Seminario en confiabilidad de dispositivos electrónicos: el caso particular de las luminarias LED (Light Emitting Diode) para alumbrado público

Fernando Silveira, Francisco Veirano,
Nicolás Rivero, Michael Varela

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República, Uruguay

Objetivos

- Brindar una introducción a la confiabilidad en general y en particular para el caso de los dispositivos electrónicos.
- Presentar un resumen de estudios recientes en mecanismos de fallas en luminarias LEDs y su seguimiento.
- Dar una introducción a los ensayos utilizados para la estimación del nivel de confiabilidad de dispositivos electrónicos y en particular la normativa que está surgiendo en el campo de la iluminación LED.

Plan

- Ma 26/3: Introducción, definición y matemática de la confiabilidad.
- Jue 28/3: Confiabilidad y mecanismos de falla de componentes electrónicos
- Ma 2/4: Test de envejecimiento acelerado, normas
- Jue 4/4: Degradación de los LEDs (TM21), asignación de artículos a presentar por los asistentes

- Ma 7/5: Mecanismos de falla en luminarias LED
- Jue 9/5: Seguimiento de tasa de fallas
- Ma 14/5, Jue 16/5: Presentaciones de material adicional por parte de los asistentes

Bibliografía

- Matemática de la confiabilidad:

Applied Reliability, 2nd. Ed., P. Tobias, D. Trindade, Van Nostrand Reinhold, ISBN 0-442-00469-9,1995. (3ra Ed. 2011 CRC)

- Mecanismos de Fallas:

Failure Mechanisms in Semiconductor Devices, 2nd. Ed., E. Ajith Amerasekera, F. Najm, John Wiley and Sons, ISBN 0 471 96482 9, 1997

- Confiabilidad LEDs

Solid State Lighting Reliability Part 2: Components to Systems, Willem Dirk van Driel, Xuejun Fan, Guo Qi Zhang, Eds., Springer, ISBN 978-3-319-58174-3, 2018. Disponible gratis Timbo

- Normas, reportes, artículos técnicos

Conceptos Básicos de Confiabilidad

Fernando Silveira

Instituto de Ingeniería Eléctrica, Universidad de la República, Uruguay

Rememorando …

- P(A.B)=P(A).P(B/A)

=> P(B/A) = P(A.B)/P(A)

- Función distribución:

  F(a) = P(X<a)

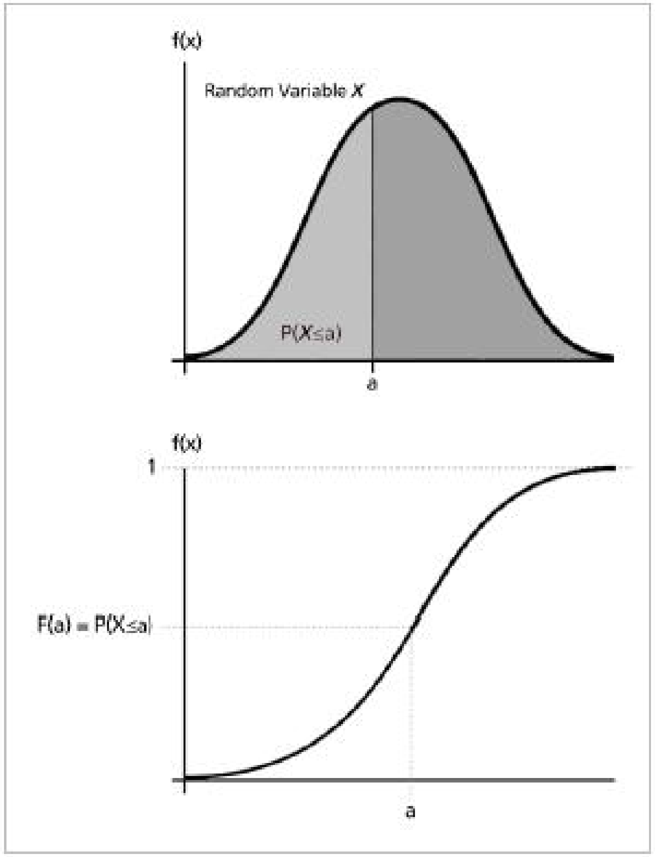
  Monótona creciente

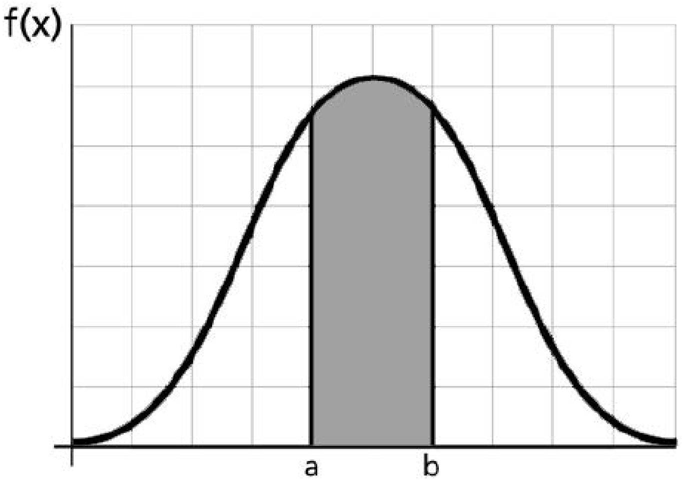
  P(x1<X<x2) = F(x2) – F(x1)

- Densidad de probabilidad correspondiente a F(x)

  f(t)=dF(x)/dx

$$P(a<X<b)=\int_a^b f(x)\,dx$$





Definiciones

- Función <u>distribución de tiempo de vida</u> ("life distribution")
  - F(t) =P(tiempo de vida < t) = Prob. de que una unidad haya fallado a las t hs.
- Función <u>confiabilidad R(t)</u>
  - R(t)= 1 – F(t) = Prob. que una unidad no haya fallado a las t hs.
- Densidad de probabilidad correspondiente a F(t)
  - f(t)=dF(t)/dt
- <u>Tasa de falla</u> ("failure rate")

$$h(t) = \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{(1-F(t)).\Delta t} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$$

- <u>Tiempo Medio de Falla (Mean Time to Fail, MTTF)</u>

$$MTTF = \int_{0}^{+\infty} t.f(t).dt$$

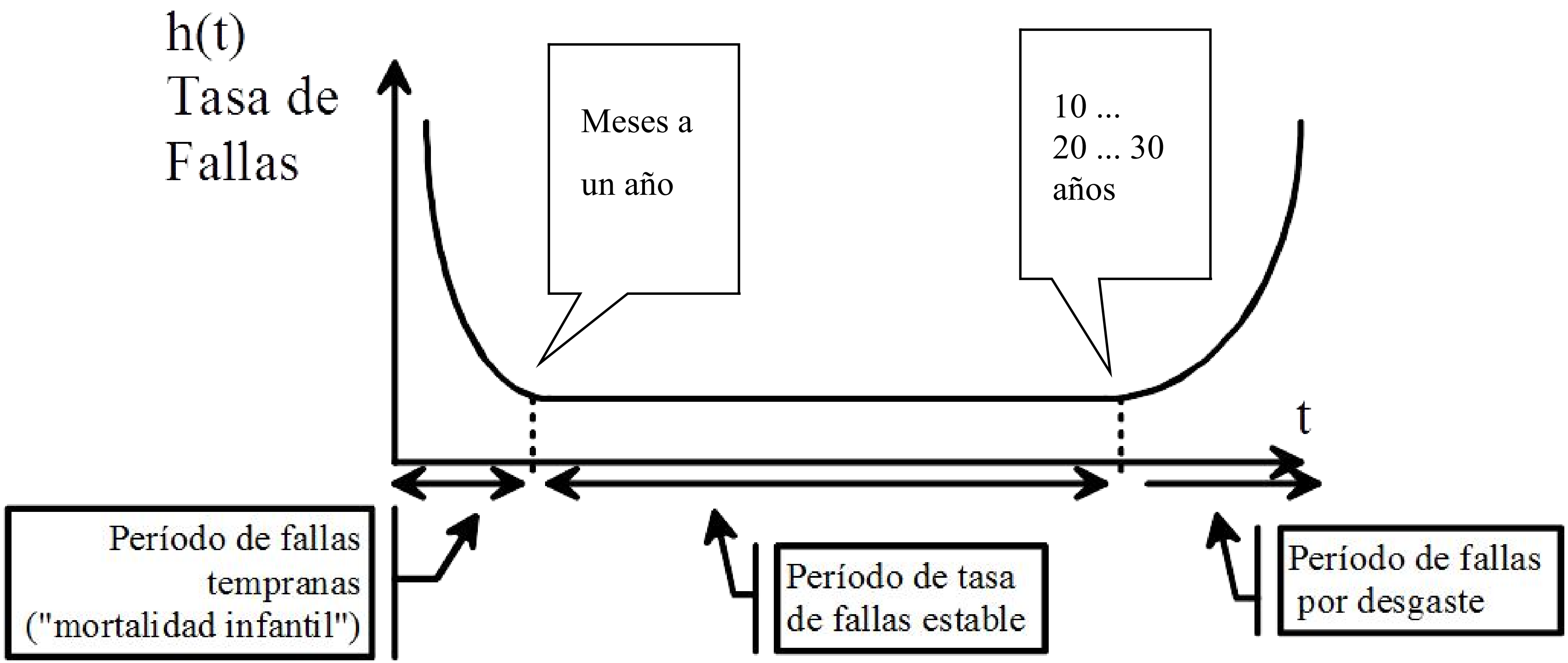
Unidades de la tasa de fallas h(t)

- %/K: porcentaje de unidades que fallan cada 1000 horas
- PPM/K: partes por millón que fallan cada 1000 horas
- 1 PPM/K = 1×10^{-6} fallas / 1×10^{3} horas =

  = 1 falla / 10^{9} horas

  = 1 FIT (“fails in time”) o (“failure unit”).

¿ Cómo evoluciona la tasa de fallas ?



Curva de la bañera (“Bath Tub Curve”)

Tasa de fallas = f(proceso de fabricación, diseño, entorno)

Modelado de la distribución de tiempos de vida: tasa de fallas constante

- Distribución exponencial

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \qquad F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$$

$$h(t) = \lambda \qquad MTTF = 1/\lambda$$

- Modela tasa de fallas constante
- Se demuestra que:
  - Tasa de fallas constante <=> distribución exponencial
  - Distribución exponencial <=> Propiedad de "ausencia de memoria" ("lack of memory"):
    - » P(falle en la próximas k horas / sobrevivió t horas) = P(unidades nuevas fallen en k horas)

$$\frac{F(t+k) - F(t)}{(1 - F(t))} = F(k)$$

Modelado de la distribución de tiempos de vida: Caso general: Weibull

- Distribución de Weibull

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \qquad f(t) = \left(\frac{\beta}{t}\right)\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \qquad h(t) = \left(\frac{\beta}{t}\right)\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}$$

- α: parámetro de escala o vida característica (también llamado η)
  - $F(t=\alpha) = 1- e^{(-1)}=0.632$ => 63.2 % de la población falla en tiempo α *independientemente del valor de* β. Por ello también se le llama t_{63}

- β: parámetro de forma:
  - $\beta=1$:
    - => coincide con distribución exponencial con $\lambda=(1/\alpha)$
    - => h(t) constante = $(1/\alpha)$
    - => $\alpha=(1/\lambda)$ = MTTF
  - $\beta>1$: h(t) creciente
  - $\beta<1$: h(t) decreciente

Distribución de Weibull (h(t))

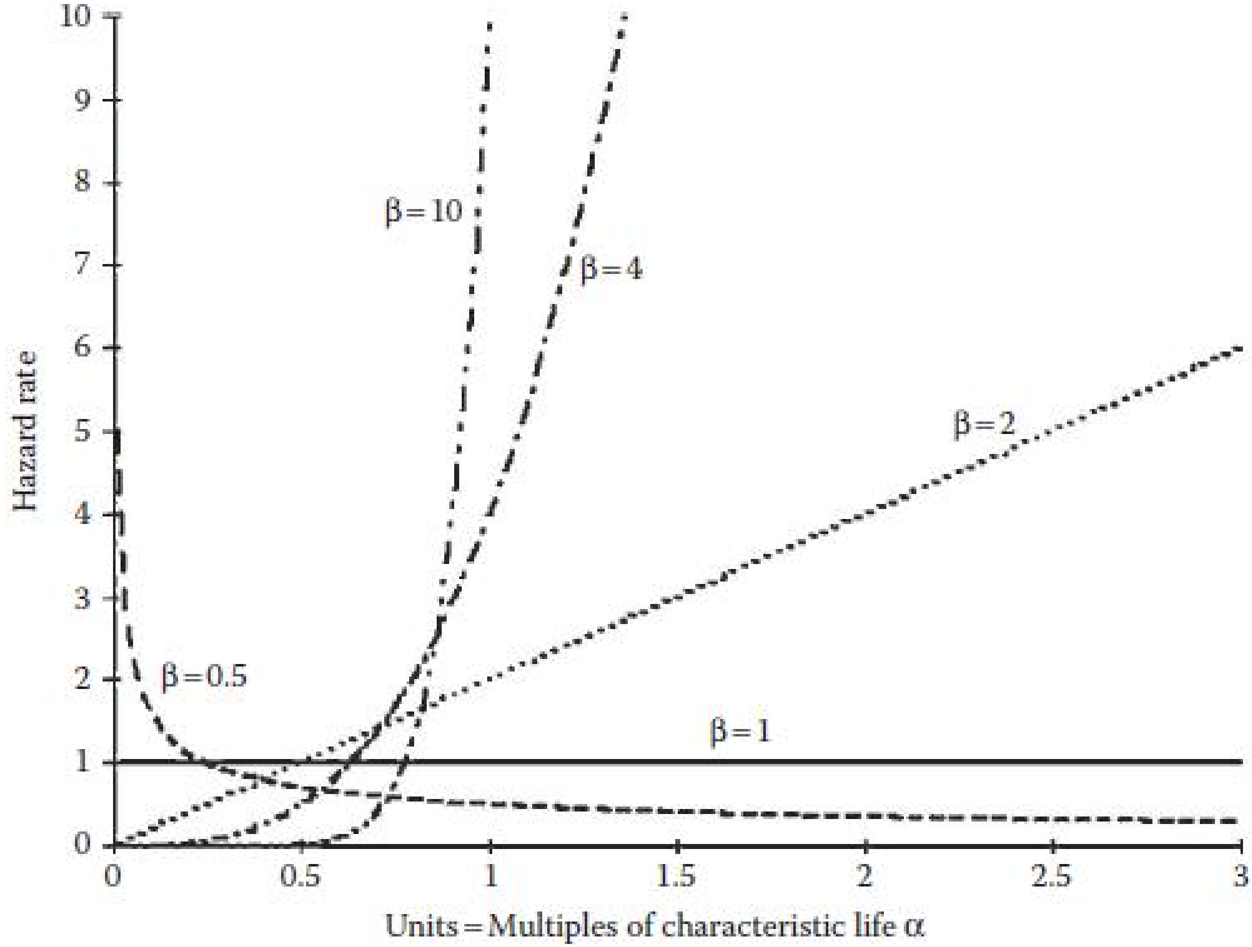


FIGURE 4.3
Weibull failure rate (hazard rate).

Tomada de Tobias y Trindade, 3ra Ed.

Distribución de Weibull (f(t))

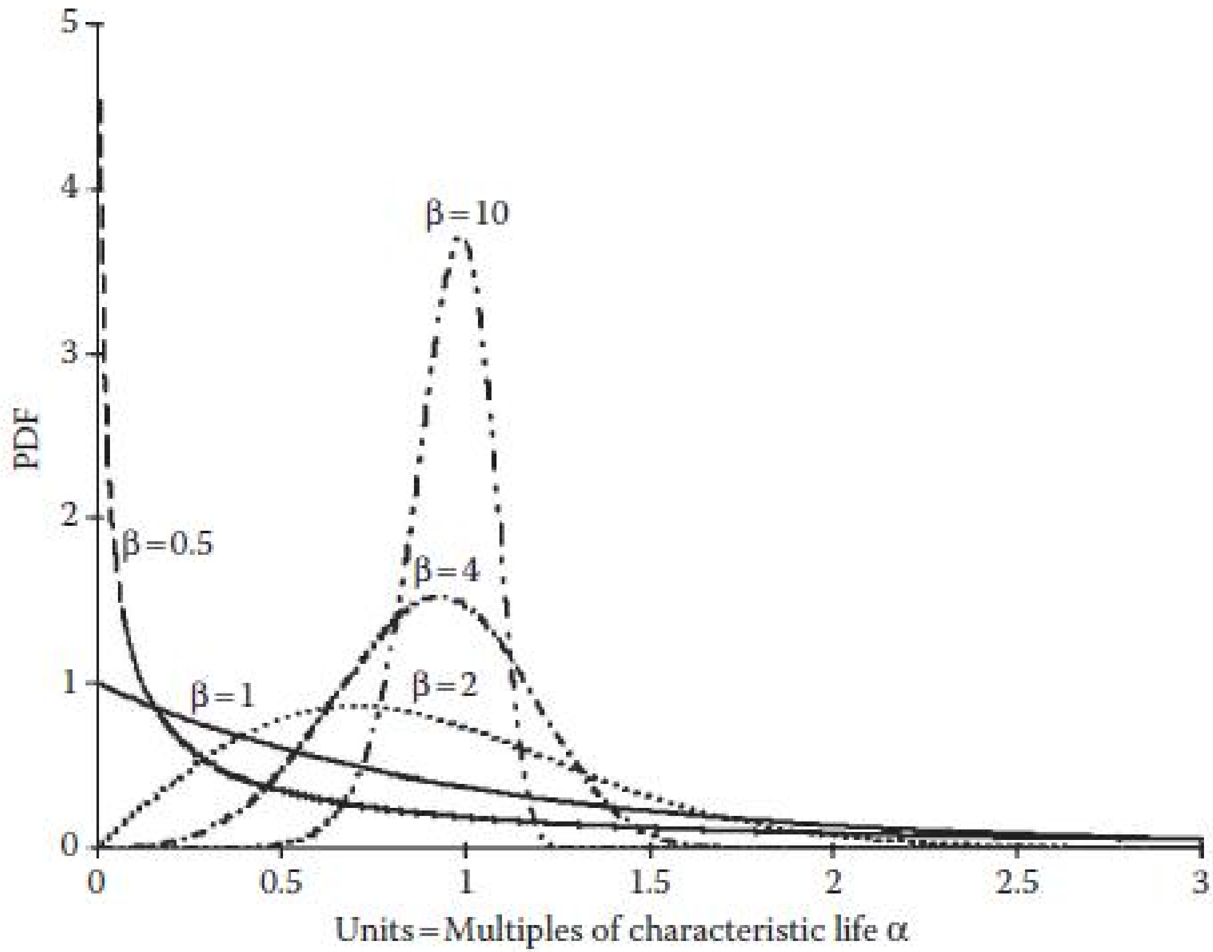


FIGURE 4.2
Weibull PDF.

Tomada de Tobias y Trindade, 3ra Ed.

Distribución de Weibull (F(t))

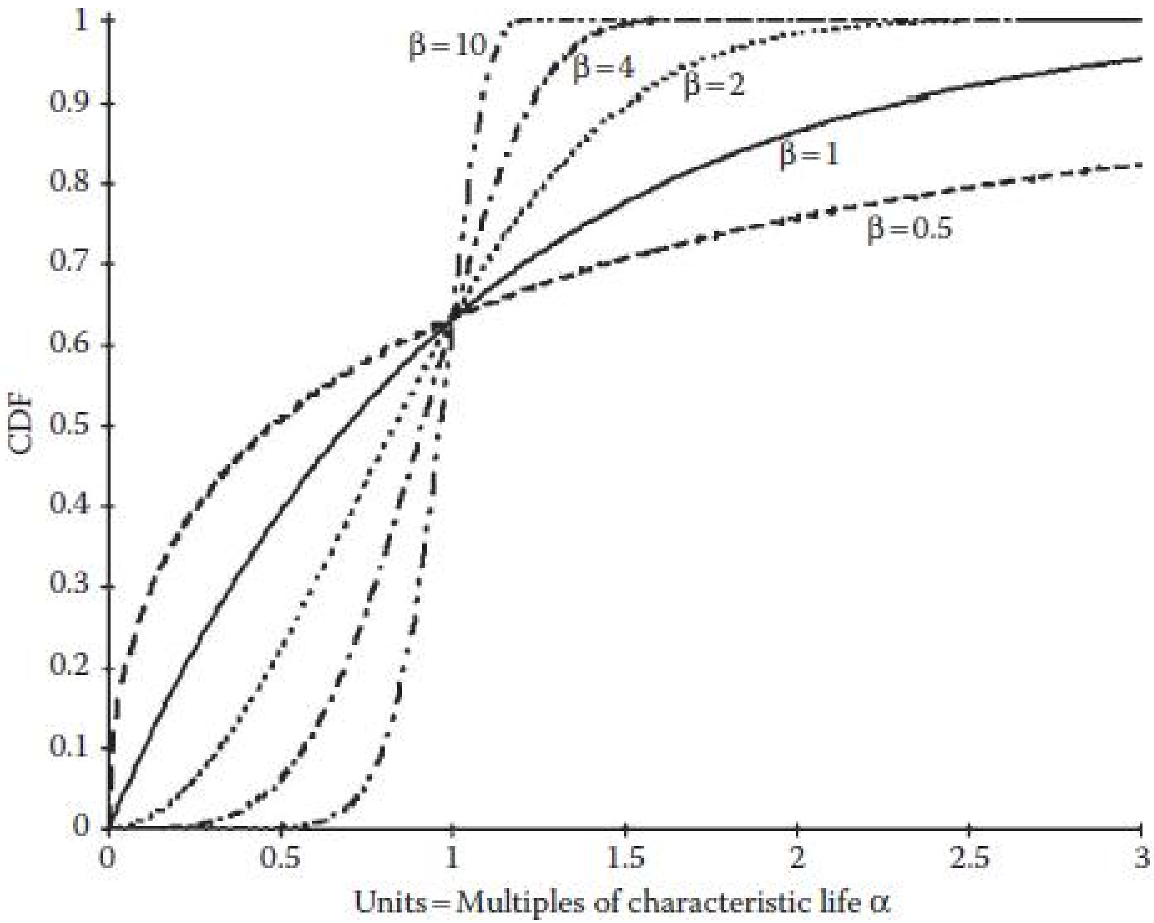


FIGURE 4.1
Weibull CDF.

Tomada de Tobias y Trindade, 3ra Ed.

Utilidad / Justificación Weibull

- Modelado de la curva de la bañera
- IES TM-26:2015

- Justificación teórica: se puede demostrar que:
  - Si una falla depende de muchos procesos idénticos e independientes y el primero que llega a un cierto nivel crítico determina el tiempo de falla → la distribución del tiempo de fallas es Weibull

Estimación de parámetros de Weibull

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta}} \qquad \ln[1 - F(t)] = -\left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta} \qquad \boxed{\ln\{-\ln[1 - F(t)]\} = \beta \ln t - \beta \ln \alpha}$$

- 1) Se obtiene de una muestra los tiempos de fallas (t) y la correspondiente distribución (F(t)), 2) Se ajusta por una recta, por mínimos cuadrados por ej., y se obtienen β y α. 3) Se puede hacer sobre papel de "Weibull"
- **¿Cómo estimar F(t)?**

=> Alternativa "trivial"

=> Median Ranks: estima $F(t_i)$ con 50% de confianza, siendo t_i el i-ésimo tiempo de falla en una muestra de N. Es la mediana: para toda F, la verdadera F la mitad de las veces está por arriba y la mitad por abajo

=> Aproximación de Bernard de Median Ranks, si i número de falla ordenada y N total de muestras testeadas

$$\boxed{\hat{F}(t_i) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}}$$

Median Ranks

$$\hat{F}(t_i) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}$$

Rank order	Sample size 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	50.0%	29.2%	20.6%	15.9%	13.0%	10.9%	9.5%	8.3%	7.4%	6.7%
2		70.8%	50.0%	38.6%	31.5%	26.6%	23.0%	20.2%	18.1%	16.3%
3			79.4%	61.4%	50.0%	42.2%	36.5%	32.1%	28.7%	26.0%
4				84.1%	68.5%	57.8%	50.0%	44.0%	39.4%	35.6%
5					87.0%	73.4%	63.5%	56.0%	50.0%	45.2%
6						89.1%	77.0%	67.9%	60.6%	54.8%
7							90.5%	79.8%	71.3%	64.4%
8								91.7%	81.9%	74.0%
9									92.6%	83.7%
10										93.3%

$$MR = \frac{j - .3}{N + .4}$$

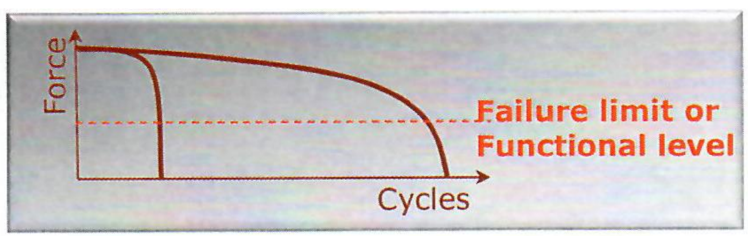
For sample size ≤5 confidence cannot be calculated

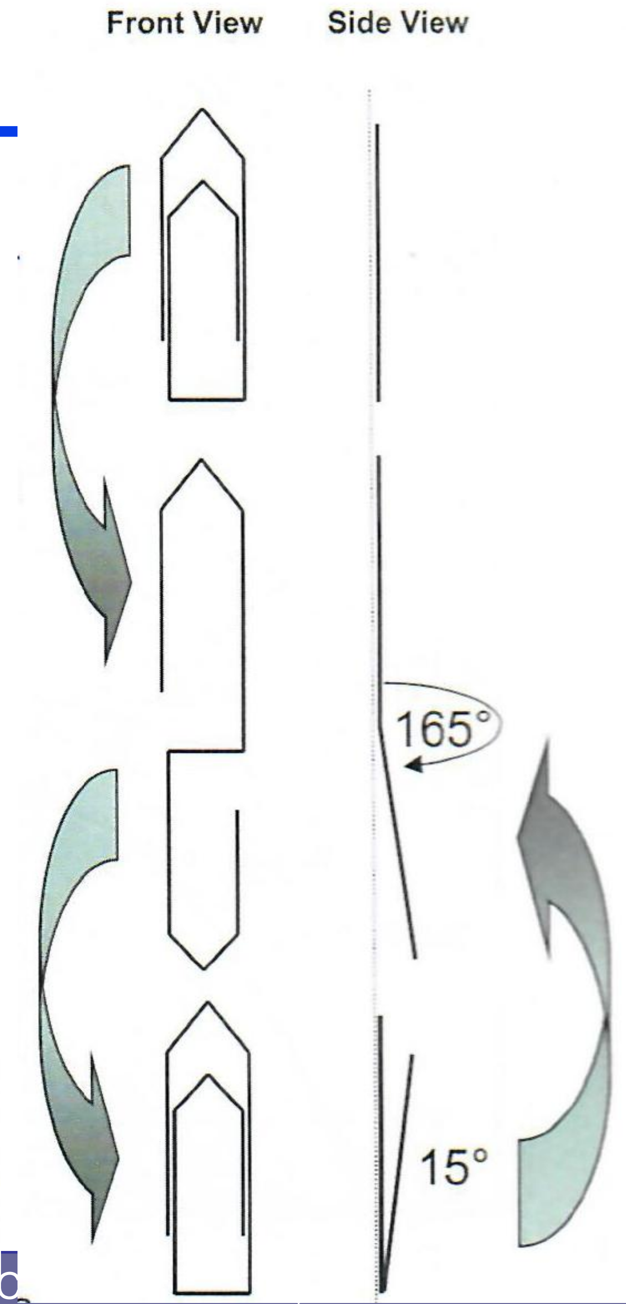
Apliquemos la teoría !

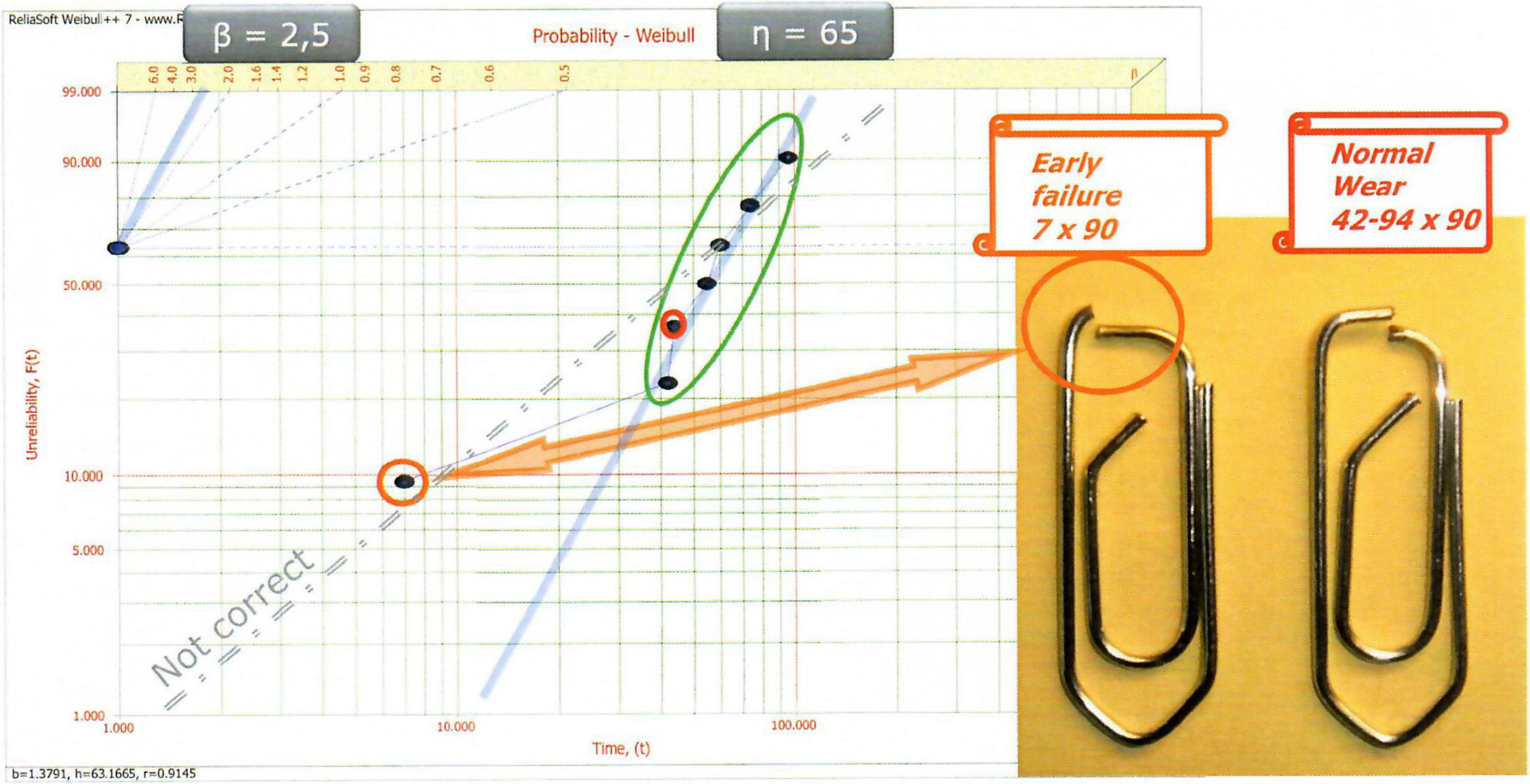
(Con las gracias a Peter de Place Rimmen)

- Calcular los valores de median ranks para el tamaño de muestra considerado.
- Poner los clips horizontales en la mesa y usar la mesa y el dedo como límite para el doblado
- Abra y cierra los clips (esto contará como 2 ciclos).
- Cuente y anote los ciclos que se requieren hasta que el clip se rompa (o quede muy “flojo”).
- Cuidar que los movimientos sean constantes y la velocidad aprox. la misma de un clip al otro.
- Sienta la fuerza que precisa y como se degrada
- Separe los clips que resistieron más y los que resistieron menos.

https://bit.ly/2HArniy

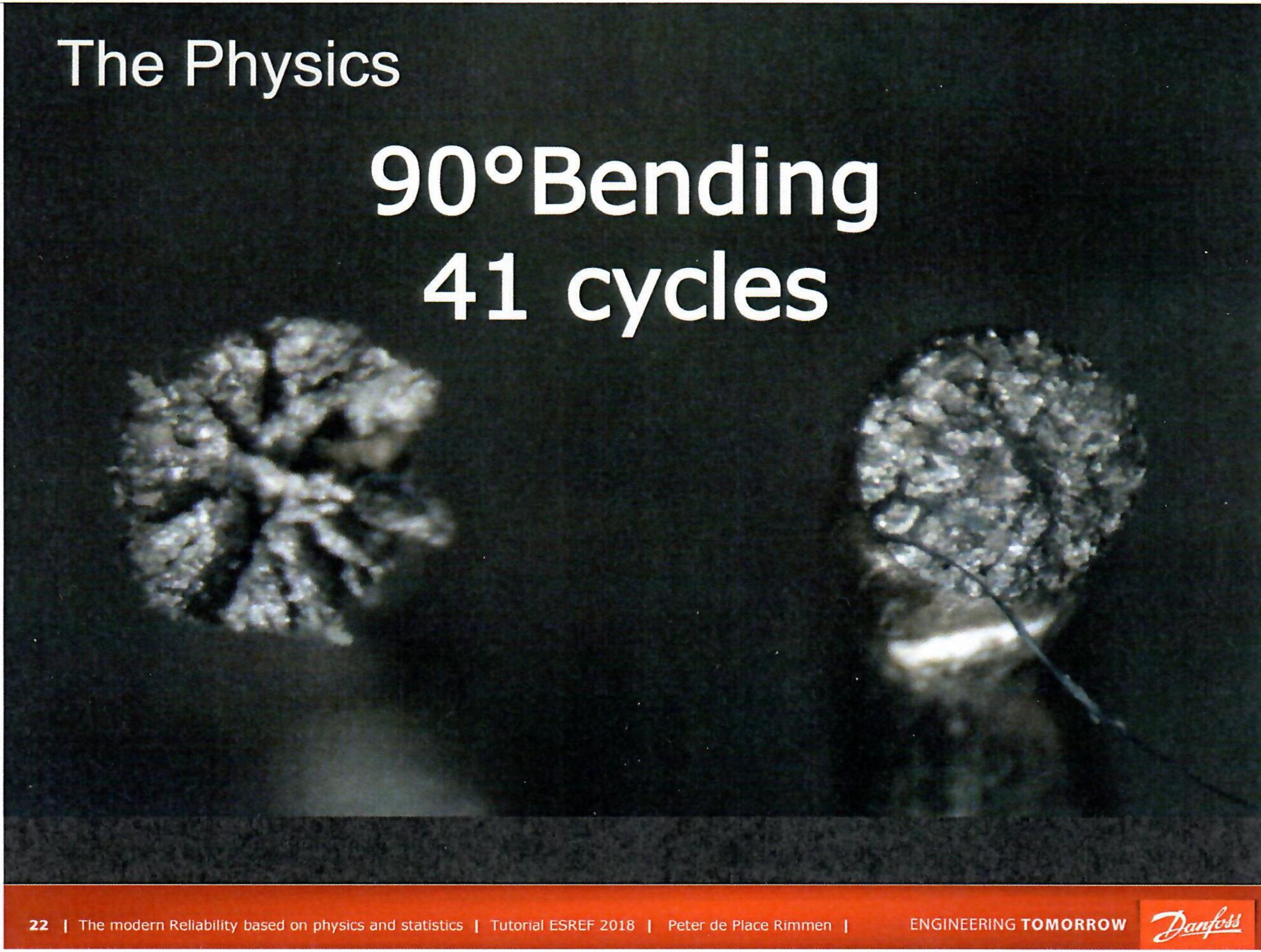




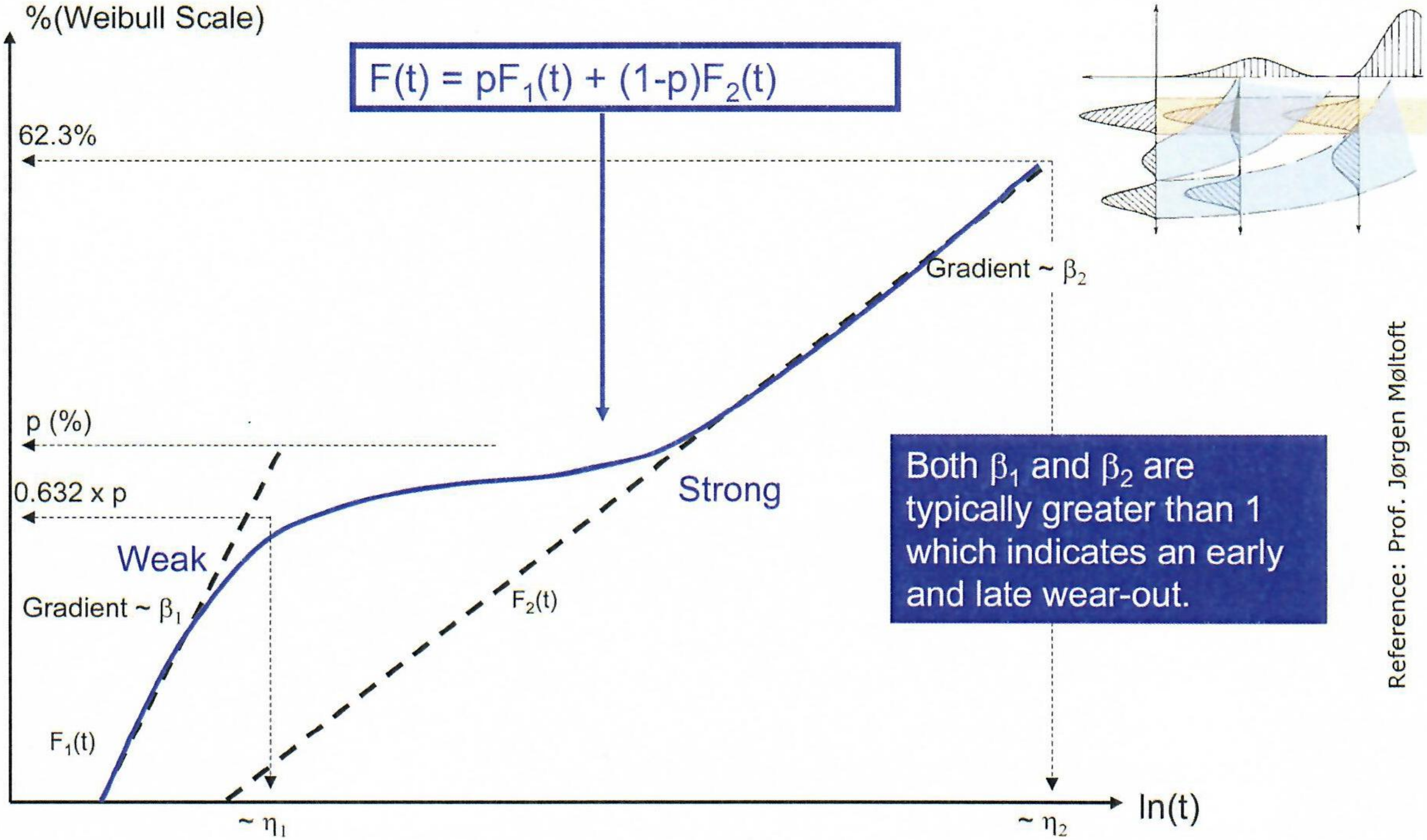


20 | The modern Reliability based on physics and statistics | Tutorial ESREF 2018 | Peter de Place Rimmen | ENGINEERING TOMORROW Danfoss

The Physics


The Physics
90°Bending
41 cycles
22 | The modern Reliability based on physics and statistics | Tutorial ESREF 2018 | Peter de Place Rimmen |
ENGINEERING TOMORROW
Danfoss

Bimodal Weibull Distribution



Both β_1 and β_2 are typically greater than 1 which indicates an early and late wear-out.

Reference: Prof. Jørgen Møltoft

Estimación de parámetros
Caso tasa de fallas constante λ

- Estimación de λ

$$\hat{\lambda} = \frac{\text{número de fallas } (r)}{\underbrace{\text{horas bajo test } (T)\,.\,\text{número de unidades bajo test } (n)}_{PowerOnHours}}$$

- Cota de λ con intervalo de confianza (1- α).100 %, por ej. 95 % (α = 0.05)

$$\hat{\lambda}_{95} / P(\lambda < \hat{\lambda}_{95}) = 0.95 \qquad \hat{\lambda}_{95} = \hat{\lambda}\,.\,k_{r,95}$$

- Ejemplos: 0 fallas al final del test, 95% de confianza

λ	POH	Test
114 FITs = 1 falla / mil unidades / año	26 Mhs	100 unidades durante 29 años o 18000 unidades durante 2 meses !!
0.33 % de fallas / año	3.63 Mhs	100 unidades durante 4 años o 2520 unidades durante 2 meses !!

Como medir la confiabilidad: Modelos de envejecimiento acelerado

- POH equivalentes = Horas de test . Factor de Aceleración
- Modelo de Arrhenius: Aceleración por temperatura
  - Factor de acerelación AF = e^x, con

$$x = \frac{E_a}{k}\left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{acel}}\right)$$

  - Ea: energía de activación en eV (desde 0.3 a 1.3, depende de mecanismo de falla)
  - k: Constante de Boltzmann (8.617e-5 eV/ºK)
  - T_{uso}: temperatura de uso en ºK
  - T_{acel}: temperatura en test en ºK

- Ej.: T_{uso}=15^{o}C, T_{acel}=85^{o}C, E_a= 0.65eV => Factor de aceleración: 165

=> 0.33%, 95%, 0 falla: 22 unidades durante 1000 hs (aprox. 40 días)

Como medir la confiabilidad: Modelos de envejecimiento acelerado

- Aceleración con otros factores de stress:
  - Con Voltaje o Corriente: Eyring ($T_{63}=A.e^{(-\alpha V)}$) y otros
  - Ciclado térmico: Coffin-Manson
  - Temperatura y Humedad

- ¿ Cómo se determinan los parámetros de los modelos de aceleración (ej. Ea) ?
  - Por estudios / ensayos sobre mecanismos de fallas (literatura, norma JEDEC JEP122).
  - Por estudios / ensayos sobre muestras del producto.

¿ Cómo se determinan los parámetros de los modelos de aceleración ?

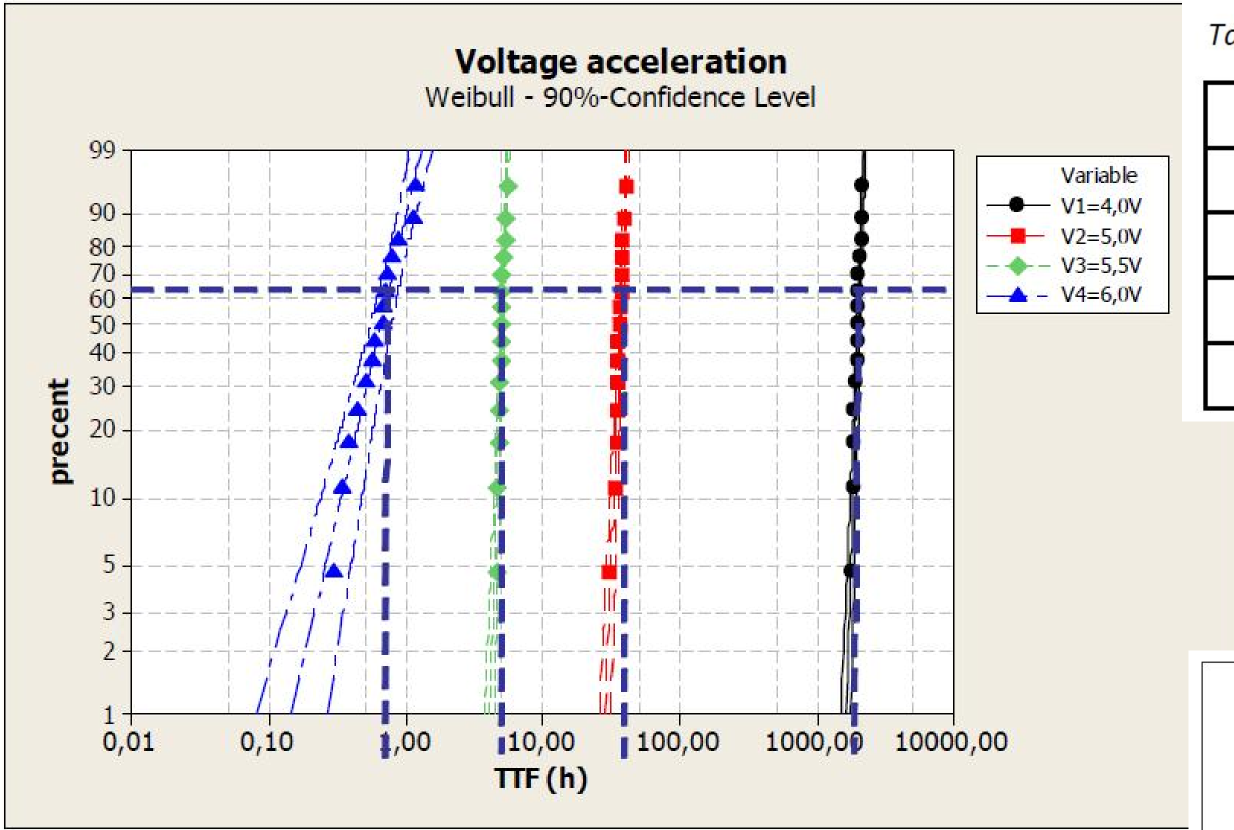
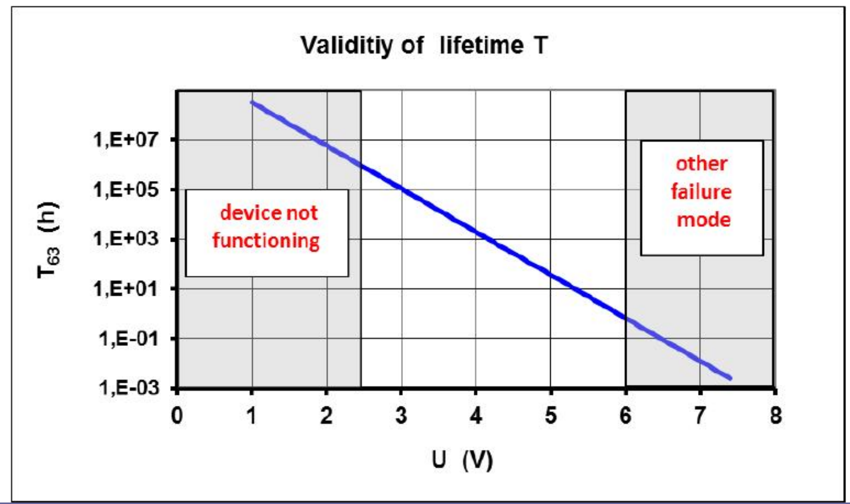


Table 9: Weibull parameter for different stress voltages

test	V_{stress} (V)	T_{63} (h)	β
1	4,0	2033	20,1
2	5,0	37,3	17,0
3	5,5	5,1	20,1
4	6,0	0,715	2,9

Eyring Model: $T_{63}=A.e^{(-\alpha V)}$

$\ln(T_{63})=\ln(A) - \alpha V$



Tomado de ZVEI: How to measure lifetime for robustness validation – step by step

Como medir la confiabilidad: ¿Cuántas muestras y por cuánto tiempo ?

- Caso modelo exponencial, tasa de fallas constante λ
- Si **0 falla al final de test**, luego de testear por nT horas equivalentes, n número de muestras, T=AF. t, AF: factor de aceleración, t: horas de test => estimador de λ con intervalo de confianza de (1- α).100 %:

$$\hat{\lambda}_{(1-\alpha).100} = \frac{-\ln \alpha}{n.T} \qquad \hat{\lambda}_{95} \simeq \frac{3}{n.T}$$

- Si hay **fallas al final del test**

$$\hat{\lambda}_{(1-\alpha).100} = \frac{r}{n.T} . k_{r,(1-\alpha).100}$$

- $k_{r,(1-\alpha)100}$ se calcula usando la distribución χ^2 (para test de hipótesis), ver Tobias & Trindade o usar Arrhenius / Fit rate calculator de Maxim Integrated

https://www.maximintegrated.com/en/design/tools/calculators/general-engineering/qafits.cfm