



SISTEMAS ROBUSTOS

Patricio Ponce Muñoz*

Los sistemas físicos, mecánicos, o sociales, requieren poseer una cierta robustez para afrontar ambientes que se caracterizan por su incertidumbre, adversidad y rápidos cambios, la falla en los sistemas es una situación de ocurrencia común, sea ésta por fallas en el diseño o por causas naturales.

Usualmente los sistemas se asocian a funciones lineales de causa-efecto. La realidad ha demostrado que los sistemas, en su mayoría, no son lineales; al ser parte de un entorno en el cual interactúan con otros sistemas y con sus propios subsistemas. Además, el mismo subsistema de realimentación genera señales que afectan al sistema propiamente tal.

Los sistemas robustos presentan una amplia gama de posibilidades como campo de estudios y aplicaciones, en la producción masiva, los sistemas de información, sistemas biológicos, ecológicos y sistemas sociales.

- Introducción.

Los sistemas robustos se caracterizan por poseer la capacidad de mantener sus condiciones esenciales de desempeño pese a recibir perturbaciones o ruidos. De acuerdo a Levin y Lubchenco (2008) la robustez es la capacidad de un sistema de absorber estrés y seguir funcionando, particularmente cuando el sistema es sometido a variaciones impredecibles en su ámbito de desempeño.

La redundancia, consistente en la duplicación de los componentes críticos de un sistema, se desarrolla con el propósito de otorgar robustez a los sistemas, de modo tal que ante la falla de un componente que pueda poner en riesgo la tarea u objetivo principal del sistema, exista una alternativa capaz de reemplazar al sistema que adolece de una falla.

La Robustez o resiliencia (Keller 2002 citado en Levin y Lubchenco 2008), se caracterizan por dos aspectos importantes, el primero es la resistencia al cambio o flexibilidad que se expresa como la

capacidad de un sistema de resistir una perturbación sin sufrir un cambio irreversible y la segunda es la capacidad de un sistema de recobrase.

Walter (2007) establece que existe un tercer aspecto que es la capacidad de transformación o "transformabilidad", el que eventualmente se puede encontrar en conflicto con los dos primeros y consiste en la capacidad del sistema de transformarse a sí mismo en otro sistema distinto del original, cualidad que es importante cuando un sistema estable es considerado como indeseable.

Sánchez-Peña y Sznaier (1998 p. 5), establecen que tradicionalmente, el estudio de los sistemas se ha hecho empleando un modelo lineal causa-efecto, en el cual el ser humano ha procurado resolver primeramente los problemas más sencillos y posteriormente los más complicados.

La visión sistémica es ampliamente aplicada en la mayoría de los campos del conocimiento, pudiéndose mencionar innumerables ejemplos como

* Capitán de Fragata (R).

el sistema solar, sistemas biológicos, sistemas sociales, sistemas mecánicos y, sistemas ecológicos. Pese a parecer sistemas independientes entre sí, todos ellos están relacionados e interactúan de diversa manera.

Bonfill (2006) plantea que en la sociedad moderna se requiere de dinamismo, capacidad de respuesta y flexibilidad, particular importancia revisten estas cualidades en el proceso de globalización, el que comprende un creciente grado de interdependencia entre los países. Por otra parte, sumado a lo anterior, las tecnologías de las comunicaciones e información han evolucionado con enorme dinámica, convirtiendo con rapidez en obsoleto lo que en un momento es moderno.

La visión de causa-efecto que se emplea en los modelos sistémicos, en general, asume que la respuesta que se obtiene tras la aplicación de una entrada será siempre la misma, no contemplando la posibilidad que el modelo pueda ser afectado por factores exógenos. No obstante, la realidad muestra que existen gran cantidad de factores que introducen ruidos a los sistemas, además éstos están expuestos a fallas, ya sea de sus componentes o de su totalidad.

Los sistemas poseen la capacidad de detectar y corregir sus fallas, en un sistema biológico como el ser humano, el organismo es capaz de detectar una enfermedad y generar anticuerpos para combatirla. El mismo modelo es aplicado a diversos sistemas por medio de un proceso de realimentación, el que posee la capacidad de medir las diferencias que se producen en la salida en base a compararla con normas previamente establecidas, generando una señal destinada a corregir la salida del sistema para llevarla a lo establecido en la norma.

Szathmáry (2006) ejemplifica el concepto de robustez a través de la comparación de dos sistemas. Cuando una

persona vuela en un avión, asume que éste no se estrellará, esta misma suposición es válida para el organismo humano en que se cree que tampoco fallará. Ambos sistemas comparten varias características:

- El avión es diseñado por ingenieros, los que a su vez fueron producto de un diseño biológico de la naturaleza.
- Ambos sistemas son simultáneamente robustos en algunos aspectos y frágiles en otros.
- La robustez puede ser intercambiada por otras características como precios y tasas de producción.

Szathmáry (2006) también plantea que la robustez en sistemas biológicos es una consecuencia de su complejidad. Jay (2007) afirma que los sistemas biológicos han desarrollado una gran robustez esencialmente por su capacidad de ser redundantes al poseer más de un órgano capaz de realizar la misma función. No obstante lo correcto de las afirmaciones, los sistemas biológicos no son los únicos sistemas complejos, también lo son los sistemas creados por el hombre como las sociedades o los sistemas mecánicos.

Todo sistema está expuesto a las interferencias o ruidos procedentes del entorno y, por lo tanto, son afectados en diverso grado en su capacidad para realizar la tarea para el cual han sido diseñados. Para otorgarle robustez a los sistemas, es preciso no sólo reconocer los efectos del entorno en el cual están insertos, también es necesario contar con un medio que permita medir las desviaciones del sistema, para de esa manera poder hacer las correcciones necesarias.

Los sistemas también reciben interferencias por parte de otros sistemas, e incluso de sus propios subsistemas. El mayor problema no lo constituyen las interferencias en sí, si no en la incerti-

dumbre que se encuentra asociada a la complejidad propia de los sistemas, debido a que los efectos que las interferencias producen en los sistemas no son lineales.

La solución para enfrentar la incertidumbre propia de un ámbito en el que diversos sistemas ejercen mutua influencia, consiste en otorgar robustez a los sistemas, sin embargo, la solución enfrenta una dualidad, ya que al otorgar robustez a sistemas diseñados para efectuar tareas específicas se genera una mayor fragilidad al enfrentar perturbaciones no previstas en el diseño del sistema. A lo anterior se agrega el incremento en los costos al generar subsistemas redundantes para otorgar mayor robustez.

Los sistemas navales, por su naturaleza, constituyen un sistema social que emplea elementos tecnológicos en los que apoyarse para la toma de decisiones y enfrentan claramente la dualidad de requerir un elevado nivel de robustez sin que ello genere fragilidad ante el elevado nivel de perturbaciones en el que se encuentran permanentemente enfrentados.

Este trabajo tiene como propósito evidenciar la aplicabilidad y principales limitaciones que un sistema robusto debe poseer con el propósito de incrementar su capacidad para entregar la respuesta requerida, a pesar de perturbaciones no previstas.

- **Sistemas.**

La Real Academia de la Lengua define sistema como: "Conjunto de reglas o principios sobre una materia racionalmente enlazados entre sí"; una segunda acepción es: "Conjunto de cosas que relacionadas entre sí ordenadamente contribuyen a determinado objeto"; una tercera acepción está en el

campo de la biología y es definido como: "Conjunto de órganos que intervienen en alguna de las principales funciones vegetativas".

En el ámbito de la Administración, se define un sistema como un conjunto de partes o elementos organizados y relacionados que interactúan entre sí para lograr un objetivo. Los sistemas reciben como entrada datos, energía o materia del ambiente y proveen como salida información, energía o materia modificados. Un sistema puede ser físico o concreto, como un computador, un televisor, o un ser humano o puede ser abstracto o conceptual como un software.

Cada sistema existe dentro de otro más grande, por lo tanto un sistema puede estar formado por subsistemas y partes, y a la vez puede ser parte de un supersistema, además tienen límites o fronteras, que los diferencian del ambiente. Ese límite puede ser físico como lo es el gabinete de un computador o conceptual. Si hay algún intercambio entre el sistema y el ambiente a través de ese límite, el sistema es abierto, de lo contrario, el sistema es cerrado. El ambiente es el medio externo que envuelve física o conceptualmente a un sistema e interactúa con él, del cual recibe entradas y al que se le devuelven salidas o respuestas. El ambiente también puede ser una amenaza para el sistema. (Figura 1).

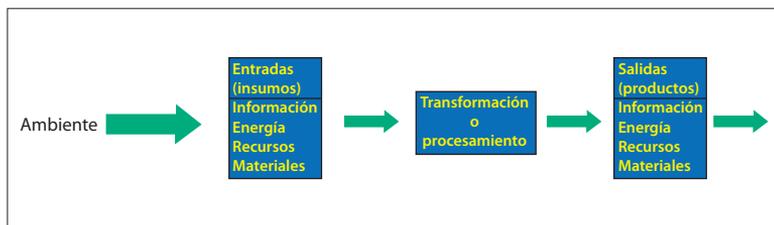


Figura 1. Sistema abierto (modificado por el autor). Fuente: Hamptom (2000 p.92).

El concepto de sistema tal como plantean Sánchez-Peña y Sznaier (1998 p. 5), tiene un enfoque lineal de causa-efecto, en el cual se asume que cualquier entrada al

sistema genera una salida que es función de la entrada. Esta visión tiene particular aplicación en sistemas mecánicos, en los cuales una variación a la entrada produce una salida proporcional. Un ejemplo típico es un motor, el que incrementa su número de revoluciones en función de la aceleración que se aplica como señal de entrada.

No obstante, la mayoría de los sistemas están afectos a fallas, las que se pueden producir por defectos en el diseño, errores en la operación, carencias en el mantenimiento, o por ruidos o interferencias provenientes del entorno e incluso de los subsistemas componentes del sistema. La exactitud en la salida de un sistema puede revestir una importancia capital, como por ejemplo los controles de vuelo de un avión jet deben tener un alto grado de exactitud, ya que lo contrario implica poner en riesgo vidas humanas, además del costo material del avión.

La corrección de las fallas o errores en la salida de los sistemas se efectúa en base a un subsistema denominado realimentación, retroalimentación o feedback. Este subsistema mide la salida, la compara con una norma previamente establecida y envía una señal de realimentación a la entrada del sistema para anular o reducir la alteración detectada; este proceso se realiza iterativamente de manera de reducir progresivamente los errores y asegurar una salida cada vez más cercana a la norma. (Figura 2).

La realidad ha demostrado que los sistemas, en su mayoría no son lineales; al ser parte de un entorno en el cual interactúan con otros sistemas, con sus propios subsistemas,

y el recibir entradas provenientes de un ambiente que es esencialmente cambiante, suelen recibir entradas o ruidos los cuales el subsistema de realimentación no está preparado para detectar y generar la señal para realizar la corrección pertinente. Además, el mismo subsistema de realimentación genera señales que afectan al sistema propiamente tal.

Sánchez-Peña y Sznaiar (1998) establecen que la señal de realimentación es necesaria exclusivamente a la incertidumbre del entorno en el cual se encuentran los sistemas, y debido a que no es posible diseñar una realimentación que controle un sistema en un ambiente de estas características, sí es posible limitar el grado de incertidumbre empleando un modelo que tenga una frontera definida, asumiendo un determinado nivel de incertidumbre dentro de esa frontera.

- **Sistemas Robustos.**

Jen (2005) plantea que en un ambiente que se caracteriza por su incertidumbre, adversidad y rápidos cambios, la falla en los sistemas es una situación de ocurrencia común, sea ésta por fallas en el diseño o por causas naturales.

Bonfill (2006) menciona que elementos de uso cotidiano considerados hoy modernos, se tornan rápidamente obsoletos al día siguiente. Sumado a lo anterior, situaciones inesperadas y repentinas son comunes en las actividades diarias en toda sociedad, ejemplo de ello lo constituyen pedidos urgentes, retrasos, cuellos de botella en procesos, e incluso condiciones climáticas, las que alteran o modifican la realización de las tareas planificadas.

De acuerdo a lo expuesto por Jen (2005), en los últimos años el concepto de robustez ha sido objeto de creciente



Figura 2. Fase de retroalimentación del control (modificado por el autor). Fuente: Hamptom (2000 p.658).

interés en las ciencias naturales y en la ciencias de la ingeniería. En el campo de la teoría del control, la confianza y estabilidad son factores relevantes en que se enfoca el estudio de la robustez para mantener las condiciones especificadas en un sistema, en particular cuando el sistema se ve expuesto a perturbaciones internas o externas.

Los sistemas biológicos han sido la base para el estudio del concepto de robustez, Jay (2007) establece que la observación de sistemas biológicos proporciona importante información de cómo construir sistemas robustos. Los sistemas más robustos se caracterizan por ser capaces de evolucionar, de manera que se pueden adaptar fácilmente a situaciones nuevas con sólo pequeñas modificaciones. Técnicas originalmente concebidas para desarrollos de inteligencia artificial pueden ser vistas como formas de implementar robustez y capacidad evolutiva en programas y sistemas de ingeniería. Como contraste, en el ámbito de los programas computacionales, la rigidez se opone a la construcción de sistemas robustos.

La interacción de una planta física o sistema con su entorno, genera señales de la planta a sus sensores y señales de los sensores a la planta, las cuales modifican su comportamiento; tanto las señales de entrada y salida como las leyes físicas que describen el comportamiento del sistema proveen la única información con que se cuenta y ésta nunca es completa. La razón es que las leyes físicas aplicadas al sistema describen sólo parte del problema, pero no su totalidad. Un ejemplo que grafica lo anterior es la aplicación de la ley de Ohm para describir el voltaje de salida de una resistencia a través de la cual circula una corriente eléctrica, sin embargo, la temperatura, el campo magnético y gravitacional como también la característica del sensor y la fuente eléctrica también influyen en la medición. Sánchez-Peña y Sznaiier (1998

p. 2). Lo anterior se debe a que todos los sistemas se encuentran mutuamente interconectados influenciándose mutuamente.

Jen (2005) establece que en aplicaciones de ingeniería, la robustez de los sistemas se entiende como un medio para obtener confiabilidad en el sistema ante la presencia de fallas con una probabilidad determinada de efectividad. En el contexto de la ingeniería de software, se hace una distinción entre el funcionamiento correcto y la robustez; se espera que un programa funcione en forma correcta dentro del ámbito de sus especificaciones, pero se considera que la robustez corresponde a situaciones que se encuentran fuera de sus especificaciones, por ejemplo, se espera que un programa falle sin provocar grandes consecuencias ante la falla de un disco duro.

Jen (2005) también se refiere a sistemas biológicos y ecosistemas. En el primer caso, la robustez se entiende como la capacidad de un proceso en desarrollo de mantenerse dentro de su curso ante perturbaciones o ruidos, en tanto en el ámbito de la biología celular, la robustez es descrita como la capacidad de ciertos procesos metabólicos y regulatorios de desempeñarse correctamente dentro de una amplia gama de parámetros o circunstancias. En el caso de los ecosistemas, la robustez es interpretada como la capacidad de un sistema de someterse a perturbaciones y mantener sus funciones y control, siendo la medida de esta capacidad la velocidad o tasa a la cual un sistema retorna al equilibrio después de una perturbación.

(Taguchi y Wu 1975 citados en Willey 2007 p.25) cita los métodos de Taguchi: "La calidad de la ingeniería no intenta reducir las fuentes de variación en los productos directamente. En su lugar, uno necesita hacer a los sistemas de producción o procesos de producción menos sensitivos a las fuentes de ruidos no con-

trolables o influencias externas, a través de parametrizar los métodos de diseño (control de calidad fuera de línea)”. (Traducido por el autor). La cita destaca claramente, que el esfuerzo en el diseño y aplicación de sistemas robustos no pretende eliminar los ruidos o influencias externas, principalmente porque la mayoría de ellas no son controlables, no obstante lo que sí es efectivo es diseñar sistemas con la capacidad de resistir esas influencias y ser capaces de mantener su capacidad dentro de los parámetros de diseño.

Ölvander (2005) menciona que muchos problemas de diseño de ingeniería en el mundo real deben solucionar en forma simultánea varios objetivos contrapuestos, optimizando una amplia gama de criterios diferentes, además, la solución debe ser robusta. Para lograr lo anterior, es preciso utilizar conceptos de optimización, la que entrega un conjunto de soluciones óptimas que el diseñador debe considerar. Con ello, es posible determinar regiones a las cuales satisfacer de mejor manera los requerimientos del diseñador, a la vez que permite identificar qué parámetros ejercen mayor influencia en las respuestas o salidas del sistema.

Chang (2007) establece que los plazos de mercado cada vez más cortos generan que los productores desarrollen nuevos productos de alta calidad para satisfacer los requerimientos de los consumidores y mantener la competitividad. Los productores deben enfocarse en la calidad del sistema de diseño y proceso productivo. Para obtener una calidad estándar a lo largo de la totalidad de los procesos, se debe contar con adecuados sistemas de realimentación y, a la vez, lograr que los sistemas sean poco sensibles a los ruidos o perturbaciones incontrolables. (Box y Bisgaard 1988 citados en Arvidsson y Gremy 2007) remarcan que el enemigo de la producción masiva es la variabilidad, por lo cual el éxito en reducirla simplifica los procesos, reduce chatarra y costos.

Jay (2007) indica que es difícil diseñar un mecanismo de utilidad general que tenga la capacidad de realizar una tarea particular con precisión, por lo que la mayoría de los sistemas de ingeniería son diseñados para realizar una tarea específica. Los mecanismos de propósito general que realmente tienen la capacidad para realizar multitareas adecuadamente marcan una diferencia cuando son creados, un ejemplo de ello es el atornillador rápido. Otro invento destacado es el computador, ya que es una máquina universal que puede simular cualquier otra máquina que procese información con el solo requerimiento de usar el software apropiado al trabajo específico que es necesario realizar.

Jen (2005) establece la diferencia entre estable y robusto; planteando que tanto en sistemas naturales, de ingeniería y sociales, la robustez es la medida de la persistencia de sistemas o características de sistemas que son difíciles de cuantificar o parametrizar, siendo por lo tanto difícilmente referidos a una norma o medición. También la robustez es la medida de la persistencia de los sistemas en que las perturbaciones representan cambios en la composición de los sistemas, su topología o las suposiciones fundamentales en relación a las características del ambiente en el cual el sistema opera. La robustez es especialmente apropiada en sistemas en que su comportamiento es el resultado de su dinámica relacional con una arquitectura organizacional definida.

El concepto de estable es antiguo y proviene de la mecánica clásica, en particular del estudio del sistema solar. Se dice que un sistema dinámico es estable cuando pequeñas perturbaciones en la salida del sistema provocan una nueva solución que se encuentra cercana a la solución original en forma permanente. Un sistema dinámico es considerado estructuralmente estable cuando pequeñas perturbaciones originadas por el propio sistema generan un nuevo sis-

tema dinámico que cualitativamente posea las mismas dinámicas que el original. Las perturbaciones de esta clase puede revestir la forma de cambios en los parámetros externos del sistema. (Duaca y Colmes 1996 citados en Jen 2007) ejemplifican esta característica de sistema estructuralmente estable a través del ejemplo del flujo de la superficie de un río, asumiendo que el flujo depende de un parámetro externo como la velocidad del viento e ignorando otros factores, el flujo permanece estructuralmente estable si pequeños cambios en la velocidad del viento no cambian cualitativamente la dinámica del flujo al no producir, por ejemplo, remolinos. (Tabla 1).

SISTEMA	CARACTERÍSTICA DE INTERÉS	PERTURBACIÓN
Atmósfera terrestre.	Temperatura.	Incremento de fluoro carbonos.
Pastizales.	Biomasa.	Cambio en política de pastoreo.
Laptop.	Desempeño del software.	Ingreso incorrecto de datos.
Laptop.	Desempeño del software.	Falla de disco.
Quimiotaxis ¹ bacterial.	Precisión de la adaptación.	Cambio en la concentración proteínica.
Quimiotaxis bacterial.	Precisión de la adaptación.	Mutación bacterial.
Sistema inmunológico humano.	Respuesta de anticuerpos.	Nuevo virus.
Sistema inmunológico humano.	Respuesta de anticuerpos.	Desorden autoinmune.
Sistema político U.S.A.	Percepción de legitimidad.	Cambios demográficos.
Sistema político U.S.A.	Percepción de legitimidad.	Depresión económica.
Religiones.	Popularidad.	Modernismo.
Vendaje pies mujeres chinas.	Longevidad.	Cambio en estatus de mujeres.
Mercado automotriz.	Identidad del Volkswagen escarabajo.	Cambio de diseño.

Tabla 1. Ejemplos en que la teoría de la estabilidad es apropiada. (Traducido por el autor). Fuente: Jen (2005 p.10).

La robustez es un concepto más amplio que la estabilidad, principalmente por dos aspectos; el primero consiste en que la robustez direcciona el comportamiento de una más variada cantidad de sistemas, perturbaciones aplicadas a sistemas de interés y características, las que serán estudiadas bajo perturbaciones. El segundo es que la robustez abarca aspectos que están fuera de la competencia de la teoría de la estabilidad, tales como costos y beneficios de la robustez, evolu-

ción pasada y futura, arquitectura organizacional de los sistemas, habilidad del sistema para cambiar entre múltiples funcionalidades. Jen (2005).

Las perturbaciones pueden ser originadas por el entorno o por el propio sistema, son señales no deseadas que ingresan al sistema y que no pueden evitarse y pueden ser ruidos, distorsiones o interferencias. Puede considerarse que es el efecto de modificar un sistema o su salida. La incertidumbre se genera por la falta de seguridad que en un sistema las soluciones o salidas tengan el mismo resultado, medido a través de un modelo matemático y de experimentos, los sistemas son diseñados con subsistemas de realimentación para reducir la diferencia

entre el modelo matemático y el real, no obstante la misma realimentación genera una degradación en el sistema. Sánchez-Peña y Sznaiier (1998).

Jay (2007) plantea que los sistemas de software han sido diseñados siguiendo la experiencia de los sistemas de ingeniería, para desarrollar adecuadamente trabajos específicos, y cada rutina se diseña para la ejecución de un trabajo particular. Cuando el problema a solucionar cambia, el software debe ser cambiado, aun cuando las modificaciones en el problema sean pequeñas, el software al ser muy rígido requiere un cambio importante, usualmente un nuevo diseño, lo que lo hace lento y caro. En contraposición, Internet ha evolucionado desde pequeños sistemas a uno de escala global, las ciudades evolucionan orgánicamente para acomodar nuevos estilos de vida, modelos de negocios, de transportes y comunicaciones.

1. La quimiotaxis es un tipo de taxis, un fenómeno en el cual las bacterias y otras células de organismos mono o multicelulares dirigen sus movimientos de acuerdo a ciertas sustancias químicas en su medio ambiente.

(Johnson 1989 citado en Ye 2001) establece que hay cuatro causas de problemas en los sistemas digitales de información: errores de especificaciones, errores de implementación, interferencias externas y defecto de componentes. Estas causas generan fallas de software y hardware en los sistemas de información. Las fallas en hardware pueden ser detonadas por cualquier error, en el caso del software las fallas son generalmente producto de errores de especificación e implementación. Las fallas en los sistemas de información introducen errores en el desempeño del sistema que puede llevar a fallas del sistema.

(Avizienis et al. 1987, Avresky 1992, Fussell and Malek 1995, Jalote 1994, Johnson 1989, Koob and Lau 1994, Kumar and Hsu 1998, Negrini et al. 1989, Pham 1992, Siewiorek and Swartz 1998, Voges 1988 citados en Ye 2001) establecen que la tolerancia a las fallas puede ser lograda a través de técnicas que previenen esas fallas eliminando las causas que las provocan. Tradicionalmente ello se logra a través del uso de sistemas de doble e incluso triple redundancia, de esa manera la tolerancia a los errores previenen que el sistema experimente fallas y continúe funcionando correctamente pese a sufrir interferencias. (Figura 3).

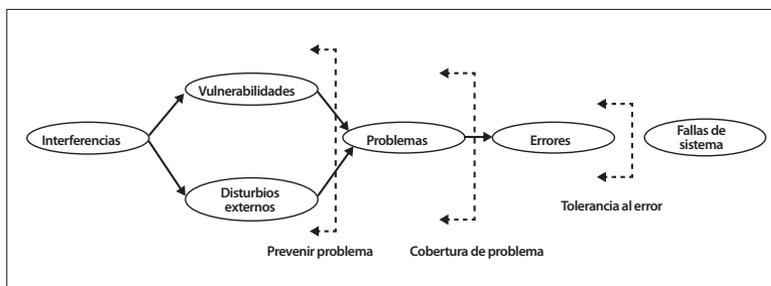


Figura 3. Causas, efectos en cadena y barreras a las intrusiones. (Traducido por el autor). Fuente: Ye (2001 p.39).

Las intrusiones constituyen una causa particular de problema en los sistemas de información, éstas pueden explotar las vulnerabilidades en los sistemas de información debido a errores

en las especificaciones, implementación o puertas traseras de los sistemas de información. Las puertas traseras son generalmente instaladas para efectuar mantenimiento, pero pueden ser empleadas por intrusos para ingresar señales erróneas como grandes cantidades de datos, canales para bloquear comunicaciones y requerimientos de interrupción de servicio que pueden causar problemas en los componentes de hardware.

Los mecanismos de prevención de intrusiones en línea forman un cerco alrededor de los sistemas de información elevando la dificultad de ingresar a los sistemas, no obstante, las defensas sólo pueden alcanzar un determinado nivel, de lo contrario el sistema empieza a degradarse perdiendo sus capacidades.

Ye (2001) establece que la tolerancia a las intrusiones en los sistemas a través de redundancia raramente se produce, debido a los altos costos de contar con software y hardware redundante. El software redundante requiere la existencia de diversos software que desarrollen la misma función en paralelo, de manera que la vulnerabilidad de una versión no esté presente en la otra. Por otra parte, la redundancia del hardware requiere computadores o servidores de respaldo de uso cotidiano sólo

como respaldo, ambas situaciones elevan los costos haciendo poco práctico contar con tal clase de redundancia.

Un sistema de informaciones provee servicios a sus usuarios a través de sus aplicaciones, las que emplean una variedad de recursos que incluyen las

capacidades de los computadores, bases de datos, comunicaciones, visualización y otros. Cada proceso conlleva entradas y salidas que son procesados en forma dinámica; la calidad de la salida indica la

calidad del servicio a los usuarios. Para mantener la calidad del servicio, pese a las intrusiones se debe establecer un equilibrio entre el nivel de redundancia que se desea otorgar al sistema y sus costos.

(Ross 1996 citado en Ye 2001) plantea que el método de diseño robusto de Taguchi provee una forma de establecer una configuración al sistema que es robusta y, por tanto, resistente a los ruidos. Considerando las intrusiones como ruidos que afectan al sistema de información, se puede aplicar el método de diseño robusto Taguchi a la configuración del sistema para prevenir problemas o fallas. Este modelo de diseño robusto se basa en la función de pérdida siguiente:

$$L(y) = k\{Sy^2 + (y-m)^2\}$$

Donde:

$L(y)$: Es la pérdida total asociada con el desempeño del sistema.

Sy^2 : Es la varianza del desempeño del sistema.

y : Es el desempeño promedio del sistema.

m : Es el desempeño esperado o de diseño del sistema.

k : Es una constante.

De acuerdo a lo planteado en la función de pérdida, el promedio y la varianza de desempeño del sistema juegan un rol importante en reducir la pérdida total. Taguchi considera los parámetros del sistema como factores de control y separa los factores de control de los factores de ruido. (Ross 1996 citado en Ye 2001) indica que los factores de control son aquellos que pueden ser manejados durante el diseño del sistema, mientras que los factores de ruido son aquellos que el sistema no puede o no desea controlar, porque controlar o eliminar los factores de ruido puede ser muy oneroso. Los factores de ruido

causan variación al desempeño del sistema.

En el método de Taguchi, la reducción de la varianza en el desempeño del sistema se logra a través de elegir el nivel apropiado de los factores que hacen robusto el desempeño del sistema frente a los factores de ruido. La información acerca de los factores de control es usada en tiempo real para adaptar la configuración del sistema de información a través de la selección del nivel de robustez de los factores de control para un estado determinado del sistema de información que le permita alcanzar la robustez óptima o la capacidad de prevención de problemas para lograr tolerancia a las intrusiones. Como resultado se obtiene un sistema de información que es resiliente y tolerante a las intrusiones a un bajo costo.

- **Sistemas Redundantes y Degenerativos.**

Los sistemas biológicos han evolucionado desarrollando una gran capacidad de robustez, una de las características de los sistemas biológicos es que ellos son redundantes. Órganos tales como el hígado y el riñón son altamente redundantes, poseen una capacidad de trabajo que excede la necesidad del organismo, de tal manera que una persona que padezca de la falta de un riñón no sufre de incapacidad. Los sistemas biológicos son también altamente degenerativos, ya que poseen una vasta capacidad para satisfacer un requerimiento dado; por ejemplo, si un dedo es dañado, hay formas en que los demás dedos se configuran para tomar un objeto. También un ente biológico puede obtener energía de una gran variedad de fuentes, pudiendo metabolizar carbohidratos, grasas y proteínas; aun cuando el mecanismo de digestión y extracción de energía de cada una de estas fuentes es significativamente distinto. Jay (2007).

Si un gen se duplica, las copias pueden divergir levemente, permitiendo

el desarrollo de variantes que pueden ser de utilidad en el futuro, sin afectar la viabilidad actual. La condición degenerativa es producto de la evolución y permite la evolución. Una criatura necesita una cantidad de capacidad degenerativa para adaptarse a los cambios del ambiente. Jay (2007) plantea como ejemplo el caso de una criatura o sistema de ingeniería degenera de tal modo que se producen varios y diferentes mecanismos para realizar cada una de las funciones esenciales. Si el ambiente o los requerimientos cambian de manera que uno de los medios para realizar una función esencial se vuelve insostenible, la criatura o el sistema continúan viviendo o satisfaciendo las especificaciones. El subsistema que se ha vuelto inoperativo queda en condiciones de mutar o repararse sin influir en la viabilidad de la operación en curso o del sistema como un todo.

Los sistemas de ingeniería pueden incorporar redundancia en sistemas donde el costo de las fallas es extremo, pero no se incorpora la capacidad degenerativa como la que poseen los sistemas biológicos, excepto como efecto lateral de diseños no óptimos.

Las organizaciones biológicas tienen claras ventajas en comparación con los sistemas de ingeniería, la flexibilidad es resaltada por el hecho que las señales entre las células son más permisivas que instructivas. Las combinaciones de señales sólo permiten ciertos comportamientos e inhiben otros. Esta débil conexión permite una variación en la implementación de los comportamientos que son permitidos en varios niveles sin modificar el mecanismo que define los niveles. Los sistemas organizados de esa manera pueden evolucionar acomodando la variación adaptativa en alguno de los niveles sin cambiar el comportamiento de los subsistemas en otros niveles. Jay (2007).

Los sistemas biológicos están bajo constante ataque de depredadores, pará-

sitos e invasores, por lo cual han desarrollado elaborados sistemas de defensa que van desde la restricción de enzimas en las bacterias a los sistemas de inmunidad en los mamíferos. Tal como plantea Jay (2007), en organismos complejos que derivan de un único cigoto, cada célula es, en principio, capaz de realizar las funciones de cualquier otra célula. Esto es redundancia, pero más importante es que esto provee un mecanismo para reparación y regeneración. Un organismo complejo es una estructura dinámicamente reconfigurable con un potencial universal de partes intercambiables y reproducibles; si una parte es dañada, las células cercanas pueden llenar el vacío y tomar la función de la parte dañada.

Los software primitivos fueron construidos para trabajar en ambientes seguros, pero con las redes y la globalización el ambiente se ha vuelto hostil y sometido a constantes cambios, las invasiones o intrusiones en los sistemas de información comprometen los atributos de seguridad de estos sistemas así como su disponibilidad, integridad y confidencialidad (Barnes 1998, Garfinkel y Spafford 1996, Kauffman et al. 1995 y Stallings 1995 citados en Ye 2001 p.38).

En la medida en que se incrementa la confianza en los sistemas de información para soportar operaciones críticas en los sistemas de defensa, de la banca, telecomunicaciones, transporte, generación y transmisión eléctrica y otros sistemas, es altamente conveniente que estos sistemas sean capaces de tolerar intrusiones y continuar funcionando correctamente en los tiempos pertinentes e incluso enfrentando las intrusiones.

Jay (2007) menciona que uno de los problemas de la industria de la computación es la denominada monocultura. La mayoría de los usuarios emplean los mismos sistemas computacionales incrementando su vulnerabilidad. En los sistemas biológicos existe una gran variación

con importantes cambios de funciones; los seres humanos poseen diferentes grupos sanguíneos, tamaño físico, forma y color entre otros factores, no obstante todos son seres humanos. Todos poseen capacidades similares, y pueden vivir en una amplia variedad de ambientes, todos se comunican a través del lenguaje, no obstante no todos tienen las mismas vulnerabilidades, e incluso algunos son capaces de crear resistencia ante algunas enfermedades. Los sistemas de ingeniería, sin embargo, usualmente no hacen uso de la diversidad, no se emplean diseños alternativos, o emplear variaciones que permitan mutaciones.

- **Resiliencia de los Sistemas.**

Los seres humanos conforman sociedades que son dependientes de diversos sistemas, naturales y artificiales, los cuales son esenciales para proporcionarles bienestar, todos los servicios que los sistemas son capaces de otorgar, se encuentran fácilmente disponibles, situación que hace sentir al ser humano que es algo garantizado, y no toman en cuenta cuando los sistemas que soportan los servicios están siendo degradados. De acuerdo a Levin y Lubchenco (2008), la pesca es un recurso que como sistema ha declinado significativamente a causa de la sobre explotación del recurso pesca, destrucción del hábitat, polución y calentamiento de los océanos.

En atención a que la humanidad está enfrentando diversos desafíos para mantener su forma de vida y su sentido, se debe prestar especial atención a los aspectos de sustentabilidad. Los ecosistemas que dan sustento al ser humano, deben ser sustentables en el tiempo, y mantener sus condiciones esenciales de funcionamiento pese a las intrusiones. Para ello deben ser robustos y resilientes, es decir, ser capaces de mantener el sistema funcionando pese a ser afectados por perturbaciones.

La resiliencia es la capacidad que tienen los materiales de recuperar su forma luego de haber recibido una presión que los llevó a deformarse, la psicología tomó esta palabra como denominación de la capacidad del sujeto para soportar y sobreponerse a situaciones trágicas o dolorosas. (The Resilience Alliance citada en Levin y Lubchenco 2008) hace una distinción entre resiliencia en la ingeniería y la define como la tasa a la cual un sistema vuelve a su estado de reposo o estado cíclico después de sufrir una perturbación, y resiliencia ecológica como la cantidad de cambio o perturbación requerido para transformar un sistema que está siendo sostenido por un conjunto de procesos mutuamente influenciados a un conjunto diferente de procesos y estructuras. En palabras más sencillas, es la capacidad de un sistema de recobrase de una perturbación o mantenerse funcionando a pesar de la perturbación.

Existen dos aspectos importantes a tener en cuenta en relación a la robustez o resiliencia, el primero es la resistencia al cambio o la cantidad de perturbación que un sistema puede recibir sin que los cambios debidos a la perturbación sean irreversibles y segundo, la capacidad de recobrase ante una perturbación. (Keller 2002 citado en Levin y Lubchenco 2008) indica que en biología se define como la capacidad de mantenerse en el rumbo a pesar de una miríada de vicisitudes que inevitablemente plagan un organismo en desarrollo. En forma general, los términos robustez y resiliencia son usados indistintamente como la capacidad de un sistema para absorber estrés y continuar funcionando.

La aproximación desde el punto de vista de la ingeniería no provee todos los elementos para entender y administrar un sistema complejo y adaptativo como lo es un ecosistema, la atmósfera e incluso un sistema social. No obstante sí ayuda a tener una visión sobre los aspectos que otorgan robustez a un sis-

tema y, por lo tanto, cómo éste se puede administrar. (Levin 1999 citado en Levin y Lubchenco 2008) identifica una serie de características que son esenciales para la adecuada administración de un sistema; en particular en relación con la robustez los elementos principales son diversidad y heterogeneidad, redundancia y capacidad degenerativa, modularidad y nivel de rigidez del ciclo de realimentación. Todos los aspectos enumerados son interdependientes ya que la robustez óptima se logra cuando ellos se encuentran en equilibrio.

El nivel de rigidez del ciclo de realimentación ayuda a proveer estructuras de apoyo que mantienen los sistemas, pero simultáneamente crean ciclos que llevan a una rápida pérdida de la robustez. La diversidad y heterogeneidad capturan la capacidad adaptativa de los sistemas, en su habilidad para alterar su composición en un ambiente cambiante. La modularidad, tal como la practicaron los primeros relojeros Levin y Lubchenco (2008), confiere robustez al compartimentar las perturbaciones, tal como se puede observar ante los efectos de epidemias, no todos los grupos de individuos comparten el riesgo de enfermar uniformemente, incluso muchos grupos desarrollan inmunidad a la enfermedad.

La diversidad y heterogeneidad es aplicable en todos los niveles de la organización, ya que sin variación no es posible obtener una respuesta adaptativa; la adaptación tiene lugar en sistemas complejos adaptativos, pero sólo los niveles inferiores que no involucran al sistema como una totalidad.

(Ehrlich y Ehrlich 1981 citados en Levin y Lubchenco 2008) emplean una analogía para explicar la robustez, en los remaches del ala de un aeroplano llama la atención la importancia de la existencia de múltiples copias de los elementos críticos, de manera que la pérdida de varios remaches no implica la pérdida de la funcionalidad del sistema; no obstante, si bien la pérdida de redundancia no puede

ser asociada a una inmediata pérdida de la función del sistema, la capacidad de adaptabilidad del sistema será dañada.

Walter (2007) indica que existen tres conceptos que definen la resiliencia; el primero es el reconocimiento que los sistemas adaptativos complejos son autoorganizados; el segundo es el que estos sistemas no son lineales en sus trayectorias de cambio, lo que lleva su potencial a múltiples regímenes estables de acuerdo a los atractores posibles; el tercero es que los sistemas avanzan a través de ciclos adaptativos, ciclos que siguen un proceso de crecimiento, conservación, colapso y reorganización.

La resiliencia es definida como la cantidad de cambio al que un sistema puede someterse, antes que cruce el umbral que lo lleve a un régimen de estabilidad alternativo al original. La adaptabilidad es la capacidad de un sistema, incluyendo el sistema humano, de administrar el umbral manteniéndose alejado de él, o cambiando su posición sobre la variable controlable, usualmente en forma lenta. También existe un tercer aspecto, el que ocasionalmente puede estar en conflicto con los anteriores, este es la "transformabilidad"; la que consiste en la capacidad de transformarse a sí mismo en un tipo de sistema diferente. Esta última característica se vuelve importante cuando un sistema en un régimen estable, posee alguna característica indeseable y que es muy difícil transformar en el original o pasarlo a otro régimen.

Cuando un observador se encuentra fuera de un sistema, rara vez se da cuenta que aun cuando pretenda mantener las condiciones del entorno y del sistema estables, el solo hecho de constituirse como observador, de una u otra manera está incidiendo en el sistema, a la vez que las condiciones del sistema y del entorno también están cambiando.

Seville, Brunson, Dantas, Le Masurier, Wilkinson y Vargo (2008) mencionan que la habilidad de una organización es su capacidad para sobrevivir en una crisis

mayor, lo cual depende de su estructura organizacional, la administración y sistemas operacionales con que cuente y la resiliencia de éstos. Las organizaciones se enfrentan a incertidumbres y eventos inesperados habitualmente, los cuales deben administrarse junto con las oportunidades y riesgos presentes.

Un aspecto interesante en el ámbito de la resiliencia en las organizaciones, es la influencia de factores poco intangibles como la cultura, liderazgo y visión constituyen elementos resilientes denominados suaves. Un ejemplo de ello son las cualidades fundamentales para lograr que diversas unidades de la organización trabajen unidas para el logro del objetivo común, ello incluye buenas comunicaciones, relaciones dentro de la organización, relaciones con los clientes y accionistas claves, confianza y visión compartida.

Walter (2007) indica que el concepto del ciclo adaptativo ayuda a asegurar que las instituciones sean suficientemente flexibles para evitar el traspaso del umbral, el concepto del ciclo adaptativo se basa en la observación que sistemas de todo tipo, como sociales y ecológicos, pasan por cuatro diferentes fases, las que no siguen un ciclo regular pudiendo avanzar o retroceder a través de las fases o saltar de una a otra.

La primera fase que inicia el ciclo es la de crecimiento, en que todo está disponible para que todos los recursos disponibles apoyen el crecimiento a su máxima posibilidad, también aparecen nuevas especies que ingresan al sistema y existe un elevado nivel de flexibilidad en el sistema. Gradualmente se pasa a la fase de conservación en la que el sistema alcanza su máxima capacidad, en esta fase se alcanza un punto de progresivo bloqueo, el sistema se vuelve menos flexible y su desempeño se encuentra limitado. Cada vez se consume más energía en la conservación y menos en el crecimiento y no puede responder fácilmente a las perturbaciones.

En la tercera fase, las interferencias provocan que el sistema tienda al colapso, es una fase rápida y caótica, no hay equilibrio y las conexiones se rompen en una forma muy dinámica y de movimientos rápidos. Finalmente el sistema llega rápidamente a la cuarta fase que es el de la reorganización en la cual aparece la novedad a medida que el sistema se reorganiza hasta llegar a un nuevo equilibrio en un régimen estable.

Un ejemplo que Walter (2007) plantea es aplicar la resiliencia a los granjeros en relación a las fluctuaciones de precio de la lana; el gobierno aplica una banda de precios como protección a los productores asegurando un precio base y haciendo acopio de la lana para cuando los precios suban, pero si en el mercado internacional los precios caen y divergen considerablemente del precio base, la lana acopiada se acumula y la resiliencia aplicada a los granjeros es de corto plazo, genera que el sistema se vuelva menos resiliente a mayor escala en el largo plazo, con lo que eventualmente los precios de la lana acopiada deberán bajar con daños económicos para los granjeros.

- **Optimización de Sistemas Robustos.**

Las futuras metodologías de diseño de sistemas deberán aceptar el hecho que el hardware será imperfecto y permitir el desarrollo de sistemas que sean resilientes, para ello el desafío más importante es el logro de niveles aceptables de robustez a un mínimo de costo, sea este de energía, poder, desempeño, tamaño, diseño y costos de validación.

Mitra (2008) plantea que para enfrentar los desafíos a la confiabilidad de la CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor) es diseñar sistemas robustos usando una combinación de dos técnicas. (Figura 4):

- Otorgar resiliencia suave a los errores (BISER) (Built In soft Error Resilience) para la corrección de errores leves y errores de bits erráticos.

- Usar circuitos con predicción de fallas combinados con técnica de auto verificación en línea denominada CASP (Critical Assessment of Techniques for Protein Structure Prediction) para superar los desafíos de mortalidad infantil y envejecimiento.

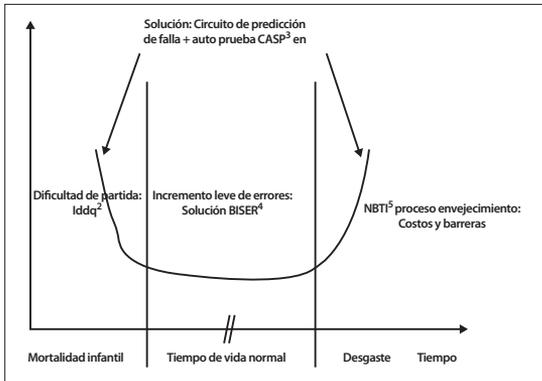


Figura 4. Desafíos de confiabilidad CMOS. (Traducido por el autor). Fuente: Mitra (2008).

(Mulvey et al.1995 citados en Bonfill 2006) establecen que el concepto de optimización robusta se aplica para trabajar con incertidumbre y tomar decisiones menos sensibles a las variaciones de los datos de entrada; una solución es considerada robusta si el desempeño del escenario actual se mantiene cercano al escenario óptimo esperado en un ámbito de incertidumbre.

Las aproximaciones basadas en la representación probabilística de datos inciertos envueltos en un proceso iterativo comprende una realimentación que controla la búsqueda de las decisiones que mejoran el criterio probabilístico deseado y una realimentación interna que administra el desempeño estocástico del problema.

Quienes toman decisiones pueden preferir un elevado nivel de desempeño, aun a riesgo de enfrentar un alto nivel de éste, pero otros prefieren evitarlo, aun a costa de obtener una solución de menor

calidad; incluso ante una fuerte adversidad al riesgo, algunos prefieren un bajo riesgo aunque signifique lograr un muy bajo desempeño del sistema, ello permite evidenciar la importancia de una decisión en los potenciales escenarios. (Sevaux and SÅorensen 2004 citados en Bonfill 2006).

Optimización bajo incertidumbre
• Métodos basados en datos probabilísticos.
Optimización estocástica.
Aproximación de etapa simple.
Programación de opción restringida.
Aproximación de recursos.
Optimización de estocástica dinámica.
• Optimización robusta.
• Métodos basados en datos Fuzzy.
Programación flexible.
Programación posibilística.

Figura 5. Aproximaciones de optimización bajo incertidumbre. (Traducido por el autor). Fuente: Bonfill (2006).

Los requerimientos computacionales se convierten en un factor crítico en la aplicación de modelos proactivos para resolver problemas prácticos ante la existencia de un gran número de parámetros de incertidumbre. No obstante, la capacidad de los métodos de simulación y optimización bajo incertidumbre se encuentran limitados a problemas de tamaño reducido, principalmente debido a los costos de grandes computadores. (Sahinidis 2004 citado en Bonfill 2006). (Figura 5).

La optimización es una de las herramientas más usadas para reducir y corregir los errores de salida de los sistemas, ya que apoyan los procesos de búsqueda, prevención y corrección de errores en los sistemas, sean estos mecánicos, sociales, biológicos o de otra índole.

2. Iddq: Es un método para probar circuitos integrados CMOS para detectar presencia de fallas de construcción.
 3. CASP: Es un chip autónomo concurrente de auto prueba usando patrones predefinidos.
 4. BISER: Técnica usada para corregir errores leves en SRAM.
 5. NBTI: Mecanismos para controlar la inestabilidad de la temperatura.

- **Conclusiones.**

Las principales conclusiones de este trabajo son:

- En el estudio de diversas áreas del conocimiento como la ingeniería, biología, astronomía, y sociedades, la visión sistémica realiza un aporte relevante, ya que permite relacionar aplicaciones de diversos sistemas, aplicar funciones de realimentación y relacionar la eficiencia y productividad de los modelos a través de la comparación de los datos de entrada y salida.
- La globalización está teniendo efectos de estandarización de sistemas, procedimientos, tecnologías y particularmente de tecnologías de la información, esta estandarización tiende a reducir las variantes y las formas de gestionar y emplear sistemas, lo que los hace perder robustez.
- Todos los sistemas se caracterizan por poseer diversos grados de complejidad, todos están insertos en sistemas mayores, siendo por lo tanto unos subconjuntos de los otros, ello lleva a una mutua interdependencia y a la vez a una complejidad dada por la dificultad en los sistemas sencillos e imposibilidad en los sistemas de mayor dinámica de conocer los múltiples efectos que esta interrelación produce sobre los sistemas, sus entradas, procesos y salidas.
- La complejidad de los sistemas se ve incrementada por los procesos de observación y realimentación, los primeros empleados para tratar de conocer los efectos que afectan al sistema en su desarrollo, y los segundos en su proceso de medir y enviar señales de corrección a los sistemas cuando las perturbaciones los alejan del estándar establecido para su funcionamiento, en atención a que ambas situaciones introducen una perturbación al sistema.
- La globalización y la creciente complejidad de los sistemas, incremen-

tan la dependencia de las sociedades humanas en los sistemas de información y computacionales, los que además de estar permanentemente expuestos a un ambiente de permanente y acelerado cambio, también se encuentran expuestos a sofisticados ataques, lo que lleva a la necesidad de otorgarles robustez y resiliencia.

- Para obtener mejores resultados en los procesos sistémicos, es necesario aplicar herramientas como la robustez y resiliencia, las que otorgan a los procesos la capacidad para resistir de mejor manera las perturbaciones que afectan su desempeño, es preciso sin embargo considerar que no hay que confundir eficiencia y corrección con robustez, ya que las primeras sólo buscan obtener una respuesta constante y con un mínimo de errores, mientras la robustez y la resiliencia buscan que los sistemas tengan la capacidad de resistir perturbaciones en un ambiente de cambios dinámicos y a la vez que sean capaces de evolucionar.
- La transformación de un sistema a otro no siempre es necesaria ni positiva, es importante tener presente que otorgar robustez a un sistema en el corto plazo puede generar resultados negativos en el largo plazo y viceversa, por lo cual es conveniente tener presente estos aspectos cuando se diseñan o modifican sistemas para hacerlos robustos.
- El balance entre lo que es posible y lo que es práctico puede otorgar una adecuada visión para equilibrar los diseños robustos y resilientes, ya que la solución teóricamente perfecta puede ser extremadamente cara o poco práctica, además, es conveniente considerar que una organización por sí sola difícilmente puede alcanzar la robustez, ya que está inmersa en un ambiente de múltiples y variables interacciones.

- Los sistemas robustos presentan una amplia gama de posibilidades como campo de estudios y aplicaciones, en la producción masiva, los sistemas de información, sistemas biológicos, ecológicos y sistemas sociales.

* * *

BIBLIOGRAFÍA

1. Hampton, D. 1989. "Administración" 3rd ed. México DF. McGrawhill /interamericana de México.
2. Sánchez – Peña, R. and Sznaiier, M. 1998. "Robust Systems, Theory and Applications". 1th ed. New York. John Wiley and Sons. Inc.
3. Arvidsson, M. and Gremyr, I. 2008. "Principles of robust design methodology". *Quality & Reliability Engineering International* 24, N° 1: 23-35. Academic Search Complete, EBSCOhost. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=e0d8fe185fe17a9cb15c4363fd9e719/MuseHost=web.ebscohost.com/MusePath/ehost/pdf?vid=4&hid=112&sid=ebd286c4-c1e6-4096-afd2-f02e12623457%40sessionmgr107/> (accessed november 28, 2008).
4. Bonfil, A. 2006. "Proactive management of uncertainty to improve scheduling robustness in process industries". Departamento de Ingeniería química, Universidad Politécnica de Cataluña. Available at: http://www.tesisenxarxa.net/TESIS_UPC/AVAILABLE/TDX-0221107-125630//01Abt01de01.pdf/ (accessed november 6, 2008).
5. Carby-Hall, J. 2000. "Redundancy". *Managerial Law* V: 42, 4/5 p: 1 – 127. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=ee3e645dd5b9ca1c77eee2c7ff52cafb/MuseHost=www.emeraldinsight.com/MusePath/Insight/viewPDF.jsp?Filename=html/Output/Published/EmeraldAbstractOnlyArticle/Pdf/0100420401.pdf/> (accessed october 24, 2008).
6. Chang, H. 2007. "Dynamic robust design with missing data". *International Journal of Quality & Reliability Management*; V 24, 16; Research paper. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=922ca6805214b14c4dc2c41923b56a3/MuseHost=www.emeraldinsight.com/MusePath/Insight/viewPDF.jsp?Filename=html/Output/Published/EmeraldFullTextArticle/Pdf/0400240603.pdf/> (accessed october 29, 2008).
7. Doherty, N. 1998. "The role of outplacement in redundancy management". *Personnel Review* V:27, 4 p: 343 – 353. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=9a65daf23b7b89aa57767a77f1c9779/MuseHost=www.emeraldinsight.com/MusePath/Insight/viewPDF.jsp?Filename=html/Output/Published/EmeraldFullTextArticle/Pdf/0140270405.pdf/> (accessed november 2, 2008).
8. Erceg-Hurn, D. and Mirosevich, V. 2008. "Modern robust statistical methods: An easy way to maximize the accuracy and power of your research". *American Psychologist* 63, N° 7: 591-601. *PsycARTICLES*, EBSCOhost. Available at: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/18855490/> (accessed november 4, 2008).
9. Gadd, K. 1995. "Business self-assessment: A strategic tool for building process robustness and achieving integrated management". *Gadd Journal:Business Process Management Journal* VI, 1 3 p:66 – 85. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=8791d8d49d4ebe36efde25e323cc533d/MuseHost=www.emeraldinsight.com/MusePath/Insight/viewPDF.jsp?Filename=html/Output/Published/EmeraldFullTextArticle/Pdf/1570010305.pdf/> (accessed october 29, 2008).
10. Goll I. and Rasheed A. 2005. "The Relationships between Top Management Demographic Characteristics, Rational Decision Making, Environmental Munificence, and Firm Performance". *Organization Studies*, 26, 7, p 999-1023. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=24f4328cab0c8e31331e938327827e8/MuseHost=oss.sagepub.com/MusePath/cgi/reprint/26/7/999/> (accessed october 29, 2008).

11. Gondhalekar, S. and Karamchandani, S. 1994. "Robust Kaizen Systems". The TQM Magazine, V.6 I.3, p. 5 – 8. Available at: www.emeraldinsight.com/10.1108/09544789410057818 / (accessed october 18, 2008).
12. Hiroaki, K. 2006. "Robustness from top to bottom". Nature Genetics 38, N° 2: 133-133. Academic Search Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/detail?vid=4&hid=102&sid=95f6a7b1-3fa3-4c7e-a63b-149bd33a1ded%40sessionmgr7&bdata=JnNpdGU9ZWhvc3QtbnGl2ZQ%3d%3d#db=a9h&AN=19531144> / (accessed october 27, 2008).
13. Jen, E. 2005. "Robust Design: A Repertoire of Biological, Ecological, and Engineering Case Studies". Oxford University Press US. Available at: <http://books.google.cl/books?hl=es&lr=&id=Bol4zcut6zMC&oi=fnd&pg=PA1&dq=Robust+Design:+A+Repertoire+of+Biological,+Ecological,+and+Engineering+Case+Studies&ots=mhtieUBhsF&sig=V26zsEQA1WDlpWuc8t6POXXe4KA> / (accessed november 2, 2008).
14. Jobson, R. 1985. "Future Trends in Physical Distribution". Journal of Marketing Management 1, N° 2: 139-143. Business Source Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=5&hid=106&sid=621d97f6-2e19-410f-98cd-ade0aae01519%40sessionmgr109/> (accessed october 29, 2008).
15. Lempert, R., Groves, D., Popper, W. and Bankes, S. 2006. "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios". Management Science 52, N° 4: 514-528. Business Source Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=2&hid=104&sid=7920c1ef-42b9-486a-a921-dd45d60b803b%40sessionmgr109> (accessed october 29, 2008).
16. Levin, S., and Lubchenco, J. 2008. "Resilience, Robustness, and Marine Ecosystem-based Management". Bioscience 58, N° 1: 27-32. MasterFILE Premier, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=5&hid=102&sid=dc528651-c0e9-4786-9f9a-11eac247b197%40sessionmgr107/> (accessed november 8, 2008).
17. McDonald, T. 2007. "Resilience thinking: Interview with Brian Walker". Ecological Management & Restoration 8, N° 2: 85-91. Academic Search Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=5&hid=9&sid=e11031a4-d14e-40ac-9507-3f4f09e6b170%40sessionmgr2/> (accessed november 10, 2008).
18. Mitra, S. 2008. Globally Optimized Robust Systems to Overcome Scaled CMOS Reliability Challenges Departments of Electrical Engineering and Computer Science Stanford University, Stanford, CA. Available at: <http://www.gigascale.org/pubs/1189/date08.invited.v5.pdf> nov 11 / (accessed november 11, 2008).
19. Ölvander, J. 2005. "Robustness considerations in multi-objective optimal design". Journal of Engineering Design 16, N° 5: 511-523. Business Source Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=2&hid=107&sid=f5509849-338a-4009-9a5f-dd2f34aba010%40sessionmgr107/> (accessed october 29, 2008).
20. Rollins, L. 1999. "Robust Control Theory" Carnegie Mellon University 18-849b Dependable Embedded Systems. Available at: http://www.ece.cmu.edu/~koopman/des_s99/control_theory/ (accessed october 24, 2008).
21. Seville, E., Brunsdon, D., Dantas, A., Le Masurier, J., Wilkinson, S., and Vargo, J. 2008. "Organisational resilience: Researching the reality of New Zealand organisations." Journal of Business Continuity & Emergency Planning 2, N° 3: 258-266. Business Source Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com.ezproxy.apollolibrary.com/ehost/pdf?vid=5&hid=22&sid=b1699a6f-d63b-4f17-94d2-127f6dea1393%40sessionmgr2/> (accessed november 10, 2008).
22. Stephen, E. 2007. "Robustness and Evolvability in Living Systems". Southeastern Naturalist 6, N° 4: 755-756. Academic Search Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com>.

- ezproxy.apollolibrary.com/ehost/detail?vid=4&hid=12&sid=ae2fa05d-f344-4600-b747-6a347d017792%40sessionmgr107&bdata=JnNpdGU9ZWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#db=a9h&AN=29339657 (accessed october 27, 2008).
23. Stephens, C. and Mayiers, M. 2001. "Developing a robust system for Effective Teamwork on Lengthy, Complex Tasks: An Empirical Exploration of Interventions to Increase Team Effectiveness". Proceedings of the International Academy for Information management. Available at: http://eric.ed.gov/ERICDocs/data/ericdocs2sql/content_storage_01/0000019b/80/1a/da/52.pdf/ (accessed november 6, 2008).
 24. Stewart, J. and O'Donnell, M. 2007. "Implementing change in a public agency/Leadership, learning and organisational resilience". *International Journal of Public Sector Management* 20, N° 3: 239-251. Business Source Alumni Edition, EBSCOhost. Available at: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=bah&AN=25131784&site=ehost-live/> (accessed november 28, 2008).
 25. Szathmáry, E. 2006. "A robust approach". *Nature* 439, N° 7072: 19-20. Academic Search Complete, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com/ehost/detail?vid=1&hid=22&sid=6775ff6b-8283-4054-9521-710160a1477e%40SRCSM2&bdata=JnNpdGU9ZWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#db=a9h&AN=19439364/> (accessed october 27, 2008).
 26. Tolani, D., Ray, A., and Horn, F. 2006. "Integrated decision and control of human-engineered complex systems". *International Journal of General Systems* 35, N° 3: 275-294. Academic Search Complete, EBSCOhost (accessed october 29, 2008). Available at: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=2&hid=101&sid=f6cd862d-972a-4261-a641-15015fa302c6%40sessionmgr103/> (accessed october 17, 2008).
 27. Wagner, A. 2005. "Robustness and Evolvability in Living Systems". Princeton University Press: Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v439/n7072/full/439019a.html> / (accessed october 25, 2008).
 28. Wu, S. and Amari, S. 2005. "Computing with Continuous Attractors: Stability and Online Aspects". *Neural Computation* 17, N° 10: 2215-2239. Psychology and Behavioral Sciences Collection, EBSCOhost. Available at: <http://web.ebscohost.com/ehost/pdf?vid=2&hid=101&sid=00a8c10c-6f86-4a23-a984-748611495ee3%40sessionmgr103/> (accessed october 29, 2008).
 29. Ye, N. 2001. "Robust intrusion tolerance in information systems" *Information Management & Computer Security*, Volume: 9 ,n1, 38 – 43. Available at: www.emeraldinsight.com/10.1108/09685220110366786/ (accessed october 16, 2008).
 30. Zakarian, A., Knight, J., and Baghdasaryan, L. 2007. "Modelling and analysis of system robustness". *Journal of Engineering Design* 18, N° 3: 243-263. Academic Search Alumni Edition, EBSCOhost. Available at: <http://swtuoproxy.museglobal.com/MuseSessionID=9ffc609d2a75546389759d8fcd59423e/MuseHost=web.ebscohost.com/MusePath/ehost/detail?vid=1&hid=104&sid=93b1a847-ca3f-438b-949b-5ae9624f7a30%40sessionmgr103&bdata=JnNpdGU9ZWhvc3QtbGl2ZQ%3d%3d#db=a2h&AN=24409848> (accessed october 16, 2008).