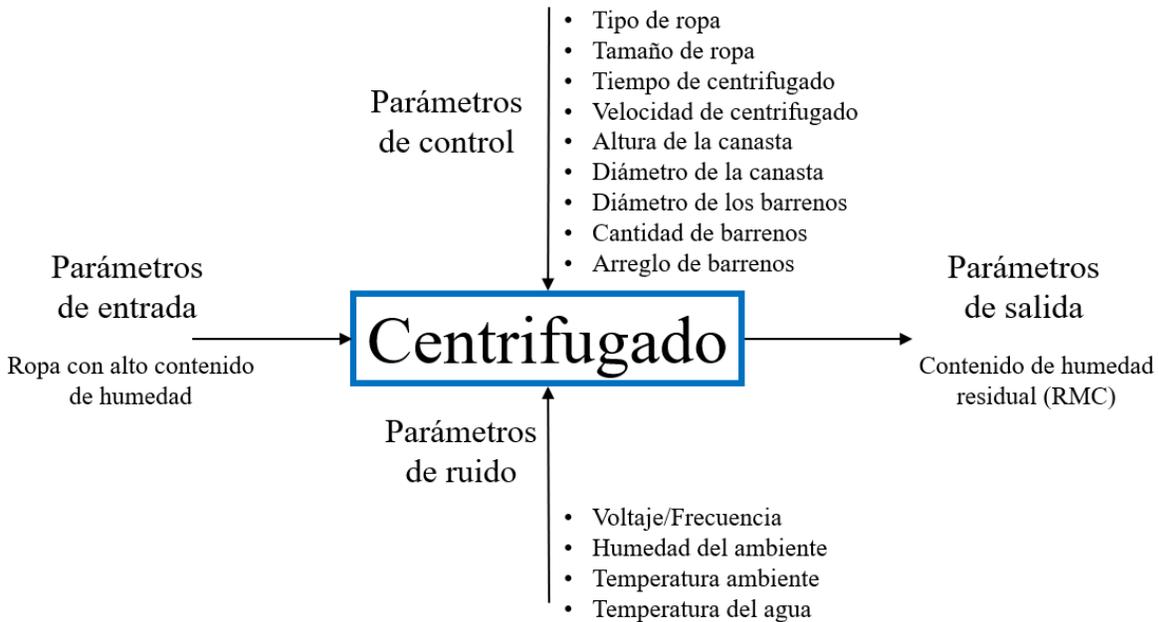


Figura 19. Diagrama de Parámetros del sistema.

5.2.5. GAGE R&R

Al llevar a cabo cualquier medición, es importante saber que el proceso es confiable ya que, con base en los resultados obtenidos, se estarán tomando decisiones. A través de un estudio del Gage R&R se puede analizar un sistema de medición que permita determinar la cantidad y el tipo de variación cuando se mide algo.

Se le puede llamar sistema de medición a todo aquello asociado con la toma de medidas, es decir, las personas que lo llevan a cabo, la herramienta con la que se mide y el método, las piezas, el ambiente, etc. Y este sistema de medición puede agregar variación a los datos medidos, donde el objetivo es utilizar un proceso de medición adecuado que arroje la menor cantidad de error de medición, ya que la variación total observada es la suma de la variación real de las partes más la variación del sistema de medición.

En un Gage R&R se le conoce como “Gage” a cualquier instrumento usado para medir, y “R&R” viene de repetibilidad y reproducibilidad; donde la variación de la medición cuando una persona (operador) usa el mismo instrumento para medir la misma parte se conoce como repetibilidad; y la variación en el promedio de las mediciones obtenidas cuando dos o más personas usan el mismo instrumento para medir las mismas partes es la reproducibilidad.

Para plantear un estudio del Gage R&R y llevarlo a cabo se siguen estos pasos:

1. Identificar el tipo de datos: en este proyecto se está trabajando con el valor de RMC que son datos variables de una medición no destructiva.
2. Identificar las fuentes de variación: que puede ser el personal, la herramienta de medición, el material, el método, el medio ambiente, etc. En este caso, las fuentes de variación identificadas sería el operador, ya que se involucra en pesar la carga de ropa y su respectivo acomodo en la lavadora; así como el método de medición, ya que se involucran diferentes velocidad, tiempos y tamaños de carga.
3. Selección de muestras: la variación de la muestra deberá ser representativa de la variación actual del proceso. En este caso se establecen dos tamaños de carga (11 y 16 lb), así como dos velocidades (650 y 500 rpm) y tiempos de 8.5 min y 13.5 min; es decir, la parte 1 se considera como 11 lb a 650 rpm durante 8.5 minutos, y la parte 2 como 16 lb a 500 rpm durante 13.5 minutos. Es decir, la parte está dada por la muestra de tela sometida al procedimiento de la norma para la obtención del RMC.
4. Recolección de datos: primeramente, se asegura que el instrumento de medición esté calibrado, en este caso es la báscula tanto para pesar el tamaño de carga, como la báscula donde se monta la lavadora para ir registrando el peso durante el centrifugado. Así como asegurar una resolución adecuada, que en este caso sí lo es, ya que se registran las libras hasta con tres decimales. Por otro lado, se debe considerar la participación de al menos dos operadores que mida cada unidad al menos 2 veces.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del RMC (± 0.8):

Tabla 2. Resultados obtenidos del Gage R&R.

Parte	Operador	RMC (%)	Operador	RMC (%)
1	1	58.34	2	57.57
1	1	58.89	2	57.84
1	1	57.57	2	57.03
2	1	64.40	2	64.68
2	1	62.20	2	63.30
2	1	64.49	2	64.18

En la Figura 20 se muestra una gráfica del perfil de deshidratación de la ropa y de velocidad, representado en color azul y naranja, respectivamente. Los primeros minutos de la prueba consisten en un acomodo de la ropa, es decir, la canasta de la lavadora con la ropa dentro gira hasta una velocidad no mayor a 450 rpm para distribuir la carga de ropa homogéneamente en la canasta y evitar un posterior desbalanceo. Después, se llena la lavadora con cierta cantidad de agua determinada por el sensor de carga de ropa. Enseguida se lleva a cabo el enjuague de la ropa, es decir, un giro de la canasta en una dirección y después otro giro de la canasta en la dirección contraria a una velocidad entre 400 y 600 rpm.

Terminando el enjuague, se detiene la canasta y se comienza con el drenado del agua de la canasta, que va hacia la tina de la lavadora y después a la manguera de desagüe. Enseguida comienzan las rampas de velocidad, es decir, se va aumentando paulatinamente la velocidad

de giro de la canasta desde cero hasta llegar a la velocidad final de centrifugado, donde se observa más drásticamente la disminución del contenido de humedad residual. Finalmente, la canasta de la lavadora se mantiene girando a cierta velocidad durante un tiempo especificado, después se detiene el giro de la canasta y hasta que esté completamente detenida, se puede retirar la carga de ropa.

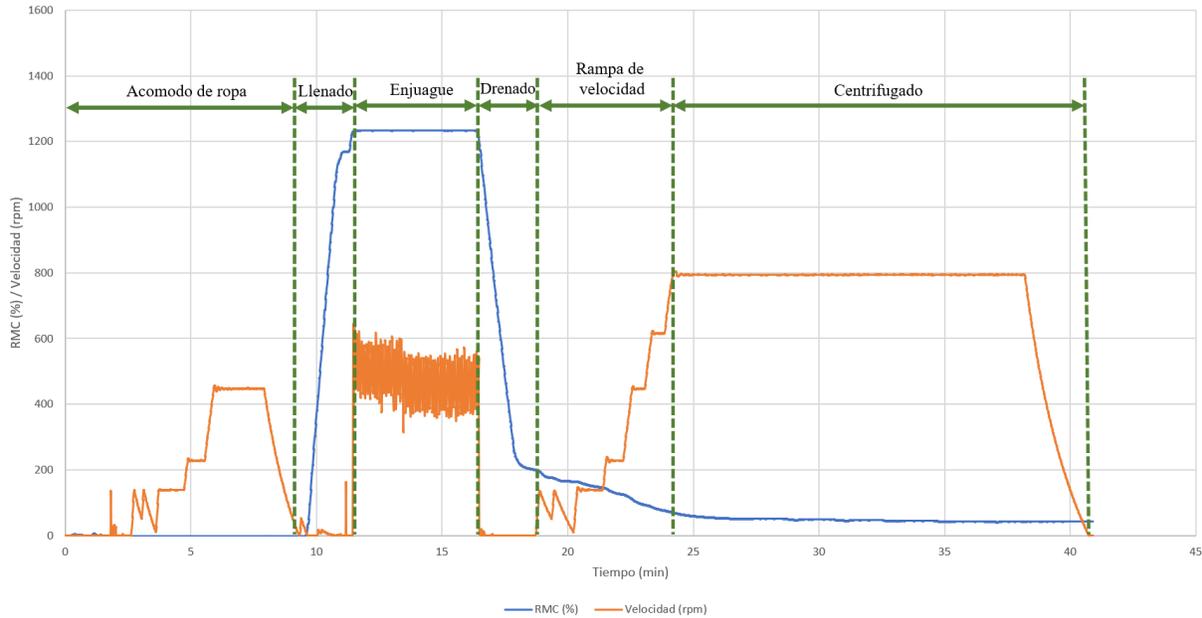


Figura 20. Gráfica del perfil de deshidratación y de velocidad.

5. Análisis de datos: para llevar a cabo el análisis de datos se utilizó el programa Minitab, donde se ingresó la información anterior y se obtuvo la información mostrada en la Tabla 3. En este caso, la fuente de la variación está definida por la pieza, el operador, la interacción entre pieza y operador, y la repetibilidad. Se cuentan con 11 grados de libertad (DF por sus siglas en inglés); así como con base a la suma total de cuadrados (SS por sus siglas en inglés) se observa que la pieza es la que tiene mayor contribución en la variación de la respuesta. También, se muestran los resultados obtenidos para la media de cuadrados, la distribución F y el valor P, donde este análisis se centra en el valor P.

Se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : la variable no es significativa
- H_a : la variable es significativa
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

Se observa que la interacción entre pieza y operador obtuvo un valor de P mayor a 0.05, es decir, no se puede rechazar la hipótesis nula y se puede decir, con al menos el 95% de confianza, que esta interacción de variables no contribuye significativamente en el total de la variación.

Tabla 3. Estudio Gage R&R con interacción.

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Pieza	1	108.060	108.060	110.219	0.060
Operador	1	0.139	0.139	0.141	0.771
Pieza * Operador	1	0.980	0.980	1.411	0.269
Repetibilidad	8	5.560	0.695		
Total	11	114.739			

Por lo tanto, se procede a llevar a cabo el análisis del Gage R&R sin la interacción presente, como se muestra en la Tabla 4. Se mantienen los 11 grados de libertad y observando el valor P, se puede decir que, en cuanto al operador, al tener un valor P mayor a 0.05 no se puede rechazar la hipótesis nula y se dice, con al menos el 95% de confianza, que esta variable no contribuye significativamente en el total de la variación. Sin embargo, el valor P de la pieza, al ser menor a 0.05, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa, es decir, que la pieza si es significativa en la variación del sistema.

Tabla 4. Estudio Gage R&R sin interacción.

Fuente	DF	SS	MS	F	P
Pieza	1	108.060	108.060	148.702	0.000
Operador	1	0.139	0.139	0.191	0.673
Repetibilidad	9	6.540	0.727		
Total	11	114.739			

El estudio Gage R&R contiene información importante sobre la repetibilidad y reproducibilidad de los resultados del sistema, así como de la contribución total que tiene cada una de las variables involucradas en la variación del mismo. La Tabla 5 muestra, para cada uno de los parámetros mencionados anteriormente, la desviación estándar, el estudio de variación y el porcentaje del mismo. El estudio de variación se refiere al 5.15 de la desviación estándar que contiene el 99% de la distribución normal, donde el porcentaje del estudio de variación debe ser menor a 20% para concluir que el sistema es capaz de medir con la variación presente; para este caso se obtuvo un 19.76% de variación, lo que se considera aceptable.

La repetibilidad es la variación de la medición cuando una persona usa el mismo instrumento para medir la misma parte, es decir, en este caso se tiene un 19.76% de variación. Por otra parte, la reproducibilidad es la variación en el promedio de las mediciones obtenidas cuando dos o más personas usan el mismo instrumento para medir las mismas partes; en este caso la variación es de 0%, es decir, sin importar la persona que mida la pieza con el mismo instrumento, no generará variación con respecto a otra. Lo que va de la mano con el parámetro de operador, el cual tuvo 0% de variación, es decir, no tiene influencia significativa en la respuesta del sistema, ya que, como es un procedimiento guiado por una norma, si el operador sigue los pasos

mencionados utilizando correctamente los instrumentos previamente calibrados, debería obtenerse la misma respuesta.

En cambio, el porcentaje de variación para la Parte (carga de ropa sometida a prueba de RMC) fue de 98.03%, es decir, que es el parámetro que tiene mayor influencia en la respuesta del sistema, lo cual implica que, como la carga de ropa tiene cierto tiempo de vida útil, conforme se va usando para las pruebas se va desgastando (va perdiendo contenido de algodón) por lo que afecta su absorción de agua en el textil. Finalmente, se sabe que el número de categorías obtenido debe ser mayor a 4 para contar con un sistema con una adecuada resolución, en este caso es de 6, por lo tanto, sí se cuenta con una resolución adecuada.

Tabla 5. Evaluación del Gage R&R.

Fuente	Desviación Estándar (SD)	Estudio de Variación ($5.15 \times SD$)	% de Estudio de Variación (%SV)
Total Gage R&R	0.85246	4.3902	19.76
Repetibilidad	0.85246	4.3902	19.76
Reproducibilidad	0.00000	0.0000	0.00
Operador	0.00000	0.0000	0.00
Parte a Parte	4.22953	21.7821	98.03
Total de Variación	4.31458	22.2201	100.00

Número de categorías = 6

5.2.6. PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO DE EXPERIMENTOS

Para el planteamiento del diseño de experimentos es necesario primeramente definir las Y's, es decir, las salidas que se desean obtener, en este caso el valor del RMC; además de definir las X's, que vienen siendo las variables de interés que pueden tener un impacto significativo en la respuesta del sistema. En este proyecto se está interesado en entender el fenómeno de deshidratación de la ropa, por lo tanto, se establecen tres variables de interés previamente definidas en el CTQ Flow Down, tomando en cuenta: el tamaño de carga de ropa, la velocidad y el tiempo de centrifugado; centrándose únicamente en la carga de ropa tipo DOE ya que es un tipo de ropa con dimensiones y geometría estandarizada que permite evitar el ruido que se podría presentar por incluir en la prueba diferentes geometrías y tamaños de trapos, así como, este tipo de carga es la que se utiliza para llevar a cabo la certificación de Energía de la lavadora. En la Tabla 6 se muestra el diseño planteado, así como cada uno de los niveles para las variables de control, y los parámetros constantes establecidos para las demás condiciones.

Tabla 6. Diseño de experimentos.

RMC	
Diseño de experimentos	
Y's	Nivel
RMC (%)	-
X's	Nivel
Cantidad de carga (lb)	6,16
Velocidad (rpm)	500,800
Tiempo de centrifugado (min)	3.5,13.5
Constantes	Nivel
Tipo de ropa	DOE
Tipo de detergente	NA
Cantidad de detergente (gr)	NA
Voltaje (V)	120
Frecuencia (Hz)	60
Tipo de suavizante	NA
Cantidad de suavizante (ml)	NA
Temperatura del agua de suministro caliente (°C)	57
Temperatura del agua de suministro fría (°C)	15.7
Dureza del agua (ppm)	NA
Características de la lavadora	
Lavadora WMH74201WDAB0 4.6 ft ³	

5.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

En Minitab se genera el diseño factorial y se lleva a cabo cada una de las pruebas en el orden especificado, obteniéndose el RMC como se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados del diseño de experimentos para el RMC.

Orden	Bloques	Tamaño (lb)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	RMC (%)
1	1	6	500	3.5	80.82
2	1	16	800	3.5	50.45
3	1	16	500	13.5	64.68
4	1	6	800	13.5	51.71
5	2	16	500	3.5	71.43
6	2	6	800	3.5	58.72
7	2	6	500	13.5	73.39
8	2	16	800	13.5	43.86

Primeramente, es necesario saber si los datos tienen un comportamiento normal, donde la hipótesis nula es que los datos se comportan como una normal y la hipótesis alternativa es que los datos no se comportan como una normal. La gráfica de normalidad se muestra en la Figura 21, cuya media tiene un valor de 61.88, desviación estándar de 12.87 y un valor de P igual a 0.842; como se tiene un valor de P mayor a 0.05, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula y se puede decir con al menos un 95% de confianza que los datos se comportan como una normal.

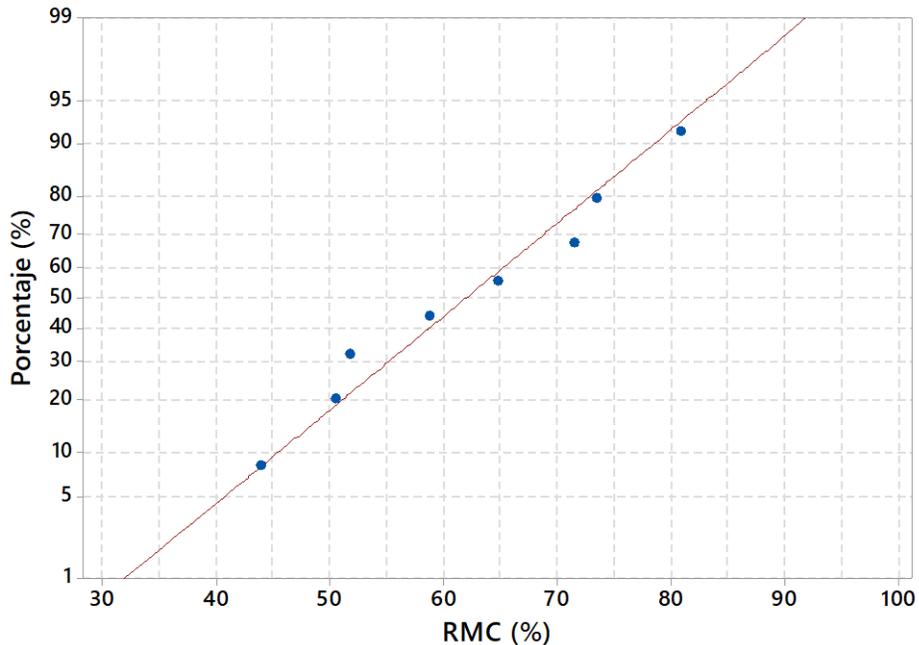


Figura 21. Gráfica de prueba de normalidad para los resultados de RMC.

Se corre el análisis estadístico donde se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : la variable no es significativa
- H_a : la variable es significativa
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

En la Tabla 8 se muestra el análisis correspondiente, donde se cuentan con 7 grados de libertad (DF por sus siglas en inglés); así como con base a la suma total de cuadrados (SS por sus siglas en inglés) se observa que el modelo lineal tiene mayor significancia en la variación de la respuesta. También, se muestran los resultados obtenidos para la media de cuadrados, la distribución F y el valor P, donde este análisis se centra en el valor P. Al no poderse obtener un valor P, se procede a quitar la interacción de las tres variables para realizar nuevamente el análisis, como se muestra en la Tabla 9; ya que la interacción de las tres variables no es significativa, lo que provoca ruido y el modelo no es capaz de obtenerse.

Tabla 8. Análisis de Diseño de Experimentos.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	7	1159.03	165.575	*	*
Lineal	3	1158.33	386.111	*	*
Tamaño (lb)	1	146.38	146.376	*	*
Velocidad (rpm)	1	915.49	915.492	*	*
Tiempo (min)	1	96.47	96.466	*	*
Interacción – 2 variables	3	0.68	0.228	*	*
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	0.49	0.490	*	*
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	0.15	0.151	*	*
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.04	0.042	*	*
Interacción – 3 variables	1	0.01	0.008	*	*
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.01	0.008	*	*
Error	0	*	*		
Total	7	1159.03			

Tabla 9. Análisis de Diseño de Experimentos sin la interacción de las tres variables.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	6	1159.02	193.170	22860.31	0.005
Lineal	3	1158.33	386.111	45693.65	0.003
Tamaño (lb)	1	146.38	146.376	17322.61	0.005
Velocidad (rpm)	1	915.49	915.492	108342.25	0.002
Tiempo (min)	1	96.47	96.466	11416.10	0.006
Interacción – 2 variables	3	0.68	0.228	26.96	0.140
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	0.49	0.490	57.99	0.083
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	0.15	0.151	17.90	0.148
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.04	0.042	4.98	0.268
Error	1	0.01	0.008		
Total	7	1159.03			

Del ANOVA mostrado en la Tabla 9 se observa que el tamaño, velocidad y tiempo tienen un valor de P menor a 0.05, por lo que se puede decir que, con al menos un 95% de confianza, no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, son variables estadísticamente significativas. Como se confirma en la Figura 22 donde se muestran los efectos principales graficados de cada variable y se observa claramente una pendiente; es decir, considerando solamente el aumento del tamaño de la carga en 10 lb, el RMC disminuyó un 12.93%, ya que, su valor disminuyó de 66.16% a 57.61%. Considerando el aumento de la velocidad en 300 rpm, el RMC disminuyó un 29.48%,

ya que el valor del RMC decrementó de 72.58% a 51.19%; y finalmente, considerando el aumento del tiempo en 10 minutos, el RMC disminuyó un 15.37%, ya que su valor se redujo de 69.02% a 53.65%. Por lo que, se puede decir que la velocidad es el factor que contribuye mayormente a la disminución del RMC con un pendiente de -2.14, la cual es negativa porque indica que a mayor velocidad se obtiene un menor RMC. En segundo lugar, se tiene el tiempo, con una pendiente de -1.06; y finalmente se tiene el tamaño como el factor que menos contribuye a la disminución del RMC, con -0.85 de pendiente.

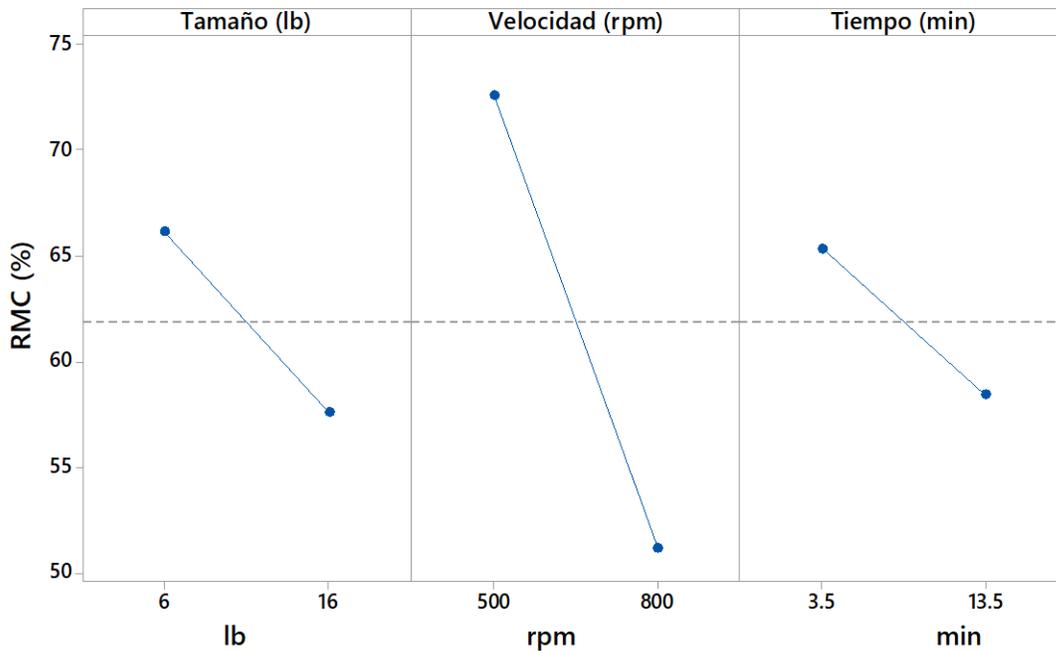


Figura 22. Gráfica de efectos principales para el RMC.

Utilizando la Ecuación 7, se calculan los efectos principales, obteniendo lo siguiente:

- Tamaño = -8.555
- Tiempo = -6.945
- Velocidad = -21.395

El parámetro de velocidad tiene una mayor pendiente, por lo tanto, ese efecto principal es mayor en un 308% y 250% comparado con el efecto principal del tiempo y tamaño de carga respectivamente. Además, las pendientes negativas indican que, conforme va aumentando el valor del factor, el RMC va disminuyendo. La variable de velocidad es la que tiene mayor peso sobre la respuesta, seguido por el tamaño de carga y finalmente el tiempo; donde, conforme éstos van aumentando, generan una disminución en el RMC de 33.74%, 13.74% y 10.35%, respectivamente.

Mientras que, para las interacciones, al tener un valor de P mayor a 0.05, se determina que se puede rechazar la hipótesis nula con al menos un 95% de confianza, donde se acepta la hipótesis alternativa y no son significativas.

Utilizando la Ecuación 8, se calculan las interacciones, obteniendo lo siguiente:

- Tamaño/Tiempo = 0.275
- Tamaño/Velocidad = 0.495
- Tiempo/Velocidad = 0.145
- Tamaño/Tiempo/Velocidad = -0.065

Además, se confirma con la Figura 23, donde se observa que las variables graficadas son paralelas entre ellas en cada uno de los casos respectivos.

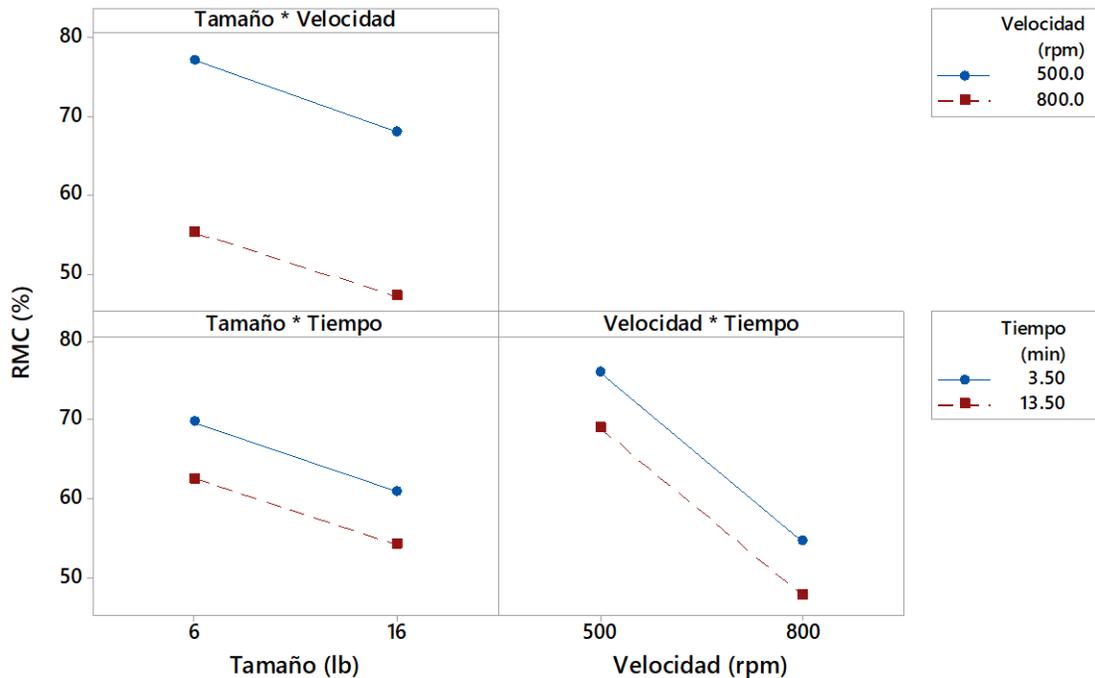


Figura 23. Gráfica de interacción de variables para el RMC.

Como se puede observar en los cálculos, los resultados del efecto de las interacciones sobre la respuesta del sistema prácticamente son nulos. Y todos estos resultados, tanto del efecto de las variables independientes como sus interacciones, se pueden verificar con la Figura 24, donde se muestra la gráfica de Pareto obtenida en el software de análisis estadístico (Minitab). Donde la línea de referencia para significancia estadística, en este caso 1.19, se traza en Z, donde Z es el cuantil $(1 - \alpha/2)$ de una distribución normal estándar.

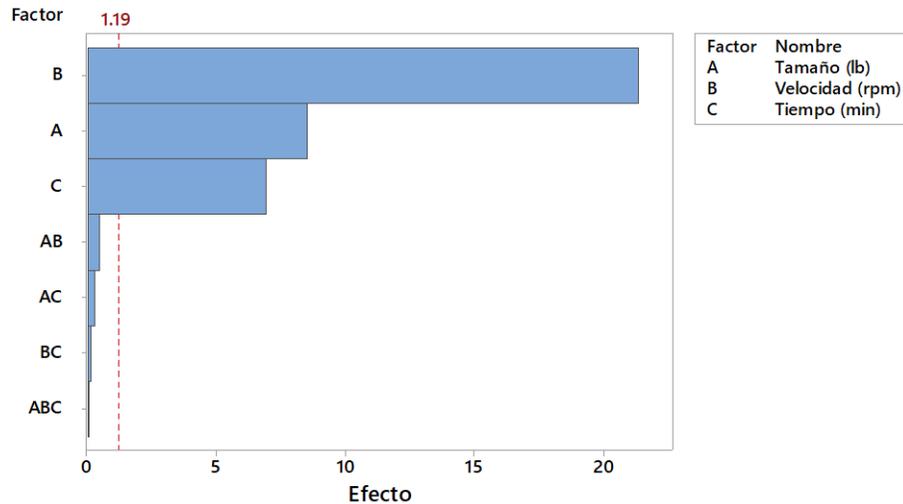


Figura 24. Gráfica de Pareto para los efectos.

En la Figura 25 se muestra el diagrama cubo donde se observa que la zona óptima, es decir, donde se obtiene un menor porcentaje de contenido de humedad es a la máxima carga (16 lb), mayor velocidad (800 rpm) y mayor tiempo (13.5 minutos).

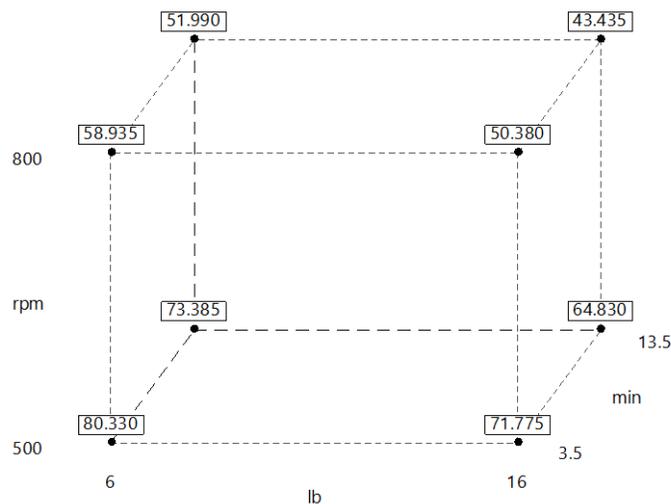


Figura 25. Gráfica de cubo de las variables del sistema para el RMC.

Para optimizar el modelo, se procede a discriminar las interacciones, ya que no son significativas y los resultados se muestran en la Tabla 10. Donde el valor de P obtenido tanto para el tamaño de carga, como velocidad y tiempo es menor a 0.05, con lo que se puede decir, con al menos un 95% de confianza, que no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, las variables son significativas. Además, se obtiene una función de transferencia con un 99.94% de ajuste y un 99.76% de predicción:

$$RMC = 123.552 - 0.8555 \text{ Tamaño (lb)} - 0.071317 \text{ Velocidad (rpm)} - 0.6945 \text{ Tiempo (min)} \quad (10)$$

Tabla 10. Análisis de diseño de experimentos sin interacciones.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	3	1158.33	386.111	2232.50	0.000
Lineal	3	1158.33	386.111	2232.50	0.000
Tamaño (lb)	1	146.38	146.376	846.35	0.000
Velocidad (rpm)	1	915.49	915.492	5293.39	0.000
Tiempo (min)	1	96.47	96.466	557.77	0.000
Error	4	0.69	0.173		
Total	7	1159.03			

5.4. MEJORAR LA RESPUESTA DEL SISTEMA

Derivado de que los tres factores resultaron estadísticamente significativos, se agregaron puntos centrales (ver Tabla 11) para determinar si el comportamiento de deshidratación tiene curvatura. Se agregaron seis puntos centrales y se llevó a cabo la medición del RMC:

Tabla 11. Puntos centrales de medición del RMC.

Orden	Bloques	Tamaño (lb)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	RMC (%)
1	1	6	500	3.5	80.82
2	1	16	800	3.5	50.45
3	1	16	500	13.5	64.68
4	1	6	800	13.5	51.71
5	2	16	500	3.5	71.43
6	2	6	800	3.5	58.72
7	2	6	500	13.5	73.39
8	2	16	800	13.5	43.86
9	1	11	650	8.5	56.66
10	1	11	650	8.5	58.34
11	1	11	650	8.5	57.84
12	1	11	650	8.5	56.89
13	1	11	650	8.5	57.03
14	1	11	650	8.5	57.57

Se corre el análisis estadístico donde se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : no hay curvatura
- H_a : si hay curvatura
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

Como se observa en la Tabla 12, el parámetro de curvatura tiene un valor de P menor a 0.05, por lo que, se puede decir con al menos un 95% de confianza que, el sistema tiene curvatura ya que se rechaza la hipótesis nula.

Tabla 12. Análisis de varianza (ANOVA) de la respuesta RMC.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	8	1228.27	153.534	374.50	0.000
Lineal	3	1158.33	386.111	941.79	0.000
Tamaño (lb)	1	146.38	146.376	357.04	0.000
Velocidad (rpm)	1	915.49	915.492	2233.03	0.000
Tiempo (min)	1	96.47	96.466	235.30	0.000
Interacción – 2 variables	3	0.68	0.228	0.56	0.667
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	0.49	0.490	1.20	0.324
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	0.15	0.151	0.37	0.570
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.04	0.042	0.10	0.762
Interacción – 3 variables	1	0.01	0.008	0.02	0.891
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.01	0.008	0.02	0.891
Curvatura	1	69.25	69.249	168.91	0.000
Error	5	2.05	0.410		
Total	13	1230.32			

En la Figura 26 se muestra el diagrama cubo con el respectivo punto central obtenido, donde se observa que la zona óptima (menor valor de RMC) está ubicada en la esquina cuyos parámetros son: velocidad de 800 rpm, tamaño de 16 lb y tiempo de 13.5 minutos; mientras que el peor caso está dado por una velocidad de 500 rpm, con un tamaño de 6 lb y un tiempo de 3.5 minutos, ya que el RMC obtenido es el del mayor valor.

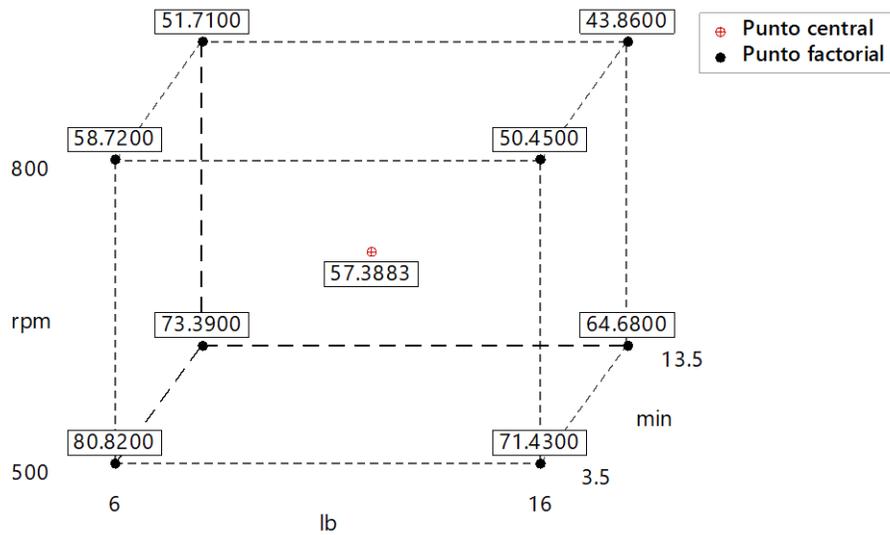


Figura 26. Gráfica de cubo con puntos centrales.

En la Figura 27 se muestra la gráfica de efectos principales actualizada, donde se mantienen los tres factores como variables significativas coincidiendo con el ANOVA realizado anteriormente; y en la Figura 28 se muestra la gráfica de interacción, donde se mantiene la relación de paralelismo entre las variables, siendo no significativas dichas interacciones siendo consistente con el ANOVA también.

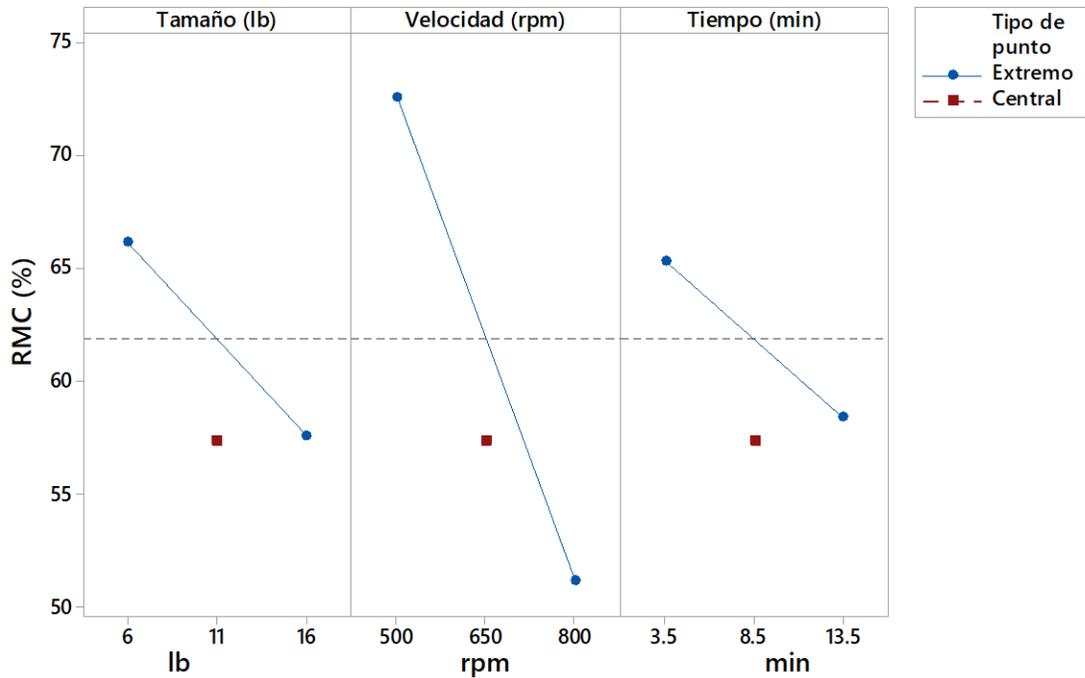


Figura 27. Gráfica de efectos principales con puntos centrales.

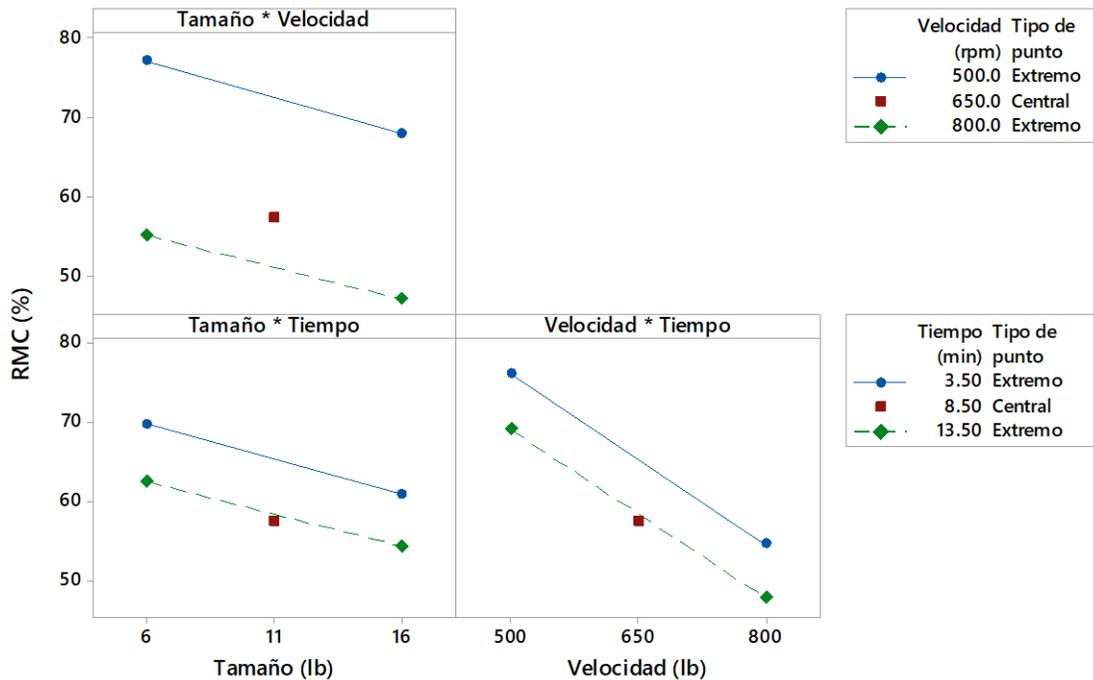


Figura 28. Gráfica de interacción entre variables con puntos centrales.

Debido a que se encontró curvatura en el sistema es necesario agregar puntos estrella, ya que un punto central no proporciona suficientes datos adicionales para modelar con precisión la relación cuadrática presente.

Los puntos estrella están localizados sobre la superficie del cubo de diseño. Si estos seis puntos centrales se extendieran fuera de la superficie del cubo por un factor de distancia determinada (ver Ecuación 11), entonces el diseño puede transformarse en un experimento de cinco niveles, como se muestra en la Figura 29.

$$Distancia = \sqrt[4]{(\text{número de puntos del cubo en el diseño})} \quad (11)$$

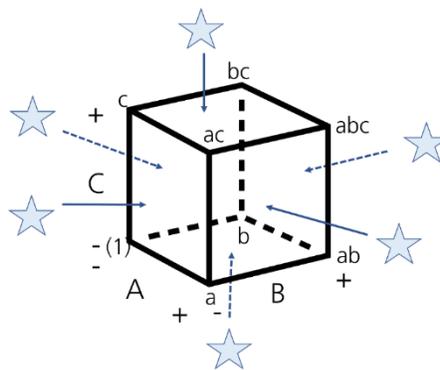


Figura 29. Puntos estrella representados en el cubo del diseño de experimentos.

En la Tabla 13 se muestran los puntos estrella agregados, así como sus respectivos resultados.

Tabla 13. Análisis de puntos estrella en la respuesta del sistema.

Orden	Tipo	Bloques	Tamaño (lb)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	RMC (%)
1	1	1	6	500	3.5	80.82
2	1	1	16	800	3.5	50.45
3	1	1	16	500	13.5	64.68
4	1	1	6	800	13.5	51.71
5	1	2	16	500	3.5	71.43
6	1	2	6	800	3.5	58.72
7	1	2	6	500	13.5	73.39
8	1	2	16	800	13.5	43.86
9	0	1	11	650	8.5	56.66
10	0	1	11	650	8.5	58.34
11	0	1	11	650	8.5	57.84
12	0	1	11	650	8.5	56.89
13	0	1	11	650	8.5	57.03
14	0	1	11	650	8.5	57.57
15	-1	1	2.835	650	8.5	64.51
16	-1	1	19.165	650	8.5	52.99
17	-1	1	11	405.05	8.5	79.85
18	-1	1	11	894.95	8.5	44.38
19	-1	1	11	650	0.335	70.62
20	-1	1	11	650	16.665	55.12

La gráfica de normalidad se muestra en la Figura 30, cuya media tiene un valor de 60.34, desviación estándar de 10.44 y un valor de P igual a 0.147; como se tiene un valor de P mayor a 0.05, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula y se puede decir con al menos un 95% de confianza que los datos se comportan como una normal.

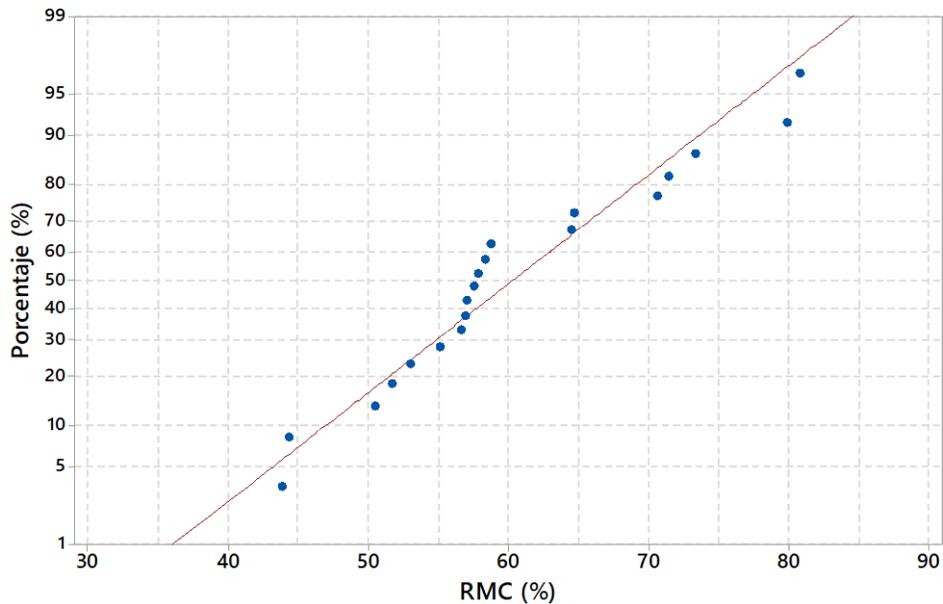


Figura 30. Gráfica de normalidad para los datos con puntos centrales y puntos estrella.

Nuevamente se corre el análisis estadístico donde se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : la variable no es significativa
- H_a : la variable es significativa
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

En la Tabla 14 se muestran los resultados obtenidos del análisis estadístico. Siguiendo los criterios establecidos sobre la hipótesis nula, el parámetro cuadrático del tamaño de carga, así como las interacciones presentes entre dos variables, no son significativas; ya que su valor de P es mayor a 0.05 y por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula. En la Figura 31 se muestra el diagrama de Pareto donde se observan visualmente estas conclusiones; así como en la Figura 32 se muestra la gráfica de efectos principales donde se observa un comportamiento lineal en el RMC respecto al tamaño de carga, por otro lado, se observa un comportamiento cuadrático en el RMC para el parámetro de velocidad y tiempo.

Tabla 14. Análisis estadístico con puntos estrella.

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	11	2063.00	187.55	165.12	0.000
Bloques	2	0.12	0.06	0.05	0.950
Lineal	3	1966.80	655.60	577.21	0.000
Tamaño (lb)	1	210.93	210.93	185.71	0.000
Velocidad (rpm)	1	1544.47	1544.47	1359.80	0.000
Tiempo (min)	1	211.40	211.40	186.13	0.000
Cuadrático	3	95.40	31.80	28.00	0.000
Tamaño (lb)*Tamaño (lb)	1	3.94	3.94	3.47	0.099
Velocidad (rpm)*Velocidad (rpm)	1	43.19	43.19	38.02	0.000
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1	57.77	57.77	50.86	0.000
Interacción – 2 variables	3	0.68	0.23	0.20	0.893
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	0.49	0.49	0.43	0.530
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	0.15	0.15	0.13	0.725
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	0.04	0.04	0.04	0.852
Error	8	9.09	1.14		
Falta de ajuste	5	7.08	1.42	2.11	0.285
Error puro	3	2.01	0.67		
Total	19	2072.08			

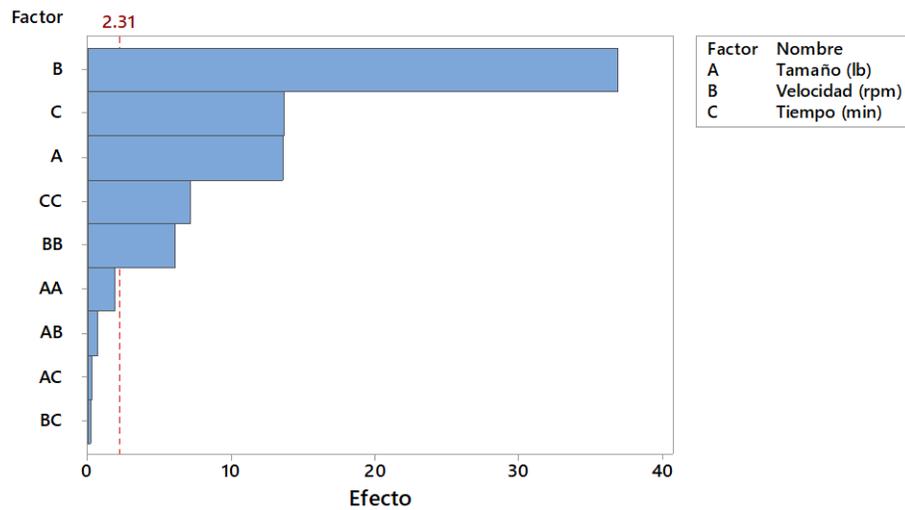


Figura 31. Gráfica de Pareto de los efectos con puntos estrella.

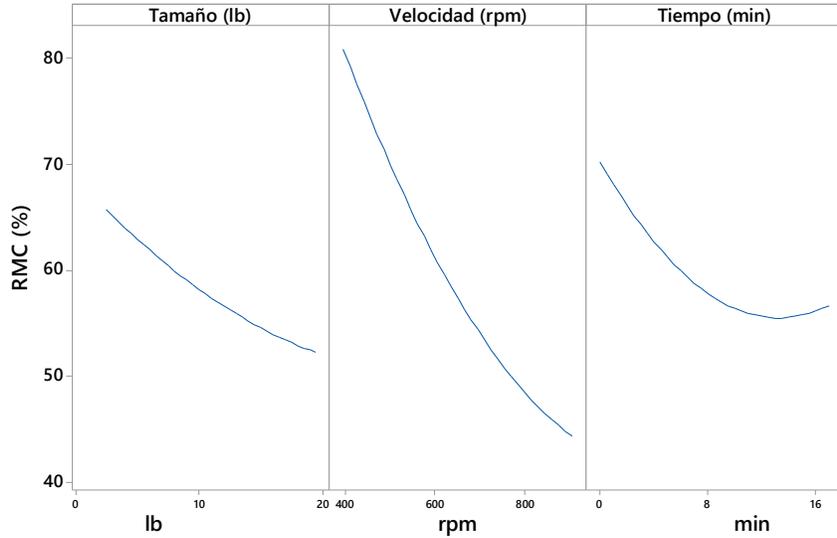


Figura 32. Gráfica de efectos principales.

Como se observa en la Figura 32, considerando solamente los puntos extremos en donde cambió el tamaño de carga (2.835 y 19.165 lb), el aumento de 16.33 lb generó una disminución en el RMC de 17.85%, ya que su valor decrementó de 64.51% a 52.99%. En cuanto a la velocidad, el aumento de 489.9 rpm, generó una disminución en el RMC de 44.42%, puesto que el valor del RMC disminuyó de 79.85% a 44.38%; mientras que, para el tiempo, el aumento de 16.33 minutos generó una disminución en el RMC de 21.95%, porque el RMC se redujo de 70.62% a 55.12%. Por lo que, se puede decir que la velocidad es el factor que contribuye mayormente a la disminución del RMC, seguido por el tiempo y finalmente por el tamaño, siendo éste el factor que menos contribuye a la disminución del RMC.

Se procede a quitar las interacciones y el parámetro cuadrado del tamaño de carga, ya que no son significativas y los resultados se muestran en la Tabla 15. Donde el valor de P obtenido tanto para el tamaño de carga, como velocidad y tiempo es menor a 0.05, con lo que se puede decir, con al menos un 95% de confianza, que no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, las variables son significativas, siguiendo un comportamiento lineal. Así como el parámetro cuadrático de velocidad y tiempo se determinan como significativos. Además, se obtiene una función de transferencia con un 99.34% de ajuste y un 97.41% de predicción:

$$RMC = 159.12 - 0.7955 \text{ Tamaño (lb)} - 0.1740 \text{ Velocidad (rpm)} - 2.192 \text{ Tiempo (min)} + 0.000079 \text{ Velocidad (rpm)} * \text{Velocidad (rpm)} + 0.0821 \text{ Tiempo (min)} * \text{Tiempo (min)} \quad (12)$$

Tabla 15. Análisis estadístico del RMC con puntos estrella y variables significativas.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	7	2058.37	294.05	257.30	0.000
Bloques	2	0.12	0.06	0.05	0.950
Lineal	3	1966.80	655.60	573.66	0.000
Tamaño (lb)	1	210.93	210.93	184.57	0.000
Velocidad (rpm)	1	1544.47	1544.47	1351.44	0.000
Tiempo (min)	1	211.40	211.40	184.98	0.000
Cuadrático	2	91.45	45.73	40.01	0.000
Velocidad (rpm)*Velocidad (rpm)	1	41.55	41.55	36.36	0.000
Tiempo (min)*Tiempo (min)	1	55.92	55.92	48.93	0.000
Error	12	13.71	1.14		
Falta de ajuste	9	11.71	1.30	1.94	0.318
Error puro	3	2.01	0.67		
Total	19	2072.08			

La velocidad representa un 74.82% de efecto sobre el RMC obtenido, mientras que el tamaño y tiempo, representan 10.24% y 10.22%, respectivamente. El parámetro de velocidad al cuadrado representa un 2.03% de efecto sobre el RMC, y el tiempo al cuadrado representa un 2.71%. De esta manera, la velocidad es la variable con mayor influencia sobre la respuesta del RMC, seguido por el tiempo, tamaño, tiempo al cuadrado y velocidad al cuadrado.

En la Figura 33, Figura 34 y Figura 35 se muestran las gráficas de contorno para el RMC respecto a velocidad y tamaño, tiempo y tamaño, así como tiempo y velocidad, respectivamente; donde se observa que a mayor velocidad, tamaño de carga y tiempo de centrifugado se obtiene un menor RMC. Por ejemplo, en la gráfica de la Figura 33 se puede observar que, para un tamaño de 5 lb a 450 rpm, el RMC tendrá un valor mayor a 80%, mientras que, para un tamaño de 17.5 lb a esa misma velocidad (450 rpm), el RMC tendrá un valor entre 70 y 80%. Por otro lado, considerando estos mismos valores de carga, 5 y 17.5 lb, pero ahora a una velocidad de 800 rpm, se obtendrán valores de RMC entre 50 y 60% para 5 lb, y entre 40 y 50% para 17.5 lb. Por lo que, se puede decir que el aumento en la velocidad de 350 rpm sin importar el tamaño de la carga, provoca una disminución en el RMC del 40% aproximadamente; sin embargo, sin importar la velocidad, la disminución en el RMC debido al aumento del tamaño de carga (12.5 lb) sería de 11%, lo que demuestra que la velocidad tiene mayor influencia sobre la disminución del RMC que el tamaño de carga.

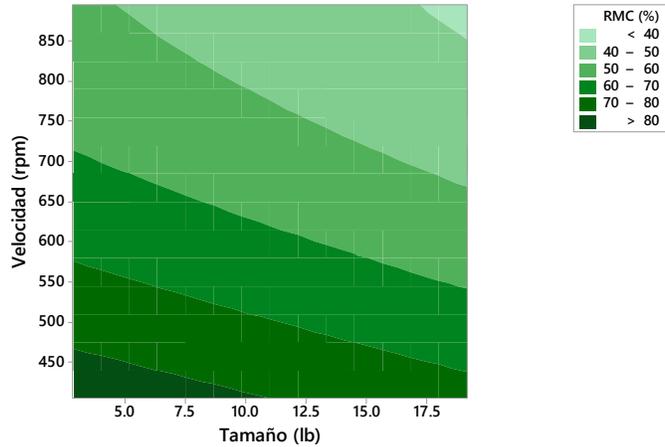


Figura 33. Gráfica de contorno del RMC respecto a velocidad y tamaño de carga.

Por otro lado, en la gráfica de la Figura 34 se puede observar que, para un tamaño de 5 lb durante 2 minutos de centrifugado, el RMC tendrá un valor entre 70 y 75%, mientras que, para un tamaño de 17.5 lb durante ese mismo tiempo (2 minutos), el RMC tendrá un valor entre 60 y 65%. Por otro lado, considerando estos mismos valores de carga, 5 y 17.5 lb, pero ahora durante un tiempo de 14 minutos, se obtendrán valores de RMC entre 60 y 65% para 5 lb, y entre 50 y 55% para 17.5 lb. Por lo que, se puede decir que el aumento en el tiempo de 12 minutos, sin importar el tamaño de la carga, provoca una disminución en el RMC del 15% aproximadamente; sin embargo, sin importar el tiempo de centrifugado, la disminución en el RMC debido al aumento del tamaño de carga (12.5 lb) sería de 13%, lo que demuestra que el tiempo tiene mayor influencia sobre la disminución del RMC que el tamaño.

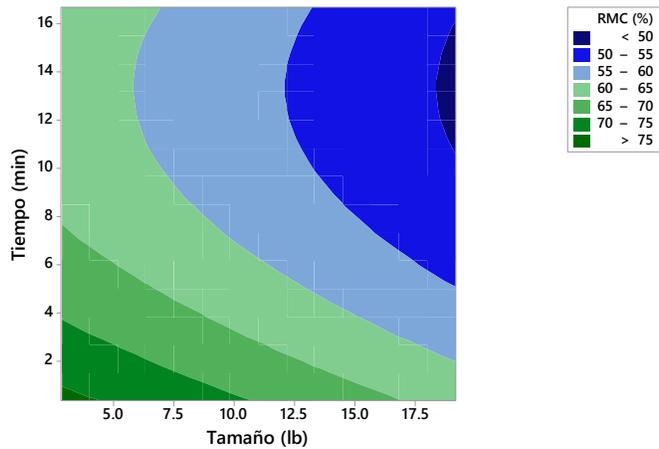


Figura 34. Gráfica de contorno del RMC respecto a tiempo y tamaño de carga.

Finalmente, en la gráfica de la Figura 35 se puede observar que, para una velocidad de 450 rpm durante 2 minutos de centrifugado, el RMC tendrá un valor entre 80 y 90%, mientras que, para una velocidad de 800 rpm durante ese mismo tiempo (2 minutos), el RMC tendrá un valor entre 50 y 60%. Por otro lado, considerando estos mismos valores de velocidad, 450 y 800 rpm, pero ahora durante un tiempo de 14 minutos, se obtendrán valores de RMC entre 70 y 80% para

450 rpm, y menor a 50% para 800 rpm. Por lo que, se puede decir que el aumento en el tiempo de 12 minutos, sin importar la velocidad de giro, provoca una disminución en el RMC del 12% aproximadamente; sin embargo, sin importar el tiempo de centrifugado, la disminución en el RMC debido al aumento de velocidad (350 rpm) sería de 33%, lo que demuestra que la velocidad tiene mayor influencia sobre la disminución del RMC en comparación con el tiempo y tamaño de carga.

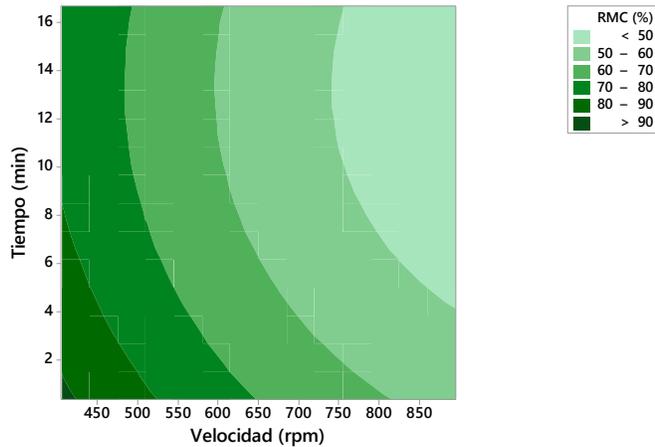


Figura 35. Gráfica de contorno del RMC respecto a tiempo y velocidad.

Así como en la Figura 36, Figura 37 y Figura 38 se muestra la superficie de respuesta obtenida respecto a tamaño y velocidad, tiempo y velocidad, además de tiempo y tamaño, respectivamente; donde se observa que el RMC se comporta con curvatura debido al parámetro de velocidad y tiempo. En la Figura 36 se observa que el valor del RMC se mantiene prácticamente constante sin importar el tamaño de carga, donde el RMC va disminuyendo conforme se aumenta la velocidad. En la Figura 37 se observa que, el RMC se mantiene prácticamente constante, con pequeña curvatura, sin importar el tiempo de centrifugado conforme se aumenta la velocidad. Por otro lado, en la Figura 38 se muestra una mayor curvatura entre el tiempo y tamaño de carga, donde a mayor tamaño de carga, el valor del RMC es menor.

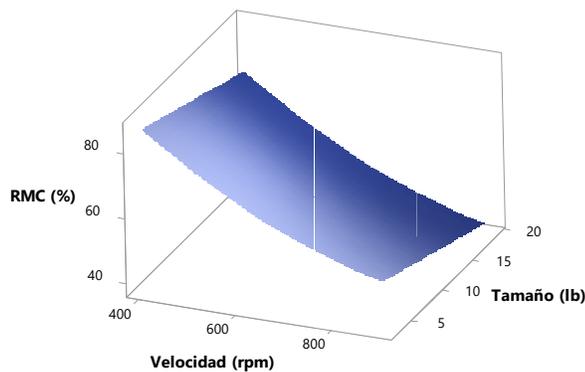


Figura 36. Superficie de respuesta del RMC respecto a tamaño de carga y velocidad.

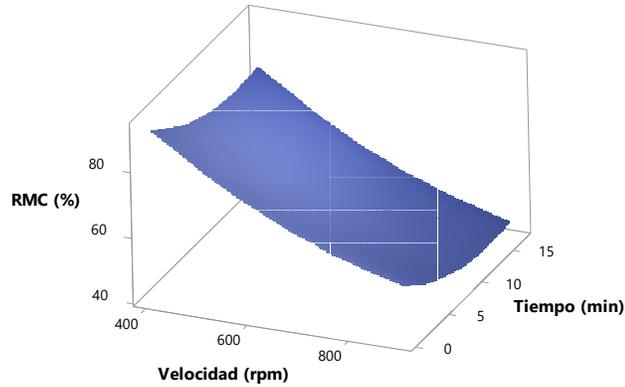


Figura 37. Superficie de respuesta del RMC respecto a tiempo y velocidad.

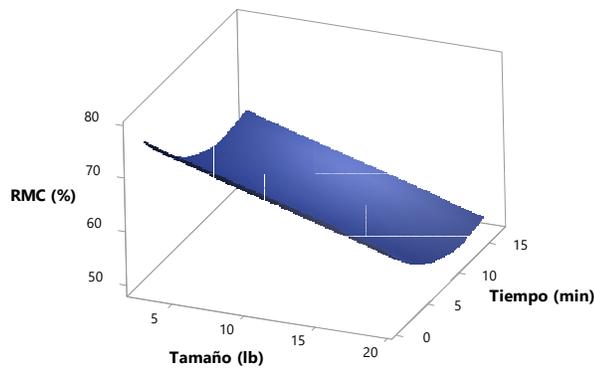


Figura 38. Superficie de respuesta del RMC respecto a tiempo y tamaño de carga.

Por otro lado, se está interesado en optimizar la respuesta del sistema, es decir, obtener el menor valor de RMC para diversos tamaños de carga en particular. Por ejemplo, en la Figura 39 se observa que, para un tamaño de carga de 19.165 lb el menor valor de RMC posible a obtener sería de 36.52% con una velocidad de 894.95 rpm durante un tiempo de centrifugado de 13.36 minutos.

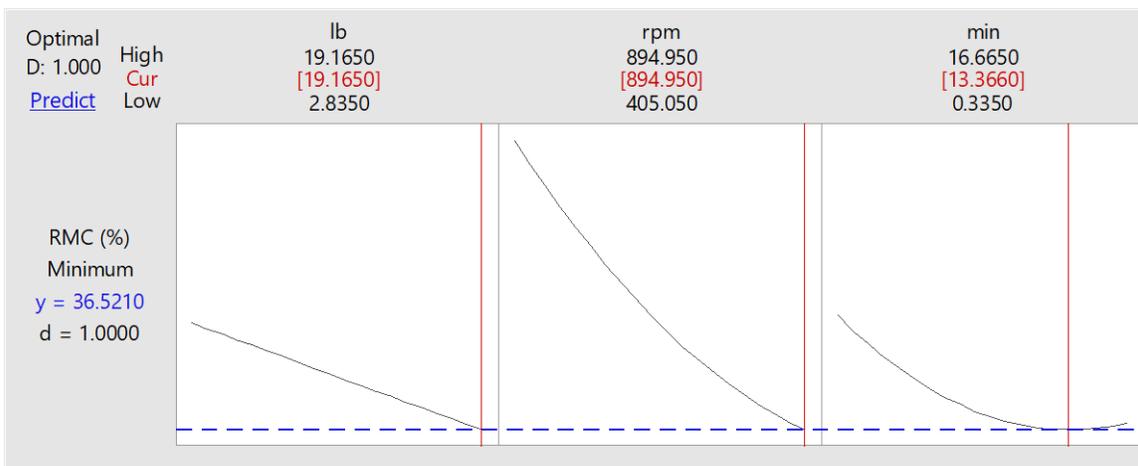


Figura 39. Optimización de la respuesta del sistema.

Suponiendo que se cuenta con una carga de 13.05 lb y 6.5 lb, el menor valor posible de RMC a obtener sería de 41.38% y 46.59% respectivamente, en una prueba a 894.95 rpm durante 13.36 minutos de centrifugado, como se observa en la Figura 40 y Figura 41, respectivamente.

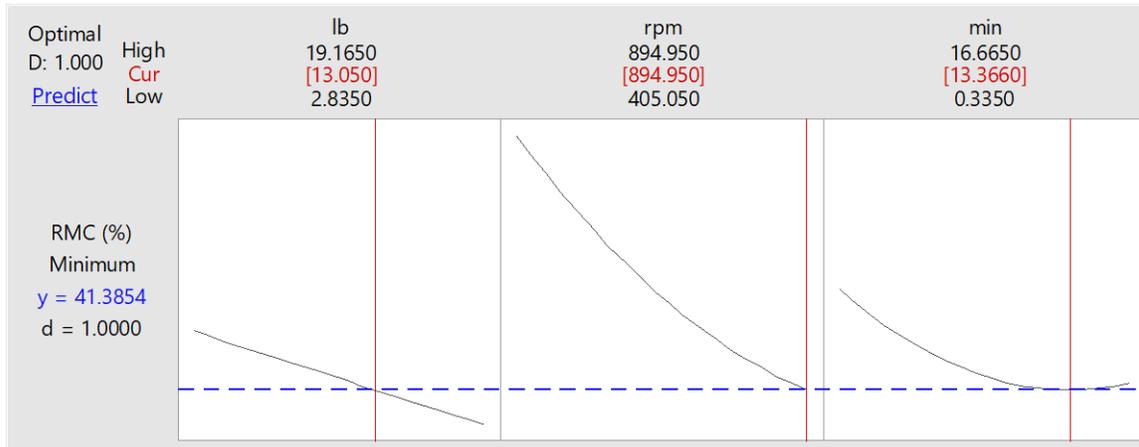


Figura 40. Optimización del RMC para una carga de 13.05 lb

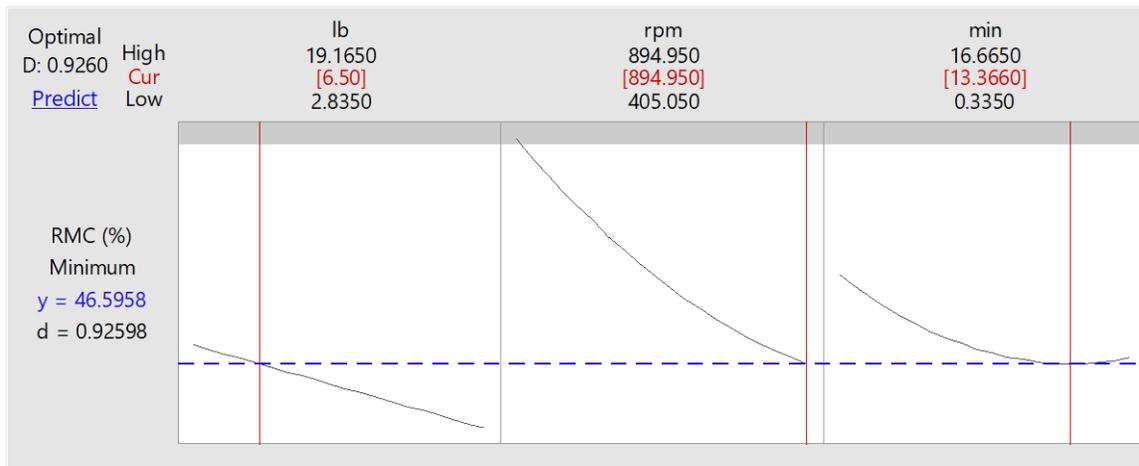


Figura 41. Optimización del RMC para una carga de 5.9 lb.

5.5. CONTROL DE LA RESPUESTA DEL SISTEMA

Es necesario validar que la Función de Transferencia obtenida anteriormente (Ecuación 12) pueda predecir, con el menor porcentaje de error posible, el valor de RMC; por lo tanto, se establecen una serie de pruebas como se muestra a continuación.

Primeramente, se hizo una prueba siguiendo el método de la norma especificado con 8 lb de carga tipo DOE a 450 rpm de velocidad de centrifugado durante un tiempo de 17.5 minutos. En la Tabla 16 se muestra el registro del valor del RMC medido experimentalmente cada 2.5 minutos,

así como el RMC calculado utilizando la función de transferencia generada (Ecuación 12). En la Figura 42 se muestra gráficamente la comparación entre la prueba experimental y los valores obtenidos mediante la función de transferencia, donde se tienen porcentajes de error menores al 6%, así como un promedio de 3.90% de error para esta prueba. Por lo que, se puede decir que la función de transferencia obtenida tiene un buen porcentaje de ajuste que permite predecir el perfil de deshidratación de la ropa.

Tabla 16. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	89.7	85.5	4.70
5	83.9	81.5	2.81
7.5	82.9	78.6	5.15
10	80.9	76.7	5.14
12.5	79.9	75.9	5.03
15	79	76.0	3.74
17.5	77.8	77.2	0.72

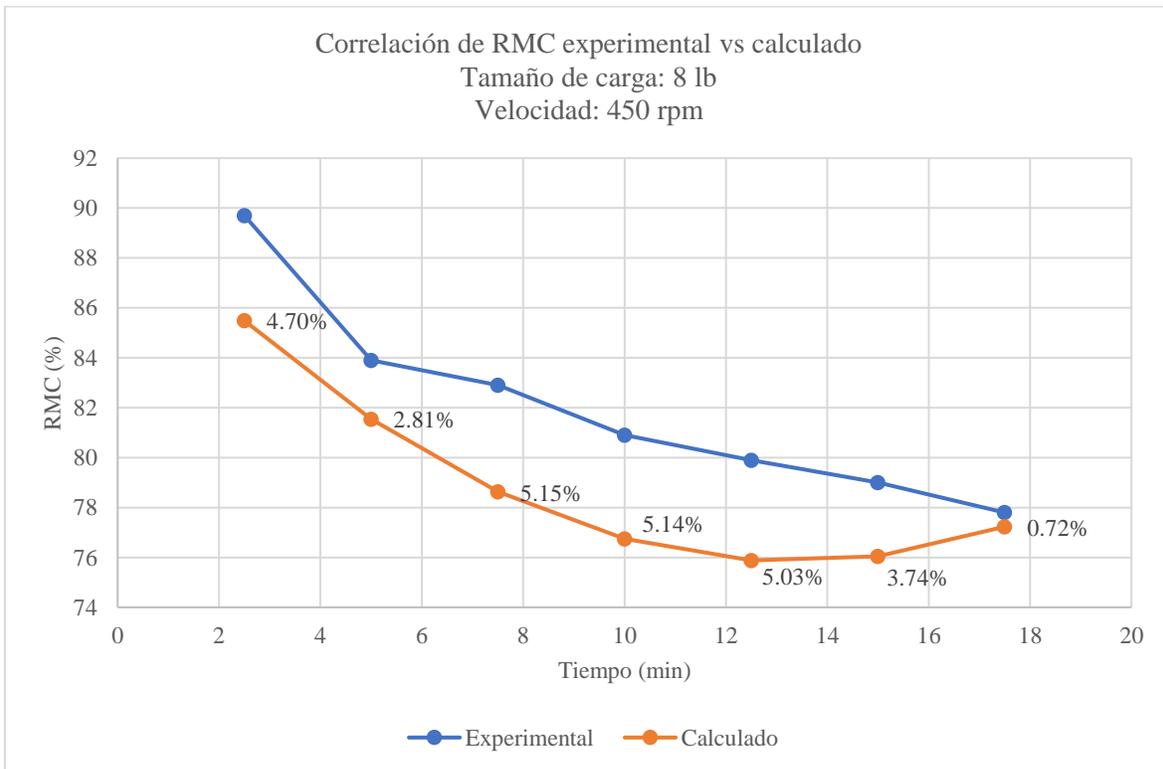


Figura 42. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 8 lb de carga de ropa tipo DOE a 620 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 7% como se muestra en la Tabla 17, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 2.1%. En la Figura 43 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 17. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	68.6	70.3	2.44
5	65.8	66.3	0.81
7.5	62.8	63.4	0.99
10	61.2	61.5	0.55
12.5	60.3	60.7	0.62
15	59.1	60.8	2.94
17.5	58.3	62.0	6.39

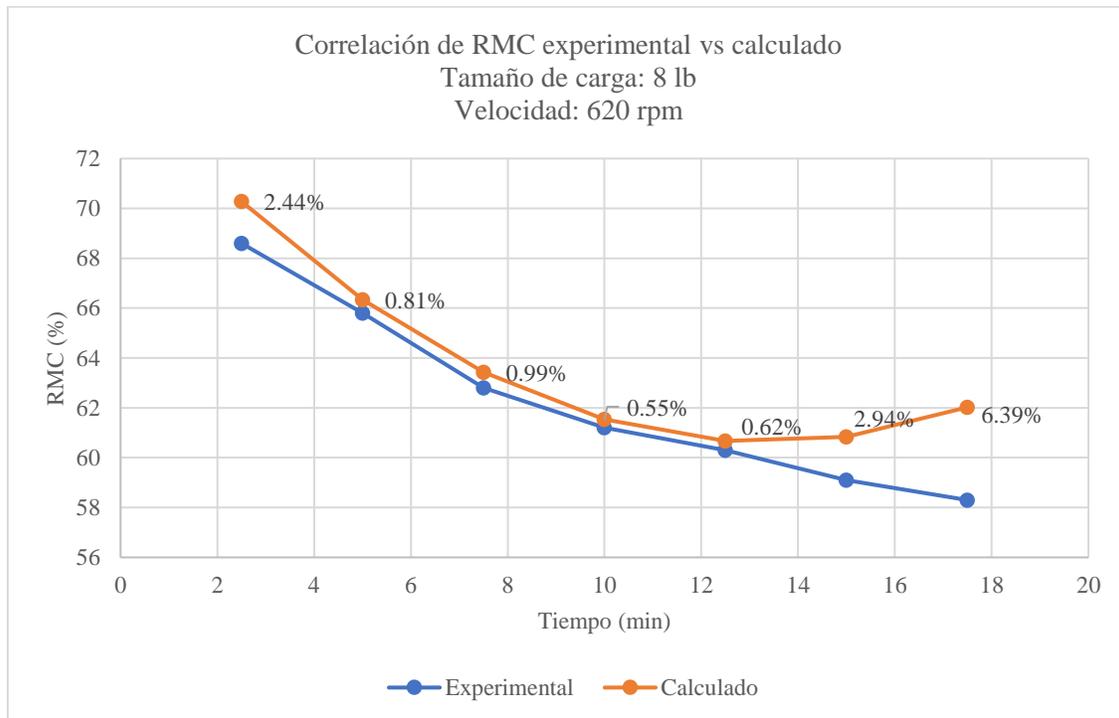


Figura 43. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 8 lb de carga de ropa tipo DOE a 800 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 10% como se muestra en la Tabla 18, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 2.35%. En la Figura 44 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 18. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	58.7	59.1	0.77
5	54.9	55.2	0.56
7.5	52	52.3	0.57
10	50.4	50.4	0.01
12.5	49.1	49.5	0.90
15	47.7	49.7	4.21
17.5	46.5	50.9	9.46

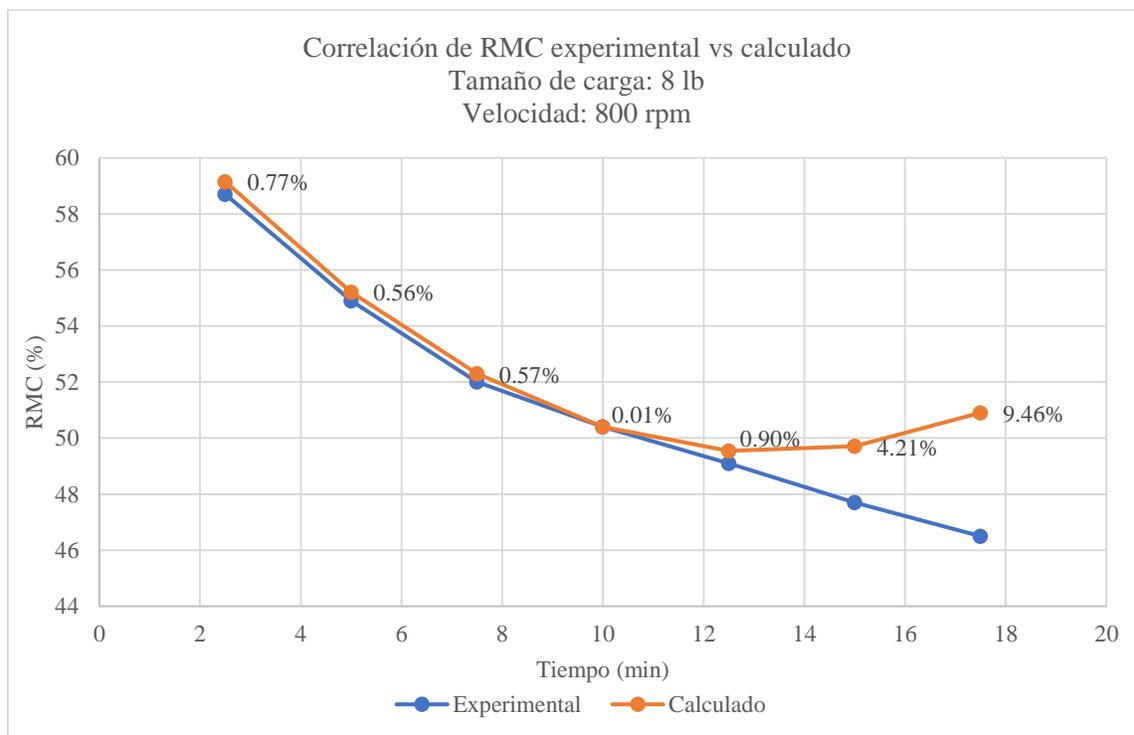


Figura 44. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 14 lb de carga de ropa tipo DOE a 450 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 7% como se muestra en la Tabla 19, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 3.14%. En la Figura 45 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 19. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	86.3	80.7	6.47
5	79.4	76.8	3.31
7.5	77.5	73.9	4.70
10	74	72.0	2.74
12.5	72.4	71.1	1.78
15	71.6	71.3	0.46
17.5	70.7	72.5	2.49

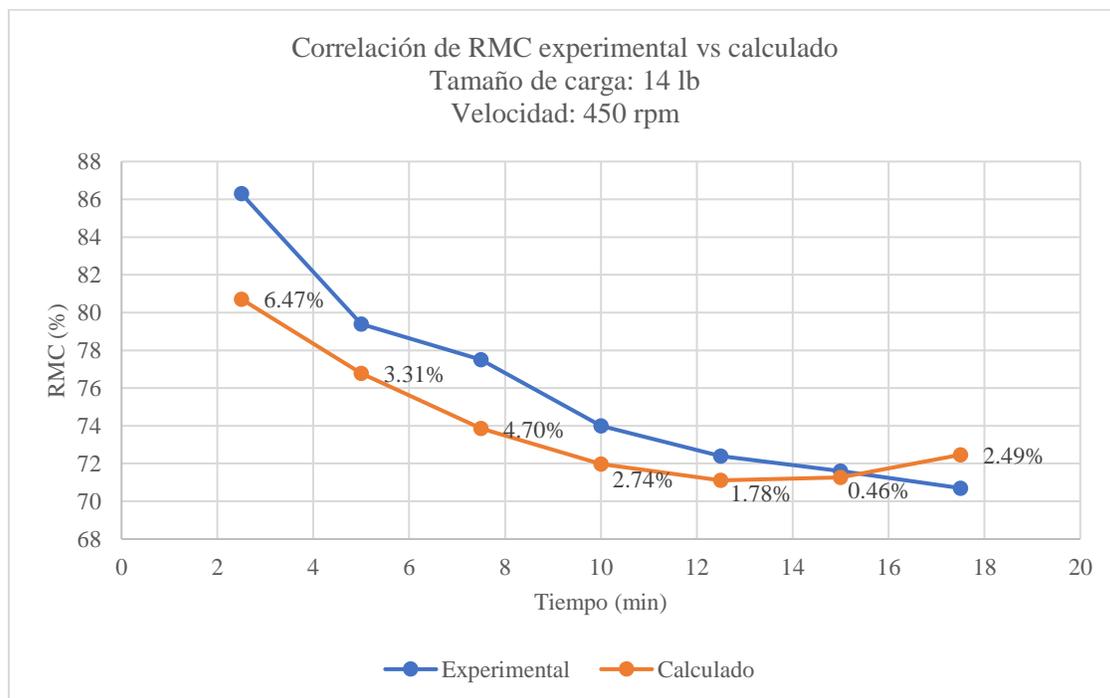


Figura 45. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 14 lb de carga de ropa tipo DOE a 620 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 5% como se muestra en la Tabla 20, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 2.89%. En la Figura 46 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 20. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	67.5	65.5	2.96
5	64.5	61.6	4.55
7.5	60.7	58.6	3.38
10	58.6	56.8	3.14
12.5	57.2	55.9	2.27
15	56.3	56.1	0.42
17.5	55.3	57.3	3.53

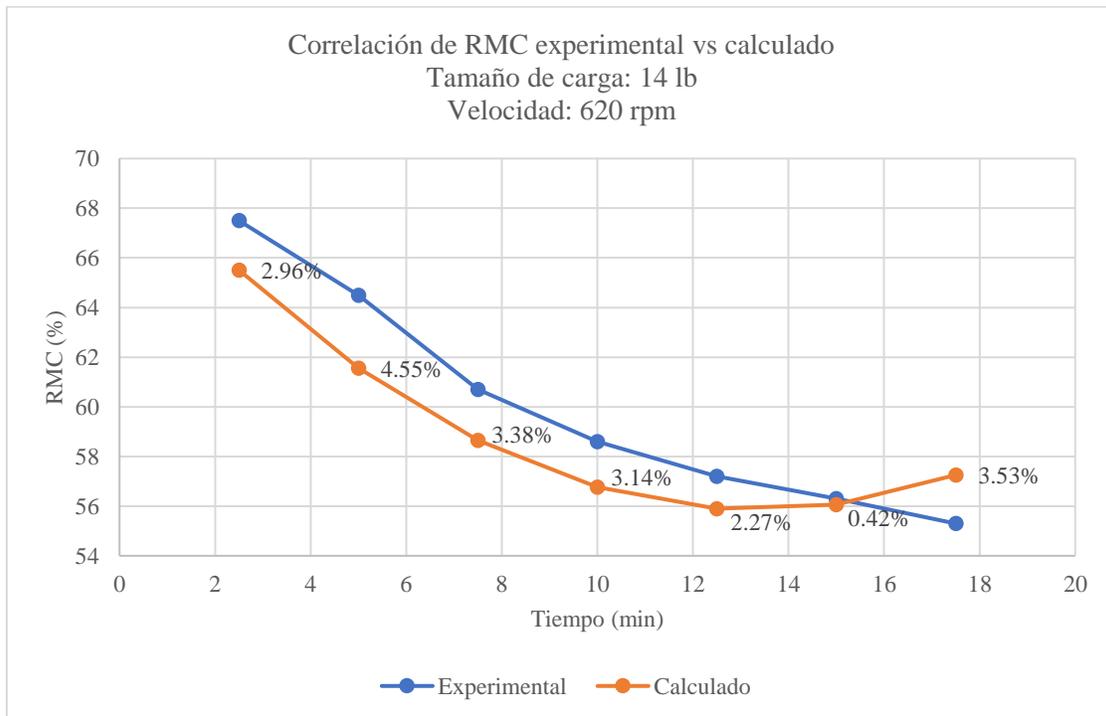


Figura 46. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 620 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 14 lb de carga de ropa tipo DOE a 800 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 7% como se muestra en la Tabla 21, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 5.03%. En la Figura 47 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 21. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	57.5	54.4	5.43%
5	53.7	50.4	6.08%
7.5	50.5	47.5	5.90%
10	48.9	45.6	6.68%
12.5	47.6	44.8	5.94%
15	46.5	44.9	3.36%
17.5	45.3	46.1	1.82%

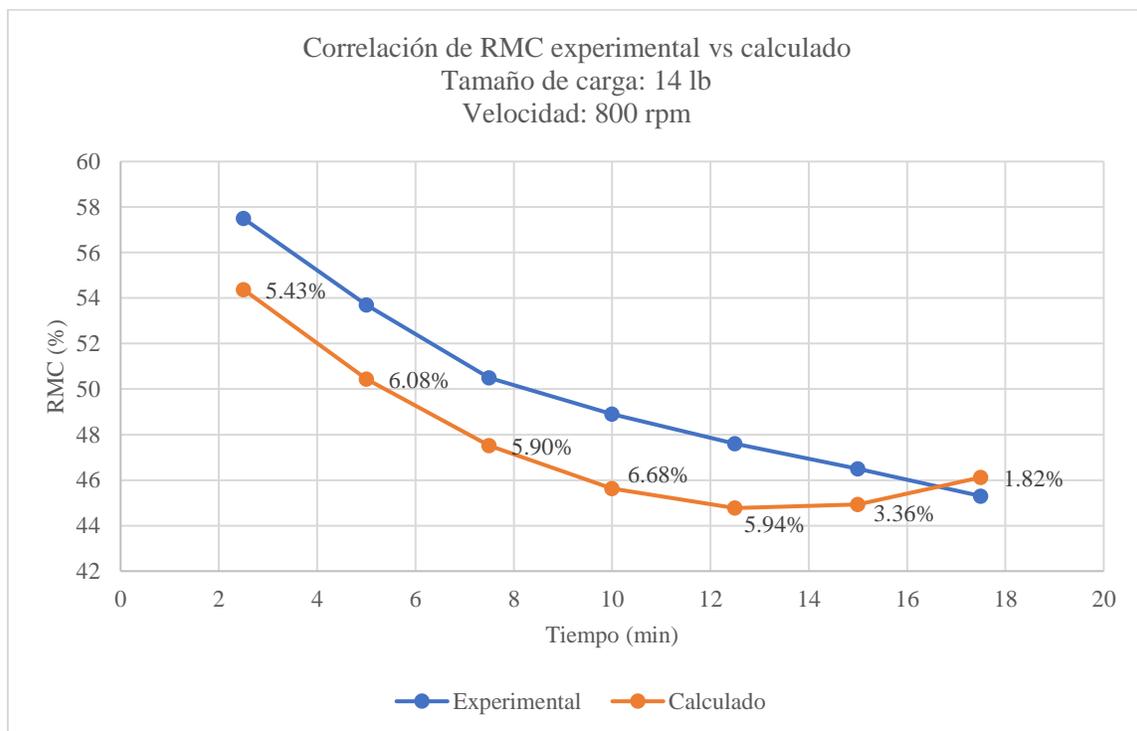


Figura 47. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 14 lb a 800 rpm durante 17.5 minutos.

Para una prueba con 19 lb de carga de ropa tipo DOE a 450 rpm de velocidad y 17.5 minutos de tiempo de centrifugado, se obtienen porcentajes de error menores al 10% como se muestra en la Tabla 22, donde se tiene un promedio de porcentaje de error del 5.97%. En la Figura 48 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 22. Prueba experimental vs Función de Transferencia con 19 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Tiempo (min)	RMC experimental (%)	RMC calculado (%)	%Error
2.5	84.6	76.7	9.30
5	77.9	72.8	6.55
7.5	76.2	69.9	8.29
10	72.7	68.0	6.47
12.5	71.3	67.1	5.85
15	70.4	67.3	4.41
17.5	69.1	68.5	0.89

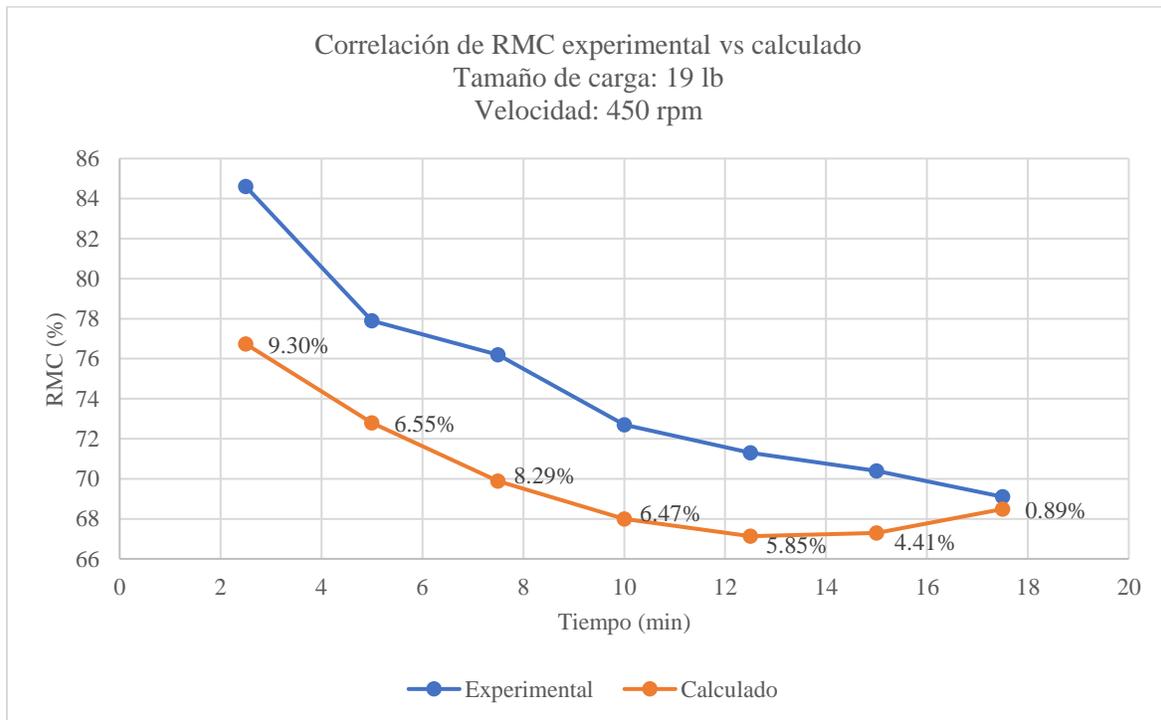


Figura 48. Gráfica de RMC experimental vs Función de Transferencia con 19 lb a 450 rpm durante 17.5 minutos.

Finalmente, en la Figura 49 se muestra una gráfica del perfil de deshidratación de la ropa durante una prueba completa de centrifugado, es decir, se midió el RMC cada segundo durante 17.5 minutos, con un tamaño de carga de 8 lb a una velocidad de centrifugado de 620 rpm. En dicha gráfica, también se observa el perfil de deshidratación de la ropa obtenido mediante la función de transferencia estimada (Ecuación 12), donde se tiene un promedio de porcentaje de error de 2.11%. Por lo tanto, se puede decir que la función de transferencia obtenida tiene un buen porcentaje de ajuste que permite predecir el perfil de deshidratación de la ropa.

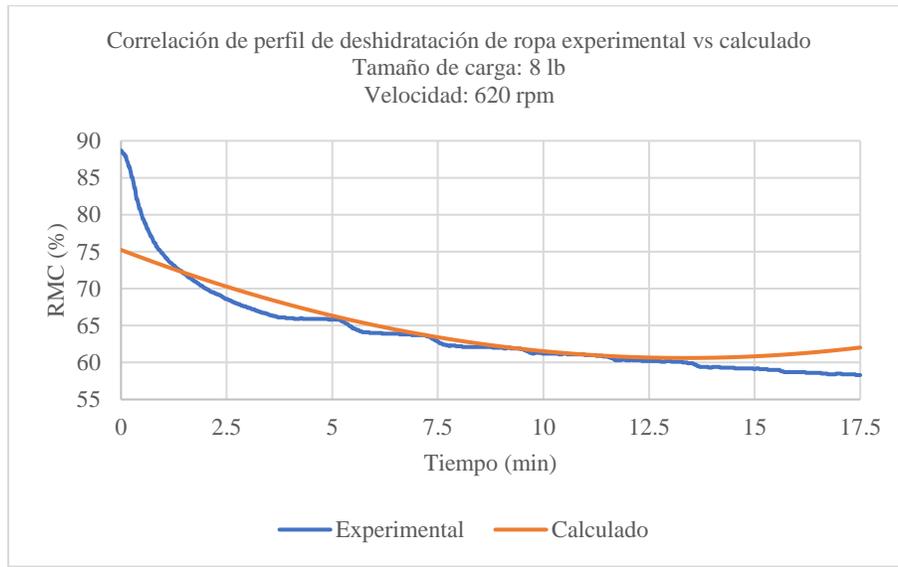


Figura 49. Correlación del perfil de deshidratación de la ropa experimentalmente vs calculado.

A continuación, se sugieren propuestas que permitan mantener en control el valor del RMC y que la función de transferencia obtenida sea la adecuada para predecir dicho valor:

- Los rangos donde la FT tiene un mejor porcentaje de ajuste son:
 - Tipo de carga de ropa: DOE
 - Tamaño de carga de ropa: 6 a 16 lb
 - Velocidad de centrifugado: 450 a 800 rpm
 - Tiempo de centrifugado: 3.5 a 13.5 min
- Se sugiere acomodar la ropa según la norma IEC para evitar el desbalanceo de la lavadora, así como asegurar un centrifugado adecuado.
- Se sugiere revisar el proceso de manufactura del barrenado de la canasta, ya que, en ocasiones no se sigue adecuadamente el patrón de barrenos especificado, donde quedan algunos sin cortar adecuadamente o falta un barrenos en el patrón (ver Figura 50), lo que puede evitar la correcta extracción del agua de la ropa de la canasta hacia la tina. Por lo tanto, se sugiere validar todos los CTQ's principales dentro de especificación; tales como diámetro de barrenos, gap entre tina y canasta, etc., cada doce meses con tres unidades como plan de control para mantenerlos dentro del rango de variación de la respuesta.

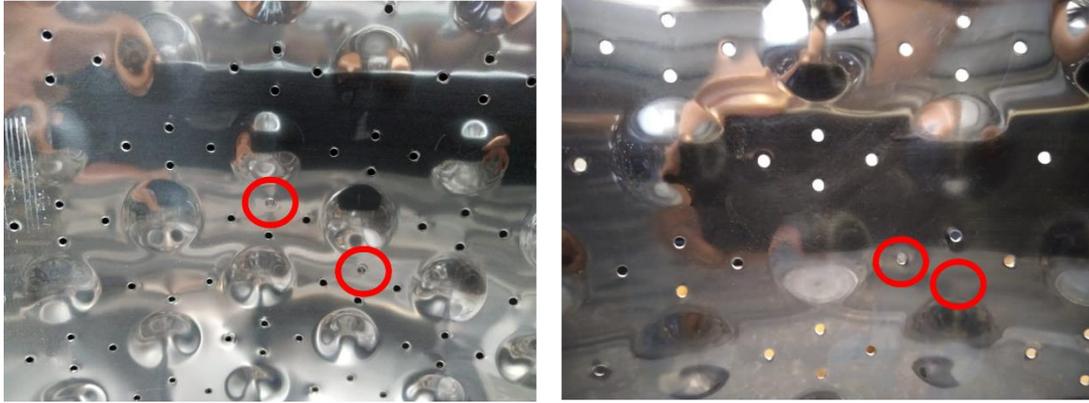


Figura 50. Defectos en la canasta de la lavadora.

5.6. ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO

Siguiendo el mismo procedimiento de análisis para el RMC, se obtuvo la potencia eléctrica (W) de la lavadora durante el proceso de deshidratación de la ropa, ya que, es de interés para este proyecto el conocer la tasa de extracción de agua por consumo de energía, dicho factor se denota como SMER (Specific Moisture Extraction Rate), que es la tasa de extracción de humedad específica, por sus siglas en inglés, con unidades de kg/kWh.

Como una manera de estudiar la eficiencia del sistema mediante el parámetro SMER, en la Tabla 23 se muestra el diseño de experimentos factorial completo con los mismos factores usados para la respuesta RMC. En dicha tabla se muestran los kilogramos de masa obtenidos al finalizar el drenado del agua del ciclo de enjuague, es decir, al comienzo del centrifugado donde la ropa contiene la mayor cantidad de agua del proceso; así como la masa obtenida al finalizar el ciclo de centrifugado, es decir, la masa con la mayor cantidad de agua extraída gracias al centrifugado de la ropa. En la Ecuación 13 se muestra el cálculo del SMER que depende del cociente entre la masa de agua extraída y la potencia total utilizada durante el centrifugado:

$$SMER = \frac{Masa\ de\ agua\ extraída\ (kg) * 1min * 3600s}{Tiempo\ de\ centrifugado\ (min) * (60s) * Potencia(kW) * 1hr} = kg/kWh \quad (13)$$

Tabla 23. Resultados del diseño de experimentos para el SMER.

Orden	Tamaño de ropa seca (lb)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	Masa al inicio del centrifugado (kg)	Masa al final del centrifugado (kg)	Tasa de extracción de agua (kg/s)	Potencia (kW)	SMER (kg/kWh)
1	6	500	3.5	7.655	4.952	0.00669	0.187	130.79
2	16	800	3.5	19.274	10.901	0.01801	0.261	248.48
3	16	500	13.5	19.256	12.199	0.00706	0.206	123.34
4	6	800	13.5	7.634	4.002	0.00338	0.239	50.95
5	16	500	3.5	19.252	12.410	0.001685	0.207	293.37
6	6	800	3.5	7.677	4.286	0.00731	0.249	105.88
7	6	500	13.5	7.800	4.798	0.00305	0.380	28.92
8	16	800	13.5	19.243	10.318	0.00835	0.257	116.95

Primeramente, es necesario saber si los datos tienen un comportamiento normal, donde la hipótesis nula es que los datos se comportan como una normal y la hipótesis alternativa es que los datos no se comportan como una normal. La gráfica de normalidad se muestra en la Figura 51, cuya media tiene un valor de 137.3, desviación estándar de 90.68 y un valor de P igual a 0.196; como se tiene un valor de P mayor a 0.05, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula y se puede decir con al menos un 95% de confianza que los datos se comportan como una normal.

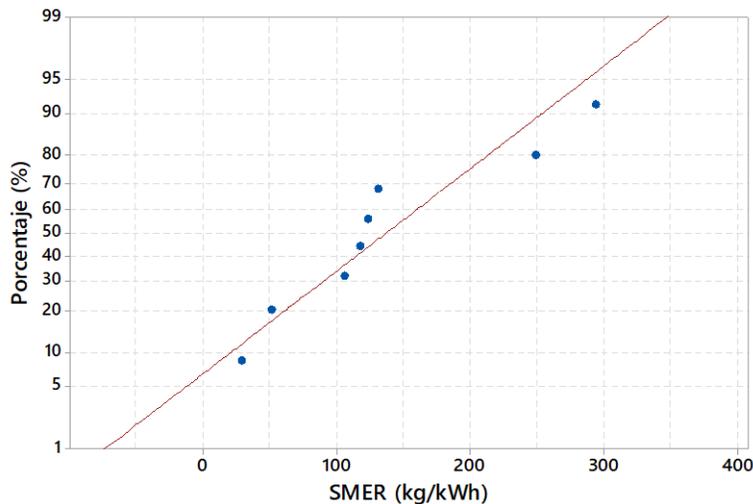


Figura 51. Gráfica de prueba de normalidad para los resultados de SMER.

Se corre el análisis estadístico donde se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : la variable no es significativa
- H_a : la variable es significativa

- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

En la Tabla 24 se muestra el análisis ANOVA correspondiente, donde al no poderse obtener un valor P, se procede a quitar la interacción de las tres variables para realizar nuevamente el análisis, como se muestra en la Tabla 25.

Tabla 24. Análisis de Diseño de Experimentos para el SMER.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	7	57560.0	8222.9	*	*
Lineal	3	53726.3	17908.8	*	*
Tamaño (lb)	1	27097.9	27097.9	*	*
Velocidad (rpm)	1	366.7	366.7	*	*
Tiempo (min)	1	26261.7	26261.7	*	*
Interacción – 2 variables	3	3824.8	1274.9	*	*
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	292.8	292.8	*	*
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	2619.4	2619.4	*	*
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	912.5	912.5	*	*
Interacción – 3 variables	1	8.9	8.9	*	*
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	8.9	8.9	*	*
Error	0	*	*		
Total	7	57560.0			

Tabla 25. Análisis de Diseño de Experimentos para el SMER sin la interacción de las tres variables.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	6	57551.1	9591.8	1077.23	0.023
Lineal	3	53726.3	17908.8	2011.27	0.016
Tamaño (lb)	1	27097.9	27097.9	3043.27	0.012
Velocidad (rpm)	1	366.7	366.7	41.18	0.098
Tiempo (min)	1	26261.7	26261.7	2949.37	0.012
Interacción – 2 variables	3	3824.8	1274.9	143.18	0.061
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	292.8	292.8	32.89	0.110
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	2619.4	2619.4	294.18	0.037
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	912.5	912.5	102.48	0.063
Error	1	8.9	8.9		
Total	7	57560.0			

De la Tabla 25 se observa que el tamaño y tiempo tienen un valor de P menor a 0.05; así como la interacción entre tamaño y tiempo, por lo que se puede decir que, con al menos un 95% de confianza, no se puede rechazar la hipótesis nula, por lo tanto, son variables significativas. Como se puede observar en la Figura 52, donde el tamaño y tiempo presentan claramente una pendiente, mientras que el factor de velocidad presenta una pendiente no significativa. Además, en la Figura 53 se observa que la línea de tamaño y tiempo tienen pendientes no paralelas, lo cual hace que se intercepten en un punto representando interacción entre ellas. Por otro lado, dichos resultados de los efectos y las interacciones presenten se pueden observar en la Figura 54, donde se muestra la gráfica de Pareto obtenida con Minitab.

Como se comentaba anteriormente, en la Figura 52 donde se muestran los efectos principales graficados de cada variable y se observa claramente una pendiente; es decir, considerando solamente el aumento del tamaño de la carga en 10 lb, el SMER aumentó un 147%, ya que, su valor aumentó de 79.135 a 195.54 kg/kWh. Considerando el aumento de la velocidad en 300 rpm, el SMER disminuyó un 9.4%, ya que el valor del SMER pasó de 144.1 a 130.6 kg/kWh; y finalmente, considerando el aumento del tiempo en 10 minutos, el SMER disminuyó un 58.88%, ya que su valor se redujo de 194.63 a 80.04 kg/kWh. Por lo que, se puede decir que el tamaño es el factor que más contribuye al aumento del SMER con una pendiente positiva de 11.64, ya que mayor cantidad de ropa favorece la fuerza centrífuga y promueve una mayor extracción de agua. En segundo lugar, de contribución está el tiempo, con una pendiente negativa de 11.46, donde a mayor tiempo se va disminuyendo el valor de SMER, debido a que mayor tiempo implica mayor consumo de energía y sin embargo, a mayor tiempo llega un punto en el que la extracción de agua ya es mínima. Y finalmente se tiene la velocidad con una pendiente negativa de 1.35, donde se observa que el aumento en la velocidad no afecta significativamente la disminución del SMER.

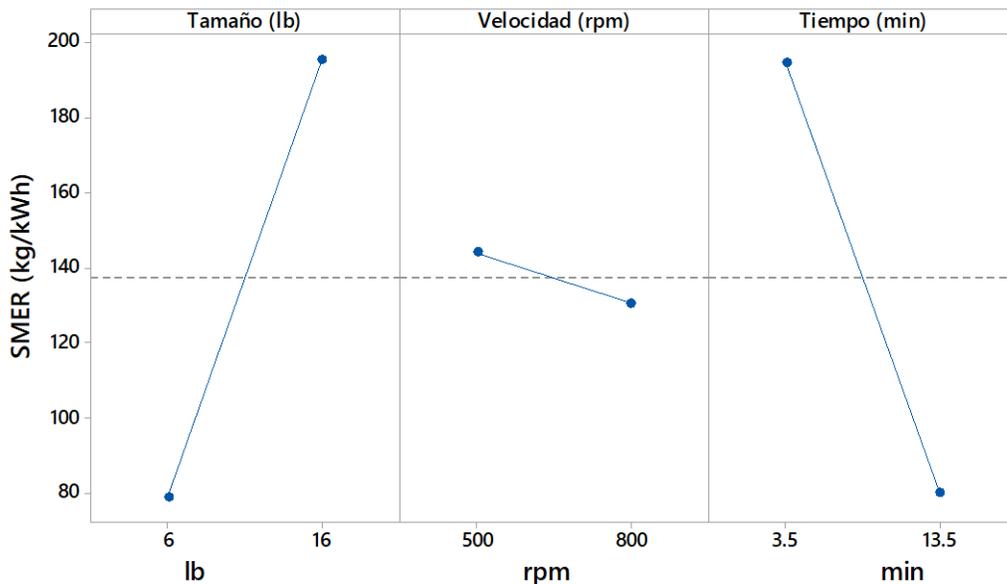


Figura 52. Gráfica de efectos principales para el SMER.

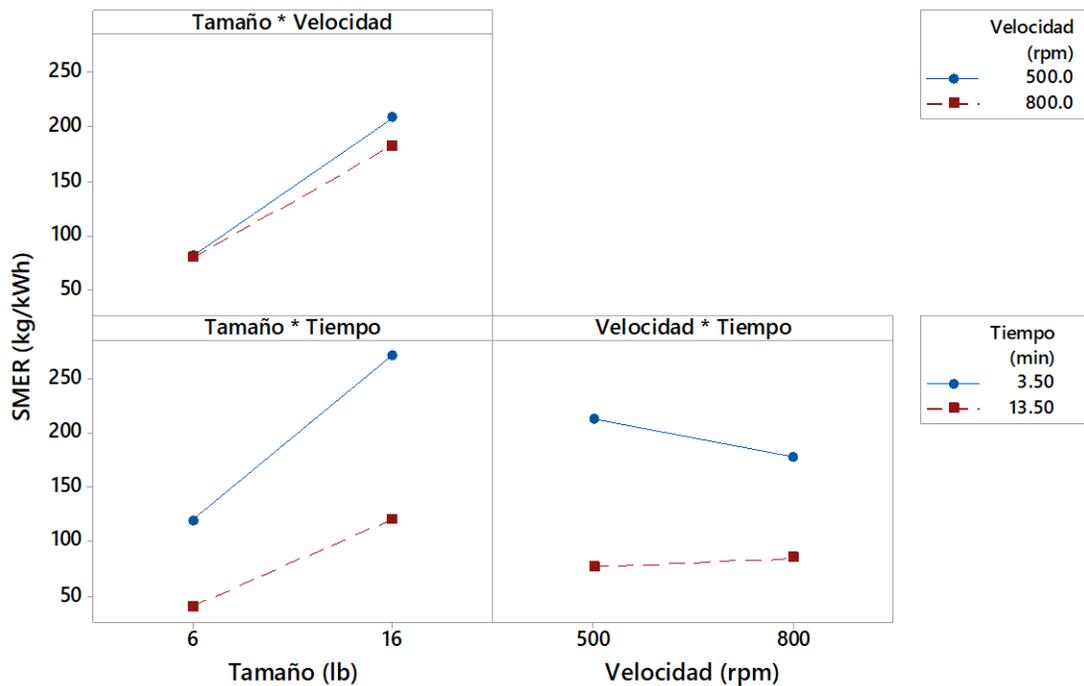


Figura 53. Gráfica de interacción de variables para el SMER.

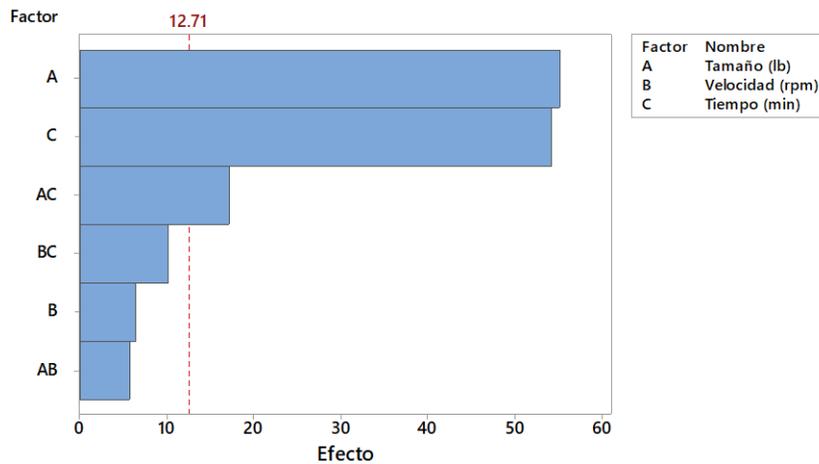


Figura 54. Gráfica de Pareto para los efectos en el SMER.

En la Figura 55 se muestra un diagrama de cubo donde se observan los valores de la combinación de factores de cada corrida; donde la zona óptima, es decir, el máximo valor de SMER obtenido, ya que representa la mayor tasa de extracción de humedad con el menor consumo de energía. En este caso se representa por el valor de tamaño de 16 lb, a 500 rpm durante 3.5 min, obteniéndose un SMER de 293.37 kg/kWh.

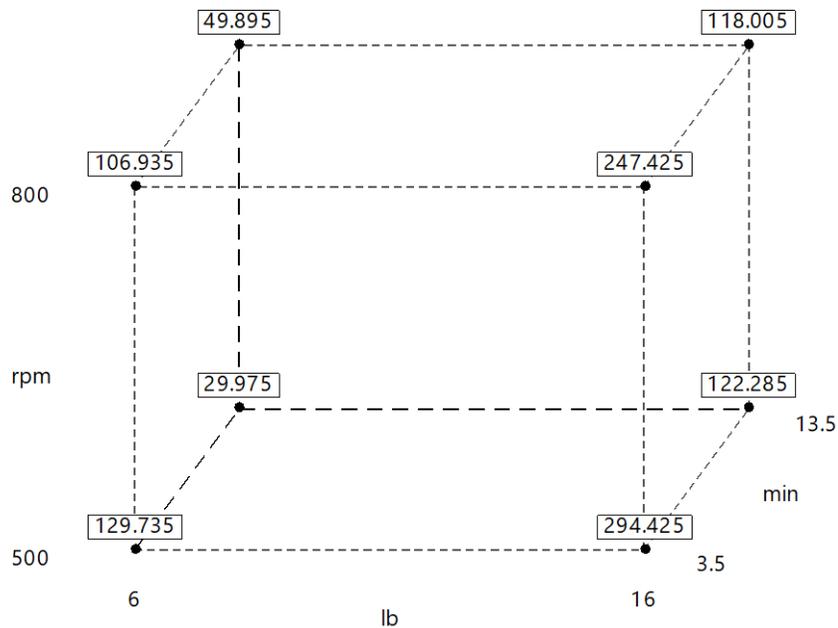


Figura 55. Gráfica de cubo de las variables del sistema para el SMER.

Se procede a discriminar la variable de velocidad y las interacciones donde está involucrada la velocidad, ya que en el ANOVA resultaron no son significativas. El ANOVA actualizado muestra en la Tabla 26. Para lo cual se obtiene una función de transferencia con un 97.25% de ajuste y un 89.01% de predicción:

$$SMER = 39 + 17.79 \text{ Tamaño}(lb) - 3.5 \text{ Tiempo}(min) - 0.724 \text{ Tamaño}(lb) * \text{Tiempo}(min) \quad (14)$$

Tabla 26. Análisis de diseño de experimentos con variables significativas para el SMER.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	3	55979	18659.7	47.21	0.001
Lineal	2	53360	26679.8	67.51	0.001
Tamaño (lb)	1	27098	27097.9	68.56	0.001
Tiempo (min)	1	26262	26261.7	66.45	0.001
Interacción – 2 variables	1	2619	2619.4	6.63	0.062
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	2619	2619.4	6.63	0.062
Error	4	1581	395.2		
Total	7	57560			

El tamaño representa un 48.4% de efecto sobre el SMER obtenido, mientras que el tiempo representa un 46.9%. El parámetro de interacción entre tamaño y tiempo representa un 4.68% de efecto sobre el SMER. De esta manera, el tamaño es la variable con mayor influencia sobre la respuesta del RMC, seguido por el tiempo y finalmente la interacción entre tamaño y tiempo.

En la Figura 56, Figura 57 y Figura 58, se muestran las superficies de respuesta obtenidas para el SMER en función del tiempo y velocidad, velocidad y tamaño, tiempo y tamaño, respectivamente; donde se observa que los valores del SMER, en las gráficas donde aparece el factor de velocidad, no presentan cambios significativos en función de la velocidad, sino más bien en función del tamaño o del tiempo según corresponde. Sin embargo, para la superficie donde está involucrado el tamaño y el tiempo, el SMER tiene un comportamiento de correlación entre ambos factores.

En la Figura 56, tomando como ejemplo el tiempo de 5 minutos a 500 rpm, se tiene un SMER entre 175 y 200 kg/kWh; mientras que, para esos mismos 5 minutos, pero a 800 rpm, se tiene un SMER en ese mismo rango. Ahora tomando un tiempo de 12.5 minutos a 500 rpm, se tiene un SMER menor a 100 kg/kWh; mientras que, para esos mismos 12.5 minutos a 800 rpm, el SMER tiene ese mismo valor. Por lo que se puede decir que la velocidad no tiene influencia significativa sobre la respuesta del SMER, al contrario del tiempo, el cual provoca un cambio significativo en la respuesta del SMER, es decir, el aumento de 7.5 minutos en el tiempo de centrifugado genera una disminución del SMER en un 50%, donde se busca obtener el mayor SMER posible, por lo que se recomienda no utilizar tiempos altos de centrifugado ya que afectan negativamente al SMER.

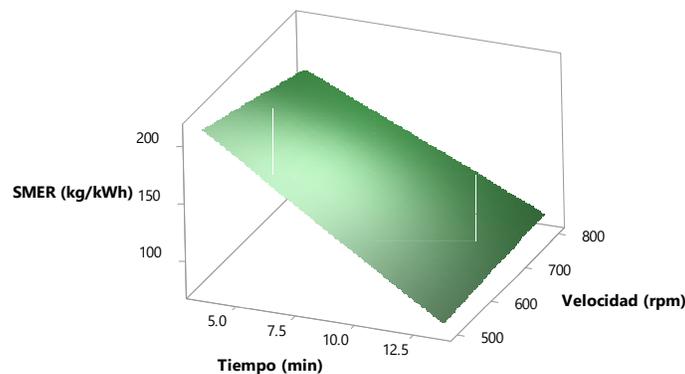


Figura 56. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tiempo (min), Velocidad (rpm).

En la Figura 57, tomando como ejemplo el tamaño de 5 lb a 500 rpm, se tiene un SMER menor a 100 kg/kWh; mientras que, para esas mismas 5 lb, pero a 800 rpm, se sigue teniendo un SMER en ese mismo rango. Ahora tomando una carga de 15 lb a 500 rpm, se tiene un SMER entre 175 y 200 kg/kWh; mientras que, para esas mismas 15 lb pero a 800 rpm, el SMER tiene ese mismo valor. Por lo que se puede decir que la velocidad no tiene influencia significativa sobre la respuesta del SMER, al contrario del tamaño de carga, el cual provoca un cambio significativo en la respuesta del SMER, es decir, el aumento de 10 lb en el tamaño de carga genera un aumento del

SMER en un 200%, donde se busca obtener el mayor SMER posible, por lo que se recomienda utilizar tamaños de carga grandes porque se genera una mayor extracción de agua sin afectar el consumo de energía.

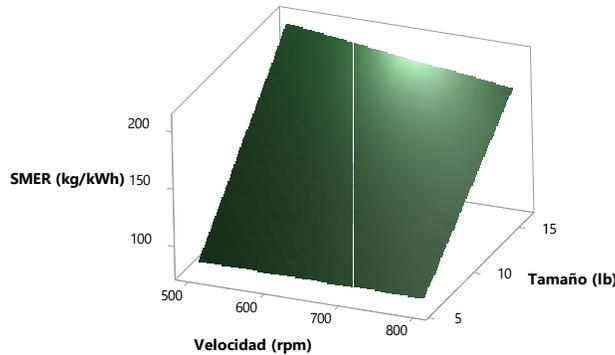


Figura 57. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tamaño (lb), Velocidad (rpm).

En la Figura 58, tomando como ejemplo el tamaño de 5 lb durante 5 minutos de tiempo de centrifugado, se tiene un SMER entre 100 y 150 kg/kWh; mientras que, para esas mismas 5 lb, pero durante 12.5 minutos de centrifugado, se sigue teniendo un SMER entre 50 y 100 kg/kWh. Ahora tomando una carga de 15 lb durante 5 minutos de centrifugado, se tiene un SMER entre 200 y 250 kg/kWh; mientras que, para esas mismas 15 lb, pero durante 12.5 minutos de centrifugado, el SMER tiene un valor entre 100 y 150 kg/kWh. Por lo que se puede decir que tanto el cambio en el tamaño de la carga como el tiempo de centrifugado tienen influencia significativa en el cambio del SMER. Por un lado, se puede decir que, manteniendo el tamaño de carga, el aumento del tiempo en 7.5 minutos genera una disminución del SMER en un 50%, por lo que no se recomienda aumentar el tiempo de centrifugado porque afecta negativamente al SMER. Sin embargo, manteniendo el tiempo de centrifugado, y aumentando la carga en 10 lb, se genera un aumento del 200% en el valor del SMER; por lo que se recomienda ampliamente usar tamaño de carga de ropa mayores.

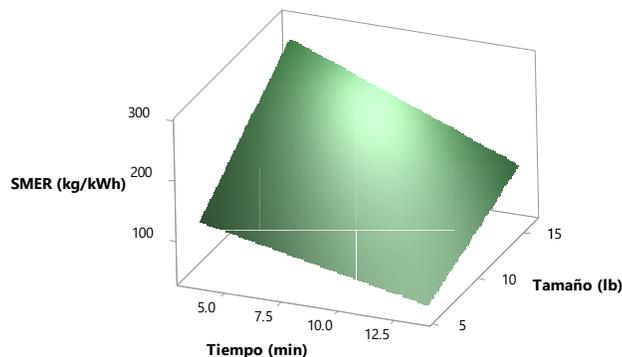


Figura 58. Superficie de respuesta del SMER (kg/kWh) vs Tiempo (min), Tamaño (lb).

5.6.1. MEJORAR LA RESPUESTA DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Como continuación del análisis del consumo energético, es importante comprender el comportamiento de la respuesta, por lo tanto, se agregan puntos centrales para determinar si el consumo energético tiene curvatura. Se agregaron seis puntos centrales como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Puntos centrales del SMER.

Orden	Tamaño de ropa seca (lb)	Velocidad (rpm)	Tiempo (min)	Masa al inicio del centrifugado (kg)	Masa al final del centrifugado (kg)	Tasa de extracción de agua (kg/s)	Potencia (kW)	SMER (kg/kWh)
1	6	500	3.5	7.655	4.952	0.00669	0.184	130.79
2	16	800	3.5	19.274	10.901	0.01685	0.207	293.37
3	16	500	13.5	19.256	12.199	0.00731	0.249	105.88
4	6	800	13.5	7.634	4.002	0.01801	0.261	248.48
5	16	500	3.5	19.252	12.410	0.00305	0.380	28.92
6	6	800	3.5	7.677	4.286	0.00706	0.206	123.34
7	6	500	13.5	7.8	4.798	0.00338	0.239	50.95
8	16	800	13.5	19.243	10.318	0.00835	0.257	116.95
9	11	650	8.5	13.512	7.840	0.00739	0.205	129.51
10	11	650	8.5	13.530	7.834	0.00746	0.167	161.10
11	11	650	8.5	13.642	7.910	0.00756	0.192	141.62
12	11	650	8.5	13.639	7.902	0.00744	0.191	140.02
13	11	650	8.5	13.491	7.810	0.00758	0.165	165.99
14	11	650	8.5	13.833	7.993	0.00771	0.182	152.43

Se corre el análisis estadístico donde se establecen las siguientes hipótesis y criterios:

- H_0 : no hay curvatura
- H_a : si hay curvatura
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

Como se observa en la Tabla 28, el parámetro de curvatura tiene un valor de P mayor a 0.05, por lo que, se puede decir con al menos un 95% de confianza que, el sistema tiene no curvatura ya que se acepta la hipótesis nula. Por lo tanto, no es necesario agregar puntos estrella para el análisis del sistema.

Tabla 28. Análisis de curvatura para el SMER.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Modelo	7	57560.0	8222.9	35.67	0.000
Lineal	3	53726.3	17908.8	77.69	0.000
Tamaño (lb)	1	27097.9	27097.9	117.55	0.000
Velocidad (rpm)	1	366.7	366.7	1.59	0.254
Tiempo (min)	1	26261.7	26261.7	113.92	0.000
Interacción – 2 variables	3	3824.8	1274.9	5.53	0.037
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)	1	292.8	292.8	1.27	0.303
Tamaño (lb)*Tiempo (min)	1	2619.4	2619.4	11.36	0.015
Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	912.5	912.5	3.96	0.094
Interacción – 3 variables	1	8.9	8.9	0.04	0.851
Tamaño (lb)*Velocidad (rpm)*Tiempo (min)	1	8.9	8.9	0.04	0.851
Error	6	1383.1	230.5		
Curvatura	1	423.2	423.2	2.20	0.198
Error	5	960.0	192.0		
Total	13	58943.1			

Por otro lado, se está interesado en optimizar la respuesta del sistema, es decir, obtener el menor valor de RMC para diversos tamaños de carga en particular, buscando el mayor valor SMER posible. Por ejemplo, en la Figura 59 se observa que, para un tamaño de carga de 16 lb el menor valor de RMC posible a obtener sería de 47.0% y para el SMER el mayor valor posible sería de 279.49 kg/kWh, con una velocidad de 800 rpm durante un tiempo de centrifugado de 3.5 minutos.

Se hace el análisis para los mismos casos analizados para el RMC. El primero es una carga de 13.05 lb, el menor valor posible de RMC a obtener sería de 49.35% y el máximo valor posible para el SMER sería de 234.47 kg/kWh, a una velocidad de 800 rpm durante un tiempo de centrifugado de 3.5 minutos como se muestra en la Figura 60.

Suponiendo que se cuenta con una carga de 6.5 lb, el menor valor posible de RMC a obtener sería de 50.97% y el máximo valor posible para el SMER sería de 211.17 kg/kWh, a una velocidad de 800 rpm durante un tiempo de centrifugado de 3.5 minutos como se muestra en la Figura 61.

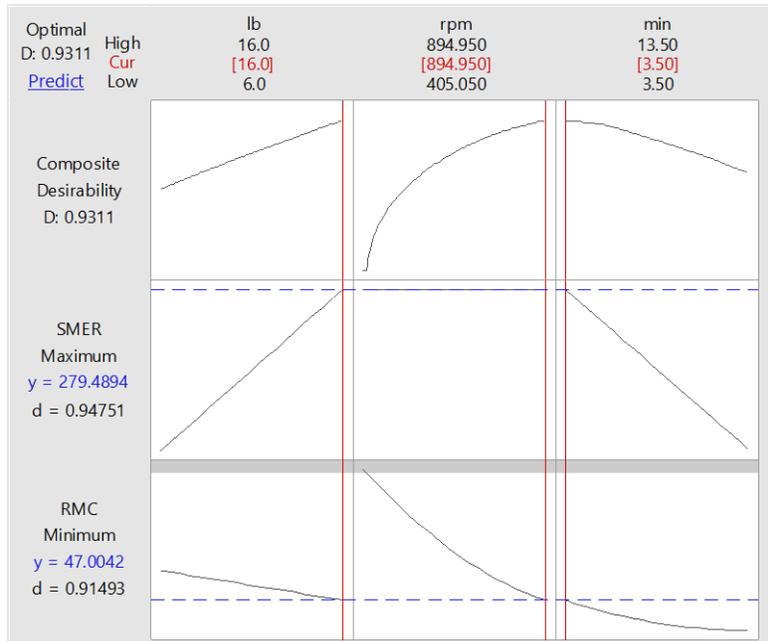


Figura 59. Optimización del RMC y SMER para una carga de 16 lb.

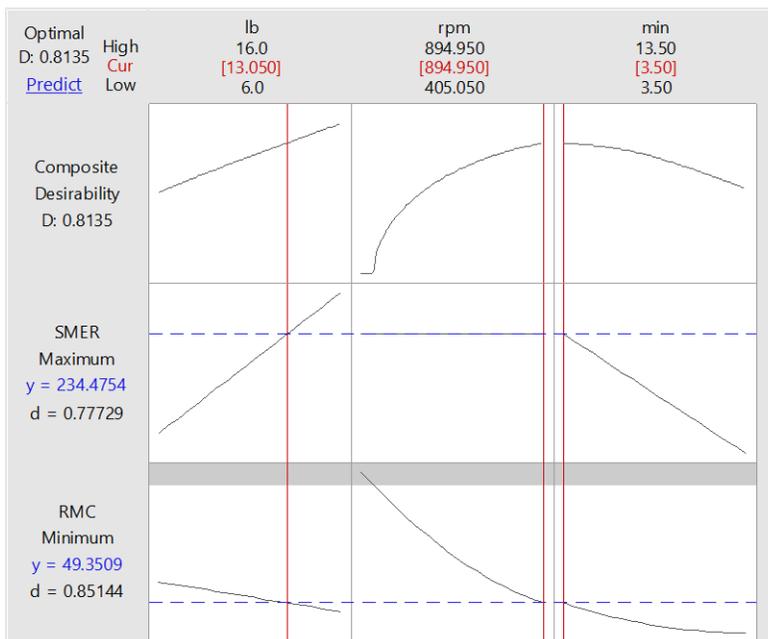


Figura 60. Optimización del RMC y SMER para una carga de 13.05 lb.

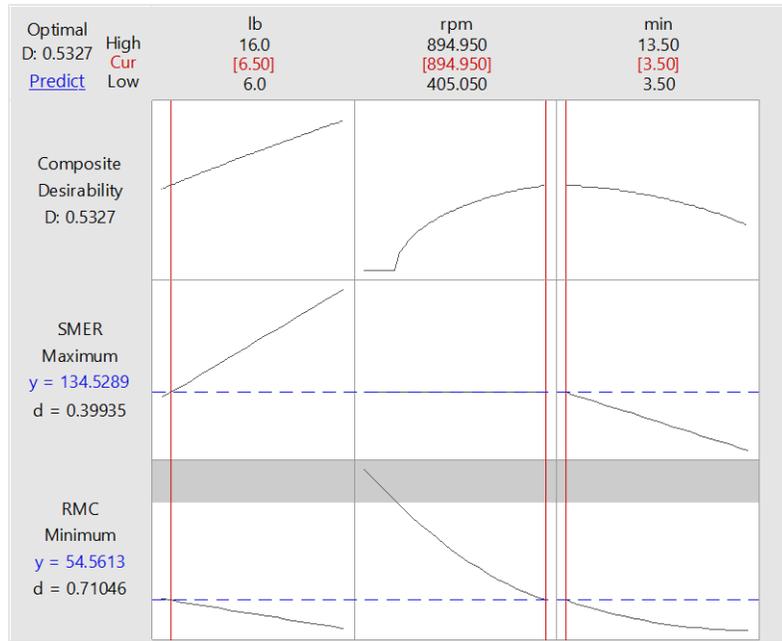


Figura 61. Optimización del RMC y SMER para una carga de 6.5 lb.

5.6.2. CONTROL DE LA RESPUESTA DEL CONSUMO ENERGÉTICO

Es necesario validar que la Función de Transferencia obtenida anteriormente (Ecuación 14) pueda predecir, con el menor porcentaje de error posible, el valor de SMER; por lo tanto, se establecieron una serie de pruebas de igual forma que se hizo para la validación del RMC.

Primeramente, se hizo una prueba siguiendo el método de la norma especificado con 8 lb de carga tipo DOE a 620 rpm de velocidad de centrifugado durante un tiempo de 7.5 minutos. En la Tabla 29 se muestra el registro del valor del SMER obtenido experimentalmente cada 2.5 minutos, así como el SMER calculado utilizando la función de transferencia generada (Ecuación 14). En la Figura 62 se muestra gráficamente la comparación entre la prueba experimental y los valores obtenidos mediante la función de transferencia, cuyo promedio de error para esta prueba es de 13.2%.

Tabla 29. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 620 rpm.

Tiempo (min)	SMER experimental (kg/kWh)	SMER calculado (kg/kWh)	%Error
2.5	185.6	158.1	14.83
5	164.0	134.9	17.77
7.5	120.1	111.6	7.04

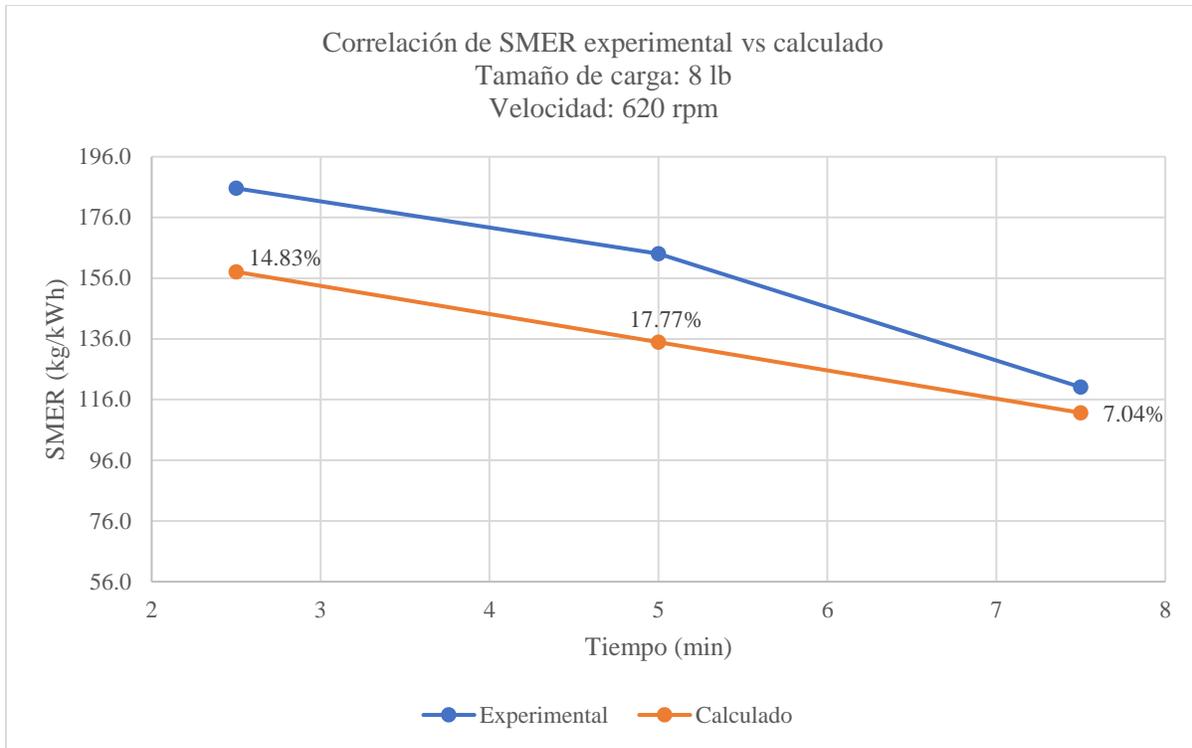


Figura 62. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 620 rpm.

Para una prueba con 8 lb de carga de ropa tipo DOE a 800 rpm de velocidad y 10 minutos de tiempo de centrifugado, mostrada en la Tabla 30, se obtiene un porcentaje de error promedio de 9.13%. En la Figura 63 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 30. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 800 rpm.

Tiempo (min)	SMER experimental (kg/kWh)	SMER calculado (kg/kWh)	%Error
2.5	139.2	158.1	13.60
5	116.6	134.9	15.64
7.5	108.1	111.6	3.25
10	92.1	88.4	4.04

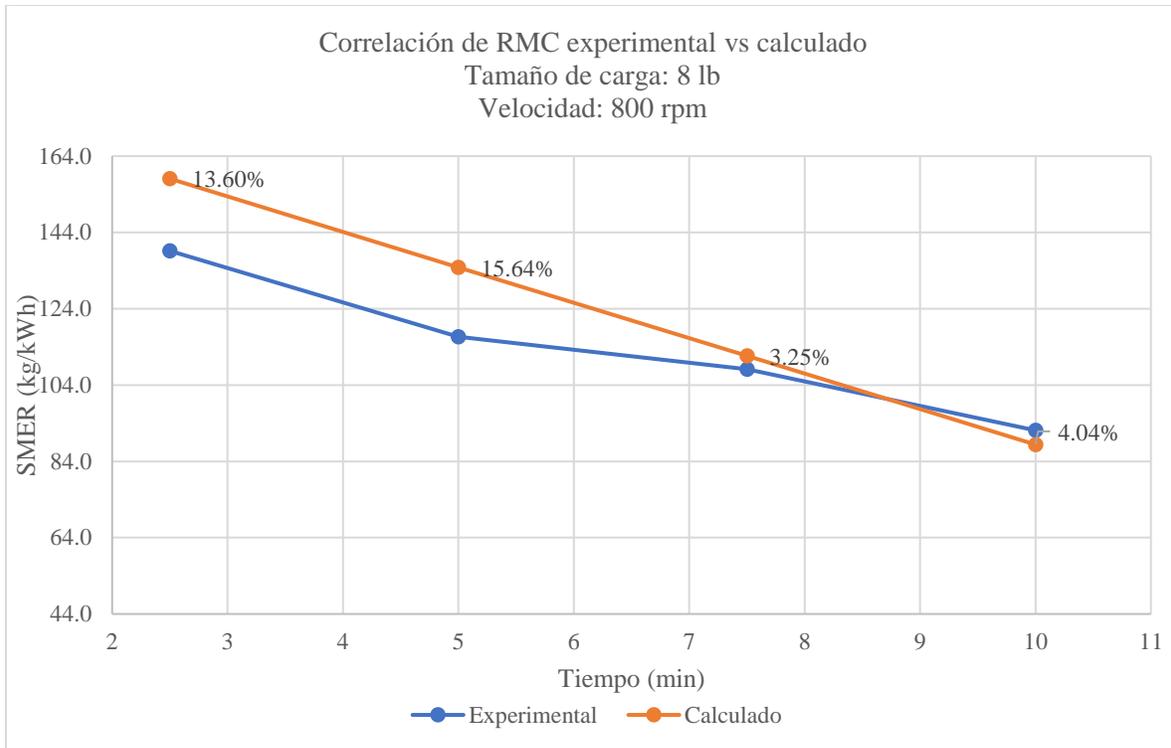


Figura 63. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm.

Para una prueba con 14 lb de carga de ropa tipo DOE a 800 rpm de velocidad y 10 minutos de tiempo de centrifugado, mostrada en la Tabla 31, se obtiene un porcentaje de error promedio de 6.83%. En la Figura 64 se muestra la gráfica comparativa de dicha prueba.

Tabla 31. Prueba experimental vs Función de Transferencia para el SMER con 8 lb a 800 rpm.

Tiempo (min)	SMER experimental (kg/kWh)	SMER calculado (kg/kWh)	%Error
2.5	232.7	254.0	9.14
5	195.2	219.9	12.66
7.5	182.2	185.8	2.00
10	157.2	151.7	3.50

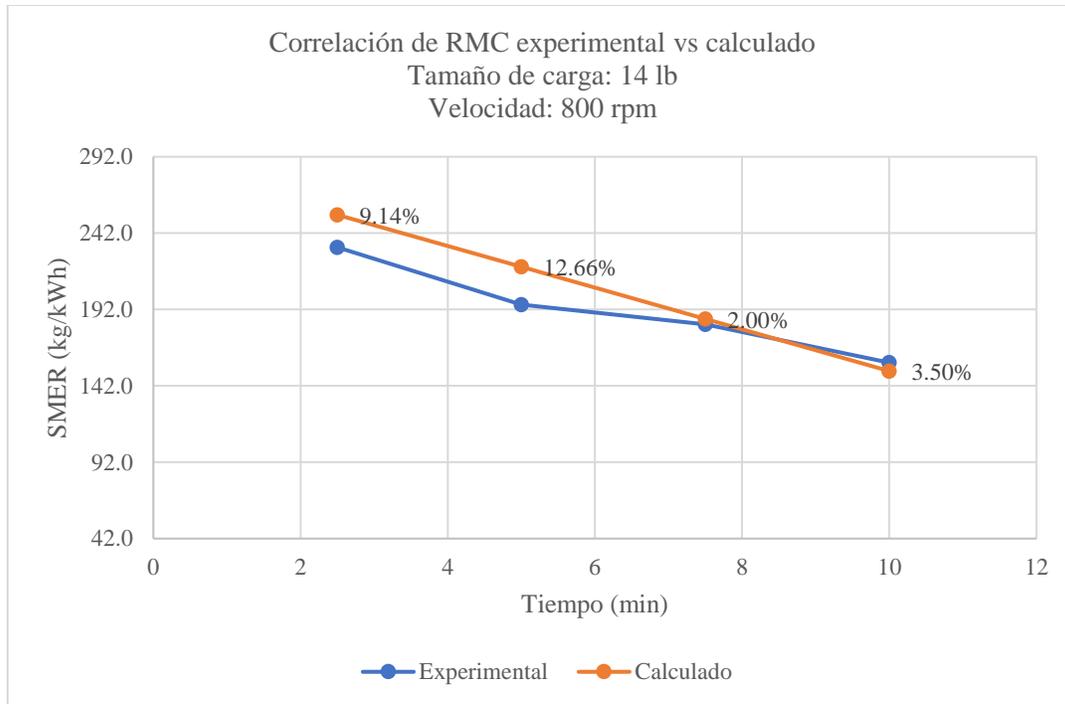


Figura 64. Gráfica de SMER experimental vs Función de Transferencia con 8 lb a 800 rpm.

A continuación, se sugieren propuestas que permitan mantener en control el valor del SMER y que la función de transferencia obtenida sea la adecuada para predecir dicho valor:

- Los rangos donde la FT tiene un mejor porcentaje de ajuste son:
 - Tipo de carga de ropa: DOE
 - Tamaño de carga de ropa: 6 a 16 lb
 - Velocidad de centrifugado: 500 a 800 rpm
 - Tiempo de centrifugado: 3.5 a 13.5 min
- Se sugiere acomodar la ropa según la norma IEC para evitar el desbalanceo de la lavadora, así como asegurar un centrifugado adecuado.
- Para mejorar el porcentaje de ajuste se sugiere llevar a cabo un planteamiento de diseño de experimentos factorial 2^k con las dos variables que resultaron significativas (tamaño y tiempo), verificar curvatura y de ser necesario, agregar puntos estrella.

5.7. ANÁLISIS ESTADÍSTICO PARA EL TIPO DE ROPA

La carga tipo DOE es la que se utiliza para el proceso de certificación de energía de los productos de lavado, por su parte, también se tiene ropa tipo SBL, que es ropa varia con cierto porcentaje de algodón y poliéster, como jeans, camisetas, etc.; y carga tipo IEC, es decir, ropa 100% algodón como toallas, sábanas, fundas. Se está interesado en conocer si el tipo de ropa es una variable que afecta el porcentaje de contenido de humedad residual en la carga de ropa, considerando que ya se sabe que tanto la velocidad como el tiempo y tamaño de carga son significativos. Por lo tanto, se planteó el diseño de experimentos mostrado en la Tabla 32, donde el tipo 1 es la carga DOE, tipo 2 es la carga SBL y tipo 3 es la carga IEC; la velocidad de centrifugado se estableció constante en 700 rpm y el tiempo fue constante de 20 minutos.

Tabla 32. Resultados del diseño de experimentos para el RMC.

Orden	Bloques	Tipo de ropa	Tamaño (lb)	RMC (%)
1	1	1	3	59.0
2	1	1	8	53.0
3	1	1	14	47.0
4	1	1	19	44.0
5	2	2	3	65.0
6	2	2	8	61.0
7	2	2	14	57.0
8	2	2	19	53.0
9	3	3	3	81.0
10	3	3	8	69.0
11	3	3	14	68.0
12	3	3	19	65.7

Primeramente, es necesario saber si los datos tienen un comportamiento normal, donde la hipótesis nula es que los datos se comportan como una normal y la hipótesis alternativa es que los datos no siguen una normal. La gráfica de normalidad se muestra en la Figura 65 cuya media tiene un valor de 61.06, desviación estándar de 10.11 y un valor de P igual a 0.843; como se tiene un valor de P mayor a 0.05, por lo tanto, no se puede rechazar la hipótesis nula y se puede decir con al menos un 95% de confianza que los datos se comportan como una normal.

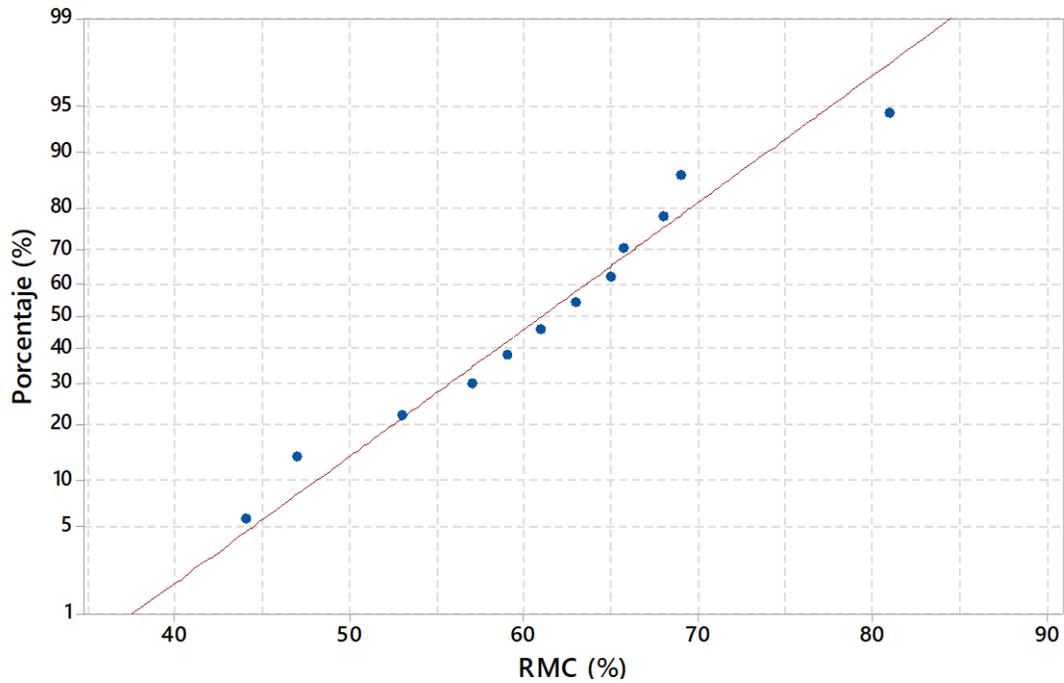


Figura 65. Gráfica de prueba de normalidad para el RMC respecto al tipo de ropa.

Se corre el análisis estadístico como se muestra en la Tabla 33, donde se establece como hipótesis nula que las variables son significativas y como hipótesis alternativa que las variables no son significativas:

- H_0 : la variable no es significativa
- H_a : la variable es significativa
- Nivel de confianza: 95%
- Valor de α : 0.05
- Criterio: si valor $P > \alpha$ no se puede rechazar H_0

Tabla 33. Análisis de diseño de experimentos para el RMC respecto al tipo de ropa.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	11	1124.05	102.19	*	*
Lineal	5	1052.22	210.44	*	*
Tipo	2	815.23	407.62	*	*
Tamaño (lb)	3	236.99	79.00	*	*
Interacción – 2 variables	6	71.83	11.97	*	*
Tipo*Tamaño (lb)	6	71.83	11.97	*	*
Error	0	*	*		
Total	11	1124.05			

Como se observa en la Tabla 33, no se pudieron obtener los valores de P, por lo tanto, se procede a discriminar la interacción de las variables porque no es significativa, para realizar nuevamente el análisis como se muestra en la Tabla 34. Se observa que tanto el tipo como tamaño son variables significativas, ya que tienen un valor de P menor a 0.05, por lo que, no se puede rechazar la hipótesis nula. Como se confirma en la Figura 66 donde se muestran los efectos principales graficados de cada variable y se observa claramente una pendiente; donde para el tipo de ropa se tiene una pendiente positiva ya que la ropa tipo IEC, al ser 100% algodón, absorbe mayor cantidad de agua, por lo que el RMC obtenido es mayor en comparación con la ropa 50% algodón y 50% poliéster que absorbe menos agua. Así como ya se había demostrado anteriormente, el aumento en el tamaño de carga de la ropa favorece la disminución del RMC, por lo que se muestra una pendiente negativa.

Tabla 34. Análisis de varianza (ANOVA) de la respuesta RMC.

Fuente	DF	Adj SS	Adj MS	Valor F	Valor P
Modelo	5	1052.22	210.44	17.58	0.002
Lineal	5	1052.22	210.44	17.58	0.002
Tipo	2	815.23	407.62	34.05	0.001
Tamaño (lb)	3	236.99	79.00	6.60	0.025
Error	6	71.83	11.97		
Total	11	1124.05			

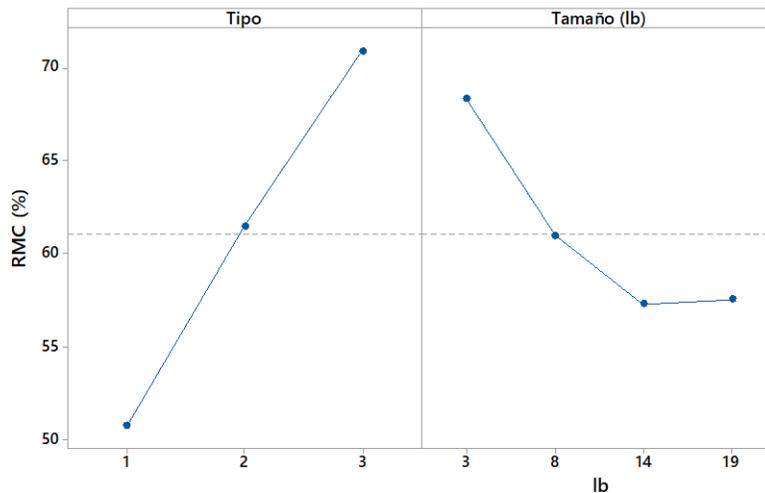


Figura 66. Gráfica de efectos principales para el RMC respecto al tipo de ropa y tamaño.

Como se explicó anteriormente, el tipo de ropa tiene un efecto significativo en la obtención del RMC, por lo que se sugiere llevar a cabo un diseño de experimentos y análisis estadístico específico para cada tipo de ropa, con lo que se obtendrá una función de transferencia adecuada para la predicción de dicho parámetro.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

En este proyecto se realizó el estudio del proceso de deshidratación de la ropa tipo DOE en una lavadora de eje vertical de uso doméstico, con el cual fue posible determinar los parámetros principales que afectan este proceso, logrando determinar una función capaz de predecir el RMC. Donde el factor independiente con mayor contribución en la disminución del RMC es la velocidad, seguido por el tiempo de centrifugado y después el tamaño de carga.

La mayor extracción de humedad de la ropa para obtener el menor contenido de humedad residual se presenta cuando tanto el tamaño de carga, como la velocidad y el tiempo de centrifugado son el valor máximo determinado. Como en este proyecto se está interesado en obtener el menor valor de RMC posible para algún tamaño de carga en específico, se determinó que la velocidad es el factor que contribuye mayormente a la disminución del RMC en un 44.42% aproximadamente. En segundo lugar, se tiene el tiempo de centrifugado, el cual permite la disminución del RMC en un 21.95% aproximadamente. Finalmente, el tamaño de carga de ropa permite la disminución del RMC en un 17.85%.

Se definió una función de transferencia que describe el proceso de deshidratación de la ropa con un 97.41% de ajuste para la predicción del valor de RMC cumpliendo con el objetivo del proyecto, donde la velocidad representa un 74.82% de efecto sobre el RMC obtenido, mientras que el tamaño y tiempo, representan 10.24% y 10.22%, respectivamente. El parámetro de velocidad al cuadrado representa un 2.03% de efecto sobre el RMC, y el tiempo al cuadrado representa un 2.71%.

La función de transferencia que predice el RMC podrá ser utilizada para el desarrollo de patrones de centrifugado adaptivos, que consisten en centrifugar la ropa durante un tiempo determinado a una velocidad en específico para obtener un valor de RMC determinado por los requerimientos del producto; en los modelos de capacidad desde 3.8, 3.9, 4.2, 4.3, 4.5 y 4.6 ft³; ahorrando tiempo y recursos, ya que no sería necesario prototipar o hacer pruebas experimentales.

Se recomienda verificar el correcto barrenado de la canasta, para asegurar la extracción de agua adecuadamente; así como asegurar que el sistema infusor si pueda hacer girar la canasta a la velocidad especificada y durante el tiempo requerido, a través de un plan de control de los CTQ's establecidos en planta.

En este proyecto, además, se estudió el consumo energético durante el proceso de deshidratación de la ropa tipo DOE, donde se definió el parámetro SMER para describir la eficiencia del sistema a través de la tasa de extracción de agua por consumo energético, logrando determinar los parámetros principales que afectan al SMER cumpliendo con los objetivos específicos del proyecto. Donde, el tamaño es el factor independiente con mayor contribución en el aumento del SMER, seguido por el tiempo.

La mayor tasa de extracción de agua con el menor consumo de energía posible, se presenta cuando el tamaño de la carga es el máximo valor y el tiempo de centrifugado es el mínimo, donde la velocidad de centrifugado no tiene significancia estadística. Es decir, el aumento en el tamaño

de carga aumenta el SMER en un 147% aproximadamente, mientras que, el aumento en la velocidad de centrifugado disminuye en un 9.4% el SMER; y finalmente, el aumento del tiempo genera una disminución del SMER en un 58.88%. Por lo que se observa que solamente el aumento en el tamaño de carga mejora el SMER, mientras que el aumento en el tiempo y velocidad de centrifugado afectan negativamente el SMER ya que éste disminuye.

Se obtuvo una función de transferencia que describe el consumo energético con un 89.01% de ajuste para la predicción del valor de SMER cumpliendo con el objetivo del proyecto, donde el tamaño representa un 48.4% de efecto sobre el SMER obtenido, mientras que el tiempo representa un 46.9%. El parámetro de interacción entre tamaño y tiempo representa un 4.68% de efecto sobre el SMER. De esta manera, el tamaño es la variable con mayor influencia sobre la respuesta del RMC, seguido por el tiempo y finalmente la interacción entre tamaño y tiempo.

Se hizo un análisis estadístico para determinar si el tipo de ropa tiene influencia significativa en el RMC, lo que demostró que efectivamente, el tipo de ropa, es decir, el material con el que está hecho y sus respectivos porcentajes de cada uno (algodón, poliéster, etc); influyen significativamente en el RMC.

Tanto la función de transferencia para la predicción del RMC como la del SMER, podrán ahorrar recursos y tiempo durante el diseño de ciclos adaptivos de centrifugados, buscando la zona óptima en donde el RMC tenga el mínimo valor posible mientras que el SMER sea el valor máximo para un tamaño de carga tipo DOE en específico. Como trabajo a futuro se busca implementar la función de transferencia para la predicción del RMC y del SMER al simulador de lavado que se tiene en el área de Cuidado de la Ropa del Centro de Tecnología y Proyectos, con el que se podrá llevar a cabo simulaciones del proceso de centrifugado con las entradas del diseño a implementar en los nuevos productos de lavado.

Por otro lado, a futuro se recomienda implementar las consideraciones de mejora del proceso de manufactura de la canasta para un mejor desempeño de la lavadora durante el centrifugado compartiendo el plan de control con el área de manufactura. Además, también se recomienda mejorar el porcentaje de predicción del SMER a través de un diseño de experimentos adecuado con las variables significativas identificadas en el desarrollo de este proyecto.

Finalmente, se recomienda llevar a cabo el diseño de experimentos planteado en este proyecto junto con sus respectivos análisis para obtener una función de transferencia que permita la predicción del valor de RMC y SMER para otros tipos de ropa, como la tipo SBL que representa al campo (tipo de ropa que un usuario lavaría utilizando un producto como esta lavadora).

REFERENCIAS

- [1] M. Adeshipo y O. Adedibu, «Simulation of a micro-controller based washing machine,» Computing, Information Systems, Development Informatics & Allied Research Journal, vol. 4, n° 3, pp. 39-48, 2013.
- [2] A. T. Salinas, S. M. Flores y M. O. Breña, «Mejora de diseño de suspensión de lavadora automática de carga vertical,» MEMORIAS DEL XV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM, pp. 346-356, 2009.
- [3] L. A. A. Vera y J. W. L. Ortega, Diseño, simulación y maqueta de una lavadora vertical de 400 kilogramos para el proceso de reducción y posterior teñido del índigo., Quito, Ecuador: Escuela Politécnica Nacional, 2009.
- [4] G.-R. Park, J.-W. Chang, J.-S. Hwang y L. Guangqing., Development on a New Damper for Noise Reduction, Korea: LG Electronics.
- [5] S. Bae, J. M. Lee, Y. J. Kang, J. S. Kang y J. r. Yun., «Dynamic analysis of an automatic washing machine with a hydraulic balancer.,» Journal of Sound and Vibration, pp. 3-18, 2002.
- [6] Instructivo lavadoras, 2010.
- [7] Manual de lavarropas de carga frontal.
- [8] C. L. Todaro, Centrifugation, Fermentation and Biochemical Engineering Handbook, 1996.
- [9] T. Beveridge, Large-Scale centrifugation, Canada: Pacific Agri-food Research Center, 2000.
- [10] Cuidado de la ropa: ¿Qué sucede durante la etapa de centrifugado?, 13 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=7REJJS2Ncd8>. [Último acceso: 20 Mayo 2022].
- [11] N. M. ANCE, Aparatos electrodomésticos y similares - Lavadoras eléctricas de ropa - Métodos de prueba para el consumo de energía, el consumo de agua y la capacidad volumétrica., ANCE, 2014.
- [12] H. Kuruk, A. Midilli, A. Kilic y I. Dincer, A review on thin-layer drying curve equations., Drying Technology, 2014.
- [13] M. Younis, D. Abdelkarim y A. El-Abdein, Kinetics and mathematical modeling of infrared thin-layer drying of galic slices., Saudi Journal of Biological Sciences., 2018.

- [14] A. Ketelaars, L. Pel, W. Coumans y P. Kerkhof, Drying kinetics: a comparison of diffusion coefficients from moisture concentration profiles and drying curves., *Chemical Engineering science*, 1995.
- [15] S. SH y M. TR, Experimental study of simultaneous heat and moisture transfer around single shor porous cylinders during convection drying by a psichrometry method., *International journal of heat and mass transfer*, 1996.
- [16] A. Sahing, I. Dincer, B. Yilbas y M. Hussain, Determination of drying times for regular multi-dimensional objects., *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2002.
- [17] S. Prasertsan y P. Saen-Saby, Heat pump drying of agricultural materials., *Drying technology*, 1998.
- [18] S. A. P. Amarillas, Análisis matemático y experimental del proceso de secado de ropa en una secadora eléctrica de venteo., México: Universidad Nacional Autónoma de México, 2020.
- [19] G. Zambonin, F. Altinier, A. Beghi, L. d. S. Coelho, N. Fiorella, T. Girotto, M. Rampazzo, G. Reynoso-Meza y G. A. Susto., Machine learning-based soft sensors for the estimation of laundry moisture content in household dryer appliances., *energies*, 2019.
- [20] S. AE, The physics of flow through porous media., *Soil Science* , 1958.
- [21] L. AV, Heat and mass transfer in capillary-porous bodies, Elsevier, 1964.
- [22] G. Zambonin, F. Altinier, A. Beghi, L. d. S. Coelho, T. Girotto, M. Rampazzo, G. Reynoso-Meza y G. A. Susto., Data-driven models for the determination of laundry moisture content in a household laundry treatment dryer appliance., *Advanced Control and Diagnosis*, 2019.
- [23] J. Berger, S. Gasparin, D. Dutykh y N. Mendes, «Accurate numerical simulation of moisture front in porous material.,» *Build Environ*, pp. 221-224, 2017.
- [24] S. Gasparin, J. Berge, D. Dutykh y M. N., «Advanced reduced-order models for moisture diffusion in porous media.,» *Transp. Porous Media*, pp. 965-994, 2018.
- [25] M. Azeem, A. Boughattas, J. Wiener y A. Havelka, «Mechanism of liquid water transpor in fabrics; a review.,» *Fibres Text.*, pp. 58-62, 2017.
- [26] B. T. C. Laundry, «Understandign moisture retention in your commercial laundry,» B&C Technologies, 2014. [En línea]. Available: <https://bandctech.com/commercial-laundry-blog/2017/02/understanding-moisture-retention-in-your-commercial-laundry/>. [Último acceso: 09 Mayo 2022].
- [27] D. L. Solutions, «What G-forces do for your industrial washing machine,» Dependable Laundry Solutions, [En línea]. Available: <https://dependablelaundry.com.au/g-forces-industrial-washing-machine/>. [Último acceso: 09 Mayo 2022].

- [28] A. Momen, V. Patel, K. Gluesenkamp, D. Erdman, J. Kiggans y G. Ormston, «Fabric properties and electric efficiency limits of mechanical moisture extraction from fabrics,» *Drying Technology*, 2021.
- [29] N. Battistella, F. Furlan, P. Gardonio, P. Gallina y M. Simonato, «Empirical model of textile water retention in professional washing machines,» *The Journal of the Textile Institute*, vol. 113, pp. 2033-2042, 2022.
- [30] Y. Joko y S. Honda, «Dehydration dynamics model with Monte Carlo Method for a front-loading washer/dryer,» *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 2021.
- [31] J. Tu, C. Quian, H. Ge, J. Wang y J. Liu., «the impact of liquid surface tension on fabric drying efficiency,» *Advanced Materials Research*, vol. 441, pp. 612-618, 2012.
- [32] E. Papadopoulos y I. Papadimitriou, «Modeling, design and control of a portable washing machine during the spinning cycle.,» *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics Proceedings.*, 2001.
- [33] E. L. Walsh, *Dynamic self-balancing of a combination washer/dryer in high-speed spin.*, USA: Georgia Institute of Technology, 1970.
- [34] N. Wulandari y A. G. Abdullah., «Design and simulation of washing machine using Fuzzy Logic Controller (FLC).,» *International Symposium on Materials and Electrical Engineering (ISMEE).*, 2018.
- [35] E. H. Bautista, *Modelado matemático del secado de madera subtropical por convección de aire caliente.*, México: Instituto Politécnico Nacional, 2011.
- [36] L. B. Monachesi, *Modelado y análisis del flujo de agua en medios porosos heterogéneos total o parcialmente saturados*, Universidad Nacional de la Plata, 2013.
- [37] A. Haghi, «Transport phenomena in porous media: a review.,» *Theoretical Foundations of Chemical Engineering.*, vol. 40, pp. 14-26, 2006.
- [38] A. Bejan, I. Dincer, S. Lorente, A. Miguel y H. A. Reis, «Porous and complex flow structures in modern technologies.,» *Springer-Verlang New York, LLC.*, 2004.
- [39] R. & P. S. Keey, «the high-temperature frying of softwood boards: a Kiln-Wide model.,» *Chem. Engn. R&D*, vol. 72, pp. 741-753, 1994.
- [40] D. & R. G. Montgomery, *Probabilidad y Estadística aplicas a la ingeniería*, Mc Graw Hill, 1996.
- [41] X. P. Ponsa, *Aplicación de la metodología "DMAIC" en la resolución de problemas de calidad.*, España: Universidad de Vic Escuela Politécnica Superior, 2015.

- [42] E. P. López y M. G. Cerdas., «Implementación de la metodología DMAIC-Seis Sigma en el envasado de licores en Fanal.,» *Tecnología en Marcha*, vol. 27, nº 3, pp. 88-106, 2014.
- [43] C. G. R. Rosario, N. G. S. Caridad, L. R. G. Ernesto y M. H. A. Caridad, «Aplicación de la metodología DMAIC de Seis Sigma con simulación discreta y técnicas multicriterio.,» *Revista de métodos cuantitativos para la economía y la empresa.*, pp. 19-35, 2016.
- [44] J. R. Ocampo y A. E. Pavón, «Integrando la metodología DMAIC de Seis Sigma con la simulación de eventos discretos en Felxsim,» *Tenth LACCEI Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*, 2012.
- [45] I. E. Commission, IEC 60456 Ed. 5.0: Clothes washing machines for household use - Methods for measuring the performance, Italy, 2008.