

*Un vehículo para integrar requisitos de soportabilidad en el diseño*

# El proceso de Ingeniería de Sistemas

**BENJAMIN S. BLANCHARD**  
*Professor Emeritus*  
*Certified Professional Logistician*

## RESUMEN

**L**a integración de requisitos de soportabilidad en el proceso de diseño de grandes sistemas (o para la reingeniería de sistemas existentes y en operación), no ha sido realizada satisfactoriamente en muchos proyectos en el pasado. Los resultados han sido caros, y muchos de los sistemas actualmente en uso ni cumplen las expectativas de sus usuarios, ni tienen una adecuada relación efectividad-coste en términos de su utilización y apoyo.

Una solución propuesta requiere la adecuada implantación del proceso de ingeniería de sistemas; esto es, un enfoque disciplinado, de arriba abajo, orientado al ciclo de vida, e integrado, para el desarrollo, producción y entrega de sistemas con la debida relación efectividad-coste para sus usuarios. Es a través de éste proceso la manera en que se pueden incluir adecuadamente los requisitos logísticos y de soportabilidad de forma oportuna y eficaz.

El objeto de este artículo es describir brevemente el proceso de ingeniería de sistemas como el enfoque deseable para la consecución de requisitos logísticos en el diseño.

## INTRODUCCIÓN

**L**a tendencia actual indica que, en general, los sistemas :

- (1) son de creciente complejidad, con la introducción de nuevas tecnologías en un entorno que cambia continuamente;
- (2) requieren períodos de tiempo cada vez mayores para su desarrollo y adquisición;
- (3) no cumplen las expectativas de los usuarios en términos de prestaciones y efectividad; y
- (4) se están volviendo más costosos desde un punto de vista del ciclo de vida.

Esto ocurre al tiempo que los recursos disminuyen y la competencia aumenta en todo el mundo.

Al tratar el tema de la efectividad-coste, la experiencia indica que una porción significativa del coste total de un sistema puede ser atribuida a la logística y a las actividades de apoyo y mantenimiento

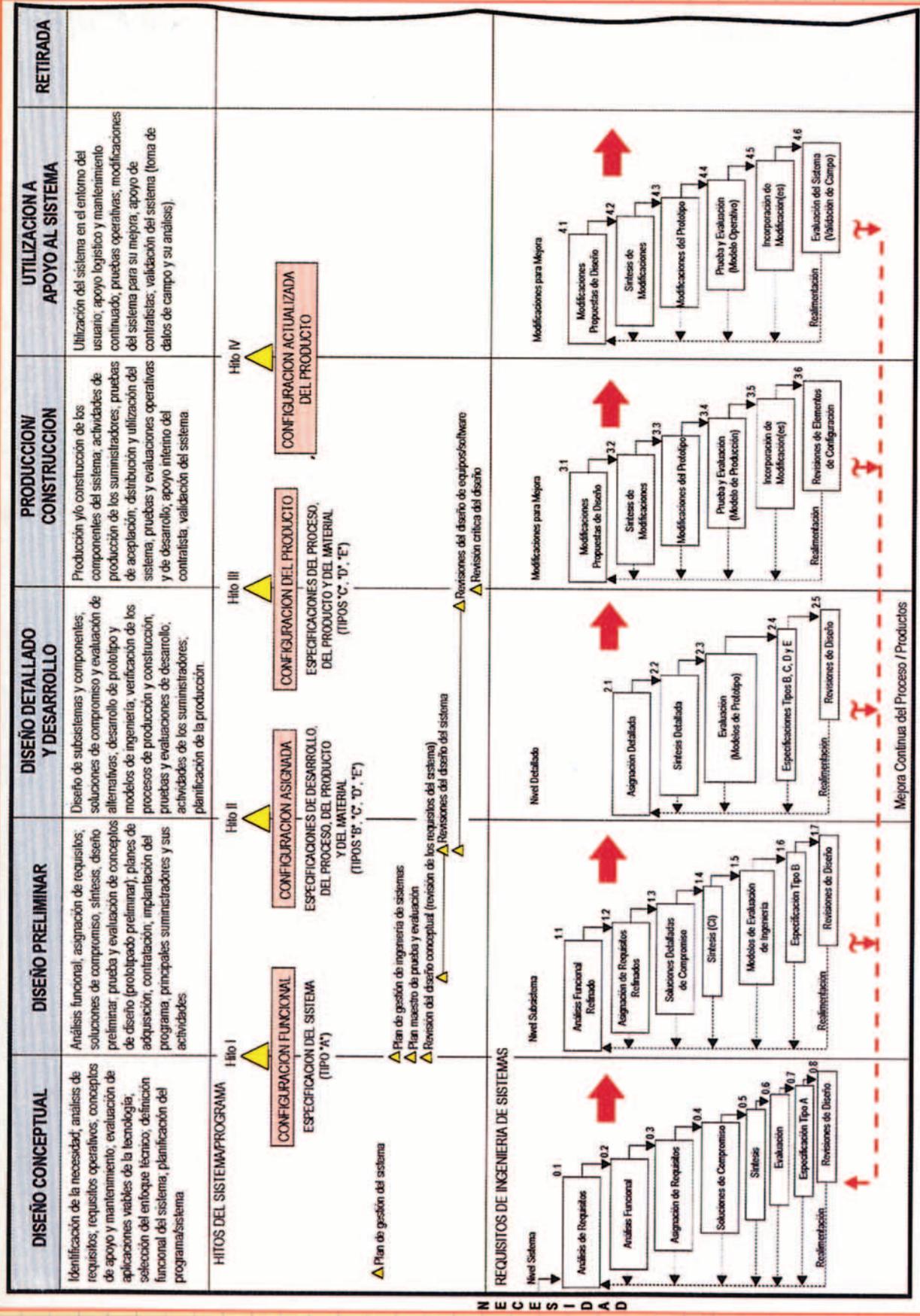
“aguas abajo” en el ciclo de vida del sistema. Más aún, al evaluar las relaciones “causa-efecto”, una parte sustancial de ese coste es el resultado directo de decisiones tomadas durante la planificación inicial y las etapas preliminares de diseño y desarrollo.

Esas decisiones iniciales relativas a la utilización de nuevas tecnologías en el diseño, la selección de componentes y materiales, la selección de un proceso de fabricación, la identificación de modelos de empaquetado de equipos, las políticas de mantenimiento y apoyo, las rutinas de diagnóstico, etc., tienen un gran impacto en el coste de operación del sistema y su posterior apoyo durante el ciclo de vida. En otras palabras, hay un gran “compromiso” con el coste del ciclo de vida en las etapas iniciales del desarrollo de los sistemas, y los costes de mantenimiento y apoyo de un sistema dado (que normalmente representan un gran porcentaje del total) pueden ser altamente influenciados por esas decisiones iniciales.

Por tanto, los diversos aspectos logísticos y de apoyo del sistema deben ser considerados desde el principio; esto es, la logística debe ser una de las principales consideraciones en el proceso inicial de ingeniería de sistemas.

Teniendo en cuenta lo anterior, hay una creciente necesidad de mejorar nuestras prácticas, no sólo en el desarrollo de nuevos sistemas, sino en la evaluación y reingeniería de sistemas actualmente en utilización. La mejor manera de alcanzarlo es a través de la adecuada implantación de conceptos y métodos de ingeniería de sistemas.

El proceso de ingeniería de sistemas constituye un enfoque disciplinado, de arriba abajo, orientado al ciclo de vida, e integrado, para el desarrollo, producción y entrega de sistemas con la debida relación efectividad-coste para sus usuarios. Requiere la oportuna integración en el proceso de diseño de consideraciones logísticas y de soportabilidad junto con las de prestaciones, fiabilidad, mantenibilidad, seguridad, ergonomía, manufacturabilidad, deshechabilidad, y factores relacionados.



- Figura 1 EL CICLO DE VIDA DEL SISTEMA ("CONFIGURACION") -

Adaptando los conceptos y métodos de ingeniería de sistemas desde el principio, es más fácil que el usuario final reciba un producto que no sólo tenga las prestaciones deseadas, sino que pueda ser apoyado de forma efectiva y eficaz a lo largo de su ciclo de vida previsto.

## UN MODELO GENÉRICO DEL PROCESO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

La Figura 1 muestra las principales fases de actividad, los principales hitos, las líneas de base de configuración y los pasos iterativos inherentes al proceso de ingeniería de sistemas. Esta figura sirve de marco de referencia y representa un proceso global en sí misma, incluyendo al proceso básico de ingeniería de sistemas, esto es, análisis de requisitos, análisis funcional, asignación de requisitos, etc. (bloques 0.1 a 0.8, etc.).

Según ello, una necesidad nueva o evolutiva significa un nuevo requisito del sistema, y son aplicables las fases básicas desde el diseño conceptual hasta la retirada de servicio. No se pretende relacionar los pasos de la Figura 1 con una escala de tiempo específica o con un determinado nivel de fi-

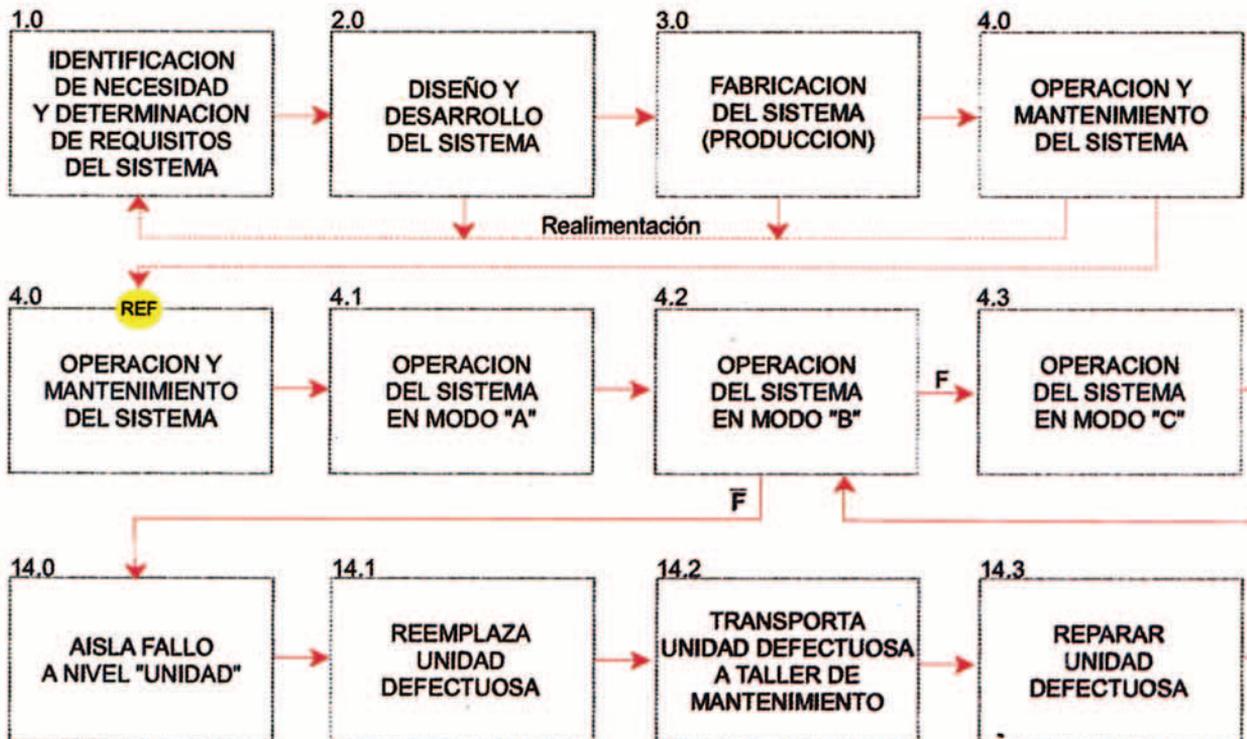
nanciación. Con independencia del tipo, tamaño y complejidad del sistema, hay un requisito de diseño conceptual (esto es, de incluir un análisis de requisitos), de esfuerzo preliminar de diseño, y así sucesivamente.

Más aún, para una máxima efectividad, los conceptos mostrados en la figura deben ser adecuadamente particularizados al sistema considerado.

Los pasos básicos del proceso de ingeniería de sistemas (Figura 1, bloques 0.1 a 0.8) son iterativos por naturaleza, proporcionando una definición de arriba abajo del sistema en términos funcionales, y luego a nivel subsistema y a niveles inferiores, según sea necesario.

Es importante en éste proceso la provisión continua de realimentación y acción correctiva, según se requiera. Tras la finalización del bloque 0.2 el sistema queda definido en términos funcionales, identificando los "que", desde la perspectiva de los requisitos. Estos "que" son traducidos a un conjunto aplicable de "como", a través de las actividades iterativas de asignación de requisitos, estudios de soluciones de compromiso, síntesis y evaluación. Es aquí donde se definen los requisitos iniciales a nivel sistema.

## DIAGRAMA SIMPLIFICADO DE FLUJO FUNCIONAL



- Figura 2 DESARROLLO DE REQUISITOS FUNCIONALES -



La definición funcional sirve de línea de base para la identificación de requisitos de recursos del sistema; esto es, la identificación de requisitos de equipos, software, personal, instalaciones, elementos de apoyo, datos, etc. Es en este punto, en las etapas preliminares de diseño, donde se especifica la identificación inicial de requisitos de apoyo.

Aunque este concepto no es único, la experiencia ha demostrado que este proceso ha sido "pobremente" implantado (si es que ha llegado a serlo) en el pasado, resultando en un enfoque de abajo-arriba al diseño, con el consiguiente desperdicio de recursos a largo plazo.

La Figura 2 muestra un diagrama simplificado de flujos funcionales que parte del bloque 0.2 de la Figura 1. Un flujo operativo abreviado (bloques 1.0 a 4.3) conduce a un flujo funcional de mantenimiento (bloques 14.0 a 14.3), y así sucesivamente. A través del desarrollo posterior se identifican las funciones logísticas junto con las funciones operativas.

La Figura 3 muestra la "explosión" de una función típica, conduciendo al diseño detallado y al desarrollo del sistema y de sus diversos componentes. Evaluando cada elemento funcional en términos de requisitos de entrada y salida, junto con las limitaciones externas impuestas (económicas, tecnológicas, políticas, sociales, etc.), pueden determinarse los recursos necesarios para desarrollar cada función.

Al revisar esos requisitos en conjunto, es posible comenzar a identificar los "como"; esto es, el hardware, el software, los recursos humanos, los datos, las instalaciones, los elementos de apoyo, y otros componentes del sistema, de forma integrada.

La Figura 4 muestra el enfoque empleado en describir los requisitos funcionales, así como la identificación de los recursos recomendados en la consecución de esas funciones.

De la identificación de un equipo, software, o requisito de recursos humanos específico, pueden derivarse ciclos adicionales de desarrollo, tal y como muestra la Figura 5. Cada uno deberá considerar la logística y el apoyo, con independencia de que se trate de equipos, software, o recursos humanos, instalaciones, o datos.

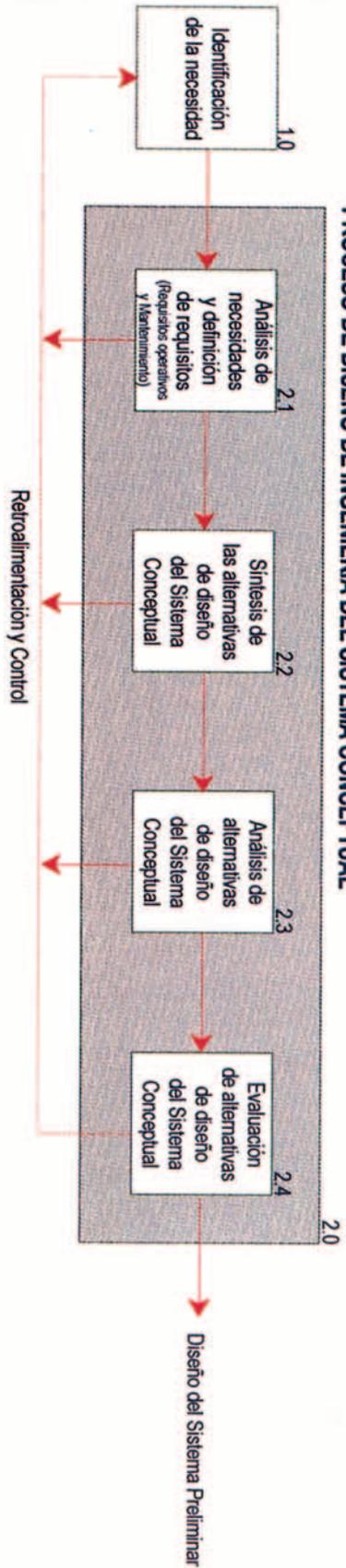
Existen muchas interfaces a través de las diferentes fases del ciclo de vida, y es esencial que esos elementos (y las actividades que apoyan el desarrollo de los componentes individuales) estén íntimamente integrados desde el principio. A menudo los diseñadores de hardware y software siguen sus respectivos caminos de forma aislada, y no se comunican hasta la fase final de integración y pruebas, cuando la incorporación de cambios es costosa.

Más aún, el elemento humano es con frecuencia dejado al margen, y no se tienen en cuenta los requisitos de apoyo logístico. Si queremos conservar los recursos en el entorno actual, es esencial implantar el proceso de ingeniería de sistemas y que los elementos de éstos estén debidamente integrados desde el principio.

La Figura 6 (una extensión de la Figura 5) enfatiza la evolución de arriba abajo del diseño del sistema, de la asignación de requisitos, de los criterios específicos de diseño aplicables a los diferentes niveles jerárquicos dentro de la estructura del sistema, y a las herramientas y métodos de diseño aplicables a medida que se progresa desde la definición inicial de una necesidad.

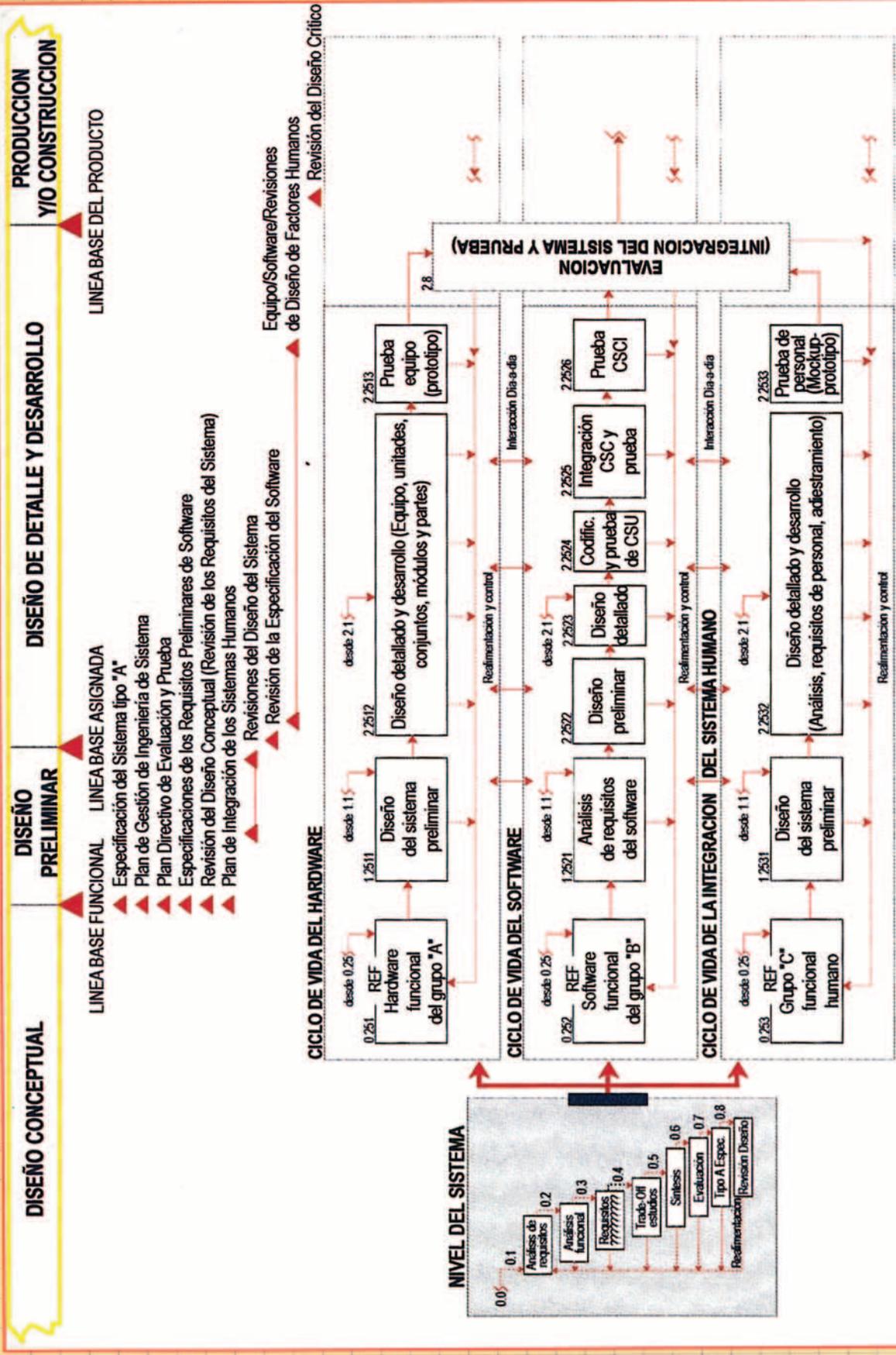
El objetivo es establecer el marco para la evaluación de recursos de requisitos a nivel sistema, nivel subsistema, nivel artículo de configuración, etc., a lo largo del ciclo de vida. Por ejemplo, un objetivo específico puede incluir el desarrollo de una estación de trabajo integrada de diseño (con las herramien-

**PROCESO DE DISEÑO DE INGENIERIA DEL SISTEMA CONCEPTUAL**

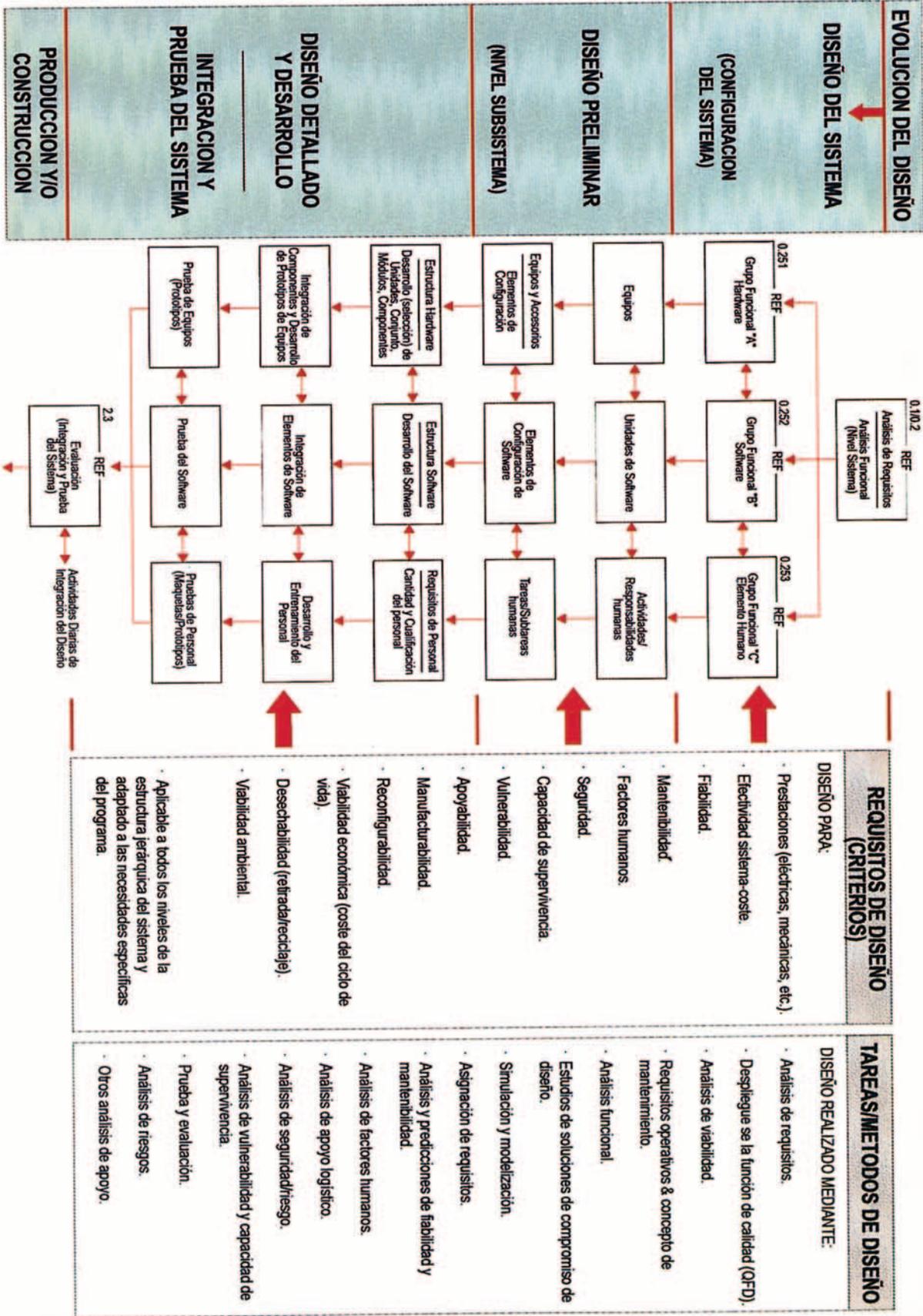


Nº Actividad	Descripción de la Actividad	Entradas requeridas	Salidas esperadas	Herramientas y Técnicas o "Mejores Prácticas"
10	Identificación de la necesidad	Estudios de cliente, elementos de mercado, embarque y servicio de sondes, estudios 7777 de mercado, investigación de producto.	Relación específica de necesidades cualitativas y cuantitativas respondiendo a la carencia actual. Se debe tener cuidado en establecer esta necesidad en términos funcionales.	Punto de referencia; análisis estadísticos de datos (e), datos recogidos como resultado de estudios y consolidados por embarque y servicio de sondes, etc.)
21	Análisis de necesidades y definición de requerimientos	Relación específica de necesidades cuantitativas y cualitativas expresadas en términos funcionales.	Factores cualitativos y cuantitativos pertinentes a niveles de prestación del sistema, distribución geográfica de productos, perfiles de utilización esperados, entorno del usuario/consumidor, ciclo de vida operativo, requisitos de efectividad, niveles de mantenimiento y apoyo, consideración de los elementos aplicables del apoyo logístico, entorno de apoyo, y etc.	Despliegue de la función de calidad (QFD); matriz de entrada y salida; chequeo de listado; valor de ingeniería; análisis de datos estadísticos; análisis de tendencia; análisis de matriz; análisis paramétricos; categorías varias de modelos analíticos y herramientas para estudios de simulación, transacciones, etc.
22	Síntesis de alternativas de diseño del Sistema Conceptual	Resultados de análisis de necesidades y proceso de definición de requisitos; estudios de investigación tecnológica; suministrar información.	Identificación y descripción de las alternativas de diseño del sistema candidato conceptual y aplicaciones tecnológicas.	Aproximación de la generación del concepto de Pugh; reunión imaginativa; analogía; comprobación de listas.
23	Análisis de las alternativas de diseño del Sistema Conceptual	Soluciones conceptuales de candidato y tecnologías; resultados de los análisis de necesidades y proceso de definición de requisitos.	Aproximación de la "bondad" de cada solución conceptual fiable relativa a los parámetros pertinentes, directos e indirectos. Esta bondad se podrá expresar como tasa numérica, medidas probabilísticas o medidas de distorsión.	Experimentación del sistema indirecto (e), simulación y modelaje matemático; análisis paramétrico; análisis de riesgos.
24	Evaluación de las alternativas de diseño del Sistema Conceptual	Resultados de las tareas de análisis en forma de conjunto de alternativas de diseño del sistema conceptual de viabilidad.	Listado simple o corto de los diseños del sistema conceptual preferidos. Además, la "sensación" de como la(s) aproximación(es) preferible(s) se relaciona(n) mucho mejor con las otras alternativas de fiabilidad.	Enfoque paramétrico dependiente del diseño; generación de números híbridos para representar la "bondad" de la solución candidata; presentación de la evaluación del diseño del sistema conceptual.

- Figura 4 ENTRADAS Y SALIDAS FUNCIONALES, REQUISITOS DE RECURSO -



- Figura 5 EVOLUCION DEL HARDWARE, SOFTWARE Y REQUISITOS HUMANOS -



- Figura 6 LA APLICACION DE REQUISITOS DE DISEÑO A LA JERARQUIA DEL SISTEMA -

DISEÑO CONCEPTUAL	DISEÑO PRELIMINAR	DISEÑO DETALLADO Y DESARROLLO	PRODUCCIÓN/ CONSTRUCCIÓN	OPERACIÓN, MANTENIMIENTO Y APOYO DEL SISTEMA	RETIRADA DEL SISTEMA
<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación y gestión logística inicial - plan preliminar de apoyo logístico integrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación y gestión logística - plan de apoyo logístico integrado</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación y gestión logística (requisitos de fabricación/consumidor)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación y gestión logística</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación y gestión logística (requisitos del cliente)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Planificación logística y gestión</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de requisitos (estudio de necesidades del consumidor)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis funcional</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Actividades de participación en el diseño y de apoyo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fabricación, adquisición y/o construcción de elementos principales del sistema (flujo de materiales, control del inventario, transporte, distribución)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mantener y apoyar el sistema en emplazamientos operativos de campo (actividades del consumidor)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Retirada progresiva, reciclaje y/o desecho de materiales</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de viabilidad (oportunidades técnicas)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Asignación de requisitos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de apoyo logístico (compensaciones de diseño, análisis, predicciones, definición de los requisitos de apoyo del sistema)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Fabricación, adquisición y/o construcción de elementos de apoyo del sistema (flujo de materiales, control del inventario, transporte, distribución)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Servicio al cliente (servicios y materiales proporcionados por el fabricante)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Elementos logísticos, según sea necesario</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Requisitos operativos del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Actividades de participación en el diseño y apoyo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registro de análisis de apoyo logístico (datos logísticos/de diseño)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modificación del sistema según sea necesario</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad de recogida de datos, análisis, evaluación y realimentación, (actualizar registro de análisis de apoyo logístico según sea necesario)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Capacidad de recogida, análisis y realimentación de datos</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>Concepto de mantenimiento del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de apoyo logístico (compromisos de diseño, análisis, predicciones, definición de los requisitos de apoyo al sistema)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Especificaciones de desarrollo, de producto, de proceso y de material (Tipos "B", "C", "D", "E")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registro de análisis de apoyo logístico (revisión de datos logísticos - evaluación de soportabilidad)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Modificaciones del sistema</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis funcional (nivel de sistema)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Registro de análisis de apoyo logístico (datos logísticos/de diseño)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aprovisionamiento, obtención y adquisición de elementos de apoyo del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prueba y evaluación del sistema</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Análisis de apoyo logístico (criterios de diseño)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Especificaciones de desarrollo, de producto, de proceso (Tipos "B", "C", "D")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prueba y evaluación del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Servicio al cliente (instalación en su ubicación operativa, verificación, servicios de campo, y apoyo)</li> </ul>		
<ul style="list-style-type: none"> <li>Especificación del sistema (Tipo "A")</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prueba de desarrollo y evaluación de componentes del sistema</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Equipos/software revisiones críticas del diseño</li> </ul>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisión de diseño (línea base conceptual funcional)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Revisiones del diseño del sistema (línea base asignada)</li> </ul>				

- Figura 7 ACTIVIDADES DEL PROGRAMA LOGÍSTICO -

tas informáticas adecuadas) para asistir en la consecución de tareas de diseño conceptual, de diseño preliminar, y finalmente en la evaluación de una configuración dada del sistema.

Hay muchas herramientas informáticas disponibles en el mercado que pueden ayudar a la realización de los diferentes tipos de análisis. Cada una fue desarrollada en una base relativamente "aislada" o "independiente" en términos de una plataforma determinada y requisitos de entrada de datos y de interfaz.

En general, los modelos no se comunican unos con otros y, por tanto, no pueden ser integrados de forma efectiva en una estación de trabajo. Además, muchos son demasiado complicados de usar en las fases preliminares de diseño y desarrollo del sistema.

Por tanto, un objetivo básico para el futuro es un enfoque de arriba abajo no sólo en el desarrollo de los sistemas y de sus componentes principales, sino también en el desarrollo y en la aplicación de los modelos y herramientas adecuados para facilitar el proceso de diseño. Esto incluye la debida integración de esas herramientas, según se requiera, en la realización de los análisis de apoyo logístico (por ejemplo, modelos de predicción de fiabilidad y mantenibilidad, análisis de nivel de reparabilidad, análisis de tareas de mantenimiento, análisis del coste del ciclo de vida, etc.).

## LA LOGÍSTICA EN EL PROCESO DE INGENIERÍA DE SISTEMAS

La logística, tal y como se emplea en este contexto, constituye un enfoque de ciclo de vida a la distribución y apoyo continuado de sistemas (en comparación con la logística industrial que trata sólo de productos consumibles).

Como resultado de las relaciones causa-efecto mencionadas anteriormente, deben ser implantados los conceptos y métodos de apoyo logístico integrado. Esto requiere que se tengan en cuenta las oportunas consideraciones logísticas y de apoyo al sistema desde el comienzo del proceso de diseño.

Con relación a la Figura 7, las consideraciones logísticas deben ser inherentes a la realización de análisis preliminares de viabilidad durante la selección de posibles aplicaciones tecnológicas, en el desarrollo del concepto de mantenimiento a partir de los requisitos operativos, y en la realización de estudios preliminares de soluciones de compromiso a través del análisis de apoyo logístico. Las tareas especificadas de diseño conceptual, preliminar y de detalle son inherentes al proceso de ingeniería de sistemas ilustrado en la Figura 1.

Aunque estas relaciones han sido reconocidas en el sector defensa a través del desarrollo y la aplicación de estándares tales como la MIL-STD-1388, el enfoque sistémico a la logística no ha sido bien lle-

vado a cabo (si es que se ha hecho)<sup>3</sup>. En general, la logística ha sido considerada "aguas abajo" en el ciclo de vida del sistema, "después-de" bajo una perspectiva de diseño, y ha sido considerada ¡costosa!

El énfasis primordial se ha puesto en el desarrollo de datos, esto es, en la generación del registro de datos del análisis de apoyo logístico según la MIL-STD-1388-2B sin que se hayan definido debidamente los requisitos de ingeniería de sistemas según la MIL-STD-1388-1A.

En la opinión de este autor, hay una falta general de entendimiento del "proceso de diseño" dentro de la comunidad logística, ya que muchos de los responsables de la implantación de ese estándar nunca se han visto involucrados en diseño, ni son capaces de "comunicarse" con los diseñadores. Al mismo tiempo, aquellos involucrados en la implantación de los requisitos de ingeniería de sistemas no están interesados en los aspectos "aguas abajo" de la logística. Por lo tanto, seguimos desarrollando y produciendo sistemas que no son muy efectivos y que son caros de utilizar y mantener.

Con relación al futuro, a pesar de que se han reconocido algunas de las relaciones básicas entre logística e ingeniería de sistemas, no han sido muy bien implantadas. Se cree que el mayor potencial de mejora en el futuro puede alcanzarse a través de dar un énfasis adicional a los requisitos logísticos preliminares y en la inclusión de características de soportabilidad en el diseño del sistema, así como mediante la debida integración de esos requisitos a través del proceso de ingeniería de sistemas aquí descrito.

## RESUMEN

El proceso de ingeniería de sistemas, si se implanta debidamente, es un enfoque efectivo y eficaz que puede ser aplicado en el diseño y desarrollo de nuevos sistemas (o en la reingeniería de sistemas actualmente en uso).

La debida implantación de un programa de logística ciertamente incluye un segmento de actividad de "ingeniería logística", y los requisitos de soportabilidad deben ser considerados como parte inherente del proceso de ingeniería de sistemas. Mediante la integración en este proceso de los aspectos de la logística relacionados con el diseño (por ejemplo, soportabilidad), el usuario "final" debería recibir una configuración de sistema que tenga la adecuada relación efectividad/coste, tanto en términos de su utilización como de su apoyo.

Aunque la implantación de este enfoque global no se ha materializado de forma plena en el pasado, nunca antes ha sido más importante su necesidad que ahora, cuando la competencia es tan grande y los recursos son tan limitados. ■