



The art and science of Systems Engineering

El arte y la ciencia de la Ingeniería de Sistemas

Jerome Longrew¹, Martina Huelles², Charles Xionak³

NASA. [Jelongrew\(AT\)grc.nasa.gov](mailto:Jelongrew(AT)grc.nasa.gov)¹, [Mahuelles\(AT\)mail.hq.nasa.gov](mailto:Mahuelles(AT)mail.hq.nasa.gov)², [Chxionak\(AT\)mail.arc.nasa.gov](mailto:Chxionak(AT)mail.arc.nasa.gov)³

INFORMACIÓN DEL ARTÍCULO

Tipo

Investigación

Historia

Recibido: 17-10-2014

Correcciones: 22-11-2014

Aceptado: 12-12-2014

Keywords

Skills, abilities, capabilities, systems engineer, curricula.

Palabras clave

Habilidades, destrezas, capacidades, ingeniero de sistemas, plan de estudios.

ABSTRACT

In this work are collected years of experience and the work of systems engineering, and debates centered in the industry leadership, of engineer and instructors around the world. A recurrent issue in this experiences and discussions is that community used a lot of terms and titles more diffused with the aim of achieve an agreement toward a common comprehension of this area of knowledge. Besides, it does not matter how are divided the functions and responsibilities among teams, the obligatoriness is ensure that this be clears and are run as a functional whole. The goal is provide a wide definition of systems engineer, described the characteristics of behave of highly effective engineered, and make explicit the expectations of the same.

RESUMEN

En este trabajo se recopilan años de experiencia y de trabajo en Ingeniería de Sistemas, y de debates centrados en el liderazgo en la industria, de ingenieros e instructores en todo el mundo. Un tema recurrente en estas experiencias y discusiones es que en la comunidad se utilizan muchas y diversas definiciones y descripciones para referirse a esta ingeniería. Aquí se utilizan los términos y títulos más difundidos con el objetivo de lograr un acuerdo hacia una comprensión común de esta área del conocimiento. Además, no importa cómo se dividan las funciones y responsabilidades entre los equipos, la obligatoriedad es asegurarse de que sean claras y que se ejecutan como un todo funcional. El objetivo es proporcionar una definición amplia de la Ingeniería de Sistemas, describir las características de comportamiento de los ingenieros altamente eficaces, y hacer explícitas las expectativas de los mismos.

© 2014 IAI. All rights reserved.

1. Introducción

La Ingeniería de Sistemas es tanto arte como ciencia, y se puede comparar con una sinfónica y su capacidad para interpretar una sinfonía. La mayoría de personas entiende lo que es la música, pero no todas pueden tocar un instrumento, porque cada uno requiere un nivel diferente de experiencia y habilidad. Algunos músicos pasan toda su carrera dominando un sólo instrumento, lo cual es bueno, porque cada uno tiene que ser bien interpretado. Pero la música sofisticada involucra muchos instrumentos diferentes tocados al unísono. En función de lo bien que se armonicen pueden producir música hermosa o una terrible cacofonía. Se puede pensar en una sinfonía como un sistema. Los músicos aplican la ciencia de la música, es decir, siguen el proceso de traducir las notas en una página para tocar sus instrumentos. Pero el director de la orquesta, el maestro, debe llevarlos a conectar el proceso armónico, es decir, el *arte*, para crear buena música. Los maestros hacen mucho más que mantener el ritmo:

- Conocen y comprenden música –cuestiones como el tono, el ritmo, la dinámica, y cualidades sónicas–, así

como las capacidades de los diversos instrumentos y músicos.

- Son necesarios una vez que la orquesta alcanza un determinado tamaño y complejidad.
- Típicamente dominan uno o más instrumentos musicales.
- Puede ser compositores.
- Seleccionan y dan forma a la música que reproduce una orquesta.
- Interpretan la música de un compositor a la luz de la audiencia.
- Se esfuerzan por mantener la integridad de las intenciones del compositor.
- Organizan y dirigen a los músicos.
- Son responsables del éxito de la función.

Por su parte, un buen ingeniero de sistemas entiende completamente y aplica el arte del liderazgo, y tiene la experiencia, la habilidad, y la capacidad suficientes para ganarse el título de *líder* de su equipo. El ingeniero de sistemas es como el maestro, quien sabe cómo debe sonar la música (el aspecto y la función de un diseño), y que tiene

las habilidades para lograr que un equipo alcance el sonido deseado (que cumpla con los requisitos del sistema). Además, los ingenieros de sistemas:

- Conocen los fundamentos de las matemáticas, la física, y otras ciencias pertinentes, así como las capacidades de diversas personas y disciplinas.
- Dominan una disciplina técnica y conocen de otras tantas.
- Entienden el final del proyecto y los objetivos generales de la empresa.
- Crean una visión y un enfoque para la consecución de los objetivos.
- Pueden ser arquitectos o diseñadores.
- Seleccionan y dan forma a las cuestiones técnicas que abordarán los equipos multidisciplinarios.
- A menudo deben interpretar y comunicar los objetivos, requisitos, arquitectura del sistema, y el diseño.
- Son responsables de la integridad técnica del diseño.
- Organizan y dirigen equipos multidisciplinarios.
- Son responsables de la entrega exitosa de un producto o servicio complejo.

Las similitudes entre los *maestros* y los *ingenieros de sistemas* son útiles para describir las características y capacidades de comportamiento deseadas de estos últimos.

La ingeniería de sistemas es el arte y la ciencia de desarrollar un sistema funcional que cumpla con los requisitos dentro de las restricciones impuestas. Esta definición es independiente de la escala, pero en este artículo se centra en el desarrollo de sistemas complejos, como aviones, naves espaciales, centrales eléctricas, y redes informáticas. La ingeniería de sistemas es holística e integradora; incorpora y equilibra las contribuciones de la ingeniería estructural, mecánica, eléctrica, de software, de seguridad de sistemas, y energía, además de muchas otras disciplinas para producir un todo coherente. La ingeniería de sistemas trata acerca de compensaciones y compromisos, y más de las generalizaciones que de las especializaciones. La ingeniería de sistemas no trata sólo acerca de los detalles de los requisitos y las interfaces entre los sub-sistemas. Por supuesto, estos detalles son importantes de la misma manera que la contabilidad exacta es importante para el director financiero de una organización, pero la contabilidad no distingue entre un buen plan financiero y uno malo, ni ayuda a mejorarlo. Del mismo modo, un adecuado control de interfaces y requisitos es necesario para una buena ingeniería de sistemas, pero ningún nivel de atención a estos asuntos puede mejorar un diseño pobre. La ingeniería de sistemas trata, ante todo, de conseguir un diseño correcto, y luego del mantenimiento y mejoramiento de su integridad técnica, así como de la gestión de la complejidad aplicando procesos adecuados para lograrlo. Las interfaces en un diseño se definen para minimizar las interacciones no-deseadas y para simplificar el desarrollo y las operaciones, para luego documentar y controlar el diseño. Ni en el diseño más grande del mundo inadecuadamente implementado –no uno mal diseñado, brillantemente implementado–, vale la pena definirlos.

Los principios de la ingeniería de sistemas se aplican a todos los niveles. Por ejemplo, los ingenieros que están desarrollando un sistema de aviación deben aplicar y definir un diseño y una interfaz creativos para lograr sus objetivos. Actividades similares son esenciales para la arquitectura, el diseño, y el desarrollo de elementos y subsistemas a lo amplio del espectro de los sistemas complejos y multidisciplinarios. En su presentación de 2007, Mike Griffin [1] describe cómo la complejidad de los sistemas aeroespaciales de hoy y las formas en que fallan han llevado a la ramificación de la industria. En tal sentido, se ha hecho necesario dividir la ingeniería de sistemas en dos campos operativos: 1) dirección técnica, y 2) administración de sistemas. El primero se centra en el diseño técnico del sistema y en la integridad técnica durante todo su ciclo de vida, mientras que el segundo se centra en administrar la complejidad asociada al desarrollo de procesos con muchas disciplinas técnicas, múltiples organizaciones, y cientos o miles de personas participando en una actividad altamente técnica.

El liderazgo técnico, el *arte* de la ingeniería de sistemas, equilibra el amplio conocimiento técnico del dominio, el instinto de la ingeniería, la resolución de problemas, la creatividad, el liderazgo, y la comunicación para desarrollar nuevos sistemas. La complejidad del sistema y la gravedad de sus limitaciones –no sólo su tamaño– es lo que impulsa la necesidad de esta ingeniería. Los sistemas de muchas empresas de hoy a menudo son grandes y complejos, por lo que requieren ingenieros de sistemas para trabajar en equipo con técnicos y especialistas de otras profesionales, con el objetivo de mantener y mejorar la integridad técnica de los sistemas. Y para lograr el éxito todas las personas involucradas deben desarrollar y aplicar creatividad y conocimiento. Por lo tanto, la capacidad de liderazgo y de comunicación a menudo es tan importante como la agudeza técnica y la creatividad [2]. Esta parte de la ingeniería de sistemas trata acerca de hacer el trabajo correcto. Para grandes sistemas complejos existen literalmente millones de maneras de no lograr los objetivos, aun después de haber definido el sistema correcto. Para trabajar todos los detalles completa y consistentemente es crucial asegurar que los diseños y las actividades técnicas de todas las personas y organizaciones se administren adecuadamente, para lo que el arte no es suficiente.

Por su parte, la administración de sistemas es la *ciencia* de la ingeniería de sistemas. Su enfoque se orienta a la administración rigurosa y eficientemente del desarrollo y el funcionamiento de los sistemas complejos. Una administración eficaz requiere la aplicación de un enfoque sistemático y disciplinado de ingeniería, que sea cuantificable, recursivo, repetible, y demostrable [3]. Aquí el énfasis está en la capacidad organizacional, los procesos, y la persistencia. La definición y el control de procesos es esencial para una implementación eficaz, eficiente, y consistente. Exigen una clara comprensión y comunicación de los objetivos y la vigilancia suficiente para asegurar que todas las tareas apoyen directamente los objetivos. La administración de sistemas se aplica para desarrollar, operar, y mantener sistemas integrados a lo largo de un

proyecto o ciclo de vida de un programa, y puede extenderse por décadas. Dado que el ciclo de vida puede exceder la memoria de las personas involucradas en el desarrollo, es fundamental documentar la información esencial. Para tener éxito, hay que mezclar el liderazgo técnico y la administración de sistemas en toda la ingeniería de sistemas.

2. Alcances de la Ingeniería de Sistemas

Desde finales de la década de 1980, muchas organizaciones gubernamentales e industriales pasaron de una cultura de liderazgo técnico (*arte*) a una de administración de sistemas (*ciencia*). La historia ha demostrado que muchos proyectos dominados por una sola de estas culturas sufren malas y significativas consecuencias [1]. Las organizaciones que se centran principalmente en la administración de sistemas a menudo crean productos que no cumplen los objetivos de los interesados, o no son rentables. Frecuentemente, el proceso se convierte en un fin en sí mismo por lo que frecuente se experimenta un parálisis. Por otro lado, las organizaciones que se centran únicamente en cuestiones técnicas a menudo crean productos o servicios que son inoperables, o sufren de falta de coordinación, y se vuelven demasiado costosos o se retrasa su entrada en utilidad [4].

Para lograr éxito en estos procesos es necesario identificar y formar ingenieros de sistemas altamente competentes, tanto en el liderazgo técnico como en la administración de sistemas. Es por eso que el objetivo debe ser desarrollar o potencializar las capacidades, habilidades y destrezas del estudiante para que se capacite como un ingeniero de sistemas completo, que encarne el arte y la ciencia de la ingeniería de sistemas en todas las áreas de su desempeño profesional. Porque en cualquier proyecto es fundamental que esta ingeniería se pueda realizar bien durante todo su ciclo de vida. El alcance, los roles, y las responsabilidades asociados de un ingeniero de sistemas en un proyecto son a menudo negociados con el director del mismo. El alcance de la ingeniería de sistemas y de las actividades en las que el ingeniero es a la vez responsable y por las cuales rinde cuentas deben ser entendidas y documentadas al comienzo del proyecto.

3. Habilidades, capacidades, y destrezas de un buen ingeniero de sistemas [5]

- *Curiosidad intelectual.* Tal vez esta sea la característica personal más importante de un ingeniero de sistemas exitoso. Las personas que prefieren limitarse en torno a su trabajo para estar cómodas, que saben lo que saben, y que disfrutan de un dominio centrado, pueden no desear considerar otra ocupación. Los ingenieros de sistemas continuamente tratan de comprender el qué, el por qué, y el cómo de su de trabajo así como de otras disciplinas y situaciones que otras personas enfrentan. Siempre buscan nuevas tecnologías, ideas, y retos, por lo que deben sentirse cómodos en un aprendizaje permanente.
- *Observar el panorama completo.* Los buenos ingenieros de sistemas mantienen una perspectiva de imagen

amplia. Entienden que su rol, aunque siempre significativo, cambia a lo largo del ciclo de vida de un proyecto. En cualquier punto en ese ciclo deben ser plenamente conscientes de lo que se ha hecho, lo que es necesario, y lo que queda por hacer. Cada fase tiene un énfasis diferente:

- *Concepción.* Misión y arquitectura de sistemas, diseño, concepto de las operaciones, y estudios comerciales.
- *Desarrollo.* Mantenimiento de la integridad técnica en todas las fases del ciclo de vida: revisión del diseño preliminar, revisión crítica del diseño, Verificación, Validación, y puesta en marcha.
- *Operaciones.* Asegurarse que el proyecto cumple con los requisitos y mantiene la integridad técnica.

Los ingenieros de sistemas deben prestar especial atención a la Verificación y Validación. La primera responde a la pregunta: ¿se está construyendo el sistema correctamente? Y consiste en probar que el producto cumple con los requisitos. La Validación responde a: ¿se construye el sistema correcto? Es decir, que el sistema haga lo que se supone que debe hacer, y que a menudo va más allá de sólo cumplir con los requisitos. Además, los ingenieros son capaces de traducir para los científicos, los desarrolladores, los usuarios, y para otras partes interesadas [6]. Por ejemplo, descubrir y entender la relación entre las estrellas recién nacidas y los núcleos de nubes moleculares es algo significativo para un científico, pero los desarrolladores y operadores entenderían mejor si se les explicara como: observe 1000 estrellas durante dos años, con un ciclo de repetición de una vez cada cinco meses, utilizando cada uno de los cuatro instrumentos de carga útil. El ingeniero de sistemas que conoce los objetivos del proyecto ayuda a determinar la forma de satisfacer estas necesidades, y mantiene la integridad técnica del sistema a lo largo de su ciclo de vida para buscar una buena oportunidad de tener éxito. Un corolario es comprobar que todos comprenden lo que hacen los demás para asegurarse de que el equipo está verdaderamente en la misma página.

- *Interconectar todo el sistema.* Los ingenieros de sistemas entienden las conexiones entre todos los elementos de un sistema, y a menudo tienen que ayudarle al equipo a ver cómo sus sistemas y decisiones relacionadas se conectan a la imagen más grande y cómo afectan el éxito del proceso. Si el diseñador no entiende esto, el proyecto puede estar en problemas. El ingeniero debe anticipar el impacto de cualquier cambio que se inyecte en el sistema o proyecto, y describir su naturaleza y magnitud a través del ciclo de vida.
- *Comunicación efectiva.* Un buen comunicador es un gran facilitador. Los ingenieros de sistemas tienen que ser capaces de salir de sus oficinas y comunicarse bien (escuchar, hablar, y escribir). George Bernard Shaw dijo una vez que Inglaterra y Estados Unidos eran dos países separados por un lenguaje común, pero los

ingenieros están más separados por sus lenguajes diferentes, más aún desde la llegada de las comunicaciones electrónicas. La ingeniería de sistemas ayuda a reducir las brechas de comunicación entre ingenieros y gerentes mediante términos, procesos, y procedimientos coherentes. Una clave para el éxito es la capacidad de ver, entender, comprender, y comunicar el panorama general, y ser eficaces para ayudarles a otros a desarrollar una imagen amplia.

- *Liderazgo.* Aquí hay que distinguir entre dirección y liderazgo, anotando que un ingeniero de sistemas debe especializarse en ambos. Hasta el momento se han descrito las características que comparten los buenos ingenieros de sistemas, pero lo ideal es que a medida que adquieren experiencia sean capaces de hacerle frente a sistemas más complejos, a través de:

- Ampliación de conocimientos técnicos y experiencia, combinados con excelencia en la ejecución.
- Pasión por el trabajo y sus desafíos, combinados con fuerza de personalidad y capacidad de liderazgo.
- Creatividad e instinto ingenieril, como habilidades para sentir la manera correcta de enfrentar un problema al tiempo que se reconocen los riesgos y las consecuencias inherentes.
- Habilidad para enseñar e influir en los demás.

- *Aceptar e integrar los cambios.* Entender que los cambios son inevitables y aceptarlos e integrarlos al sistema. Anticiparlos y ser capaces de entender cómo afectan al sistema, para hacerles frente a sus efectos, pero sin perder el sueño por los que aparecen.

- *Trabajar con incertidumbre.* Por lo general, no se conoce cuándo se termina una tarea, o incluso un proyecto. Lo que se sabe es que los requisitos siempre están incompletos y hay que interpretarlos. Pero este es el lado sencillo de la incertidumbre, porque el lado más complejo exige experiencia para manejar probabilidades y estadísticas. El ingeniero de sistemas comprende y estimula la cuantificación de la incertidumbre y debe ser capaz de trabajar con un equipo para diseñar un sistema que se adapte a ella.

- *Dominar la paranoia.* Es decir, esperar lo mejor, pero pensando y planeando para lo peor. Esto sugiere que el ingeniero de sistemas está constantemente revisando y cotejando datos seleccionados en todo el sistema para asegurarse de que la integridad técnica se mantiene intacta.

- *Destrezas técnicas diversas.* Un ingeniero de sistemas debe ser capaz de aplicar principios técnicos razonables a través de diversas disciplinas. Debe conocer la teoría y la práctica de muchas disciplinas técnicas, respetar los aportes de los especialistas e interactuar con ellos; tener la suficiente madurez ingenieril para ahondar en y aprender nuevas áreas técnicas que se deban integrar en el sistema; ser un líder técnico fuerte, además de tener amplias

competencias técnicas; y cumplir con el desafío especial de dominar conocimientos técnicos diversos, además de gestionarlos y liderarlos efectivamente.

- *Auto-confianza y decisión.* Saben lo que saben y son conscientes de lo que no saben, y no tienen miedo de reconocerlo. No significa que los ingenieros de sistemas no cometan errores, sino que son conscientes de los mismos y son capaces de aceptarlos y corregirlos, minimizando sus efectos.

- *Apreciar el valor de los procesos.* Esto no significa que la ingeniería de sistemas sólo sea un proceso tras otro, como un libro de recetas. Por ejemplo, para crear la música de una sinfonía los músicos utilizan sus instrumentos, partituras, y notas; estas herramientas les proporcionan un marco de referencia común, les ayudan a mantener el tiempo adecuado, y les permiten trabajar juntos para interpretar música hermosa. Para el ingeniero de sistemas los procesos tienen el mismo propósito, aunque no limitados a hojas en las que se escribe lo que hay que interpretar. Porque los problemas complejos no se pueden encajar en procedimientos pre-establecidos, sino que la mayor parte está por descubrir. En esto radica el arte: ¿qué tanto logra el maestro al llevar a los músicos a utilizar las herramientas que les ofrece? Los maestros saben cómo sacar lo mejor de sus músicos, y cómo variar el tempo y el momento adecuado para una partitura. Esto también es cierto para los ingenieros de sistemas, porque planifican los procesos que deben integrar en el trabajo, pero los dirigen adecuadamente aprovechando el talento de su equipo. Saben cómo equilibrar el arte de la dirección técnica con la ciencia de la administración de sistemas, porque saben que ambos son necesarios para el éxito. Todas estas habilidades, destrezas, y capacidades son necesarias para cumplir con los muchos desafíos que enfrentan los ingenieros de hoy y en el futuro de los sistemas complejos.

4. Arquitectura y diseño de sistemas complejos

Hasta este punto se ha definido a la ingeniería de sistemas como una combinación de liderazgo técnico y administración de sistemas, y se ha establecido que los ingenieros de sistemas altamente eficaces comparten ciertas características de comportamiento. Estos elementos se integran para lograr un diseño exitoso: la capacidad de lograr un diseño inicial correcto del sistema y mantener su integridad técnica durante todo el ciclo de vida. Existen numerosas definiciones para la arquitectura y el diseño, pero en este texto se utilizan las siguientes [7]:

- La *arquitectura* se refiere a la organización fundamental de un sistema, representada en sus componentes, sus relaciones y con el medio ambiente, y en los principios que rigen su diseño y evolución.

- El *diseño* es la creación de un producto o sistema, así como un plan para desarrollarlo y utilizarlo. Para este propósito, los arquitectos proporcionan las reglas y los diseñadores crean las implementaciones que las utilizan.

Los ingenieros de sistemas realizan ambas cosas, es decir, ayudan a crear el diseño y mantienen su integridad durante todo el ciclo de vida. El diseño de nuevos sistemas complejos es una actividad técnica muy creativa, y, para lograrlo, la mayoría de ingenieros utiliza una variación de un proceso fundamental de pensamiento: 1) definen el problema, 2) establecen criterios de selección, 3) sintetizan alternativas, 4) analizan alternativas, 5) comparan alternativas, 6) toman una decisión, y 7) implementan (e iteran, según el caso). Aunque no suele ser obligatorio aplican este proceso, o uno muy parecido, porque produce útiles y buenos resultados que funcionan. En la literatura se refieren a él como DESACMI: Define, Establish, Synthesize, Analyze, Compare, Make, Implement [8]. El primer diseño creíble para un sistema complejo y sus asociados suele ser el producto de unos pocos individuos o de un pequeño equipo de diseño, que:

- Captura y valida las necesidades de las partes interesadas y los criterios de éxito.
- Identifica los requisitos de alto nivel crítico y comprende los criterios de aceptación.
- Crea un concepto del sistema, así como las arquitecturas física y funcional.
- Desarrolla un concepto de operaciones y lo integra con el concepto del sistema, la arquitectura, y los requisitos de alto nivel.
- Diseña las interfaces críticas entre los elementos de la arquitectura.
- Desarrolla requisitos claros y sin ambigüedades que se derivan del concepto del sistema, la arquitectura, las operaciones, y las interfaces definidas.

El resultado de esta intensa actividad, muy iterativa y creativa, es un primer diseño creíble que es compatible con los principios básicos de la ingeniería y que cumple con los requisitos de alto nivel. Es una línea base desde la cual se aplican procesos de administración de sistemas para hacer compensaciones y análisis cuantitativos más detallados que se centran en mejorar los detalles de diseño. También se identifican y mitigan los riesgos técnicos, de costo, y de calendario. Una cuestión clave es la definición de las interfaces y que hay que mantener su número a un mínimo aceptable; generalmente, menos es más apropiado para que el nivel de aislamiento de la interacción se mantenga. También hay que mantenerlas lo más simple posible y, cuando se enfrenta con una interfaz especialmente difícil, se modifican, re-organizan, y simulan sus características. Por supuesto, es necesario tener en cuenta la ley de Murphy. Los diseñadores e ingenieros de sistemas dedicados a esta actividad temprana, y de hecho, en todo el ciclo de vida, siguen varios principios arduamente aprendidos [9]:

1. *Aplicar igual trabajo.* Consiste en fragmentar los requisitos de rendimiento o funcionales requeridos tanto como sea posible, de modo que ningún sub-sistema tenga un problema insuperable. Si el mapa de errores es mal localizado, se puede incrementar significativamente el costo y la complejidad de un elemento, permitiendo al mismo tiempo que otro se ponga en marcha con un exceso de margen. Se requiere

buen juicio y comunicación para asignar un requisito a través de las fronteras de los sub-sistemas, de tal manera que cada elemento necesite igual trabajo para su cumplimiento. Pero hay que estar preparados para re-asignar cuando un problema inesperadamente presenta dificultades en un área. Para lograrlo, los jefes de equipo deben haber establecido una comunicación abierta con la expectativa de que los miembros puedan y deban plantear soluciones.

2. *Mantener la tensión saludable.* Un proyecto debe cumplir simultáneamente su costo, el cronograma, y los objetivos técnicos, lo que frecuentemente crea conflictos. ¿Cuánto se debe invertir en el mejoramiento del sistema y en que lo bueno sea suficientemente bueno? ¿Cuánto tiempo y dinero se invierte en encontrar un problema? ¿Qué riesgo se tomarán al eliminar una prueba y qué bien se entiende el riesgo? Si la ingeniería se focaliza demasiado en crear un sistema perfecto, la administración del proyecto deberá intervenir los costos y el calendario. Si la administración del proyecto se centra demasiado en minimizar las pruebas para reducir el calendario, la ingeniería deberá intervenir la integridad técnica. Las discusiones pueden llegar a ser extremadamente complejas y apasionadas, pero hay que mantener presente el objetivo común del éxito del sistema.

El diálogo constructivo entre compañeros respetuosos junto con la discusión oportuna de los impases es crítico. Es vital que haya tiempo suficiente para la discusión productiva mientras que la toma de decisiones oportunas sigue adelante. Las interacciones pueden ser estresantes individualmente y parecen ser un desperdicio, pero situaciones similares se producen en muchas áreas: en las organizaciones, los sub-sistemas o elementos, y en la fase de eliminación de requisitos. Esta tensión también se vive durante la fase de diseño, cuando los operadores tratan de asegurarse de que el sistema sea operable y fácil de mantener, mientras que los diseñadores trabajan para balancear las limitaciones significantes cercanas al plazo, como el costo o el calendario. También cuando se modifica el diseño con el objetivo de asegurar el éxito del sistema. Esta tensión continua a lo largo del ciclo de vida del producto ayuda a mantener apropiadamente los requisitos, las restricciones, y las pruebas. Por ejemplo, hay que encontrar un equilibrio en la cantidad de las pruebas, porque cuando son insuficientes se añade riesgo al proyecto, mientras que en exceso pueden ser muy costosas y añadir tiempo de ejecución innecesario. Esta tensión saludable es una clave para crear y mantener el entorno que producirá un sistema más equilibrado, y el ingeniero de sistemas debe mantenerlas y fomentarlas.

3. *Gestionar los excedentes.* Los buenos ingenieros de sistemas mantienen un control permanente de la ejecución de los recursos. Pero lo más importante, conocen los excedentes, es decir, la diferencia entre las necesidades y las capacidades. Si un sistema complejo debe hacer algo se destinan requisitos. Una forma de

añadir excedentes es trabajar con requisitos un poco más difíciles de lo absolutamente necesario para cumplir la exigencia del sistema, algunos lo llaman contingencia [10]. De esta manera se crea capacidad.

4. *Buscar lagunas y solapamientos.* Una vez que el diseño se comienza a sentir cómodo y seguro, buscar lagunas y solapamientos ayudará a recuperar la comodidad y la confianza del equipo. ¿Qué se ha olvidado? ¿Qué requisitos son incompletos? ¿Dónde se desconectan los requisitos de alto nivel, la arquitectura, el diseño, y el concepto de operaciones? También se deben considerar cuidadosamente todas las interfaces del sistema y buscar en lo profundo de ellas para identificar lo que podría interferir con el sistema. Cuando se realiza este proceso repetidamente a menudo se concluye que el sistema o el alcance del diseño todavía no están suficientemente definidos.
5. *Crear un diseño robusto.* Un diseño robusto es una filosofía de desarrollo comprobada focalizada en mejorar la fiabilidad de los sistemas, productos, y servicios. Otros términos utilizados para describirlo incluyen resistente, estable, flexible, y tolerante a fallos [11]. Es una clave para sistemas complejos exitosos. Sin embargo, para ser útil, debe hacer parte de una fase temprana e integral del desarrollo. El objetivo es hacer que los sistemas sean inmunes a los factores que podrían perjudicar su rendimiento y éxito. Un diseño robusto y consistentemente trabajado a través del ciclo de vida tiene en cuenta una amplia gama de condiciones e influencias externas, y resiste eventos inimaginables. En otras palabras, proporciona estabilidad en presencia de la ignorancia.
6. *Estudiar las consecuencias imprevistas.* Una de las claves del éxito en sistemas complejos es analizar rigurosamente los modos de falla y los efectos para determinar cómo se comportará cuando los elementos individuales, sub-sistemas, y componentes fallan. Los ingenieros de sistemas estudian las fallas de los sistemas complejos para hacerse una idea de las causas, los efectos heredados, y los factores contribuyentes. El hardware, el software, las interfaces, las organizaciones, y las personas introducen complejidad, por lo que es necesario estudiar las fallas para evitarlas. Henry Petroski [9] señala que el estudio de las fallas ayuda a evaluar mejor las consecuencias no-deseadas del diseño. Así que el ingeniero de sistemas debe estudiar tantas fallas como sea posible para desarrollar una buena práctica.

En las universidades, los ingenieros aprenden a optimizar los diseños, especialmente en las disciplinas eléctricas y mecánicas tradicionales. Pero, por lo general, en un gran y complejo diseño de sistemas, los requisitos y las limitaciones hacen que la optimización de los sub-sistemas sea inapropiada. Se necesita un diseño equilibrado que satisfaga las necesidades de las partes interesadas, así como los requisitos críticos y las limitaciones de alto nivel. El diseño es el acto creativo de gestionar restricciones, organizar la complejidad del sistema, desarrollar

interfaces eficaces, gestionar recursos y limitaciones, e inyectar tecnología de punta cuando se considere necesario. A menudo, la creación de una arquitectura y de un diseño complejo requiere el uso de procesos probados para administrar esa complejidad.

5. Procesos para sistemas complejos

Ganarse el derecho de realizar el diseño es un primer paso fundamental en la creación, desarrollo, y operación de sistemas complejos. Esta actividad de inspiración representa el 10% asociado a una solución aceptable. Mantener la integridad técnica y administrar la complejidad utilizando buenos procesos sólidos representa el otro 90% de transpiración necesaria para entregar los productos y servicios. No importa lo brillante que sea el diseño, todavía hay que entender y aplicar adecuadamente los procesos y procedimientos rigurosos en todo el ciclo de vida del proyecto. De lo contrario, lo que parecía ser un diseño adecuado tendrá una alta probabilidad de no cumplir con la misión prevista, y dentro de los costos y el calendario. Los ingenieros de sistemas deben ser capaces de hacer frente a los amplios problemas técnicos y de aplicar procesos y procedimientos rigurosos, especialmente cuando los proyectos se hacen más grandes y más complejos. La mayoría de organizaciones que trabajan con estos sistemas, como la aeroespacial y la aeronáutica, elaboran documentos completos acerca de la administración y gestión de los procedimientos, pero por experiencia se conoce que los equipos técnicos tienden a ignorar los documentos de política que indican lo que se debe hacer cuando los documentos no se adaptan a las circunstancias del proyecto y se tienen elementos causantes complementarios.

En resumen, hay que preservar las lecciones aprendidas y los procesos probados y verdaderos, así como mejorar la comunicación y aplicar de forma coherente los procesos y procedimientos a lo largo de la organización. Los procesos sólidos permiten una buena ingeniería de sistemas para sistemas complejos. Los ingenieros de sistemas deben apropiarse de los procesos y herramientas y saber cuándo y cómo usarlos, pero no tomar propiedad de ellos. La falta de un proceso riguroso puede llevar fácilmente al desastre, pero demasiado rigor puede conducir a la rigidez cadavérica [12]. Así que el reto es formar ingenieros de sistemas con criterios técnicos que sepan cómo aplicar un enfoque equilibrado, porque el objetivo de un proceso es proporcionar el producto o servicio necesario.

Debido a que la Ingeniería de Sistemas es un arte y una ciencia, muchas de las destrezas y habilidades necesarias para ser altamente eficaz en sistemas complejos no se aprenden en la escuela, se obtienen a través de la experiencia. Los procesos y herramientas son muy importantes, pero no pueden sustituir a las personas capaces. Siguiendo procesos y usando juegos de herramienta no se forma automáticamente un buen ingeniero de sistema. Registrar requisitos en una base de datos no los hace adecuados. Tener el diseño en CAD no significa que sea el correcto. Las personas capaces y bien formadas y capacitadas son quienes hacen la diferencia entre el éxito y el fracaso.

6. La formación del ingeniero de sistemas

Entonces, ¿cómo se capacitan los ingenieros de sistemas para afrontar este desafío? Abraham Lincoln tenía razón cuando dijo que si tuviera ocho horas para cortar un árbol, le gustaría pasar seis horas afilando el hacha. Pero, ¿cuál es la mejor manera de afilar el hacha? Para quienes aspiran ser ingenieros de sistemas la recomendación es adoptar las características de comportamiento descritas previamente, y alcanzar las habilidades, destrezas, y capacidades en ingeniería de sistemas propuestas en SEBoK [13]. Posteriormente, reconocer qué competencias y experiencias tiene y las que aún necesitan desarrollar. Una vez que haya hecho esta evaluación, la mejor (algunos dirían que la única) manera de aprender y capacitarse en ingeniería de sistemas es *practicándola*. Una buena idea es esforzarse por realizar tareas relacionadas con el desarrollo, la entrega, o el funcionamiento de sistemas hardware y software. Mike Griffin [1] recomienda participar en tantas sesiones de trabajo relacionado como sea posible, pasar tiempo con los ingenieros de sistemas experimentados y aprender de sus historias. Todos son diferentes y hay muchas maneras de proceder, pero una carrera en ingeniería de sistemas se puede desarrollar de tres formas: 1) capacidad técnica, 2) administración de sistemas, y 3) liderazgo. Al principio de la carrera la atención se centra principalmente en desarrollar la capacidad técnica, lo cual se logra a través de la práctica permanente con hardware y software para adquirir experiencia, a la vez que desarrolla o potencializa las habilidades en administración de sistemas y el liderazgo. Generalmente, los ingenieros de sistemas requieren más las habilidades de liderazgo y de administración al avanzar en su formación y capacitación.

Cuando los ingenieros se forman y capacitan de esta manera son más capaces de afectar el éxito de los proyectos, incluso cuando se involucra una complejidad creciente. También queda claro que un enfoque, orientado a cultivar el talento en ingeniería de sistemas, debe partir de un proceso de formación-capacitación sustentado con una adecuada tutoría-asesoría y con prácticas que fomenten la capacitación formal. La mejor manera de convertirse en un buen ingeniero de sistemas es *ensuciarse las manos* con experiencia práctica en múltiples disciplinas. De esta manera, progresan en su nivel de rendimiento, realizan actividades cada vez más complejas, y aprenden que pueden afectar más fuertemente otras actividades conexas. El objetivo es alcanzar:

- **Habilidades de liderazgo:** demuestra capacidad de influir en los demás, trabaja en equipo, desarrolla relaciones de confianza, comunica la visión y el enfoque técnico, y es mentor y entrenador de ingenieros de sistemas con menos experiencia.
- **Actitudes y atributos:** exhibe auto-confianza intelectual, curiosidad intelectual, y capacidad para gestionar el cambio, es objetivo y mantiene un sano escepticismo.

- **Comunicación efectiva:** notifica ideas y fomenta discusiones de manera eficiente y efectiva, narra cuentos y analogías, y escucha y traduce información.
- **Resolución de problemas y pensamiento crítico:** gestiona el riesgo, piensa críticamente, e intuye las cuestiones de manera lógica.
- **Capacidad técnica:** demuestra destrezas y habilidades técnicas, tiene capacidad de aprender continuamente, y aplica la experiencia y las lecciones aprendidas de los éxitos y fracasos.

7. Conclusiones

En este artículo se discuten las características personales que deben poseer o desarrollar los ingenieros de sistemas, con el objetivo de ayudarles a los aspirantes a comprender mejor la naturaleza de la profesión y lo que se espera de ellos. También se describen aspectos seleccionados del diseño de sistemas complejos para demostrar la importancia de la arquitectura, el diseño, y el concepto de operaciones para el éxito del proyecto. Un buen ingeniero de sistemas debe comprender y aceptar los principios del diseño robusto y estar en condiciones de participar en el desarrollo del mismo.

La ingeniería de sistemas de los sistemas complejos, y en general en toda la industria, es tanto un arte como una ciencia, por lo que cualquier persona con el título de ingeniero de sistemas debe ser capaz de manejar tanto el liderazgo técnico como la administración de sistemas. De hecho, ambos son fundamentales para mantener la integridad técnica durante todo el desarrollo y el funcionamiento de estos sistemas. Los ingenieros de sistemas técnicamente competentes, con diversas habilidades técnicas, son muy eficaces en la dirección de equipos y la administración de sistemas.

La ingeniería de sistemas es una disciplina crítica al interior de las organizaciones y de toda la comunidad de los sistemas complejos. Las universidades deben preocuparse por formar y capacitar buenos ingenieros de sistemas, de tal forma que puedan enfrentar los retos actuales de forma eficiente, y buscar solucionar los problemas sociales de la mejor forma. No basta sólo con impartir un plan de estudios, también se necesita modificar las didácticas y los modelos educativos, de tal manera que los ingenieros de futuro respondan realmente a la exigencia de poseer un título en sistemas.

Referencias

- [1] Griffin, M. (2007). [System Engineering and the "Two Cultures" of engineering](#). Boeing Distinguished Lectures, NASA.
- [2] Ferguson, E. (1992). [Engineering and the Mind's Eye](#). MIT Press.
- [3] Gladwell, M. (2007). [Blink: The power of thinking without thinking](#). Back Bay Books.
- [4] Kidder, T. (2000). [The soul of a new machine](#). Back Bay Books.
- [5] Larson, W. et al (2009). [LSC Applied space systems engineering](#). McGraw-Hill.

- [6] Lee, G. (2007). [So you want to be a system engineer?](#) Personal behaviors of a systems engineer. DVD NASA.
- [7] Rechtin, E. (1991). [System architecting: Creating building complex systems](#). Prentice Hall, Inc.
- [8] Logsdon, T. (1993). [Breaking through: Creative problem solving using six successful strategies](#). Addison Wesley.
- [9] Petroski, H. (2006). [Success through failure: The paradox of design](#). Princeton University Press.
- [10] Derro, M. & Jansma, P. (2007). [Coaching valuable systems engineering behaviors](#). IEEE Aerospace Conference, pp. 1-17. March 1-8, Big Sky, USA.
- [11] Larson, W. & Pranke, L. (2000). [Human spaceflight: Mission analysis and design](#). McGraw-Hill.
- [12] Perrow, C. (1999). [Normal accidents: Living with high risk technologies](#). Princeton University Press.
- [13] BKCASE Editorial Board (2014). [The Guide to the Systems Engineering Body of Knowledge \(SEBoK\)](#). The Trustees of the Stevens Institute of Technology.