XIV Seminario de Ingeniería biomédica. 2005
Núcleo de ingeniería biomédica.
Facultades de medicina e ingeniería.
Universidad de la República Oriental del Uruguay

Confiabilidad de Circuitos Electrónicos Aplicado al Proyecto "IMPETOM: Tomógrafo de impedancias".

Leandro Patrón – hleandro@ieee.org

Monografía vinculada a la conferencia del Prof. Agr. Ing. Fernando Silveira sobre "Tecnología de integrados dedicados para la construcción de marcapasos" del 5 de abril de 2005.

Resumen - . La confiabilidad de un sistema electrónico se puede calcular de diferentes maneras, existen formas experimentales (probando ejemplares) y otras más teóricas en base a estudios anteriores, como la basada en la norma MIL-HDBK-217 [1] (ésta no requiere tener el dispositivo construido).

I. INTRODUCCIÓN

Un estudio de confiabilidad es necesario para cualquier circuito electrónico. Si se trata de un artículo comercial para el día a día, este estudio va a servir para mejorarlo desde el diseño, lo que va a redituar en una mejor imagen comercial, en un menor costo de garantía, y evitar tener que retirar un producto del mercado y rediseñarlo, etc. En un articulo de uso médico (como ser un marcapaso) es esencial que se tenga el menor numero de fallas (se diseña de forma que una falla simple no provoque un evento catastrófico) y además que la probabilidad de que se de una falla doble sea virtualmente imposible.

Este trabajo dará una presentación de los conceptos de confiabilidad de los equipos electrónicos, luego se desarrollará en base a la norma MIL-HDBK-217 y concluirá con un estudio de confiabilidad del proyecto IMPETOM utilizando el software Reliability Workbench [2].

II. CONCEPTOS BÁSICOS

La teoría de confiabilidad tiene sus raíces en análisis meramente estadísticos y en leyes probabilísticas de fallas pues no existe un modelo determinista que prediga el tiempo en el cual un dispositivo falla.

R(t) – función de confiabilidad: es la probabilidad de que el sistema funcione correctamente durante un intervalo de tiempo. Si considero T como una variable aleatoria que mide el tiempo que trascurre hasta el próximo fallo y F(t) es su función de distribución

$$F(t) = P\left[T \le t\right] = \int_0^t f(t)dt$$

La fiabilidad se calcula como:

$$R(t) = 1 - F(t) = P\left[T > t\right]$$

Si T sigue una distribución exponencial

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

$$F(t) = \int_0^t \lambda e^{-\lambda t} = 1 - e^{-\lambda t} \quad \rightarrow \quad R(t) = e^{-\lambda t}$$

La fiabilidad (y no fiabilidad) de un componente en un instante t viene dada por:

$$R(t) = \frac{N_0(t)}{N} = \frac{N_0(t)}{N_0(t) + N_f(t)}$$

$$Q(t) = \frac{N_f(t)}{N} = \frac{N_f(t)}{N_0(t) + N_f(t)} = 1 - R(t)$$

Donde N es el número total de componentes, N_0 son los que no han

fallado y N_f son los componentes que han fallado al momento t.

Z(t) – función tasa de fallas: Si diferenciamos el número de componentes que han fallado en un instante t con respecto al tiempo, obtenemos la tasa de fallas instantánea de esos componentes. Dividiendo este valor por el número de componentes que aún están operativos en ese instante, obtenemos la función tasa de fallas o función de riesgo del componente.

$$z(t) = \frac{1}{N_0(t)} \frac{dN_f(t)}{dt} = \frac{1}{N_0(t)} \left(-N \frac{dR(t)}{dt} \right)$$

$$= -\frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{\frac{dQ(t)}{dt}}{1 - Q(t)}$$

La tasa de fallas instantánea se calcula también como la probabilidad de que un superviviente en t, falle en un instante $t + \Delta t$, cuando $\Delta t \rightarrow 0$

$$P(t < X < t + \Delta t \,/\, X > t) =$$

$$= \frac{P(t < X < t + \Delta t)}{P(X > t)} =$$

$$= \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)}$$

$$Z(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{F(t + \Delta t) - F(t)}{R(t)} =$$

$$= \frac{\frac{dF(t)}{dt}}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)}$$

Empíricamente la tasa de fallas para un componente electrónico sigue una curva como la siguiente:

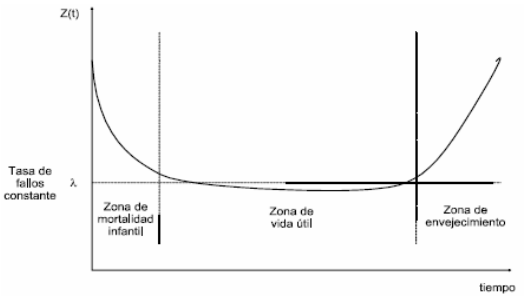

Figura 1 – Distribución de la tasa de fallas. Gentileza de Fernando Silveira

Analizando cuidadosamente la representación de la curva típica de la evolución de la tasa de fallas dependiente del tiempo (figura anterior), también conocida como curva bañera, se pueden distinguir tres etapas. La primera corresponde a los fallos iniciales (la mortalidad infantil de las estadísticas demográficas) que se manifiestan prematuramente y se caracteriza por una tasa decreciente, corresponde generalmente a la existencia de dispositivos defectuosos o instalados indebidamente con una tasa de fallos superior a la normal. La segunda etapa (la edad adulta) representa los fallos normales y se presentan de forma aleatoria, su tasa es constante en el tiempo de vida del componente. La tercera y última etapa (la vejez) se atribuye a los fallos por desgaste donde se ha superado la vida prevista del componente, en este caso la tasa se caracteriza por un aumento significativo debido a la degradación.

Las fallas iniciales pueden eliminarse mediante pruebas previas a la operación, y además existen formas de acelerar este tiempo de prueba, por ejemplo mediante el "burn-in", que es hacer funcionar los dispositivos (todos) a altas temperaturas (100 a 135 ^{o}C) durante 160 a 240 hs.

En la segunda etapa la experiencia muestra que la tasa de fallas es prácticamente constante

$$z(t) = \lambda = \frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

Ley de fallas exponencial: para un valor constante de la función tasa de fallas, la fiabilidad varía exponencialmente con el tiempo.

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

Tiempo medio hasta la avería – MTTF: Es el tiempo medio en que trabajará un dispositivo antes que falle por primera vez. Si tenemos N dispositivos idénticos

que empiezan a funcionar en el instante t = 0 y medimos el tiempo que tarda cada uno en fallar, la media de estas medidas constituye el MTTF.
T es la variable aleatoria que mide el tiempo en que tarda un componente en fallar.

$$E[T] = MTTF = \int_0^\infty tf(t)dt = \int_0^\infty t\frac{dQ(t)}{dt}dt = -\int_0^\infty t\frac{dR(t)}{dt}dt$$

$$= \int_0^\infty R(t)dt$$

Si es una distribución exponencial entonces MTTF = 1/λ.
Por más información [3]

III. UNIDADES Y MEDIDAS

Unidades de la tasa de fallas z(t)
%/K: Porcentaje de unidades que fallan cada 1000 horas.
PPM/K: Partes por millón que fallan cada 1000 horas
1 PPM/K = $1x10^{-6}$ fallas / $1x10^{3}$ horas =
= 1 falla / 10^{9} horas =
= 1 FIT ("fails in time") o ("failure unit").
Estimación de λ:
$\hat{\lambda}$ = número de fallas / (horas bajo test * número de unidades bajo test)
POH - "power on hours" se calcula como: (horas bajo test * número de unidades bajo test).
Ejemplo: 114 FIT es igual a 1 falla en 1000 unidades probadas durante un año.
Si tengo 0 fallas al final del test y quisiera una confianza del 95 % necesitaría tener Un POH de 26 Mhr, lo que implica testear 100 unidades durante 29 años o testear 18000 unidades durante 2 meses. La primera opción es inviable por el tiempo y la segunda porque para tener 18000 unidades ya tengo que estar en fase de producción, y no me sirve para tener un valor antes de salir al mercado.
Hay formas de acelerar el envejecimiento. POH equivalentes es igual a las horas de test por el factor de aceleración.
Modelo de Arrhenius: aceleración por temperatura, factor de aceleración e^x con

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

Donde E_a es la energía de activación en eV (desde 0,3 a 1,3 dependiendo del mecanismo de falla).
k es la constante de Boltzmann
T_{uso}: temperatura de uso en °K
T_{acel}: temperatura del test en °K
Ejemplo: E_a = 0,6 eV
T_{uso} = 37 °C = 310 °K
T_{test} = 135 °C = 408 °K
Tenemos un factor de aceleración de 220, y en el ejemplo de hoy se refleja en testear 81 unidades durante 2 meses en lugar de 18000.
Esta sección fue extraída de "Tecnología de integrados dedicados para la construcción de marcapasos" por Fernando Silveira.

IV. NORMA MIL-HDBK-217

El modelo calcula la tasa de fallas usando los datos experimentales de componentes reales. Fue desarrollado por el departamento de defensa de EEUU y hay varias revisiones con actualización de las tablas de datos de los componentes, la última versión al día de hoy es la 2 del año 1995.
Lo interesante de este método es que provee una estimación sin tener el dispositivo construido, y según el grado de desarrollo se pueden aplicar dos métodos: "Part Stress Analysis" (que requiere saber exactamente cada uno de los componentes, por lo que solo se puede aplicar al final del desarrollo) y "Parts Count" (requiere menos información, basta con el número de partes y su calidad, además del entorno donde se va a utilizar, es útil para tener una idea de la confiabilidad antes de tenerlo pronto y da un valor muy conservativo)

Este método tiene limitaciones, está basado en el análisis de los datos que se tenían al momento. Las estimaciones en el modelo de fallas son válidas bajo las condiciones en las cuales los datos fueron obtenidos y por los dispositivos testeados, sin embargo es posible extrapolar, pero dada la naturaleza empírica en ciertas condiciones puede diferir con la realidad.
El procedimiento general para calcular la predicción de un sistema, es primero calcular la tasa de fallas para cada dispositivo y luego sumarlos. También hay que sumar la confiabilidad de la placa, conectores, etc.
La tasa de error de cada dispositivo se calcula de la siguiente manera:

$$\lambda_p = \lambda_b \pi_T \pi_A \pi_R \pi_S \pi_C \pi_Q \pi_E$$

donde λ_p es la tasa de error del componente.

λ_b es la tasa de error base .
Los factores que se encuentran en casi todos los modelos son:

π_E es el factor que el medio ambiente afecta a la confiabilidad de la parte.

π_Q es el factor que toma en cuenta la calidad del componente y como afecta a la confiabilidad del mismo.

π_T es el factor de la temperatura y su valor es función de la tecnología de fabricación.
Hay otros factores que se aplican al modelo particular del dispositivo a consideración (por ejemplo si es una resistencia o un IC).
La norma incluye tablas que se aplican para obtener la tasa de error con los diferentes factores para cada familia de dispositivos, existen aplicaciones software que hacen este trabajo por nosotros, por ejemplo yo voy a utilizar Reliability Workbench 9.1 en su versión demo, pero también existen otras aplicaciones similares. Lo que tienen de interesante es que traen una librería con el nombre de los dispositivos y sus especificaciones, pero en los que he probado solo es válido en la versión licenciada.

V. IMPETOM

Figura 2 – Foto de una de las placas del proyecto Impetom

Componente	Cantidad	Fallas/año	FIT's
741	32	0.0103	1180
ISO122P	16	0.00543	620
4N26	4	0,00117	134
4N25	5	0,00147	167
Cap Tant 1 uF	64	0,0336	3840
Resistencias	50	0,00221	252
TOTAL		0,0543	6193

Tabla 1 – Estudio de confiabilidad echo a una de las placa del proyecto Impeton.

En la tabla anterior está representado cada uno de los componentes y la cantidad que hay en la placa.
En el caso de las resistencias, 50 es el número total sumando todos los valores.
En todos los componentes importa la temperatura ambiente, el medio ambiente en que será utilizado, la calidad de los componentes, y cómo está unido a la placa. La temperatura ambiente asumí que era de 30 °C, y que el medio ambiente era benigno y

terrestre, me basé para asumir esto en que en general va a ser usado en un Hospital, donde hay un ambiente muy controlado y una temperatura bastante uniforme.
En el método de soldadura use que es hecho a mano, y la calidad de los componentes usé que es "Commercial or Unknown".
En los modelos es muy importante el voltaje o disipación (para las resistencias) máximos y el voltaje o disipación a que son utilizados, con esta relación se calcula el stress a que está sometido.
En los circuitos integrados los datos equivalentes son la disipación, θ de la juntura al case, y θ del case al ambiente. Desgraciadamente estos datos no están completos en la hoja de datos y uno tiene que hacer estimativos.
Los elementos que más claramente influyen en el ejemplo son los condensadores, y esto es porque operan entre ± 15 y están diseñados para un voltaje máximo de 40 V, lo que introduce considerable stress, y al ser numerosos marcan el resultado final.

VI. CONCLUCIONES

Primero que nada quisiera citar una frase en la norma MIL-HDBK-217.
"Those who correctly apply the models and use the information in a conscientious reliability program will find the prediction a useful tool. Those who view the prediction only as a number which must exceed a specified value can usually find a way to achieve their goal without any impact on the system".
Esto es porque realmente es un método muy poderoso para la estimación, pero tiene que ser tomado en serio en la realización y con los datos más precisos que sea posible, porque fácilmente se lo puede hacer que de lo que uno quiera.
Es interesante de utilizar durante las etapas finales del diseño y la elección de componentes, ya que uno muchas veces encuentra varias opciones para una misma función, y perfectamente se podría decidir por el dispositivo que agregara menos tasa de error al sistema.

REFERENCIAS

[1] La revisión F se puede obtener aca: http://assist.daps.dla.mil/docimages/0000/41/35/53939.PD0
Revision F Change Notice 1 aca: http://assist.daps.dla.mil/docimages/0000/41/34/271N1.PD8
Revision F Change Notice 2 aca: http://assist.daps.dla.mil/docimages/0000/41/34/53939.PD9
[2] Este software es producido por Isograph, y se puede conseguir aca: http://www.isograph.com/workbench.htm
[3] En www.weibull.com se puede encontrar material tanto teórico como de aplicación. Ellos también fabrican software para la estimación de la tasa de fallos, aunque desgraciadamente no lo he podido probar aun.

Agradecimientos
Primero que nada quiero agradecer a los docentes del Seminario de Ingeniería Biomédica por la paciencia que me han tenido.
A Fernando Silveira por su aporte más que importante al trabajo.
A Weibull que a diferencia de otras compañías, ponen en su web a disposición material de excelente calidad.