

# La Mecatrónica y el Diseño de Máquinas

**Una máquina en general puede considerarse como un conjunto de componentes “adecuadamente” seleccionados o fabricados y “debidamente” dispuestos para que, al relacionarse entre sí y con su entorno, satisfagan “de la mejor forma posible” una necesidad que el mercado siente que debe poder satisfacer al disponer de la misma.**

## Luis García Pascual

Doctor ingeniero Electromecánico del ICAI y Diplomado en Organización Industrial. Desde 1957 a 1964 trabajó en la industria del automóvil, en el campo del mantenimiento, campo en el que ha seguido investigando durante toda su carrera.

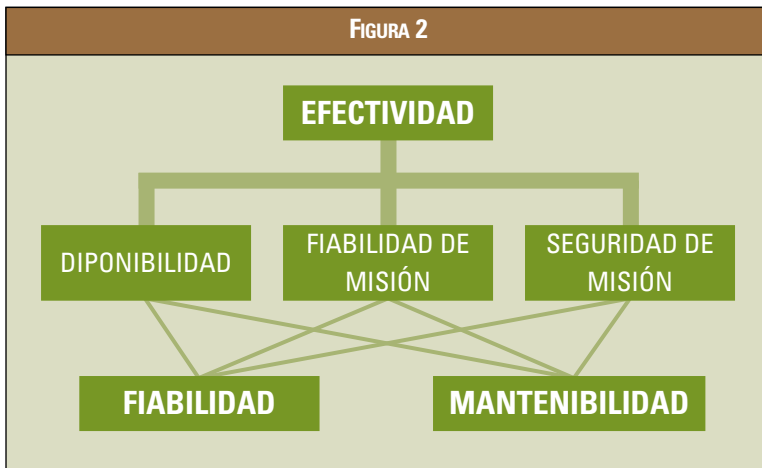
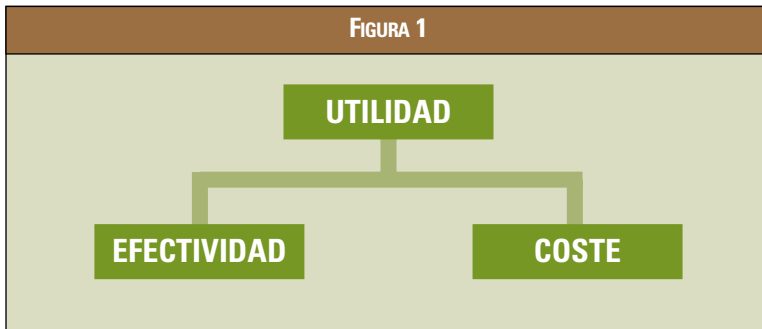
Entre 1964 y 1968 simultaneó su trabajo en la industria con su actividad académica en ICAI. En 1968 comenzó a trabajar con dedicación exclusiva en ICAI, ha sido en ocasiones, y en cada una de ellas durante dos mandatos consecutivos, Director de las Escuelas Técnicas. Los últimos cuatro años, viene desempeñando el cargo de Vicerrector de Investigación y Postgrado de la UPCO



## Introducción

**Y**a nos damos cuenta que las expresiones “adecuadamente”, “debidamente” y “de la mejor forma posible”, para ser ingenierilmente válidas necesitan transformarse en una variable que, recogiendo lo implícito en dichas expresiones, pueda cuantificarse de tal manera que su valor sea predecible en la etapa de diseño de la máquina, demostrable durante su fase de producción y validable mientras dicha máquina se esté usando para que, vigilando su valor, quede garantizado que se diseña la máquina necesaria, que se fabrica como interesa, que se utiliza como conviene y que no van a despilfarrarse valores residuales excesivos ni va a degradarse el medio ambiente más de lo necesario en el momento de desprendernos de ella.

Vamos a considerar como la variable mágica, que recoge toda esta información, la “**utilidad**”, entendiendo por tal la cantidad de la necesidad que el cliente perciba que queda satisfecha por unidad de coste realmente aplicado para ello. Como indicamos en la figura 1, el concepto de utilidad queda expresado con cierta claridad si lo consideramos como la relación “**efectividad/coste**”, entendiendo por “**efectividad**” el grado de satisfacción de la necesidad sentida por el usuario, y por “**coste**” la suma de los costes de adquisición de la máquina, más los que pueda ocasionar la instalación y puesta a punto de la misma, junto a los que tengan origen en su utiliza-



ción y mantenimiento durante la fase de servicio y considerando también aquellos que puedan generarse en su retirada de servicio cuando llegue el mo-

mento de desprenderse de la misma.

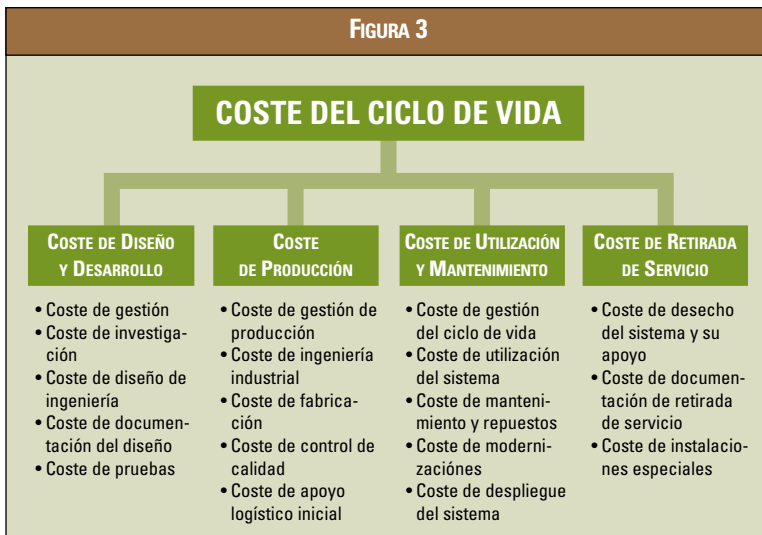
La **efectividad**, como indica la figura 2 y como analizare-

mos en detalle después, viene medida por la **disponibilidad**, por la **fiabilidad de misión** o por la **seguridad de misión** según sea la necesidad a satisfacer por la máquina para el cliente en concreto.

La disponibilidad, la fiabilidad de misión o la seguridad de misión dependen, a su vez, de la **fiabilidad** y de la **mantenibilidad** tanto de los componentes que constituyen la máquina, como de la configuración con que se integren en ella.

Por otro lado, los costes a considerar “**coste del ciclo de vida**” creemos que quedan suficientemente recogidos en el cuadro de la figura 3.

Llegar a aprovechar todas las posibilidades que ofrece esta manera de entender las máquinas exige abandonar el enfoque reduccionista, con el que se han venido estudiando las máquinas (enfoque característico del pensamiento cartesiano tendente a considerar como independientes las distintas partes en que pudiera dividirse un todo) y pretender, basados en el paradigma sistémico, modelar las máquinas como un conjunto que, como tal, optimice su comportamiento. Ello va a reclamar, entre otras exigencias, la multidisciplinaridad de los conocimientos puesto en juego desde la concepción inicial de la máquina hasta su retirada de servicio y aquí la “Mecatrónica” va a aparecer como materia absolutamente indispensable para quienes aspiren a capacitarse para hacer frente a



las decisiones técnicas del momento actual, generalmente conducentes a muy elevadas inversiones. Por ello, después de estudiar con algún detalle las peculiaridades que caracterizan el enfoque sistémico, de analizar con cierto detenimiento la efectividad y de pormenorizar con alguna minuciosidad las partidas que realmente integran el coste del ciclo de vida, veremos como la Mecatrónica aflora como disciplina indispensable para poder manejar estos conceptos con resultados asombrosos por las enormes posibilidades que ofrecen las tecnologías al alcance hoy de todos los usuarios.

**Enfoque sistémico frente a enfoque reduccionista**

Se ha venido pensando durante mucho tiempo que, para explicar y predecir el comportamiento de una máquina, podría bastar con descomponerla en sus diversos componentes y, a partir del comportamiento de estas partes intergrantes, deducir las posibilidades de la máquina resultante (criterio reduccionista).

Esto no es cierto; ya que, como hemos visto, lo realmente interesante es la utilidad que, a lo largo del tiempo, preste la máquina como conjunto y no las utilidades parciales de cada componente aislado, y es claro que aquella utilidad no depende sólo de las prestaciones tempo-

rales de cada componente sino fundamentalmente de los resultados que, para conseguir la prestación objetivo, aparezcan a lo largo del tiempo como consecuencia de las interacciones de dichos elementos componentes entre sí y con el entorno. Este empeño en analizar cada componente como parte integrante de un todo superior y de describirlo en términos de su relación inicial y a lo largo del tiempo con el conjunto y con el entorno es la base en que se fundamenta el criterio sistémico.

De los puntos anteriores podemos deducir que el enfoque reduccionista ha aspirado a conseguir la máquina ideal de acuerdo con el siguiente esquema.

1. Descomponer la máquina M en sus diversos componentes  $C_i$ .
2. Explicar y predecir el comportamiento inicial y a lo largo del tiempo de cada uno de los  $C_i$  componentes.
3. Mejorar todo lo aconsejable cada uno de ellos.
4. Agruparlos formando el conjunto máquina M deseado.

Es obvio que el esquema es incorrecto; ya que siendo verdad que:

$$M = \sum_i C_i$$

También es verdad que:

Funcionalidad de  $M = \sum_i$  Funcionalidad de  $C_i$

Características de  $M = \sum_i$  Características de  $C_i$ .

Mejoras de  $M = \sum_i$  Mejoras de  $C_i$ .

Restricciones de  $M = \sum_i$  Restricciones de  $C_i$ .

Estas incoherencias quedan superadas con el enfoque sistémico; ya que con él pretendemos seleccionar la alternativa que, mediante la agrupación correcta de los componentes adecuados, consiga:

1. Satisfacer, con la máquina como tal, el menester pretendido.
2. Dominar con precisión la dependencia mutua entre el comportamiento de las diversas partes entre sí al agruparlas bajo la configuración que dé origen a la máquina.
3. Tener información completa del comportamiento de la máquina en su conjunto, tanto en el instante inicial de su empleo como en su evolución en el tiempo al considerar que, tal comportamiento, puede ser variable a lo largo del mismo no sólo considerando las prestaciones particulares de cada componente sino teniendo en cuenta, además, las modificaciones que puedan producirse en el entorno en que deba trabajar y sin olvidar las relaciones, posiblemente también cambiantes, de cada componente con el resto de los mismos o con el entorno.

4. Conseguir la solución óptima teniendo en cuenta todo el ciclo de vida de la máquina; es decir, considerando las etapas de:

- Identificación y definición de la necesidad a satisfacer.
- Análisis de mercado.
- Estudio de viabilidad.
- Especificación de requisitos detallados.
- Diseño.
- Montaje.
- Puesta en servicio.
- Utilización.
- Mantenimiento.
- Retirada de servicio.

5. Perseguir una:

$$\text{Utilidad} = \frac{\text{Efectividad}}{\text{Coste}}$$

realmente representativa.

Es evidente como, en este enfoque sistémico, intervienen consideraciones de tipo:

- Teleológico, al perseguir un fin.
- Económico, al considerar el coste del ciclo de vida.
- Dinámico, al tener en cuenta los cambios que pueden producirse, a lo largo del tiempo, en algunas características de los componentes, del entorno, y de las relaciones entre unos y otro.
- Interactivo, al ajustar en cada instante lo conseguido por el sistema y lo deseado de él mediante las realimentaciones necesarias.
- Sinérgico, ya que la máquina como un todo es más que la suma de sus componentes y puede poseer propiedades de las

que no goce ninguno de ellos.

### Efectividad y su evaluación

**A**l especificar los requisitos a satisfacer por una máquina moderna suelen aparecer, con frecuencia, un número elevado de tales requisitos; por ello debe disponerse de métricas que evalúen de forma global la efectividad de dicha máquina sin perjuicio de que algunos aspectos concretos y de especial importancia deban ser evaluados individualmente.

### “La disponibilidad ha de intentar predecirse en la fase de diseño”

Ello obliga a considerar métricas no sólo de tipo general sino algunas de tipo específico que cuantifican requisitos concretos a exigir en cada máquina determinada y, tanto unas como otras, deben prever que la efectividad con que la máquina responde a la satisfacción de los mismos no tiene por qué ser independiente del tiempo, dado el carácter cambiante de las características particulares de cada componente, de las relaciones con los otros componentes o con el entorno o incluso de las necesidades que motivaron la adquisición o el desarrollo de la máquina en estudio.

### Métricas generales

Como tales suelen emplearse normalmente:

- La Disponibilidad.
- La Fiabilidad de Misión.
- La Seguridad de Misión.

Cada una de estas métricas tiene sus características específicas para hacerla más adecuada frente a los diferentes tipos de empleo a que deba destinarse la máquina considerada.

### Disponibilidad

Es el tanto por cierto de la vida operativa de la máquina en que ésta, trabajando en el entorno real en que haya de funcionar, se encuentre en condiciones de satisfacer la necesidad para la que fue diseñada. Es una forma adecuada de medir la efectividad cuando la máquina deba desarrollar un perfil de misión bien definido y, además, deba funcionar de manera continua.

Como parte integrante de la utilidad, la disponibilidad ha de intentar predecirse en la fase de diseño, demostrarse en la etapa de producción y validarse durante la vida operativa de la máquina. La predicción en el diseño puede conseguirse mediante modelos matemáticos siendo, como es evidente, necesario analizar cuidadosamente si la máquina como sistema satisface las hipótesis en que se base el desarrollo del modelo; ya que, en caso contrario, llegaríamos a resultados incorrectos a veces enmascarados por el ropaje matemático en que se apoyan tales modelos, ropaje que puede

únicamente servir para dar la impresión de rigor a aspectos que desde sus inicios son falsos.

Como ejemplo de cómo se puede predecir la disponibilidad vamos a definirla en un instante  $t$  como la probabilidad de que la máquina funcione correctamente en dicho instante; es decir:

$$D(t) = P[x(t) = 1] \quad [1]$$

Siendo  $x(t)$  una variable binaria que tome el valor 1 si la máquina funciona y el valor 0 si ésta no está en condiciones de hacerlo.

Esta disponibilidad instantánea valdrá para la máquina (e igual podría considerarse para un componente cualquiera):

$$\begin{aligned} D(t) &= P[x(t) = 1] = \\ &= R(t) + \int_0^t R(t-x)m_H(x)dx \end{aligned} \quad [2]$$

Siendo  $R(t)$  la probabilidad de que no haya fallado durante  $t$

$$e^{-\int_0^t R(t-x)m_H(x)dx}$$

la probabilidad de que los posibles elementos que debamos haber renovado en cualquier instante  $x$  (comprendido entre 0 y  $t$ ) no hayan vuelto a fallar hasta  $t$ . Como es evidente,  $m(x)$  es la densidad de renovaciones en el instante  $x$ .

Tomando transformadas de Laplace, recordando el comportamiento de esta transformada ante la convolución y considerando que  $R(t) = \bar{F}(t) = 1 - F(t)$  tendremos:

$$\begin{aligned} D^*(s) &= \frac{1}{s} - F^*(s) + L\left[\int_0^t \bar{F}(t-x)m_H(x)dx\right] = \\ &= \frac{1}{s} - F^*(s) + L\left[\int_0^t m_H(x)dx(1 - F(t-x))\right] = \\ &= \frac{1}{s} - F^*(s) + L\left[\int_0^t m_H(x)dx - \int_0^t F(t-x)m_H(x)dx\right] = \\ &= \frac{1}{s} - F^*(s) + M_H^*(s) - m_H^*(s)F^*(s) = \\ &= \frac{1}{s} - \frac{1}{s}f^*(s) + \frac{1}{s}m_H^*(s) - \frac{1}{s}m^*(s)f^*(s) = \\ &= \frac{1}{s}(1 - f^*(s)(1 + m_H^*(s))) = \frac{1}{s}(1 - f^*(s))\left[\frac{h^*(s)}{1 - h^*(s)}\right] = \frac{1}{s}\left[\frac{1 - f^*(s)}{1 - h^*(s)}\right] \end{aligned} \quad [3]$$

Siendo  $f^*(s)$  la transformada de Laplace de la densidad de fallos en cualquier instante  $t$  y  $h^*(s)$  la transformada de Laplace de la densidad de la distribución de la longitud del ciclo de un fallo más la reparación del elemento fallado; es decir (ver expresión [14]).

$$h^*(s) = L[h(t)] = L[f(t)]L[g(t)]$$

Ya que:

$$H(t) = \int_0^t f(x)G(t-x)dx$$

En el caso de una tasa de fallos  $\lambda$  y una tasa de reparaciones  $\mu$ , tendríamos:

$$\begin{aligned} f^*(s) &= \frac{\lambda}{s + \lambda} \\ h^*(s) &= \frac{\lambda}{s + \lambda} \frac{\mu}{s + \mu} = \frac{\lambda\mu}{(s + \lambda)(s + \mu)} = \frac{\lambda\mu}{s^2 + s(\lambda + \mu) + \lambda\mu} \end{aligned}$$

Por lo que [3] se convertiría en:

$$D^*(s) = \frac{1}{s} \frac{\frac{s}{s + \lambda}}{\frac{s^2 + s(\lambda + \mu) + \lambda\mu}{(s + \lambda)(s + \mu)}} = \frac{s + \mu}{s(s + \lambda + \mu)} \quad [3]$$

Para encontrar  $D(t)$  busquemos la antitransformada de  $D^*(s)$  y para ello hagamos:

$$D^*(s) = \frac{A}{s} + \frac{B}{s + \lambda + \mu} = \frac{A(s + \lambda + \mu) + Bs}{s(s + \lambda + \mu)}$$

Lo que exige que:

$$A+B = 1$$

$$A(\lambda+\mu) = \mu$$

Por lo que:  $A = \frac{\mu}{\lambda + \mu}$

y  $B = 1 - \frac{\mu}{\lambda + \mu} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu}$

Luego:

$$D^*(s) = \frac{1}{s} \left( \frac{\mu}{\mu + \lambda} \right) + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} \frac{1}{s + \lambda + \mu}$$

De donde es inmediato deducir que:

$$D(t) = \frac{\mu}{\mu + \lambda} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda+\mu)t} \quad [4]$$

Encontrada la disponibilidad en el instante t, la disponibilidad media durante un cierto intervalo T será evidentemente:

$$D_T = \frac{\int_0^T D(t) dt}{T} \quad [5]$$

Si T lo extendemos hasta un tiempo muy largo tendremos la disponibilidad límite definida por:

$$D_l = \lim_{t \rightarrow \infty} D(t) \quad [6]$$

Y la disponibilidad media límite vendrá dada por:

$$D_\infty = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\int_0^T D(t) dt}{T} \quad [7]$$

En el caso que venimos considerando, la disponibilidad límite valdrá:

$$D_l = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \quad [8]$$

En muchas ocasiones en vez de hablar de la tasa de fallos  $\lambda$  se maneja el tiempo medio entre fallos (MTBF =  $1/\lambda$ ) y en lugar de considerar la tasa de reparaciones  $\mu$  se habla del tiempo medio a la reparación (MTTR =  $1/\mu$ ). Por lo que, con estas nuevas variables, la disponibilidad límite valdrá:

$$D_l = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad [9]$$

Ya vemos como la disponibilidad depende de la fiabilidad y de la mantenibilidad, variables que deben tenerse por lo tanto muy en cuenta en el diseño de la máquina y a cuya cuantificación la Mecatrónica también puede hacer aportaciones interesantísimas.

También, a título de ejemplo, vamos a desarrollar un posible modelo de estudio que nos permita predecir, ya desde el diseño de una máquina, el número de sustituciones n que esperamos sea necesario efectuar, durante un tiempo de funcionamiento  $t_f$ , de un componente que en una máquina tenga una distribución de fallos F(t); es decir, que sea F(t) la probabilidad de que dicho elemento se estropee en t antes de t.

Es evidente, considerando los números sobre F superíndices y no exponentes, que:

$F(t_f)$  es la probabilidad de que al llegar a  $t_f$  hayamos tenido que efectuar al menos una sustitución.

$$F^2(t_f) = \int_0^{t_f} f(x)F(t_f - x)dx$$

es la probabilidad de que durante  $t_f$  hayamos tenido que realizar al menos 2 cambios; ya que  $f(x)dx$  es la probabilidad de que se produzca un fallo en  $t = x$  y  $F((t_f - x))$  es la probabilidad de que se estropee el componente, cambiado en x, en  $t_f$  o antes de  $t_f$ ; pero x puede extenderse desde 0 a  $t_f$  por lo que es necesario extender el proceso desde  $x = 0$  a  $x = t_f$ .

En general podemos decir que:

$$F^n(t_f) = \int_0^{t_f} f(x)F^{n-1}(t_f - x)dx$$

es la probabilidad de que durante  $t_f$  haya sido necesario realizar el menos n sustituciones del componente en estudio.

Como consecuencia de lo anterior es evidente que la probabilidad de que el número de cambios durante  $t_f$  valga n será:

$$E[N(t_f) = n] = F^n(t_f) - F^{n+1}(t_f) \quad [10]$$

ya que la probabilidad de que hasta  $t_f$  se cambien n elementos se obtendrá restando a la probabilidad de que se cambien n o más elementos la probabilidad de que se cambien n+1 o más elementos.

Por otro lado también es evidente que:

$$F^0(t_f) = 1$$

ya que es seguro que hasta  $t_f$  se han cambiado cero o más de cero elementos. De estas expresiones obtenemos la conclusión obvia de que:

$$P[N(t_f) = 0] = F^0(t_f) - F^1(t_f) = 1 - F(t_f) = R(t_f)$$

puesto que la función complementaria a la distribución de fallos  $F(t_f)$  es la distribución de supervivencia  $R(t_f)$ .

De lo anterior ya podemos deducir el número de renovaciones que, durante un tiempo  $t_f$ , esperamos hacer del elemento que estudiamos, puesto que este número será:

- 0 multiplicado por la probabilidad de que no cambiemos ningún elemento durante  $t_f$ .
- 1 multiplicado por la probabilidad de que cambiemos 1 elemento durante  $t_f$ .
- 2 multiplicado por la probabilidad de que cambiemos 2 elementos durante  $t_f$ .
- 3 multiplicado por la probabilidad de que cambiemos 3 elementos durante  $t_f$ .
- ...
- n multiplicado por la probabilidad de que cambiemos n elementos durante  $t_f$ .
- ...
- $\infty$  multiplicado por la probabilidad de que cambiemos  $\infty$  elementos durante  $t_f$ .

Por tanto, el número de componentes cambiados durante  $t_f$ , que llamaremos  $M_F(t_f)$ , valdrá:

$$M_F(t_f) = \sum_{n=0}^{\infty} n [F^n(t_f) - F^{n+1}(t_f)] = 0 [F^0(t_f) - F^1(t_f)] + 1 [F^1(t_f) - F^2(t_f)] + 2 [F^2(t_f) - F^3(t_f)] + \dots = 0 + \sum_{n=1}^{\infty} F^n(t_f) \quad [11]$$

También podremos escribir que:

$$M_F(t_f) = F^1(t_f) + \sum_{n=2}^{\infty} F^n(t_f) = F^1(t_f) + \sum_{j=1}^{\infty} F^{j+1}(t_f) = F(t_f) + \sum_{j=1}^{\infty} \int_0^{t_f} f(x) F^j(t_f - x) dx = F(t_f) + \int_0^{t_f} \sum_{j=1}^{\infty} F^j(t_f - x) f(x) dx \quad [12]$$

Pero por [11]:

$$\sum_{j=1}^{\infty} F^j(t_f - x) = M_F(t_f - x)$$

Por lo que:

$$M_F(t_f) = F(t_f) + \int_0^{t_f} M_F(t - x) f(x) dx \quad [13]$$

En esta expresión  $F(t_f)$  es la esperanza de que tengamos que sustituir el elemento inicialmente instalado en la máquina y la integral representa la esperanza de que tengamos que cambiar a lo largo de  $t_f$  los elementos que sucesivamente vayamos instalando durante el funcionamiento de la citada máquina.

Si en [13] tomamos transformadas de Laplace, y recordando como se comporta dicha transformada en la convolución, tendremos:

$$M_F^*(s) = F^*(s) + M_F^*(s) f^*(s) = F^*(s) + s M_F^*(s) F^*(s)$$

Es decir:

$$M_F^*(s) = \frac{F^*(s)}{1 - s F^*(s)}$$

Si pasáramos al dominio de las densidades tendríamos:

$$m^*(s) = \frac{f^*(s)}{1 - f^*(s)}$$

Y si, en vez de considerar sólo el fallo, considerásemos también la reparación tendríamos:

$$m_H^*(s) = \frac{h^*(s)}{1 - h^*(s)} \quad [14]$$

(expresión utilizada en [3]).

Tomando antitransformadas tenemos resuelto el problema planteado.

A título de ejemplo consideremos el caso de que el tiempo de fallo esté distribuido según una ley negativa exponencial de tasa de fallos  $\lambda$  (hipótesis muy aplicada aunque fuertemente restrictiva):

$$F(t_f) = 1 - e^{-\lambda t_f}$$

Y por lo tanto:

$$F^*(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \lambda} = \frac{s + \lambda - s}{s(\lambda + s)} = \frac{\lambda}{s(\lambda + s)}$$

Luego:

$$M_F^*(s) = \frac{\lambda}{s(\lambda + s)} \cdot \frac{\lambda}{1 - \frac{\lambda}{\lambda + s}} = \frac{\lambda}{s^2}$$

Y, tomando antitransformadas, vemos que:

$$M_F^*(t_f) = \lambda \frac{t_f^{2-1}}{(2-1)!} = \lambda t_f \quad [15]$$

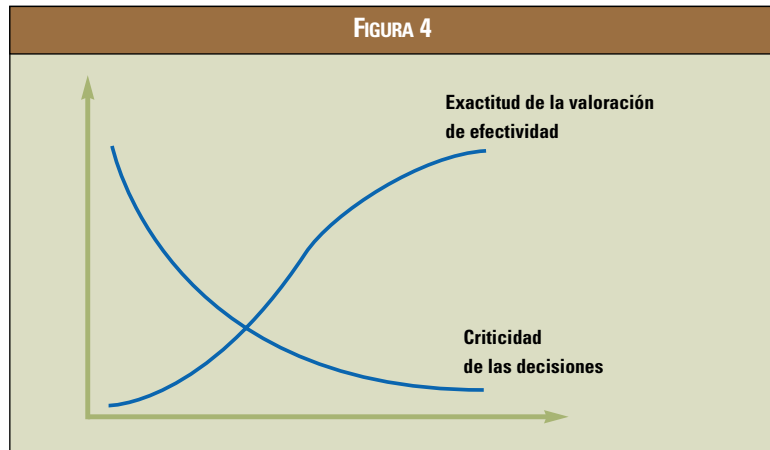
Como necesariamente tenía que suceder ya que el número de fallos por unidad de tiempo vale  $\lambda$ .

## Fiabilidad de Misión y seguridad de Misión

Si la máquina es multifuncional; es decir, si se adquiere para desarrollar diversos perfiles de misión que pueden no ser igualmente importantes para el usuario, o si el funcionamiento de tal máquina es intermitente, se suelen emplear para medir la efectividad de dicha máquina bien la fiabilidad de misión o bien la seguridad de misión. En ambos casos se considera que tan importante como que el sistema esté disponible, cuando se requiera el inicio de su misión, es que ésta se complete con éxito.

Se entiende por fiabilidad de misión la probabilidad media de que la misión encomendada se complete con éxito sin que el sistema sufra averías, suponiendo que dicho sistema se encuentre disponible en el momento en que la misión sea requerida; la seguridad de misión, en cambio, es la probabilidad media de que tal misión se complete con éxito, ya sea sin averías o ya sea con la aparición de algunas de ellas que puedan ser subsanadas por los propios usuarios y en menos de un tiempo máximo prefijado, suponiendo también que el sistema se encuentre disponible cuando la misión le fue requerida.

Después de los modelos de estudio que hemos comentado para predecir la disponibilidad no es difícil establecer modelos capaces de prever la cuantificación tanto de la fiabilidad de misión como de la seguridad de misión.



### Métricas particulares

A veces la máquina puede requerir ciertas características específicas (peso, consumo, autonomía...), que deban cuantificarse en las diversas alternativas a considerar, y en muchos casos, puede ser necesario, ante las diversas características a evaluar, el empleo de modelos de evaluación multiatributo para poder conseguir una valoración cuantitativa que represente con claridad el cumplimiento del perfil que deseamos satisfacer con cada una de las alternativas.

Hasta aquí hemos considerado como podemos predecir la efectividad de una máquina en su fase de diseño. Mostrar posteriormente tal efectividad en la etapa de producción ya podrá hacerse con más garantías, por ejemplo mediante ensayos de vida acelerada, y la valoración de lo realmente conseguido será inmediata cuando el usuario contraste las prestaciones que le ofrece el sistema; aunque, si entonces éstas no son las deseadas, será mucho más difícil actuar para mejorar tales prestaciones.

Es de resaltar como las decisiones que más van a influir en cuanto a la efectividad de la máquina son las que se tomen en la etapa de diseño, cuando todavía tenemos libertad para modificar todo lo que deseemos puesto que no se han “congelado” ni la configuración de la máquina ni la estructura de apoyo a prestarle; por ello, resulta imprescindible realizar valoraciones de la efectividad desde las primeras etapas del ciclo de vida, a pesar de las limitaciones de información que en ellas podamos tener (Fig. 4).

### Coste del ciclo de vida y su evaluación

Una vez analizada con cierto detalle la efectividad, vamos a prestar ahora atención al coste del ciclo de vida con miras a tener cuantificada, mediante la efectividad por unidad de coste, la utilidad como variable realmente representativa de la calidad de una máquina desde el punto de vista del usuario. Para



ello consideremos que cualquier máquina, o sistema en general, tiene un determinado coste de adquisición  $C_a$  para el usuario; pero no es éste el único coste al que debe hacer frente a lo largo del tiempo en que vaya a utilizar dicho sistema. A este coste  $C_a$  es necesario añadir los costes de puesta en servicio necesarios para poner operativo el sistema  $C_o$  y, además, siempre se incurrirá en unos costes de utilización y mantenimiento durante su vida en servicio que, por unidad de tiempo, llamaremos  $c$ . Incluso en la retirada de servicio del sistema pueden originarse unos costes  $C_r$  que pueden ser positivos (coste de transporte a un lugar determinado, costes medioambientales por retirada de desechos...) o negativos derivados de la venta del sistema como producto de segunda mano a otro posible usuario. El concepto de coste de ciclo de vida de un sistema (CCV) pretende recoger el resultado que el conjunto de todos estos costes representa para el usuario y que podrá representarse por la ecuación [16] para un sistema que se adquiera en el instante  $t_i$  y se abandone en el instante  $t_r$ .

$$CCV = C_a(t_i) + C_o(t_i) + \int_{t_i}^{t_r} c dt + Cr(t_r) \quad [16]$$

expresión en la que, como los distintos costes se van a realizar en momentos distintos, puede ser necesario actualizarlos para un instante dado. Actualizando al instante  $t_i$  la ecuación [16] se convertiría en:

$$(CCV)_{t=t_i} = C_a(t_i) + C_o(t_i) + \int_{t_i}^{t_r} c \cdot e^{-i(t-t_i)} dt + C_r \cdot e^{-i(t_r-t_i)} \quad [17]$$

siendo  $i$  la tasa de actualización continua del capital.

La expresión [17] para el CCV es válida para un usuario que desea adquirir una máquina en el instante  $t_i$  y mantenerla hasta el instante  $t_r$ ; sin embargo no es válida, en absoluto, desde el punto de vista del fabricante de dicho equipo; ya que el primero tiene que analizar el coste que, las distintas alternativas, a su alcance, van a representar para él mientras que el fabricante debe considerar lo que puede ofrecer con su alternativa a cualquier posible comprador y en esto ha de considerar:

a) Los gastos que para él va a ocasionar el diseño y desarrollo del sistema junto a la producción del mismo. Estos gastos influirán decisivamente en el valor  $C_a$  para los distintos posibles clientes.

b) Las necesidades de puesta a punto, utilización y mantenimiento que su alternativa requiere. Con el control de éstas puede motivar ciertamente a los posibles usuarios, ya que puede ofrecer unos valores de  $C_o$  y  $c$  más o menos atractivos para dicho usuario.

c) Los costes de retirada que requiere su alternativa; ya que éstos representan el valor de  $C_r$  que deberá afrontar el posible cliente en el momento de desprenderse del sistema. Es decir, el fabricante del sistema ha de considerar los cuatro apartados que aparecen en la figura 3.

En los apartados siguientes se explicitan un poco más los costes involucrados en los cuatro grupos de la citada figura.

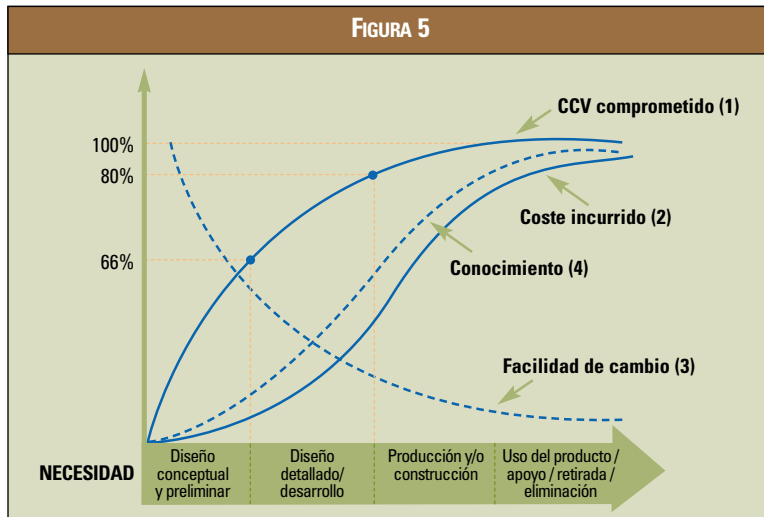
a) Costes de investigación y desarrollo: Incluyen los costes derivados de los análisis de necesidades identificadas, de la especificación de requisitos, de los estudios de viabilidad y del diseño del sistema.

b) Costes de producción: Son los costes de fabricación del sistema y de los elementos de apoyo logístico que requiera.

c) Costes de utilización y mantenimiento: Incluyen tanto los costes asociados a la utilización del sistema (costes de personal, de energía, de consumibles y fungibles, etc.) como los derivados de su mantenimiento (costes de repuestos, de instalaciones y equipos de apoyo y prueba, de personal, etc.)

d) Costes de retirada de servicio: Este grupo incluye los costes asociados al desecho del sistema al final de su vida operativa (costes de personal, costes de transporte, costes de instalaciones, costes de energía, etc.)

De manera parecida a lo comentado al analizar la efectividad, al principio del ciclo de vida es cuando realmente es posible tomar decisiones de gran repercusión en los costes que el sistema va a requerir a lo largo del citado ciclo; porque, al decidir sus componentes básicos y su configuración, van a quedar en gran medida comprometidos dichos



costes necesarios para su ciclo de vida como representa la curva 1 de la figura 5. Además, es en esas primeras etapas del ciclo de vida cuando todavía no tenemos restricciones impuestas por decisiones previas ni por costes incurridos (curva 2) que nos impidan tener gran facilidad para efectuar cambios (curva 3). El inconveniente puede sobrevenir por la falta de conocimiento (curva 4) que podamos tener, en el inicio, acerca del sistema que nos propongamos desarrollar; aquí vuelve a surgir la importancia de la multidisciplinaridad y la necesidad de retroalimentación entre las distintas fases del ciclo de vida de un producto, características ambas del enfoque sistémico que venimos preconizando y de las posibilidades que ofrece la Mecatrónica.

### Optimización de la utilidad

Conocida la efectividad y analizado el coste del ciclo de vida, ya es inmediato deducir

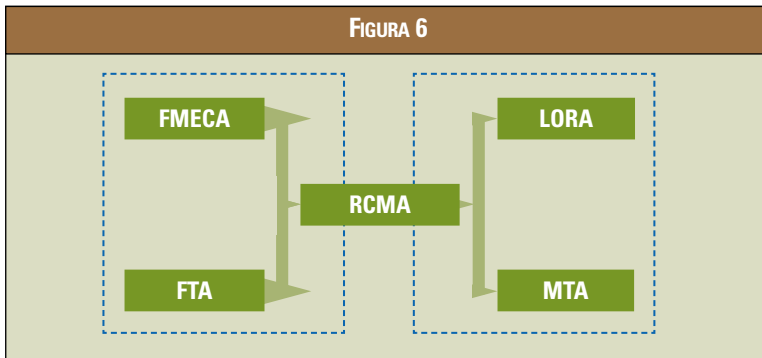
la utilidad; ahora bien, es importante considerar que, tanto la efectividad como el coste del ciclo de vida, dependen de la fiabilidad y de la mantenibilidad ya que ambas características del sistema, en que hemos convertido la máquina, pretenden aumentar la efectividad de una máquina y reducir los costes asociados a su explotación. Por otro lado, ambas variables –fiabilidad y mantenibilidad– no pueden independizarse; ya que son las partes del sistema que pueden dejar de estar operativas (aportación de la fiabilidad) las que deben volver a ponerse de nuevo en condiciones de prestar servicio en poco tiempo, con bajos costes, mediante medios económicamente asumibles, etc, (objetivo de la mantenibilidad); es decir, aquello que pueda romperse debe poderse reparar con eficacia y aquello en que esta eficacia no sea posible no debe romperse con frecuencia.

De las consideraciones anteriores surge la necesidad de realimentar entre sí ambas variables para lo que suele ser normal el

empleo de herramientas de uso ciertamente extendido que ayudan a esta interrelación bien por identificar los posibles fallos, su criticidad y sus efectos (failure modes, effects, and criticality tree analysis, FMECA), o bien mediante el análisis de los árboles de fallo (failure tree analysis, FTA) para evitar su aparición (mantenimiento preventivo) o para facilitar las tareas necesarias para subsanar los fallos que se produzcan y devolver el sistema a estado operativo (mantenimiento correctivo).

A este proceso de identificar las tareas necesarias, en función de los modos de fallo posibles, se conoce como análisis de mantenimiento centrado en la fiabilidad (reliability, centred maintenance, analysis, RCMA). Una vez identificadas, partiendo de la fiabilidad, las tareas de mantenimiento necesarias se completa el proceso mediante el análisis del nivel de reparabilidad (level of repair analysis, LORA) es decir, se establece el lugar donde debe efectuarse la reparación para que las tareas necesarias se realicen optimamente teniendo en cuenta tanto criterios técnicos como económicos y, mediante el análisis de las tareas de mantenimiento (maintenance task analysis, MTA), se define en detalle la ejecución de cada tarea al precisar el tiempo necesario, los repuestos y los consumibles a emplear, las herramientas requeridas, la cualificación del personal preciso, etc. La figura 6 pone de manifiesto el desarrollo del proceso que acabamos de preconizar.

Conviene recordar también que, dado el carácter evolutivo e



iterativo propios del enfoque sistémico, también la mantenibilidad debe influir en la fiabilidad puesto que, si como consecuencia de las tareas de mantenimiento potencialmente resultantes y de sus implicaciones (tiempo, costes, personal...), resultase una utilidad baja por una efectividad o unos costes no asumibles, deberá modificarse el diseño para que la fiabilidad mejore en la medida adecuada. La figura 7 recoge esta realimentación entre la fiabilidad y la mantenibilidad.

### Programación de mantenimiento preventivo

Si, como consecuencia de los análisis anteriores, se decidiera desarrollar tareas de mantenimiento preventivo, éstas pueden programarse según uno de los tres criterios siguientes:

- Mantenimiento basado en la vida operativa.
- Mantenimiento basado en la condición.
- Mantenimiento basado en la oportunidad.

Cada uno de estos tres criterios tiene ventajas e inconvenientes por lo que, en cada caso, habrá que ver cuál resulta más aconsejable, tarea que no representa ningún problema a la luz de los comentarios sobre cada una de estas políticas que hacemos a continuación.

### Mantenimiento basado en la operación

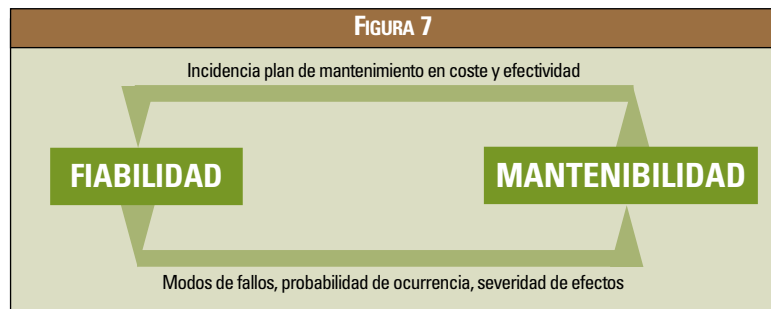
Las tareas se realizan a intervalos fijos de cualquier parámetro que represente la actividad realizada por la máquina (tiempo, ciclos, arranques...). El intervalo se establece en función de la distribución de vida del equipo que estemos considerando o de sus distintos componentes.

Esta política presenta como principal ventaja la posibilidad de conocer de antemano los recursos de todo tipo que serán necesarios en cada instante. Como principal

inconveniente aparece la posibilidad de efectuar operaciones innecesarias en elementos con vida operativa todavía aprovechable lo que implica gastos innecesarios, indisponibilidades evitables y riesgos de que aparezcan averías inducidas por la propia ejecución de la tarea de mantenimiento.

### Mantenimiento basado en la condición

En este caso se condiciona la ejecución de la tarea de mantenimiento al estado real en que se encuentre el elemento o elementos a los que la misma se aplique. El empleo más inmediato de este tipo de mantenimiento preventivo se da en aquellos casos en que la variación del estado, que pueda ser origen del fallo, venga bien definida por el valor que adquiera una variable bien identificada. Es interesante que pueda obtenerse, con cierta facilidad, el valor real de dicha variable para conocer en cada instante su degradación verdadera y el gradiente con que se modifica con el tiempo, para predecir la mayor o menor inmediatez con que deba realizarse la tarea de mantenimiento a dicha degradación asociada. Es de resaltar como, si se profundiza con cierto detalle en los equipos, a veces con sensores muy económicos puede aplicarse mantenimiento basado en la con-



dición con resultados de alcance insospechado y a costes bajísimos. En cualquier caso, la Mecatrónica puede aportar posibilidades grandísimas al seleccionar y evaluar la variable que es adecuada para predecir el fallo junto con los medios a emplear para cuantificar su valor.

### Mantenimiento basado en la oportunidad

Esta política se basa en realizar tareas de mantenimiento preventivo aprovechando la indisponibilidad de la máquina o los trabajos a realizar en ella por otras tareas de mantenimiento. Como ejemplo de aplicación de esta política podríamos citar cómo es aconsejable que, al establecer los intervalos del mantenimiento basado en la operación, tales intervalos sean múltiplos unos de otros.

### Conclusión


**H**emos visto en los apartados anteriores la interdisciplinariedad con que deben abordarse todas las etapas del “ciclo de vida” de una máquina para asegurar la máxima “utilidad” de la misma (efectividad por unidad de coste); ya que la especificación de los requisitos a cumplir, su diseño, el proceso a seguir en su fabricación, su capacidad productiva, su fiabilidad, su mantenibilidad, su disponibilidad, la política de mantenimiento a aplicarle, etc, son características todas relacionadas entre sí. Para abordar to-

do ello con esa mentalidad interdisciplinar no podemos estudiar por un lado los sistemas mecánicos que integren la máquina, por otro los dispositivos eléctricos que la compongan, por un tercero los elementos de control que en ella existan, sino que hemos de integrar todos ellos para pretender una aproximación concurrente a los mismos en vez de yuxtaponerlos de manera secuencial, y así, superar las incoherencias propias del enfoque reduccionista y utilizar las ventajas asociadas al enfoque sistémico. Es decir, es necesario tener la oportunidad de contemplar cualquier máquina no desde la óptica estrecha de una tecnología determinada sino desde la interdependencia entre los distintos elementos (mecánicos, hidráulicos, neumáticos, eléctricos, electrónicos, de tratamiento de señales, de control...) que deban estar presentes en ella. Pensemos, simplemente a título de ejemplo, la interrelación que debe haber entre distancia, luminosidad, geometría y movimientos en una máquina tan al alcance de cualquiera como puede ser una cámara fotográfica automática. La Mecatrónica pretende dar al técnico esta visión, esta cultura y esta manera de ser y estar ante los retos tecnológicos del momento actual.

Resumiendo mucho podemos decir que la Mecatrónica pretende que se estudie y diseñe cualquier máquina como un sistema con una o varias entradas para generar una o varias salidas, lo que entraña la necesidad de medir las magnitudes de entrada y las de salida, convertir la cantidad

de esas magnitudes en números concretos, números que, debidamente tratados en sistemas informáticos, puedan asegurar – mediante los sistemas de control apropiados– que las salidas generadas adquieran un valor particular deseado o sigan una secuencia de valores predeterminada. Es decir, desde el punto de vista de la Mecatrónica, ante cualquier máquina hemos de saber definir:

- El sistema que, como conjunto, la define.
- El o los sistemas de medidas que precisa.
- El o los sistemas de control que requiere para conseguir de ella la misión deseada.
- Etc.

Definidos estos sistemas para la máquina en estudio, la Mecatrónica nos facilitará la tecnología más apropiada (mecánica, eléctrica, hidráulica, neumática, electrónica...) para cumplir la tarea a cada sistema encomendada sabiendo que la transmisión de potencia, la captación, acondicionamiento y presentación de señales, la respuesta dinámica del sistema, las funciones de transferencia, la respuesta en frecuencia, los controladores en lazo abierto o cerrado, etc, no son conceptos asociados a una tecnología determinada sino que son ideas generales que pueden utilizarse en todas ellas y, en consecuencia, la máquina ideal será la que utilice esos conceptos usando la tecnología más adecuada teniendo en cuenta la totalidad que ha de conformarla. 

**Nota** — Acaba de aparecer un libro, publicado en la Colección Ingeniería de la Universidad Pontificia Comillas, que lleva por título “Fiabilidad, Mantenibilidad, Efectividad –Un enfoque sistémico–”, del que es autor Alberto Sols, y de cuyos trabajos preliminares están tomadas muchas de las ideas que aparecen en este artículo. Es muy interesante para quienes deseen profundizar en estos temas.