

DISPONIBILIDAD, CONFIABILIDAD, MANTENIBILIDAD Y CAPACIDAD (I PARTE)

Por H. Paul Barringer, de Barringer & Associates, Inc.

Disponibilidad, Confiabilidad, Mantenibilidad y Capacidad son los componentes de la ecuación de efectividad. La ecuación de efectividad es una figura meritoria útil para encontrar cual componente(s) influye(n) negativamente en la medición de desempeño. En muchas plantas con procesos continuos la confiabilidad de un componente es el más grande atacante para un mejor desempeño. En este artículo se ilustra el cálculo de los componentes mediante el uso de pequeños listados de datos.

La **Eficiencia*** está definida mediante una ecuación que dimensiona la eficiencia en la oportunidad para producir los resultados propuestos. La ecuación de Eficiencia está descrita en diferentes formatos (**Blanchard** 1995, **Kececioglu** 1995, **Landers** 1996, **Pecht** 1995, **Raheja** 1991). Cada elemento de eficiencia varía como una probabilidad. Dado que los componentes de la ecuación tienen diferentes formas, éstos varían de un autor a otro. Las definiciones de la ecuación de eficiencia, y sus componentes, generan muchos argumentos técnicos. El principal (e incontrovertible argumento económico) es la búsqueda de un valor de eficiencia del sistema que produzca el más bajo costo de la inversión a largo plazo, usando los costos del ciclo de vida (**LCC**) (**Barringer** 1996^a y 1997) para el valor entregado:

Eficiencia del sistema = Eficiencia/LCC

El costo es una medida del uso de los recursos. Un bajo costo es generalmente mejor que un costo alto. Las estimaciones del costo nunca incluyen todos los elementos posibles pero se espera que incluyan los elementos mas importantes.

La eficiencia es una medida del valor recibido. **Clements** (1991) describe la eficiencia como aquello que nos dice que tan bien un proceso/producto satisface las demandas del usuario final. Una alta eficiencia es generalmente mejor que una baja eficiencia. La eficiencia varía entre 0 y 1, y raramente incluye todos los valores elementos, dado que éstos son difíciles de cuantificar. Una forma es descrita por **Berger** (1993):

Eficiencia = disponibilidad * confiabilidad * mantenibilidad * capacidad

En un lenguaje claro, la ecuación de la eficiencia es el producto de:

- la oportunidad del equipo o sistema de estar disponible para desempeñar su trabajo,
- si operará por un tiempo dado sin falla,
- si es reparado sin pérdidas excesivas de tiempo de Mantenimiento y
- si puede desempeñar su actividad productiva para la cual fue creado, de acuerdo a estándares determinados.

Cada elemento de la ecuación de la eficiencia requiere un dato consistente, el cual cambia con las condiciones de operación, por un valor real dado entre 0 y 1.

La ecuación de eficiencia de **Berger** (disponibilidad * confiabilidad * mantenibilidad * capacidad) es calificada por algunos como defectuosa porque contiene la disponibilidad y los componentes de la misma disponibilidad (confiabilidad y mantenibilidad). La ecuación de eficiencia de **Blanchard** (disponibilidad * dependibilidad * desempeño) tiene similares defectos. Para que cualquier índice sea exitoso, este debe ser entendible y acreditado por el personal que lo usa. Mucha gente entiende la disponibilidad y puede cuantificarla. Pocos cuantifican la confiabilidad o la mantenibilidad en términos que cualquiera entendería. La ecuación de la eficiencia es simplemente un índice relativo para la medición de *“cómo lo estamos haciendo”*.

Considere los elementos de la ecuación de la eficiencia en refinerías y plantas químicas. En muchas industrias con procesos continuos, la disponibilidad es alta (entre un 85 y un 98%), la confiabilidad es baja (entre un 0.001 y un 10%) cuando se mide frente a los intervalos de las paradas de planta, y la mantenibilidad es alta (entre el 50 y el 90%) cuando se mide frente al tiempo seguido en reparaciones, y la productividad es alta (entre el 60 y el 90%). ¿Qué dice la ecuación de la eficiencia acerca de esas condiciones? El primer elemento que destruye la eficiencia es el componente confiabilidad (**Barringer 1996b**) – dado que este es el que dice dónde hay que hacer los mejoramientos.

¿Puede la ecuación de la eficiencia ser usada para hacer benchmarking entre un negocio y otro? En teoría sí, pero en la práctica no. El problema práctico radica en normalizar a lo largo de las compañías y de las líneas de negocio, los datos de eficiencia. Por ejemplo, una planta puede tener un tiempo de corrida aceptable para sus equipos por un año, mientras que una segunda planta puede requerir cinco años de tiempo de corrida por sus paradas de planta (**N. de T.: turnaround**). Del mismo modo, una planta puede tener un tiempo de reparación para una bomba específica de 8 horas, transcurridas entre dos intervenciones de cuadrillas, y una segunda planta puede tener 12 horas transcurridas entre dos intervenciones de cuadrillas. A lo mejor, la ecuación de la eficiencia es aplicable dentro de compañías donde normas similares son aplicadas a lo largo de las plantas operativas, y la estructura de costos es similar.

La importancia de cuantificar los elementos de la ecuación de la eficiencia (y sus costos asociados) es encontrar las áreas de mejoramiento. Por ejemplo, si la disponibilidad es del 98%, la confiabilidad es del 70%, la mantenibilidad es del 70%, y la capacidad es del 65%, la oportunidad de mejorar la capacidad es mucho más grande que la de mejorar la disponibilidad.

La **Tabla 1** contiene un simple juego de datos usados para ilustrar como son calculadas algunas *“habilidades”*. Los eventos son colocados en categorías de tiempos en servicios y tiempos de paradas, para el sistema. Dado que en los datos faltan detalles específicos de las fallas, los intervalos de funcionamiento son frecuentemente considerados como datos genéricos de tiempos para fallar. Del mismo modo, los detalles específicos de mantenimiento son frecuentemente considerados como tiempos genéricos de reparación. Al añadir mas detalles a los reportes se incrementa su utilidad. Estos datos limitados pueden ser útiles para entender la ecuación de la eficiencia – aún hoy la mayor parte del personal de nivel de las plantas, no sabe que tiene datos adecuados para análisis (**Barringer 1995**).

La **Disponibilidad** diverge de la duración del tiempo en servicio por operaciones, y es una medida de qué tan frecuente el sistema está bien y listo para operar. Esta es frecuentemente expresada como (tiempo en servicio)/(tiempo en servicio + tiempo en parada) con muchas variantes. El tiempo en servicio y el tiempo en parada son dos condiciones dicotómicas (**N. de T.: el autor se refiere a dos únicas condiciones extremas –en servicio o en parada-, sin considerar situaciones intermedias**). EL tiempo en servicio se refiere a la capacidad para desempeñar la tarea

y el tiempo de parada se refiere a cuando éste no esté en capacidad de desempeñar tal tarea, así, tiempo en servicio = no-tiempo en parada. Además, la Disponibilidad (N. de T.: A del inglés *Availability*) puede ser el producto de varios términos diferentes, tales como:

$$A = A_{\text{hardware}} * A_{\text{software}} * A_{\text{humano}} * A_{\text{interfaces}} * A_{\text{proceso}}$$

y configuraciones similares. La Disponibilidad está determinada por el mas pequeño de estos tres principales factores (Davidson 1988): 1) incremento del tiempo para fallar, 2) decremento de las paradas por reparaciones o Mantenimiento programado, y 3) acompañamiento de los numerales 1 y 2 de forma efectiva en costos. A medida que la disponibilidad crece, la capacidad para producir se incrementa, porque el equipo estará en servicio un mayor porcentaje de tiempo.

Tabla 1. Datos en bruto procedentes de las bitácoras de operación

Horómetro		Tiempo transcurrido en operación	Tiempo transcurrido en parada
Comienzo	Final		
0.0	708.2	708.2	
708.2	711.7		3.5
711.7	754.1	42.4	
754.1	754.7		0.6
754.7	1867.5	1112.8	
1867.5	1887.4		19.9
1887.4	2336.8	449.4	
2336.8	2348.9		12.1
2348.9	4447.2	2098.3	
4447.2	4452.0		4.8
4452.0	4559.6	107.6	
4559.6	4561.1		1.5
4561.1	5443.9	882.8	
5443.9	5450.1		6.2
5450.1	5629.4	179.3	
5629.4	5658.1		28.7
5658.1	7108.7	1450.6	
7108.7	7116.5		7.8
7116.5	7375.2	258.7	
7375.2	7384.9		9.7
7384.9	7952.3	567.4	
7952.3	7967.5		15.2
7967.5	8315.3	347.8	
8315.3	8317.8		2.5
TOTAL =		8205.3	112.5
MTBM =		683.8	
MTTR =			9.4

Frecuentemente son utilizadas tres ecuaciones de disponibilidad (Ireson 1996), las cuales se explican a continuación.

- **Disponibilidad Inherente**, tal como es vista por el personal de Mantenimiento, (excluye las paradas por Mantenimientos Preventivos, demoras en suministros, y demoras administrativas), y es definida como:

$$A_i = \text{MTBF}/(\text{MTBF} + \text{MTTR})$$

- **Disponibilidad Lograda**, tal como es vista por el Departamento de Mantenimiento, (incluye tanto el Mantenimiento Correctivo como el Preventivo, pero no incluye demoras en suministros y demoras administrativas), y es definida como:

$$A_a = \text{MTBM}/(\text{MTBM} + \text{MAMT})$$

Donde **MTBM** es el Tiempo medio Entre acciones Correctivas y Preventivas, y **MAMT** es el Tiempo Medio en que Mantenimiento estuvo Activo.

- **Disponibilidad Operacional**, tal como es vista por el usuario, y es definida como:

$$A_o = \text{MTBM}/(\text{MTBM} + \text{MDT})$$

Donde **MDT** es el tiempo medio de parada.

En pocas palabras la Disponibilidad se describe en términos cuantitativos como: tiempo en línea, tiempo de factor de corrida, falta de paradas, y un buen número de términos operativos coloquiales, que incluyen un mínimo valor para la disponibilidad operacional. Aunque muchos equipos no están en operación permanente, los Departamentos de Producción quieren que estén disponibles por lo menos una cantidad específica de tiempo con el fin de completar sus tareas, por lo que se necesita un mínimo valor de disponibilidad.

Un ejemplo de 98% de disponibilidad para un proceso continuo, dice que se espera un tiempo de servicio de $0.98 \cdot 8760 = 8584.8$ hr/año y de parada de $0.02 \cdot 8760 = 175.2$ hr/año, dado que disponibilidad + no-disponibilidad = 1. Ahora, usando el listado de datos de la **Tabla 1**, la disponibilidad dicotomizada es 98.6% basada en un tiempo de servicio = 8205.3 horas y un tiempo de parada = 112.5 horas.

Por supuesto que la visión dicotomizada de la disponibilidad es simplista y entrega cifras de disponibilidad pobres para este caso. No todos los equipos en un proceso suministran resultados binarios de solo servicio o solo parada – algunas veces están parcialmente en servicio o parcialmente en parada. Es claro que el servicio entregado define correctamente la falla. En el mundo práctico, existe complejidad en las definiciones cuando solamente algunos equipos están disponibles en el proceso, y la disponibilidad neta es menor que la disponibilidad ideal – por

ejemplo, una reducción en la entrega ocurre por una falla en el equipo, lo cual decrementa la salida ideal desde un 95% a un valor mas bajo como un 87%, cuando la falla está correctamente definida.

Una medida clave es definir la reducción (y la consiguiente pérdida de disponibilidad desde el punto de vista dicotómico) cuando esta reducción declina a un nivel que causa pérdidas financieras – este es el estándar económico de la falla. En pocas palabras, el área bajo la curva de disponibilidad puede ser sumariada para calcular el nivel práctico de disponibilidad, y generar altos valores de dicha disponibilidad, de tal manera que solamente sean usados valores dicotomizados. La pérdida de disponibilidad es un problema relacionado primariamente con las fallas de los equipos. Pero la causa raíz de la falla puede estar en áreas diferentes a las inicialmente esperadas. El deterioro frecuente, seguido de la falla económica, causa conflictos en las definiciones de confiabilidad, mantenibilidad, y capacidad – la vida real entregada, es raramente simple e independiente.

Para los propósitos de producción, un sistema debe estar totalmente disponible (listo para trabajar) y confiable (ausencia de fallas) para producir resultados efectivos.

La **Confiabilidad R** (N. de T.: R del inglés Reliability) se relaciona con la reducción en la frecuencia de las fallas en un intervalo de tiempo, y es una medida de la probabilidad para una operación libre de fallas, durante un intervalo de tiempo dado; así, es una medida del éxito para una operación libre de fallas. Frecuentemente, ésta es expresada como:

$$R(t) = \exp(-t/MTBF) = \exp(-\lambda t)$$

donde λ es la rata constante de falla y MTBF es el Tiempo Medio Entre Fallas. El MTBF mide el tiempo entre las fallas del sistema y es más fácil de entender que un número de probabilidad. Para los modos de falla distribuidos exponencialmente, el MTBF es un índice básico de confiabilidad (la rata de falla, λ , es el recíproco del MTBF). Para un tiempo de corrida dado con el fin de lograr una alta confiabilidad, se requiere un gran MTBF. Además, la confiabilidad puede ser el producto de diferentes componentes de confiabilidad tales como:

$$R = R_{\text{servicio}} * R_{\text{alimentación de la planta}} * R_{\text{procesamiento}} * R_{\text{empaquetado}} * R_{\text{envío}}$$

y configuraciones similares.

Para el usuario de un producto, la confiabilidad es medida como una larga operación sin fallas. Grandes periodos de interrupciones sin fallas, son resultantes de una capacidad productiva incrementada, requiriendo pocas partes de repuesto y una menor fuerza laboral para las actividades de Mantenimiento, lo cual redundando en bajos costos. Para el proveedor del producto, la confiabilidad es medida mediante el completamiento de un periodo de garantía libre de fallas, bajo condiciones de operación específicas, y con pocas fallas durante la vida de diseño del producto.

El mejoramiento de la confiabilidad ocurre con un incremento del costo del capital pero éste es sobrepasado por las expectativas de mejoramiento de la disponibilidad, el decremento de las paradas con costos de Mantenimiento más bajos, el mejoramiento de los costos secundarios de fallas, y como resultados, mejores oportunidades para hacer dinero, dado que los equipos están libres de fallas por largos periodos de tiempo. Mientras que los cálculos generales de confiabilidad pertenecen a ratas de falla constantes, los cálculos detallados de confiabilidad están basados en la

consideración de un modo de falla, el cual puede ser de “*mortalidad infantil*” (decremento de las ratas de falla con el tiempo), oportunidad de falla (ratas de falla constantes con el tiempo), o desgaste (N. de T.: en inglés wear-out) (incremento de la rata de falla con el tiempo).

En pocas palabras, las descripciones de confiabilidad en términos cuantitativos son: tiempo medio para fallar, tiempo medio entre fallas, tiempo medio de acciones antes/después de mantenimiento, tiempo medio antes/después de reparaciones, vida media de unidades en términos contables tales como horas o ciclos, ratas de falla, y el número máximo de fallas es un intervalo específico de tiempo.

Un ejemplo de un tiempo de corrida de un año con un equipo, el cual tiene un tiempo medio entre fallas de 30 años, da una confiabilidad del 96.72%, la cual es la probabilidad de éxito de cumplir un intervalo de tiempo de un año sin fallas. La probabilidad de falla es de 3.378%, dado que la confiabilidad + no-confiabilidad = 1. Para los resultados de confiabilidad, definir el tiempo de corrida es muy importante en la obtención de respuestas valederas. Se debe notar en el ejemplo que una alta confiabilidad para tiempos de corrida de un año o más, requiere una alta confiabilidad inherente (por ejemplo, un gran tiempo medio para fallar) – frecuentemente no se logra una alta confiabilidad inherente, debido a errores de operación y de mantenimiento.

Los datos de la **Tabla 1** muestran que el tiempo medio entre acciones de mantenimiento es de 693.8 horas. Calcule la confiabilidad del sistema usando las distribuciones exponenciales descritas, y un tiempo de corrida de un año. El sistema tiene una confiabilidad de $\exp(-8760/683.8) = 0.00027\%$. EL valor de confiabilidad es la probabilidad de cumplir un año de corrida sin fallas. En pocas palabras, el sistema es altamente no-confiable (para un año de tiempo de corrida), y las acciones de mantenimiento tienen una alta demanda, dado que para el sistema se espera que tenga $8760/683.8 = 12.8$ acciones de mantenimiento por año!

Los cálculos anteriores de confiabilidad fueron hechos aritméticamente. Se encuentran mayores proyecciones de precisión construyendo la carta de probabilidad a partir de los datos de la **Tabla 1**, usando el software de Weibull **WinSMITH** (Fulton 1996). La **Figura 1** muestra el evento de tiempo medio entre fallas de 730 horas. El 98% de todos los tiempos estarán entre 7.3 horas y 3362.3 horas. El diez por ciento de todos los tiempos serán menores de 76.9 horas. El tiempo medio es de 506 horas.

Y, ¿Cómo puede lograrse una lata disponibilidad con sistemas que requieren muchas acciones de mantenimiento? Las acciones de mantenimiento deben ser realizadas muy rápidamente para minimizar paradas!!!! Esto permite presionar para establecer operaciones de mantenimiento clase mundo. Una mejor forma de resolver los problemas es reducir el número de fallas – entonces la exigencia de operaciones de mantenimiento clase mundo se evitan y los costos disminuyen – particularmente cuando los costos del ciclo de vida señalan las acciones. Recuerde que las fallas traen costos ocultos resultantes de producciones ocultas asociadas con pérdidas de producción por desechos o productos deficientes, y por bajas entregas incurridas mientras se restablece las condiciones normales de operación – el tiempo perdido puede ser de 1.5 a 5 veces los costos esperados por pérdida de tiempo. El resultado real para la confiabilidad estudiada, es señalado por un simple concepto llamado dinero – particularmente cuando el costo de la no-confiabilidad (Barringer 1996c) es identificado y usado para motivar estudios de evaluación.

Una alta confiabilidad (pocas fallas) y una alta mantenibilidad (tiempos predecibles de mantenimiento) son la tendencia de sistemas altamente efectivos.

Traducido por **Héctor Danilo Ordóñez Lozano**