

Análisis de la fiabilidad de una máquina de serigrafía semiautomática, utilizando métodos de distribución de probabilidad continua

Analysis of the reliability of a semi-automatic screen-printing machine, using continuous probability distribution methods

Fabián Eduardo Bastidas-Alarcón

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador
fbastidas@esPOCH.edu.ec

Eder Lenin Cruz-Siguenza

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador
eder.cruz@esPOCH.edu.ec

Carlos Ramiro Cepeda-Godoy

Escuela Superior Politécnica de Chimborazo - Ecuador
ccepeda@esPOCH.edu.ec

Rodrigo Velásquez-Carvajal

Instituto Superior Tecnológico Carlos Cisneros - Ecuador
ing.rvelasquez.c@gmail.com

doi.org/10.33386/593dp.2021.4-1.577

RESUMEN

La investigación se fundamenta en el estudio de la probabilidad con la que un equipo funciona de manera adecuada en un determinado periodo bajo condiciones operativas específicas, el análisis de fiabilidad realizado en una máquina serigráfica semiautomática, permite verificar la disponibilidad del equipo en la ejecución de trabajos inherentes a la misma y por ende optimizar el mecanismo y ofrecer productos que cumplan con los requerimientos del mercado, para ello debemos conocer los tiempos correctos en los cuales se va a realizar mantenimiento preventivo, este estudio se realizó por medio de la aplicación de la distribución de Weibull y exponencial con las que se pudo determinar que el valor de la fiabilidad para las dos distribuciones es muy similar con un aproximado del 65%. También se pudo determinar que la fiabilidad de un elemento va a disminuir en función del tiempo debido al desgaste que este va a presentar por el uso constante de los elementos constitutivos de la máquina. Por otra parte, de acuerdo con los análisis realizados se determina que la máquina tiene una disponibilidad del 97,75%, para efectuar los trabajos encomendados a la serigrafía. Finalmente se realiza un programa de mantenimiento para cada elemento y así poder incrementar la vida útil del mismo.

Palabras clave: distribución exponencial; distribución de Weibull; fiabilidad; mantenimiento preventivo.

Cómo citar este artículo:

APA:

Bastidas-Alarcón, F., & Cruz-Siguenza, E., & Cepeda-Godoy, C., & Velásquez-Carvajal, R., (2021). Análisis de la fiabilidad de una máquina de serigrafía semiautomática, utilizando métodos de distribución de probabilidad continua. 593 Digital Publisher CEIT, 6(4), 71-81. <https://doi.org/10.33386/593dp.2021.4.577>

Descargar para Mendeley y Zotero

ABSTRACT

The research is based on the study of the probability with which an equipment works adequately in a certain period under specific operating conditions, the reliability analysis carried out on a semiautomatic screen printing machine, allows to verify the availability of the equipment in the execution of works inherent to it and therefore optimize the mechanism and offer products that meet market requirements, for this we must know the correct times in which preventive maintenance will be carried out, this study was carried out through the application of distribution Weibull and exponential with which it was possible to determine that the value of the reliability for the two distributions is very similar with an approximate of 65%. It was also possible to determine that the reliability of an element will decrease as a function of time due to the wear that it will present due to the constant use of the constituent elements of the machine. On the other hand, according to the analyzes carried out, it is determined that the machine has an availability of 97.75%, to carry out the jobs entrusted to screen printing. Finally, a maintenance program is carried out for each element in order to increase its useful life.

Key words: exponential distribution; preventive maintenance; reliability; weibull distribution.

Introducción

Dentro de la industria es muy importante conocer el periodo entre fallos que puede presentar un equipo o elemento, así como sus periodos de reparación por lo cual se debe realizar el análisis de fiabilidad ya que estos datos nos ayudan a mejorar el diseño y funciones de estas máquinas ya que Uno de los principales objetivos de la industria es diseñar un producto de tal manera que este dure el mayor tiempo posible.

La fiabilidad es la capacidad de los productos o servicios de funcionar de la forma requerida durante un cierto tiempo, en otras palabras, la persistencia de la calidad a lo largo del tiempo.

La fiabilidad se trata del estudio de los fallos que pueden existir en un equipo o sistema. Todo elemento llega a un instante en el que no puede cumplir satisfactoriamente la función para la cual fueron diseñados y esto presentara repercusiones e incluso pérdidas económicas, por lo tanto, la fiabilidad de un sistema dependerá de la naturaleza de su objetivo, el que un sistema tenga una mayor fiabilidad conlleva un mayor costo y esfuerzo por lo que su exigencia debe adecuarse con su objetivo. (Sols, 2000)

Es necesario realizar un análisis de fiabilidad de la máquina de serigrafía ya que así podremos determinar el tiempo en el que cada elemento va a fallar y poder realizar un respectivo procedimiento de mantenimiento preventivo, esto nos ayudara a evitar gastos innecesarios además de prevenir la falla total de la máquina, debemos realizar el análisis del conjunto y también el análisis por separado de cada elemento para así obtener una mayor eficiencia en el índice de fiabilidad de la máquina.

Método

La fiabilidad se conoce como un proceso estadístico en donde como principal objetivo se tiene el estudio y obtención de una variable aleatoria conocida como “tiempo hasta que se produzca un fallo” (Parra Márquez et al.,

2012). Se requiere información básica obtenida empíricamente a través de registros de los elementos objeto de análisis en donde se detallan cronológicamente los tiempos históricos de las fallas presentadas en el equipo hasta la actualidad.

Análisis de fiabilidad mediante la distribución exponencial

La distribución exponencial es considerada como una distribución simple que consta de un solo parámetro y que se utiliza para la modelación de datos de fiabilidad. La distribución exponencial se puede decir que es una variación de a distribución de Weibull en donde .

Esta distribución ofrece un modelo adecuado para la etapa de vida útil de un producto o elemento en donde existe también una probabilidad de fallar sin importar si este es completamente nuevo o si tiene varios años de antigüedad. Este tipo de distribución generalmente se la aplica en elementos electrónicos en donde el desgaste aparece mucho después del límite de la vida útil del elemento, sin embargo, no es recomendable aplicar la distribución exponencial para el modelamiento de elementos mecánicos y/o eléctricos debido a que se puede producir la aparición de fatiga, desgaste o corrosión en estos elementos mucho antes de llegar al límite de la vida útil, siendo un claro ejemplo, los rodamientos.

Una propiedad interesante de esta distribución es la ausencia de memoria, lo cual indica que el tiempo restante de la vida útil de un elemento no va a depender de su antigüedad.

Esta distribución se caracteriza porque su tasa de fallos es constante, se asume que el dispositivo no ha tenido fallos y que aún no han aparecido desgastes, es la distribución más utilizada para el estudio de fiabilidad. (Solé, 2005)

La fiabilidad es la capacidad de un equipo de funcionar bajo las condiciones establecidas durante un periodo de tiempo, y esta se puede calcular mediante la siguiente ecuación: (Prat, 2009)

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1)$$

También se conoce que:

$$\lambda = \frac{1}{TMEF} \quad (2)$$

Reemplazando (2) en (1):

$$R(t) = e^{-\frac{t}{TMEF}} \quad (3)$$

Dónde:

λ : Frecuencia con la que se dan los fallos en el componente analizado

$TMEF$: Tiempo medio entre fallos

$$\left(\frac{\text{tiempo real de trabajo}}{\text{numero de averias}} \right)$$

Las relaciones entre la fiabilidad y los componentes son (Creus, 1991):

$$R(t) = \frac{N_s(t)}{N(0)} = \frac{N(0) - N_f(t)}{N(0)} = 1 - \frac{N_f(t)}{N(0)} \quad (4)$$

Dónde:

$N_s(t)$: Número de componentes que siguen operando en un tiempo t

$N(0)$: Número de componente en un tiempo $t=0$

$N_f(t)$: Numero de componente que han fallado en un tiempo t

También podemos calcular la infirabilidad o mortalidad (elementos que han fallado) por medio de la ecuación:

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Análisis de fiabilidad mediante la distribución de Weibull.

La distribución de Weibull es la distribución más utilizada en el modelamiento de datos de fiabilidad. Esta distribución es fácil de interpretar debido a su versatilidad. Durante el análisis de datos de fiabilidad la distribución de Weibull se emplea para responder ciertas preguntas.

¿Qué porcentaje de los elementos se espera falle durante el período de quemado?

¿Cuántos reclamos de garantía pueden esperarse durante la fase de vida útil?

¿Cuándo se espera que se produzca un desgaste rápido?

Debido a que la distribución de Weibull tiene la posibilidad de modelar datos asimétricos hacia cualquier lado o simétricos, es utilizada para evaluar la fiabilidad de diversos elementos, entre los cuales figuran tubos de vacío, rodamientos de bolas, condensadores. La distribución de Weibull tiene la capacidad de modelar elementos bajo una función de riesgo que sea creciente, decreciente o constante, mediante o cual se puede definir cualquier etapa de la vida útil del elemento.

En modos de falla debido a procesos de degradación o reacciones químicas como la corrosión es muy probable que este método no funcione con eficacia. Para este tipo de modelo es recomendable utilizar el método de distribución log normal.

Es uno de los métodos más usados para problemas con tiempos de vida en fiabilidad industrial y la fiabilidad en esta distribución se expresa en la ecuación (6) (Martinez, 2011) (Solé, 2005)

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (6)$$

Para la tasa instantánea de fallos podemos utilizar la expresión (7)

$$h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} \quad (7)$$

También podemos calcular la infiabilidad o mortalidad (elementos que han fallado) por medio de la ecuación:

Tabla 1

Factor de forma para diferentes elementos

Componente	β (Factor de forma)
Rodamientos de bolas	1.3
Pernos	3.0
Diafragmas de goma	1.1
Resortes	1.1
Motores C.A.	1.2
Válvulas de control	1.0
Transmisores	1.0
Indicadores de temperatura	1.0
Manómetros	1.2
Medidores de caudal	1.0
Medidores de nivel	1.0
Sistemas en general	1.2

Fuente: Solé Antonio, España, 2005

Cálculo de la disponibilidad

Para el cálculo de la disponibilidad del equipo utilizaremos la siguiente ecuación:

$$DISP = \frac{\text{Horas totales} - \text{horas de parada por mantenimiento}}{\text{horas totales}} \quad (9)$$

Resultados

Datos recolectados.

Tabla 2

Turnos diarios hora/día

Turnos por día	2
Enero	3 hoes/día
Febrero	4 hoes/día
Marzo	5 hoes/día
Abril	5 hoes/día
Mayo	6 hoes/día
Junio	6 hoes/día
Julio	6 hoes/día
Agosto	4 hoes/día
Septiembre	5 hoes/día
Octubre	5 hoes/día
Noviembre	6 hoes/día
Diciembre	6 hoes/día
Días Laborables	20 días
Tiempo de alimentación y otros	0.5 h/día

Tabla 3

Tiempos de trabajo

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	TOTAL
Tiempo teórico de trabajo	120	160	200	200	240	240	240	160	200	200	240	240	2440
Tiempo perdido por alimentación y demás	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	240
Tiempo perdido por mantenimiento programado	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	48
Tiempo perdido por paros programados	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24	288
Tiempo de paro por proceso (no programado)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	13
Tiempo total perdido	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	26	301
Tiempo real de trabajo	95	135	175	175	215	215	215	135	175	175	215	214	2139
Numero de averías	1	2	3	3	3	3	3	2	3	3	3	3	32
TMEF	95	67.5	58.33	58.33	71.67	71.67	71.67	67.50	58.33	58.33	71.67	71.33	66.84

$$TMEF = \left(\frac{\text{tiempo real de trabajo}}{\text{numero de averías}} \right)$$

$$= \frac{2139}{32} = 66.84 \text{ Hora}$$

Análisis de fiabilidad mediante la distribución exponencial

Tabla 4

Cálculos mediante distribución exponencial

Tiempo	Fiabilidad $R(t) = e^{-\frac{t-\gamma}{\eta} \beta}$	Infabilidad $F(t) = 1 - R(t)$
1	0.983151087	0.014848913
2	0.970322654	0.029677346
3	0.956111457	0.043888543
4	0.941914242	0.058085758
5	0.927927899	0.072072101
6	0.914149119	0.085930881
7	0.900574998	0.099425002
8	0.887202488	0.112797512
9	0.874028447	0.125971553
10	0.861050074	0.138998926
11	0.848264417	0.151725583
12	0.835666612	0.164301388
13	0.823259841	0.176740159
14	0.811035228	0.188964672
15	0.798992335	0.201007665
16	0.787128167	0.212871833
17	0.775440169	0.224569831
18	0.763925723	0.236074273
19	0.752582259	0.247417741
20	0.74140723	0.25859277
21	0.730398199	0.269601861
22	0.71953252	0.28044748
23	0.708867948	0.29112052
24	0.698342029	0.301637971
25	0.687972409	0.312007391
26	0.677756766	0.322234234
27	0.667692815	0.3323207183
28	0.657778903	0.3422821697
29	0.64801101	0.352118999
30	0.638388751	0.3618411249
31	0.628909372	0.3714590628
32	0.619570751	0.3809829249
33	0.610370799	0.389429201

34	0.601307456	0.396892344
35	0.592378694	0.4047621306
36	0.583582514	0.4146417486
37	0.574916948	0.425992092
38	0.566380056	0.438119944
39	0.557969928	0.442080072
40	0.549684681	0.450315319
41	0.541522461	0.458477389
42	0.533481441	0.466518339
43	0.525559822	0.474440178
44	0.51775388	0.48224417
45	0.510067719	0.489932282
46	0.502492767	0.497506238
47	0.495032281	0.504967719
48	0.487681589	0.512318411
49	0.480440048	0.519559952
50	0.473306035	0.526692965
51	0.466277955	0.533722045
52	0.459354235	0.540645765
53	0.452533223	0.547466677
54	0.445812695	0.554186305
55	0.439193647	0.560806133
56	0.432672293	0.567327703
57	0.426247582	0.573752418
58	0.419918269	0.580081731
59	0.413682939	0.586317061
60	0.407540197	0.592459903
61	0.401488668	0.598511332
62	0.395526998	0.604472002
63	0.389653852	0.610346148
64	0.383867916	0.616132084
65	0.378167894	0.621832106
66	0.372552512	0.627447488
67	0.367028312	0.632979468

12	0.886498533	0.1135	0.012047581
13	0.875796401	0.1242	0.012241997
14	0.865060413	0.1349	0.012424794
15	0.85430429	0.1457	0.012597427
16	0.843540134	0.1565	0.012761085
17	0.832778694	0.1672	0.012916754
18	0.822029564	0.1780	0.013065261
19	0.81130135	0.1887	0.013207308
20	0.800601801	0.1994	0.013343495
21	0.789937915	0.2101	0.013474339
22	0.779316029	0.2207	0.013600289
23	0.768741894	0.2313	0.013721739
24	0.758220738	0.2418	0.013839036
25	0.747757318	0.2522	0.013952486
26	0.737355969	0.2626	0.014062362
27	0.727020642	0.2730	0.014168907
28	0.716754939	0.2832	0.014272341

Análisis de fiabilidad mediante la distribución de Weibull

Tabla 5

Factores para distribución Weibull

DATOS	
Parámetro de escala η	70
Parámetro de forma β	1.2
Parámetro inicial de tiempo γ	0

Tabla 6

Cálculos mediante distribución Weibull

tiempo	Fiabilidad $e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta}$	Distribución de fallos acumulados $1 - R(t)$	Tasa de fallos $\frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1}$
0	1	0.0000	0
1	0.993910849	0.0061	0.007329319
2	0.986066029	0.0139	0.008419176
3	0.977432643	0.0226	0.009130359
4	0.968277093	0.0317	0.009671094
5	0.958740029	0.0413	0.010112478
6	0.94891112	0.0511	0.010488028
7	0.938853589	0.0611	0.010816412
8	0.928614926	0.0714	0.01110917
9	0.918232384	0.0818	0.011373971
10	0.90773612	0.0923	0.011616187
11	0.897151134	0.1028	0.011839739

29	0.706562145	0.2934	0.01437286
30	0.696445253	0.3036	0.014470644
31	0.686406989	0.3136	0.014565853
32	0.676449834	0.3236	0.014658637
33	0.666576039	0.3334	0.014749129
34	0.656787649	0.3432	0.014837454
35	0.647086512	0.3529	0.014923724
36	0.637474295	0.3625	0.015008044
37	0.6279525	0.3720	0.015090511
38	0.61852247	0.3815	0.015171213
39	0.609185403	0.3908	0.015250234
40	0.599942362	0.4001	0.015327651
41	0.590794281	0.4092	0.015403534
42	0.581741975	0.4183	0.015477951
43	0.572786151	0.4272	0.015550963
44	0.563927406	0.4361	0.015622629
45	0.555166244	0.4448	0.015693005
46	0.546503075	0.4535	0.015762139
47	0.537938223	0.4621	0.015830082
48	0.529471931	0.4705	0.015896878

49	0.521104365	0.4789	0.01596257
50	0.512835621	0.4872	0.016027198
51	0.504665728	0.4953	0.0160908
52	0.496594649	0.5034	0.016153412
53	0.488622291	0.5114	0.016215068
54	0.480748503	0.5193	0.0162758
55	0.472973082	0.5270	0.016335639
56	0.465295775	0.5347	0.016394614
57	0.457716285	0.5423	0.016452753
58	0.450234268	0.5498	0.016510081
59	0.442849342	0.5572	0.016566623
60	0.435561085	0.5644	0.016622405
61	0.428369039	0.5716	0.016677447
62	0.421272712	0.5787	0.016731772
63	0.414271582	0.5857	0.0167854
64	0.407365094	0.5926	0.016838352
65	0.40055267	0.5994	0.016890646
66	0.393833701	0.6062	0.016942301
67	0.387207557	0.6128	0.016993333

Tabla 7

Análisis de falla por elemento

Elemento	Fallo/anual	Porcentaje %	Acumulado fallo	Porcentaje acumulado %
Bastidor	12	25,532	12	25,53191
Resortes	8	17,021	20	42,55319
Rodamientos de juego	6	12,766	26	55,31915
Tuberías de conducción de aire	6	12,766	32	68,08511
Cilindro neumático	4	10,638	37	78,72340
Plancha de soporte	4	8,511	41	87,23404
Pedal neumático	3	6,383	44	93,61702
Estructura Soporte	2	6,383	47	100
TOTAL	47	100		

Cálculo de la disponibilidad

$$DISP = \frac{2139 - 48}{2139}$$

$$DISP = 0.9775$$

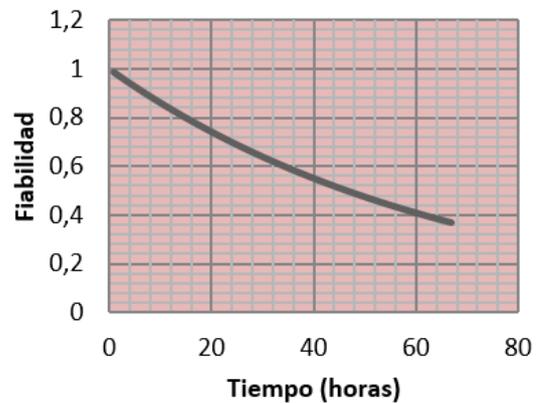
$$DISP = 97.75 \%$$

De acuerdo con los datos obtenidos tenemos tendencias las cuales nos dan un claro panorama del comportamiento de la fiabilidad en función del tiempo como podemos ver a continuación en las siguientes gráficas.

Gráfico 1

Tiempo vs Fiabilidad – Exponencial

Tiempo vs Fiabilidad

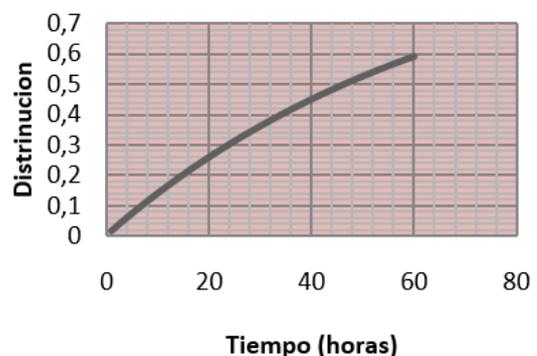


En la gráfica se puede observar que la fiabilidad disminuye de manera exponencial en función del tiempo esto se debe al desgaste existente en los elementos de la máquina por el uso constante de la misma. Además, en esta gráfica se empleó un intervalo de 67 horas para de esa manera ver como se estabiliza la curva de tiempo vs fiabilidad

Gráfico 2

Tiempo vs Infiabilidad- exponencial

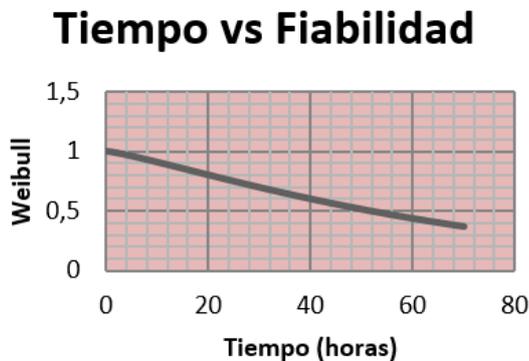
Tiempo vs Infiabilidad



La tasa de infiabilidad incrementa en función del tiempo debido al desgaste que se va a dar en cada elemento por el uso constante que se le va a dar a la máquina.

Gráfico 3

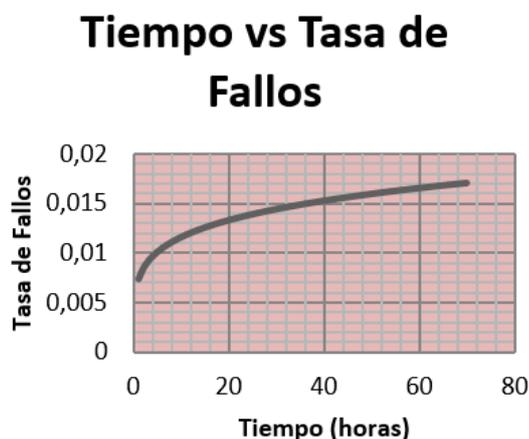
Tiempo vs Fiabilidad Weibull



Al igual que la distribución exponencial podemos ver que la fiabilidad disminuye en función del tiempo esto se debe al desgaste existente en los elementos de la máquina por el uso constante de la misma, además podemos observar que los valores de fiabilidad son muy similares en las dos distribuciones.

Gráfico 4

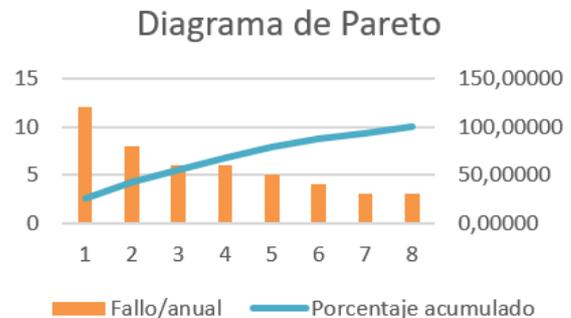
Tiempo vs Tasa de Fallos Weibull



En la curva la tasa de fallos incrementa con el transcurso de los turnos los cuales están establecidos en horas/día durante los 12 meses que tiene un año debido a que la producción no es estable durante todo el año.

Gráfico 5

Diagrama de Pareto análisis individual de elementos



Se puede observar que el fallo/anual de los elementos que constituyen la máquina tienen distintos valores siendo el más considerable el del bastidor con 12 fallos/anuales y el más bajo el del pedal neumático, así como la estructura con 3 fallos/ anuales.

Discusión

De acuerdo con Sole, cuando tratamos de un mecanismo de estudio de Fiabilidad del funcionamiento debemos utilizar una metodología capaz de simular en primera instancia un trabajo continuo exponencial con el cual no se tiene fallas, y obviamente poder constatar con datos reales arrojados por el sistema de la máquina, logrando así un comparativo de la eficiencia real con la esperada por lo cual estamos muy de acuerdo que se utilice el método de variación de distribución Weibull. Para estos casos.

Conclusiones

Se ha podido determinar que con el análisis de las dos distribuciones el resultado de la fiabilidad ha sido muy similar, además de que las curvas de fiabilidad van disminuyendo en función del tiempo.

Se determinó que nuestra máquina tiene una disponibilidad del 97,75%, es decir que el tiempo disponible para producir y el tiempo total de parada son óptimos para un buen funcionamiento. Una vez que la máquina de serigrafía se de mantenimiento o antes del

mantenimiento tiene un porcentaje adecuado de disponibilidad.

Se ha determinado que la tasa de fallos va a incrementar en función del tiempo debido al desgaste que va a existir en cada elemento.

Los elementos más considerables que van a fallar en la maquina son el bastidor y los resortes.

Referencias bibliográficas

- Parra Márquez, C. A., & Crespo Márquez, A. (2012). *Ingeniería de mantenimiento y fiabilidad aplicada en gestión de activos: desarrollo y aplicación práctica de un modelo de gestión del mantenimiento (MGM)*. Ingeman.
- Creus Solé, A. (2005). *Fiabilidad y seguridad: su aplicación en procesos industriales*. Marcombo.
- Sols, A. (2000). *Fiabilidad, mantenibilidad, efectividad: un enfoque sistemático*. Universidad Pontificia Comillas.
- Prat Planas, M. (2009). Capacidad De Mantenimiento Y Seguridad De Una Impresora Industrial Digital., 4. Retrieved from <https://upcommons.upc.edu/>
- Creus Solé, A. (1992). *Fiabilidad y seguridad: su aplicación en procesos industriales*. Marcombo. Retrieved from <https://books.google.com.ec/books?id=mR0dOgAACAAJ&dq=Fiabilidad+y+seguridad:+su+aplicación+en+procesos+industriales&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiTnemGxqnjAhUCwFkKHcgoBooQ6AEIJzAA>
- Martínez Laura. (2011). *Métodos De Inferencia Para La Distribución Weibull: Aplicación En Fiabilidad Industrial*, 68. Retrieved from http://eio.usc.es/pub/mte/descargas/proyectosfinmaster/proyecto_613.pdf
- Creus Solé, A. (1991). *Fiabilidad y seguridad de procesos industriales*. Barcelona: Marcombo.
- Lin, P. T., Gea, H. C., & Xu, L. (2011). Reliability-based design optimization of electrothermal microactuators using Hybrid Reliability Approach. In *2011 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, ROBIO 2011* (pp. 2529–2534). <https://doi.org/10.1109/ROBIO.2011.6181685>
- Gupta, R. D., & Kundu, D. (2001). Exponentiated exponential family: An alternative to gamma and Weibull distributions. *Biometrical Journal*, 43(1), 117–130. [https://doi.org/10.1002/1521-4036\(200102\)43:1<117::AID-BIMJ117>3.0.CO;2-R](https://doi.org/10.1002/1521-4036(200102)43:1<117::AID-BIMJ117>3.0.CO;2-R)
- Dey, S., & Dey, T. (2014). Generalized inverted exponential distribution: Different methods of estimation. *American Journal of Mathematical and Management Sciences*, 33(3), 194–215. <https://doi.org/10.1080/01966324.2014.927338>
- Barakat, H. M. (2015). A new method for adding two parameters to a family of distributions with application to the normal and exponential families. *Statistical Methods and Applications*, 24(3), 359–372. <https://doi.org/10.1007/s10260-014-0265-8>
- Bhattacharya, P., & Bhattacharjee, R. (2010). A Study on Weibull Distribution for Estimating the Parameters. *Wind Engineering*, 33(5), 469–476. <https://doi.org/10.1260/030952409790291163>
- Kundu, D., & Gupta, R. D. (2008). Generalized exponential distribution: Bayesian estimations. *Computational Statistics and Data Analysis*, 52(4), 1873–1883. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2007.06.004>
- Barabadi, A. (2013). Reliability model selection and validation using Weibull probability plot - A case study. *Electric Power Systems Research*, 101, 96–101. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2013.03.010>
- Mudholkar, G. S., & Srivastava, D. K. (1993). Exponentiated Weibull Family

- for Analyzing Bathtub Failure-Rate Data. *IEEE Transactions on Reliability*, 42(2), 299–302. <https://doi.org/10.1109/24.229504>
- Wu, Y.-T. (1994). Computational methods for efficient structural reliability and reliability sensitivity analysis. *AIAA Journal*, 32(8), 1717–1723. <https://doi.org/10.2514/3.12164>
- Youn, B. D., Choi, K. K., & Park, Y. H. (2003). Hybrid Analysis Method for Reliability-Based Design Optimization. *Journal of Mechanical Design*, 125(2), 221. <https://doi.org/10.1115/1.1561042>
- Crow, L. H. (1982). Confidence interval procedures for the weibull process with applications to reliability growth. *Technometrics*, 24(1), 67–72. <https://doi.org/10.1080/00401706.1982.10487711>
- Bebbington, M., Lai, C. D., & Zitikis, R. (2007). A flexible Weibull extension. *Reliability Engineering and System Safety*, 92(6), 719–726. <https://doi.org/10.1016/j.res.2006.03.004>
- Murthy, D. N. P., Bulmer, M., & Eccleston, J. A. (2004). Weibull model selection for reliability modelling. *Reliability Engineering and System Safety*, 86(3), 257–267. <https://doi.org/10.1016/j.res.2004.01.014>
- Basu, A. P. (1964). Estimates of Reliability for Some Distributions Useful in Life Testing. *Technometrics*, 6(2), 215–219. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490165>
- Marshall, A. (2004). A new method for adding a parameter to a family of distributions with application to the exponential and Weibull families. *Biometrika*, 84(3), 641–652. <https://doi.org/10.1093/biomet/84.3.641>
- Taylor, P., Abouammoh, A. M., & Alshingiti, A. M. (2009). Journal of Statistical Computation and Reliability estimation of generalized inverted exponential distribution Reliability estimation of generalized inverted exponential distribution, (September 2012), 37–41.
- Gupta, R. D., & Kundu, D. (2001). Generalized exponential distribution: Different method of estimations. *Journal of Statistical Computation and Simulation*, 69(4), 315–337. <https://doi.org/10.1080/00949650108812098>
- Zhang, T., & Xie, M. (2011). On the upper truncated Weibull distribution and its reliability implications. *Reliability Engineering and System Safety*, 96(1), 194–200. <https://doi.org/10.1016/j.res.2010.09.004>
- Bučar, T., Nagode, M., & Fajdiga, M. (2004). Reliability approximation using finite Weibull mixture distributions. *Reliability Engineering and System Safety*, 84(3), 241–251. <https://doi.org/10.1016/j.res.2003.11.008>
- Basu, A. P., Marshall, A., Gupta, R. D., Kundu, D., Taylor, P., Abouammoh, A. M., ... Evans, R. A. (2004). Generalized exponential distribution: Different method of estimations. *Technometrics*, 25(4), 315–337. <https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490165>
- Evans, R. A. (2006). [Statistical Methods in Reliability]: Discussion. *Technometrics*, 25(4), 333. <https://doi.org/10.2307/1267853>
- Kao, J. H. K. (1958). Computer methods for estimating weibull parameters in reliability studies. *IRE Transactions on Reliability and Quality Control, PGRQC-13*, 15–22. <https://doi.org/10.1109/IRE-PGRQC.1958.5007164>
- Choi, S.-K., Grandhi, R. V., & Canfield, R. A. (2007). *Reliability-based structural design*. Springer.
- M^a, J., & Del Pino, T. (1991). NTP 316: Fiabilidad de componentes: la distribución

exponencial, 8. Retrieved from http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/301a400/ntp_316.pdf