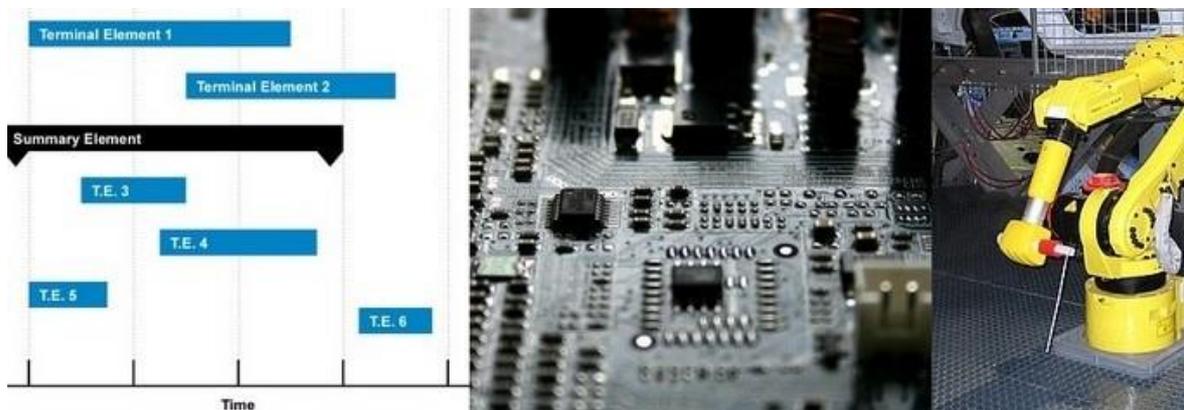


Sistemas de sistemas



Alberto Sols
Ingeniero Naval
Director de la Escuela de Arquitectura,
Ingeniería y Diseño (U. Europea de Madrid)
Academia de las Ciencias y las Artes Militares
Sección de Prospectiva de la Tecnología Militar

Los sistemas del *homo faber*

El censor romano Appius Claudius Caecus escribió hace 2.300 años su serie de *sententiae*, incluida la célebre *faber est suae quisque fortunae*. Se refería al ser humano como el *homo faber*, el que fabrica. La especie humana se caracteriza por su capacidad de concebir, fabricar y utilizar artefactos, que han evolucionado desde primitivas herramientas y utensilios, a familias de sistemas de extraordinaria complejidad. El ser humano diseña y desarrolla sistemas para obtener capacidades deseadas y/o satisfacer problemas detectados. La sociedad se enfrenta a retos cada vez más formidables y como consecuencia los sistemas son, cada vez, más complejos.

La ingeniería de sistemas es el marco interdisciplinar que permite abordar el análisis de problemas o retos para diseñar sistemas que satisfagan las necesidades de los clientes y del resto de grupos de interés (*stakeholders*), de manera eficaz y eficiente a lo largo de toda la vida operativa de los sistemas, incluyendo su retirada de servicio. El enfoque sistémico caracteriza por la visión de conjunto, materializado en 3 dimensiones: (1) el ciclo de vida, ya que se considera desde el análisis de la necesidad u oportunidad, hasta la retirada de servicio del sistema concebido para satisfacerla; (2) los diferentes intereses, desde el usuario al resto de grupos de interés (*stakeholders*) y (3) las disciplinas. El marco de ingeniería de sistemas, que permite analizar oportunidades detectadas o necesidades identificadas y diseñar los sistemas que las satisfagan de manera eficaz y eficiente, se muestra en la figura 1.

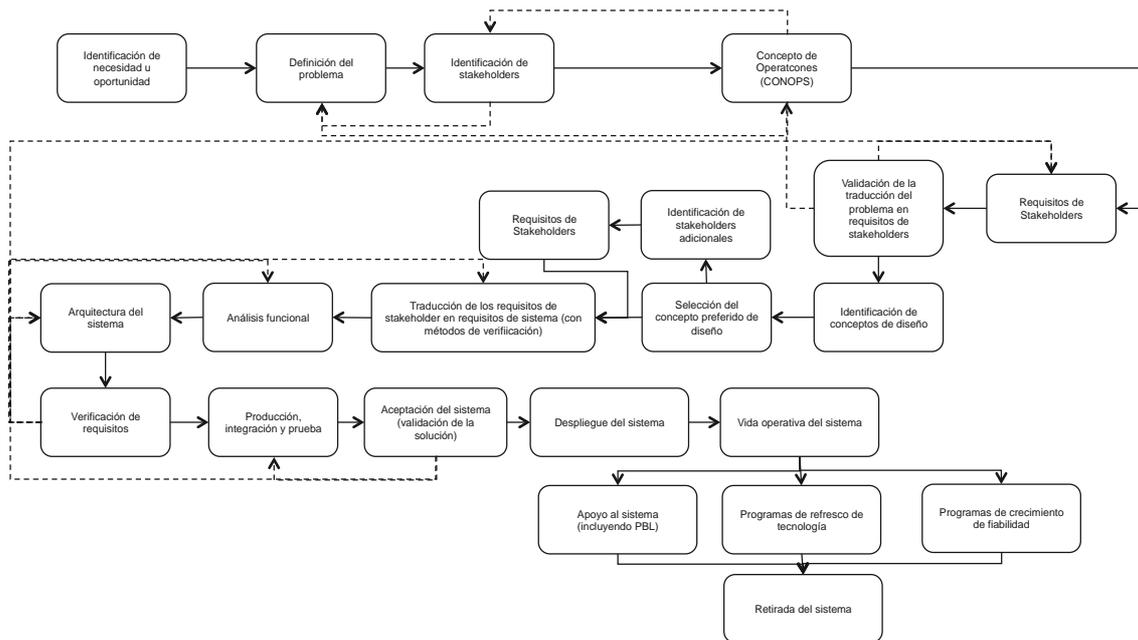


Figura 1 – El marco de ingeniería de sistemas

Familias de sistemas

Hace unas décadas se tomó conciencia de que algunos sistemas que habían sido desarrollados de forma totalmente independiente podían interactuar conjuntamente, dando lugar a unas capacidades emergentes. Esas capacidades no las proporcionaba ningún sistema de manera aislada, pero el uso conjunto de varios sistemas permitía a los usuarios de alguno de ellos realizar cosas de que otra manera no podría. A ese conjunto de sistemas se le denominó sistema de sistemas. Por otro lado, algunas necesidades o problemas era de tal envergadura que no había manera de satisfacerlas con un único sistema, por lo que se diseñaban y desarrollaban (o se adquirían) varios, de forma que conjuntamente aportaran las capacidades requeridas, aunque no interactuaran entre sí. A estos conjuntos se los denominó federaciones de sistemas.

Los sistemas de sistemas y las federaciones de sistemas son familias de sistemas, cada uno de los cuales ha sido desarrollado aplicando los principios y métodos de la ingeniería de sistemas. Ambas familias poseen cosas en común, y es que sus sistemas miembros han sido diseñados y desarrollados siguiendo el enfoque sistémico, al tiempo que se diferencian en otros aspectos. Todos los miembros de una federación de sistemas tienen un objetivo o propósito similar, aunque no interactúan entre sí; por el contrario, los miembros de un sistema de sistemas persiguen satisfacer objetivos o necesidades diferentes, pero interactúan dando lugar a propiedades emergentes. La figura 2 muestra el concepto de sistema de sistemas.

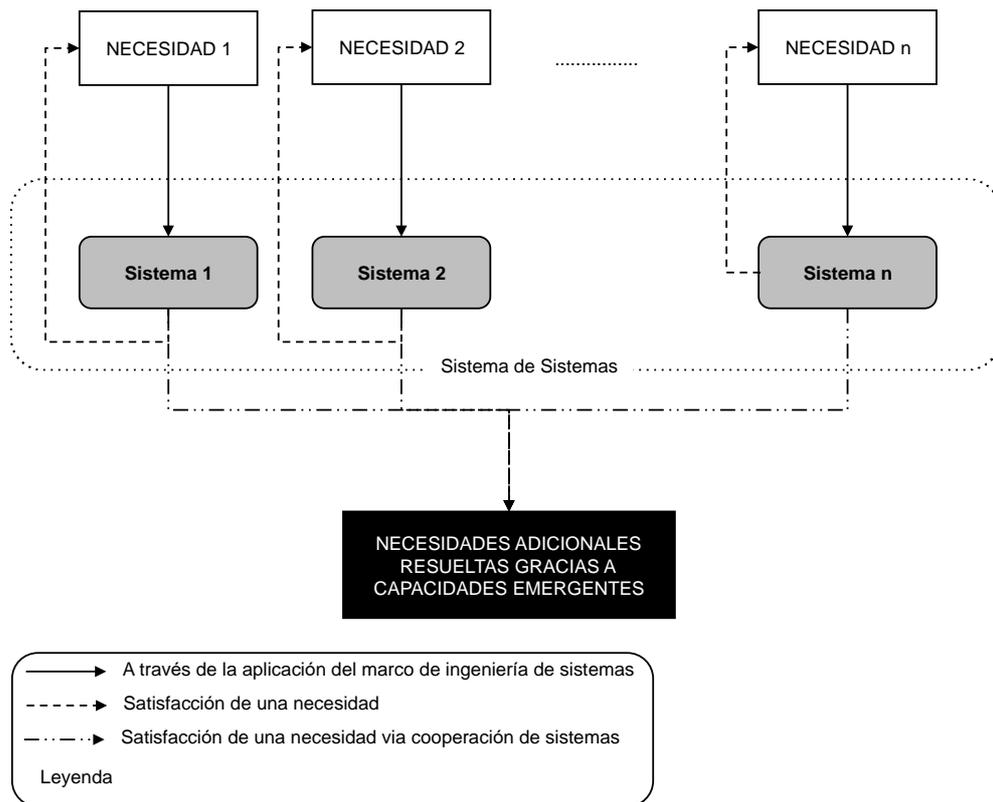


Figura 2 – Sistema de Sistemas

Sistemas de sistemas

Con frecuencia se usa el término sistema de sistemas para referirse a sistemas que son, sin duda, complejos, pero que no son sistemas de sistemas conforme a la definición adoptada. Todo sistema que haya sido diseñado para satisfacer un determinado fin es un sistema, aunque sea capaz de llevar a cabo distintos perfiles de uso gracias a su arquitectura y a los subsistemas que lo integran. Existen diferentes tipos de sistemas de sistemas (en inglés, *Systems of Systems*, SoS), dependiendo de su desarrollo, propiedad y gestión:

Virtual. Carece de una autoridad central de gestión y de un propósito común aceptado. Emerge un comportamiento a nivel superior al sistema, pero son necesarios mecanismos relativamente invisibles para mantener su operatividad. Un ejemplo de SoS virtual es un sistema de código abierto, como por ejemplo LINUX. Las diferentes funcionalidades que se le van añadiendo hacen el sistema más capaz, pero no hay una autoridad gestora ni hay planificación sobre futuros desarrollos. La capacidad emergente es la derivada de las nuevas rutinas que se incorporan al sistema, dando lugar al ser usadas con otras existentes a nuevas funcionalidades.

Colaborativo. No existe una autoridad central de gestión. Los sistemas interactúan entre sí, de manera más o menos explícita, de cara a un objetivo común. Un ejemplo de SoS

colaborativo es el que permite a los usuarios de transporte público de una gran ciudad saber cuándo llegará el próximo autobús de una determinada línea a una determinada parada. La flota de autobuses es un sistema; otro lo es el *Global Positioning System* (GPS), o cualquier sistema análogo de geolocalización; otro sistema es un mapa digital; y finalmente el último sistema es una aplicación para teléfonos móviles (*smartphones*). Al saberse la posición de cada autobús y las condiciones de tráfico, es posible predecir con razonable precisión el tiempo estimado de llegada a una determinada parada. Esa capacidad de estimación es la capacidad emergente que experimentan los usuarios del transporte público.

Reconocido. Tiene objetivos definidos y un gestor designado. Sin embargo, los sistemas integrantes conservan su independencia, objetivos, financiación, desarrollo y estructura de apoyo. Los cambios en los sistemas se basan en la colaboración entre cada sistema y el sistema de sistemas. El programa IRIS de Inmarsat para mejorar la gestión del tráfico aéreo europeo es un ejemplo de SoS reconocido. Los países adheridos al programa modernizarán sus sistemas de manera que se asegure su compatibilidad y su capacidad de permitir comunicaciones de enlace de datos por satélite de manera segura y de gran ancho de banda. Con ello se desplegarán más comunicaciones digitales entre controladores y pilotos, lo que redundará en una gestión más segura y eficaz del tráfico aéreo en Europa. Cada país seguirá siendo dueño de su sistema y responsable de su operación y mantenimiento, pero los sistemas son desarrollados conforme al acuerdo de objetivo final perseguido.

Dirigido. El sistema de sistemas es desarrollado y gestionado para cumplir propósitos definidos. La gestión es centralizada durante la vida de los sistemas. Los sistemas integrantes mantienen la capacidad de operar independientemente, pero su modo operativo normal está subordinado al propósito general y a la autoridad gestora. El programa *Future Combat System* de los Estados Unidos es un ejemplo de SoS dirigido. Una autoridad central, el Departamento de Defensa, identifica las necesidades a ser satisfechas y para ello define el conjunto de sistemas que han de ser diseñados y desarrollados. Esos sistemas tendrán autonomía en su operación, pero habrán sido concebidos de manera que al actuar conjuntamente generen las adecuadas capacidades emergentes. La gestión del SoS es centralizada durante el ciclo de vida completo de los sistemas integrantes.

Retos y riesgos de los sistemas de sistemas

Los diferentes tipos de SoS presentan extraordinarias oportunidades, pero no están exentos de sus propios retos y riesgos. Al analizar una necesidad u oportunidad y plantearse el diseño de un sistema hay que pensar en qué medida deberá ser autosuficiente el sistema, o tomará prestadas de otros sistemas existentes ciertas capacidades. Pero igual que hay capacidades emergentes, puede haber capacidades en recesión; de forma transitoria o permanente, intencionada o no, puede que otros sistemas de la familia no estén operativos o no presten sus capacidades al resto. La posibilidad de experimentar una recesión de capacidades es un aspecto a ser especialmente considerado. Además, si para valorar la efectividad de los

sistemas no existe un conjunto de métricas suficientemente completo y estandarizado, son mayores aún las carencias de métricas adecuadas para medir la efectividad de los SoS.

La brecha de capacidades que experimentan los sistemas durante su vida operativa presenta retos aún más importantes cuando se trata de miembros de un SoS. La reducción de capacidades de algunos sistemas tendrá repercusión en las capacidades emergentes disfrutadas, pero salvo que la gestión de los sistemas sea centralizada no podrá asegurarse que se den las adecuadas respuestas para reducir esas brechas. Iniciativas como la logística basada en las prestaciones y los programas de transferencia de tecnología ayudan a mitigar la brecha de capacidades, pero puede que sean las brechas experimentadas por otros sistemas de la familia, operados por otras organizaciones, las que tengan un impacto menos mitigable.

Por otro lado, vivimos un mundo cada vez más conectado. Estamos en la cuarta revolución industrial, conocida como Industria 4.0. La digitalización, la hiperconectividad, internet de las cosas y la existencia de los llamados gemelos digitales, entre otros, confieren aún más importancia a la ciberseguridad. Diseñar SoS dirigidos, o concebir sistemas que vayan a formar parte de algún otro tipo de SoS, requiere un análisis profundo tanto de las ventajas que la familia de sistemas puede aportar, como de los esfuerzos, retos y riesgos que comportará.

Una reflexión final

La complejidad de los nuevos sistemas es proporcional a los problemas y retos cada vez más complejos que es preciso abordar. La visión de conjunto de la ingeniería de sistemas es imprescindible. Es irrenunciable una formación rigurosa en ingeniería de sistemas y una experiencia amplia en su aplicación para afrontar con éxito la resolución de esos problemas y retos. No sólo se requiere una sólida formación técnica. Los profesionales del conocimiento añadimos valor en función de nuestra capacidad de analizar y entender situaciones complejas, así como de desarrollar las soluciones necesitadas. Por eso hace falta, cada vez más, que seamos nuevos profesionales del Renacimiento. Tenemos que unir a la rigurosa formación técnica el adecuado conocimiento de temas socioculturales, económicos, legales, medioambientales, etc., para poder tomar parte en, e incluso dirigir, los equipos de profesionales necesarios para el exitoso desarrollo y operación de sistemas de sistemas.