



DISEÑO Y DESARROLLO DE PRUEBA DE CONFIABILIDAD PARA EL SISTEMA DE RODAMIENTO POR RUEDAS DE UNA SECADORA DE ROPA DOMÉSTICA

Development and design of a reliability test for a rolling bearing system of a clothes dryer

Jesús Esqueda¹, Eric Leonardo Huerta¹

¹Universidad Autónoma de Querétaro, Cerro de las campanas S/N, Santiago de Querétaro, Querétaro, 76010, México.

*Autor de correspondencia
jesus.esqueda@mabe.com.mx

RESUMEN

Este estudio está centrado en el diseño de una prueba de confiabilidad para el sistema de rodamiento por ruedas de secadoras de ropa domésticas. En el mercado actual, se encuentran secadoras de ropa que cuentan con un sistema de rodamiento asistido por ruedas, el cual tiene como propósito dar soporte al tambor o canasta, y servir como superficie de deslizamiento durante el funcionamiento de la secadora. La prueba que se propone es una evaluación acelerada de vida que considera, como factores de esfuerzo, la temperatura ambiente, la acumulación de pelusa, la carga de peso sobre el componente, la velocidad de giro del tambor, y el desalineamiento en el buje de las ruedas.

Los resultados obtenidos en la prueba muestran que, asumiendo un modelo de distribución Weibull, se espera una confiabilidad del 96.5%, con un nivel de confianza del 90%, en un periodo de 10 años. El experimento consideró la evaluación de 40 muestras probadas por 1600 horas bajo condiciones de esfuerzo definidas y simulando las 9.6 millones de revoluciones del tambor correspondiente a los 10 años de vida de una secadora.

Palabras Clave:

Análisis de degradación, Confiabilidad, Factores de esfuerzo, Ruedas de rodamiento, Parámetro de prueba, Prueba de vida acelerada.

ABSTRACT

This work focuses in the design of a reliability test for the roller bearing system in clothes dryers. Some modern clothes dryers feature roller bearing system, which serves as drum/basket support and provides a sliding surface during machine's operation. The proposed test is an accelerate life assessment based on temperature, load, spin speed, roller shaft's misalignment and lint accumulation as stress factors.

Results show that, assuming a Weibull distribution model, a 96.5% reliability is expected at ten years with a 90% confidence. The experiment includes forty samples tested during 1600 hours under stress and 9.6 million drum revolutions.

Keywords:

Degradation analysis, Reliability, Stress factors, Rollers system, Test parameter, Accelerated life test.

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los fabricantes de electrodomésticos, principalmente de secadoras de ropa domésticas, requieren desarrollar productos de alta calidad que garanticen altos niveles de confiabilidad. Esto ha impulsado a las empresas a desarrollar métodos de prueba donde se someten dichos productos a condiciones de envejecimiento simuladas en laboratorio para determinar medidas que incrementen la confiabilidad de los sistemas, materiales y partes de los componen.

Los métodos precisados se conocen comúnmente como pruebas de vida convencionales, pruebas de vida aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT), los cuales consisten en someter a condiciones controladas al producto para caracterizar la degradación de sus funciones y sus efectos sobre la vida útil del mismo, y con esto, calcular la confiabilidad esperada con los usuarios finales.

Esta investigación se enfoca en el estudio de aquellos factores de esfuerzo que afectan de forma directa la confiabilidad del sistema de rodamiento por ruedas, como uno de los componentes que forman parte de la construcción de una secadora de ropa doméstica. En particular, el estudio tiene como objeto diseñar un método de prueba para evaluar de forma efectiva la confiabilidad del



sistema de rodamientos por ruedas en cuestión aplicando la metodología de pruebas de vida convencionales, ALT y ADT.

1.1. Marco teórico.

Es común que los fabricantes de todo tipo de productos lleguen a experimentar un mayor número de reclamos por garantías que el esperado, afectando de esta manera no sólo sus finanzas, sino también, su imagen frente a sus clientes. La causa más frecuente tiene que ver con omisiones o errores durante el proceso de evaluación de la confiabilidad de sus diseños (Meeker et al., 2009). En el proceso de desarrollo de un nuevo producto, se tiene una etapa conocida como diseño de prueba, y si ésta es omitida o no es diseñada correctamente, es muy probable tener como resultado una pobre calidad en el producto final, debido a que ciertas características de los modos de falla de interés no pudieron ser detectados (Yadav et al., 2006).

Como consecuencia de lo anterior, estos errores provocan la falta de inclusión de mecanismos de falla (para reproducir la mayor cantidad de modos de falla posibles) y una mala selección de niveles de esfuerzo en los factores usados durante la realización de una prueba de vida.

Hoy en día, la evaluación de los productos, a través del uso de técnicas tradicionales de pruebas de vida, es decir, por medio de monitorear solamente los tiempos de falla, no es suficiente para determinar su confiabilidad en tiempos razonables durante el proceso de diseño. Por lo que, con el fin de obtener resultados de confiabilidad en tiempos más cortos, investigadores han mezclado pruebas de vida convencionales con el uso de pruebas aceleradas (ALT) y pruebas de degradación acelerada (ADT) en el proceso de evaluación (De Carlo et al., 2014).

En cuanto a estudios recientes de pruebas aceleradas, se encuentran aquellos realiza-

dos por Escobar and Meeker (2006), quienes presentaron una revisión de los modelos utilizados en pruebas aceleradas, con el fin de determinar los niveles de estrés adecuados y entender la relación entre la vida normal y el sobre-esfuerzo de los componentes o productos evaluados.

A pesar que las pruebas ALT y ADT han sido aplicadas en distintos materiales, componentes, y productos para diferentes ramas de la industria, se tienen pocas referencias en cuanto a su aplicación en electrodomésticos. Entre los estudios que son de interés se encuentran el de Borgia et al. (2013) en donde se aborda el uso de pruebas aceleradas y consideraciones necesarias para su aplicación en los electrodomésticos, y como continuación de este estudio De Carlo et al. (2014) se enfocan particularmente en aplicar las pruebas aceleradas al sistema de oscilación (canasta, tina y el resto de los componentes involucrados en el sub ensamble) de una lavadora de ropa doméstica.

Con base en lo anterior, la información encontrada en la literatura no hace referencia a estudios previos que hagan referencia a la aplicación de pruebas de vida para el "sistema de rodamiento por ruedas", por lo que este estudio plantea una metodología en la aplicación de los principios de pruebas de vida al componente en cuestión, para posteriormente, demostrar su confiabilidad.

2. METODOLOGÍA / MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Antecedentes.

En la figura 1 se muestra el sistema de rodamiento por ruedas en una secadora. Está conformado por 4 ruedas fijadas a los soportes frontal y trasero, y sobre ellas descansa el tambor de la secadora.

En la Figura 2 se observa a detalle el sub-ensamble de una rueda, el cual consiste de 4

componentes conocidos como seguros, eje, buje de rodamiento, y el cuerpo de la rueda. Las ruedas giran sobre su eje debido a la transmisión de movimiento que ejerce el tambor cuando éste es accionado por el motor de la secadora.

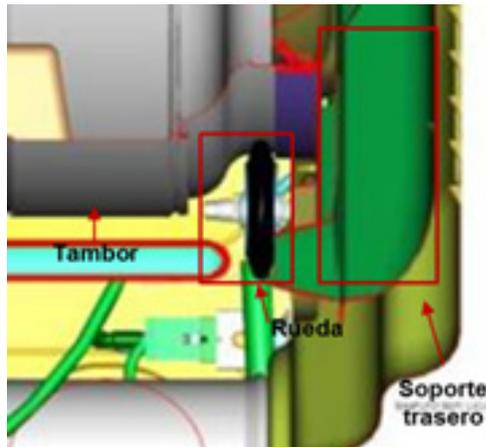


Figura 1. Estructura de sistema de rodamiento por ruedas.

Existen varios posibles modos de falla que pueden presentarse con los usuarios finales, tales como una rueda atascada, floja, ruidosa, desgastada, rota, etc. (de acuerdo a AMEF de diseño mostrado en la Figura 3). Los principales modos de falla en el sub-ensamble son "rueda desgastada" y "rueda rota". Se tiene registro que estos modos también se presentan en secadoras que se encuentran con el usuario final, es decir, en el campo. En la Figura 4 se presenta el gráfico de índice de fallas que se tiene actualmente para una secadora que se produce desde el año 2015.

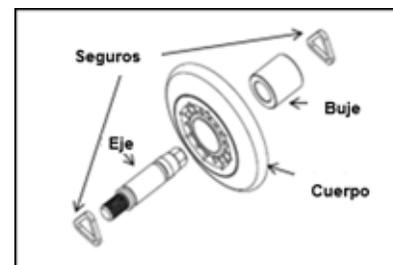


Figura 2. Estructura de sistema de rodamiento por ruedas.

AMEF (Análisis de Modo y Efecto de Falla)											
Parte o bloque del DSE	Función en el DSE	Modo de Falla Potencial - Resultante en la pérdida de la función	Causa potencial del Modo de Falla	Ocurriencia	Efecto potenciales del modo de falla en el producto o usuario final	Gravedad	Prevención planeada para causa	Detección planeada para la Causa (Validación)	Detección	SE C E N	NP P R
Seguros de rueda	Delimitar desplazamiento de rueda sobre su eje	Seguros fuera de posición con riesgo de su salida del eje de rotación	Seguro no ensamblado correctamente	3	Vibración en tambor de secadora durante giro	7	Plan de control	Pruebas de funcionamiento al final de línea	2	21	42
Seguros de rueda	Delimitar desplazamiento de rueda sobre su eje	Seguros fuera de posición con riesgo de su salida del eje de rotación	Seguros con dimensiones fuera de especificación	1	Vibración en tambor de secadora durante giro	7	Plan de control con proveedor	Inspecciones anuales de materiales	3	7	21
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de contacto con tambor de secadora	Rueda desgastada	Acumulamiento de ciclos de secado (desgaste mecánico)	5	Ruido y vibración por fallado superficie de contacto	8	Dureza de goma de contacto especificada en plano (Nisepan 250g)	Pruebas confiabilidad a nivel sistema WILT (water injection Wettest)	6	40	240
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de contacto con tambor de secadora	Rueda desgastada	Deshidratación de material de banda y envejecimiento por temperatura ambiente	4	Ruido y vibración por fallado superficie de contacto	8	Dureza de goma de contacto especificada en plano (Nisepan 250g)	Pruebas confiabilidad a nivel sistema WILT (water injection Wettest)	7	32	224
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de giro con tambor de secadora	Rueda rota	Eceso de carga en tambor	3	Ruido y secadora silenciosa	8	Detección por software	Ninguna	10	24	240
Cuerpo de rueda	Proveer superficie de giro con tambor de secadora	Rueda rota	Fractura en banda de rueda por exceso de temperatura	2	Ruido y secadora silenciosa	10	Detección de temperaturas altas por software	Validación de SW en prueba final de línea	3	20	80

Figura 3. Extracto de AMEF de diseño para el sistema de rodamiento por ruedas en la secadora.

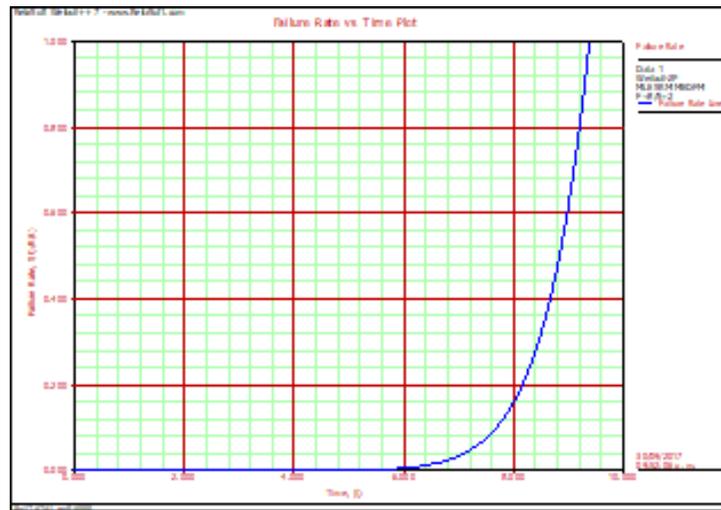


Figura 4. Curva del índice de fallas para el sistema de rodamiento por ruedas en la secadora.

2.2. Diseño de prueba de vida acelerada.

Es conocido que los principales modos de falla en los sistemas de rodamientos metálicos o plásticos pueden ser simulados considerando tanto parámetros físicos, tales como: el nivel de esfuerzo por sobre carga, la temperatura de operación, el número de revoluciones o velocidad de giros; así como parámetros materiales: el tipo de metal o plástico seleccionado, y los acabados de las superficies de contacto (Sadeghi et al., 2009).

Tomando en cuenta lo arriba mencionado se define que, para reproducir los modos de falla detectados anteriormente en campo, se tuvo que escoger como parámetros de prueba la superficie de contacto, la temperatura, la carga, la acumulación de pelusa y la velocidad del tambor que transmite el giro a las ruedas, tal y como se muestra en el diagrama de parámetros de la Figura 5.

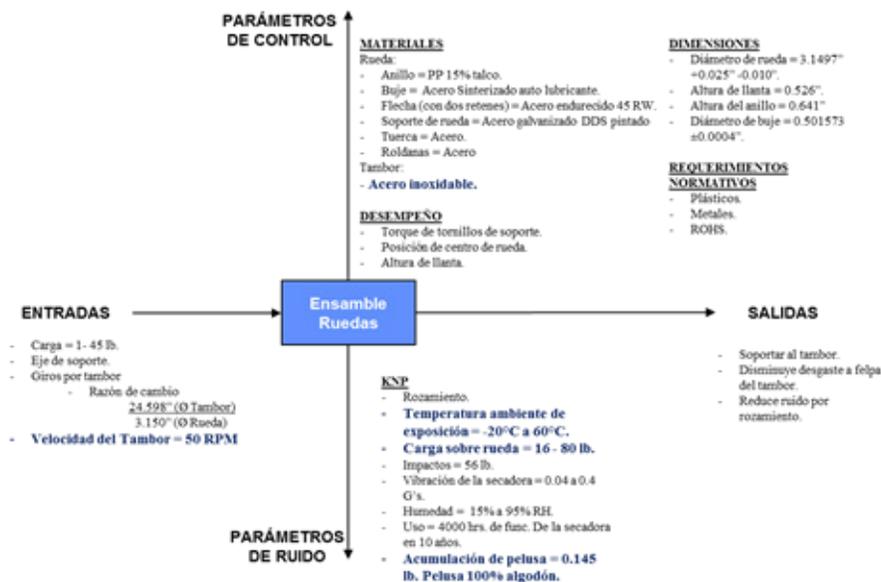


Figura 5. Diagrama de parámetros del sistema de rodamiento por ruedas.

Superficie de contacto	Temperatura	Carga sobre rueda	Acumulación de pelusa	Velocidad de tambor	Activaciones	Tamaño de muestra	Tiempo de prueba
Acero inox.	60°C - 70°C	25 lb.	0.145 lb.	100 RPM	Paros cada 0.4 hrs.	40 muestras	1600 hrs.

Tabla 1. Plan de prueba de vida acelerada para sistema de rodamientos por ruedas.

Con base en los parámetros de control y ruido detectados se define un diseño de prueba, en donde se consideran valores que sean capaces de llevar a un esfuerzo considerable durante la prueba de vida acelerada. En la Tabla 1 se muestran los valores de cada uno de los elementos de prueba propuestos.

En donde el tiempo de prueba está dado por:

El total de revoluciones es calculado de acuerdo a la cantidad de giros de tambor que se esperan durante el uso de una secadora doméstica en condiciones de uso normal.

El objetivo de confiabilidad esperado para la validación del diseño del sistema de rodamiento por ruedas, de acuerdo a especificaciones, fue del 96.5%, con un nivel de confianza del 90%, a 10 años de vida (1600 hrs. de prueba). Por disponibilidad de cantidad de muestras para la prueba y para tener cálculos de confiabilidad precisos en un menor tiempo, fue necesario implementar el

principio de degradación acelerada (ADT), en el cual se definió realizar inspecciones en los años 0, 5, 8, 9, y 10 llevando a cabo mediciones del diámetro de ruedas, el cual tiene como especificación 3.1497" + 0.025" y -0.010", y así, precisar el desgaste acumulado durante y al final de la prueba.

2.3. Diseño de dispositivo de prueba.

El dispositivo desarrollado para llevar a cabo la prueba acelerada del sistema de rodamiento por ruedas, fue diseñado por el departamento de ingeniería de evaluación con ayuda de herramientas de análisis, tales como Análisis de modo y efecto de falla (AMEF), Diagrama de parámetros, y Diagrama de bloques funcionales (DBF), de tal forma que el dispositivo fuera capaz de incluir los mecanismos de falla necesarios para la reproducción de modos de falla y controlar los parámetros de prueba definidos. En la Tabla 2 se muestran los mecanismos de falla considerados y los niveles de esfuerzo a controlar en el dispositivo.

(1)

$$\frac{9,600,000 \text{ Revoluciones (cant. giros de tambor en 10 años)}}{100 \text{ RPM (Velocidad de giros de tambor)}} = \frac{96,000 \text{ Minutos}}{60 \text{ Minutos/hr}} = 1,600 \text{ hr}$$

Mecanismo de falla	Parámetros de prueba
Fricción	Acero inox. (superficie tambor)
Peso o carga	0 - 40 lb. sobre rueda
Tiempo de exposición	9.6 millones de RPM del tambor
Contaminación de pelusa	0 - 3 lb. en el ambiente
Velocidad de tambor	0 - 200 RPMs

Tabla 2. Definición de mecanismos de falla y rangos de parámetros en dispositivo de prueba.



Los giros del tambor fueron simulados por un motor de velocidad variable que transmite el movimiento a la placa circular en el centro, y ésta a su vez, hace girar las ruedas que están dispuestas en su periferia. El peso, o la carga, fue dada por resortes adaptados a las fijaciones de las ruedas, de tal manera, que la carga puede ser ajustada al comprimirlos o extenderlos, según fuera requerido. El cuerpo del dispositivo fue encapsulado con una cabina hermética, para controlar la temperatura ambiente y la presencia de pelusa en el flujo de aire. En la Figura 6 se puede apreciar el diseño del dispositivo y su construcción final.

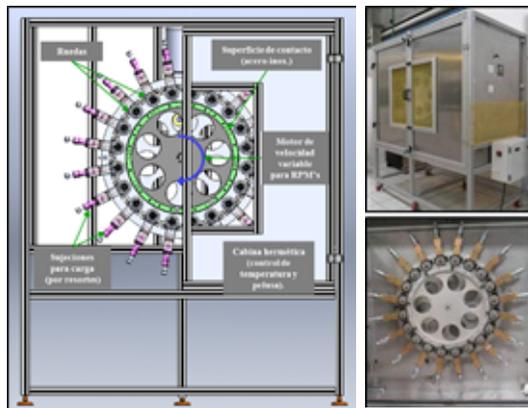


Figura 6. Esquema de diseño y construcción de dispositivo de prueba acelerada para sistema de rodamiento por ruedas.

Para validar el dispositivo y el método de medición para el diámetro rueda, se realizó una prueba piloto utilizando 10 prototipos, con la participación de 3 evaluadores y realizando 3 mediciones cada uno.

Se realizó un estudio de repetitividad y reproducibilidad (Estudio Gage R&R) en el cual se obtuvo como resultado que el porcentaje de la variación es de 19.63 %, como se muestra en la Figura 7, por lo tanto, el método de medición es aceptable ya que el porcentaje de variación del estudio es menor al 20%.

En trabajos posteriores se buscará mejorar este porcentaje de variación, pero para efectos de este trabajo el método y el equipo, son suficientes para medir la degradación del sistema de rodamiento por ruedas.

Gage R&R			
Source	VarComp	%Contribution (of VarComp)	
Total Gage R&R	0.0000033	3.85	
Repeatability	0.0000033	3.85	
Reproducibility	0.0000000	0.00	
Part-To-Part	0.0000834	96.15	
Total Variation	0.0000867	100.00	

Source	StdDev (SD)	Study Var (6 * SD)	%Study Var (%SV)
Total Gage R&R	0.0018280	0.0109681	19.63
Repeatability	0.0018280	0.0109681	19.63
Reproducibility	0.0000000	0.0000000	0.00
Part-To-Part	0.0091300	0.0547798	98.05
Total Variation	0.0093112	0.0558671	100.00

Number of Distinct Categories = 7

Figura 7. Resultados de Estudio Gage R&R para el método y dispositivo de medición de diámetro de rueda.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La prueba se llevó a cabo bajo las condiciones definidas, se pudieron reproducir los principales modos de falla ("rueda desgastada" y "rueda rota"), sin embargo, no fue posible llevar a la falla todas las muestras expuestas, como se muestra en la Tabla 3. Debido a que no se tenía el tiempo suficiente para llevar todas las muestras a la falla, se aplicó el principio de degradación a las mediciones realizadas al diámetro de las ruedas, de tal manera que, extrapolando aquellos datos censurados (a la derecha) de las muestras sobrevivientes, se pudiera conocer el pronóstico del tiempo en el que se presentaría la falla para cada una de las muestras.

Modo de falla	Tiempo a la falla (hrs)	Años simulados	Muestras
Rueda desgastada	1,440	8.0	1
Rueda desgastada	1,440	9.0	1
Rueda rota	1,588	9.9	1
Rueda desgastada	1,600	10.0	1
No presentan falla*	1,600	10.0	35

(*) Datos censurados a la derecha.

Tabla 3. Modos de falla reproducidos en ruedas evaluadas en prueba acelerada.

El valor crítico de diámetro de rueda se definió como 3.0497", que corresponde al diámetro mínimo permitido por especificación, y que de no cumplirse puede provocar que la rueda no tenga contacto con el tambor de la secadora y, por lo tanto, no llevar a cabo su función.

Se observó en el análisis de degradación del diámetro de la rueda, que la función de densidad de la falla de los datos se distribuye como una exponencial, mostrando como efecto la pérdida de material en la llanta de la rueda a una tasa constante. La función de densidad exponencial está dada por,

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \text{ en donde, } \lambda > 0 \text{ y } t > 0, \quad (2)$$

Siendo λ la tasa media de ocurrencia de las fallas y t el tiempo dado.

Se determinaron los tiempos a la falla de todas las muestras censuradas con ayuda del análisis de degradación, y con estos valores se realizaron los cálculos de confiabilidad pertinentes. Los datos fueron analizados usando una distribución Weibull, en la que su función de densidad (pdf) está dada por:

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left\{-\frac{t^\beta}{\eta}\right\} \quad (3)$$

Tabla 4. Tiempos a la falla obtenidos por degradación.

Muestra	Tiempo a la falla (años)						
1	8.4	11	14.3	21	14.5	31	12.9
2	9.9	12	14.1	22	14.8	32	11.8
3	10.8	13	14.8	23	12.8	33	14.6
4	4.7	14	15.0	24	12.0	34	12.4
5	13.2	15	13.8	25	12.0	35	15.2
6	12.5	16	12.1	26	13.8	36	12.8
7	12.5	17	12.0	27	13.7	37	13.2
8	12.0	18	12.2	28	14.5	38	14.3
9	12.1	19	14.3	29	13.9	39	14.5
10	12.9	20	14.0	30	12.8	40	13.9

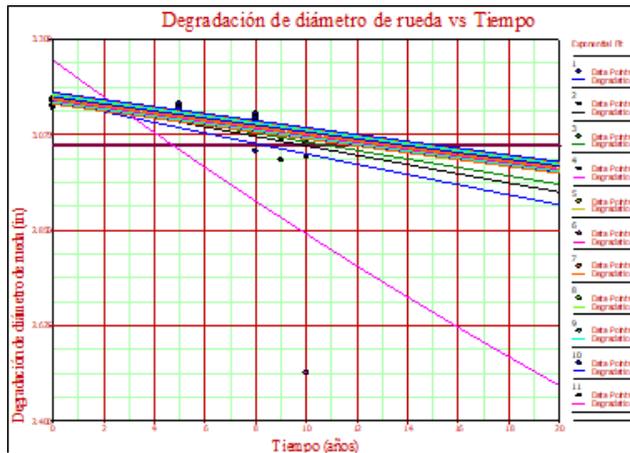


Figura 8. Gráfico de degradación de diámetro de rueda vs tiempo de prueba.

En donde $t > 0$, $\beta > 0$, $\eta > 0$ y su función de confiabilidad está dada por,

$$R(t) = \exp\left\{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right\} \quad (4)$$

Con base en las Ecs. (3) y (4), para los tiempos a la falla calculados se presentaron valores en $\beta = 9.9304$ y $\eta = 13.5845$, nos dio como resultado el 97.83% de confiabilidad en el ensamble ruedas, con un nivel de confianza del 90% a 10 años de vida simulados (1600 hrs). Lo anterior, demostró que el objetivo de confiabilidad del ensamble rueda fue cumplido. En la Figura 9 se presenta la curva de confiabilidad.



Figura 9. Resultados de la confiabilidad del ensamble rueda.

4. CONCLUSIONES

Con esta investigación se logró reproducir, por medio del diseño y desarrollo de una prueba de vida acelerada, los principales modos de falla del sistema de rodamiento por ruedas en secadoras domésticas que se presentan en campo. A través de esta prueba acelerada (ADT) fue posible determinar la confiabilidad del componente usando factores de esfuerzo representativos del uso normal del producto y de las condiciones a las que son expuestos.

En un inicio no se contaba con información de laboratorio referente a la confiabilidad del sistema, lo cual representaba posibles riesgos en el cumplimiento de las garantías del producto. Por tal motivo, la importancia de la aplicación de pruebas aceleradas y de degradación es un factor determinante para validar la calidad a través del tiempo de un sistema o componente.

¿Cómo es posible mejorar la confiabilidad usando pruebas aceleradas o degradación? Primeramente, se deben identificar los modos de falla del componente en cuestión, a través de numerosas pruebas, que por lo general solamente incluyen aspectos que permiten conocer su operación y sus límites. Estas pruebas no sólo consumen tiempo, sino que además suelen ser costosas, pero es un proceso que no puede ser omitido. Una vez identificados los modos de falla se definen los mecanismos de falla involucrados y se incluyen en los métodos de prueba ya establecidos, de tal forma que retroalimenten de forma efectiva los factores de esfuerzo anteriormente definidos. Por último, cuando se hayan completado las pruebas correspondientes, se determina la confiabilidad y es comparada con los objetivos iniciales, si los resultados no son aceptables, es requerido un cambio en el diseño de los componentes. Este proceso debe ser repetido cuantas veces sea necesario hasta asegurar que los cam-

bios hayan solucionado las deficiencias de confiabilidad presentadas.

No se trata de una regla que siempre debe seguirse para el diseño de pruebas, sino que se trata de un proceso vivo en el cual, de acuerdo a las necesidades de cada sistema o componente, todas las actividades de análisis y prueba deben ser completadas antes de la salida a producción de cualquier producto.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por su apoyo durante toda esta investigación. Así mismo se extienden los agradecimientos a la empresa Mabe por su apoyo y soporte para la realización de las pruebas en sus instalaciones.

FUENTES DE FINANCIAMIENTO

Este proyecto fue solventado mediante el apoyo de la empresa Mabe.

REFERENCIAS

Borgia, O., F. De Carlo, N. Fanciullacci, and M. Tucci. 2013. Accelerated life tests for new product qualification: a case study in the household appliance. IFAC. Available from: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S147466701535686X>

De Carlo, F., O. Borgia, and M. Tucci. 2014. Accelerated degradation tests for reliability estimation of a new product: A case study for washing machines. *Proc. Inst. Mech.*

Eng. Part O J. Risk Reliab. 228:127–138. doi:10.1177/1748006X13500650.

Available from: <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1748006X13500650>

Escobar, L. A., and W. Q. Meeker. 2006. A Review of Accelerated Test Models. *Stat. Sci.* 21:552–577. doi:10.1214/088342306000000321.

Available from: <http://projecteuclid.org/euclid.ss/1177334529>

Meeker, W. Q., L. A. Escobar, and Y. Hong. 2009. Using Accelerated Life Tests Results to Predict Product Field Reliability.

Technometrics. 51:146–161. doi:10.1198/TECH.2009.0016.

Sadeghi, F., B. Jalalahmadi, T. S. Slack, N. Raje, and N. K. Arakere. 2009. A Review of Rolling Contact. 131:1–15. doi:10.1115/1.3209132.

Yadav, O. P., N. Singh, and P. S. Goel. 2006.

Reliability demonstration test planning: A three dimensional consideration. *Reliab. Eng. Syst. Saf.* 91:882–893. doi:10.1016/j.res.2005.09.001.