

I Introducción.....	1
II Desarrollo.....	1
1 Caos.....	1
2 Sistemas complejos.....	3
3 Sistemas ergódicos.....	5
4 Sistemas de distribución de agua potable.....	6
4.1 Dependencia de escala.....	6
4.2 Dependencia administrativa.....	7
4.3 Autosuficiencia.....	7
4.4 Autosuficiencia en la complejidad.....	7
4.5 Autosuficiencia con vigilancia.....	8
5 Resumen de las etapas de desarrollo.....	10
III Referencias.....	11
IV Notas.....	11

I Introducción

En el siglo VXVIII inició la ciencia y para mediados del siglo XX ya existía un gran cúmulo de conocimientos. Recientemente en muchas disciplinas científicas se apreciaron fenómenos comunes como: caos, propiedades emergentes y complejidad. Para estudiarlos nació una disciplina, y aunque aún es nueva, al considerar sus incipientes descubrimientos es posible adquirir una mejor visión sobre el mundo.

Esta nueva disciplina estudia los procesos dinámicos que se presentan cuando las partes que componen un sistema interactúan entre ellas. Cuando esto sucede aparecen propiedades (emergentes) que no se presentaban antes de que las partes interactuaran y que dependen de la forma en como éstas lo hacen y no de las propiedades específicas de los componentes. Consecuencia de esta característica es que las ciencias de la complejidad tienen como paradigma la universalidad: que diferentes sistemas pueden tener propiedades similares cuando sus partes interactúan, aún cuando los componentes sean diferentes. Esta idea nos es familiar, es la misma propuesta del materialismo dialéctico marxista y de la filosofía oriental, la idea de leyes universales.

En este documento utilizo las propiedades de los sistemas que las ciencias de la complejidad han descubierto para comprender mejor el desarrollo de dos sistemas interrelacionados entre sí: los organismos operadores de agua potable y los sistemas de distribución de agua.

II Desarrollo

1 Caos

Un sistema es un conjunto de cosas o partes que, ordenadamente relacionadas entre sí, contribuyen a determinado objeto o función (Encarta).

Todo está compuesto de partes y por lo tanto todo se puede considerar un sistema: una barra metálica está compuesta de átomos, el cerebro de neuronas, los gases de moléculas.

Unas de las primeras observaciones de caos, orden, desorden y complejidad se dieron en el estudio de los magnetos. Un magneto es una barra de hierro que tiene un campo magnético. La barra se compone de átomos que a su vez son pequeños magnetos alineados todos en dirección al campo de la barra, esto es, el campo de la barra se forma por la suma de la acción de los campos de los átomos que la componen.

Cuando la barra se calienta por encima de cierta temperatura pierde sus propiedades magnéticas. Esto se debe a que con el incremento de la energía interna de los átomos (consecuencia del incremento de temperatura) éstos se vuelven más inestables y llega un momento en que dejan de estar todos alineados. Ahora los átomos vibran y cambian su polaridad (podemos imaginar que giran en su posición) frecuentemente, siguen teniendo carga pero debido a que no están ordenados no generan el campo magnético que podemos apreciar en la barra fría.

La descripción del magneto nos permite mostrar algunas propiedades de los sistemas: orden, desorden y escala. Cuando el sistema está frío y todos los átomos están alineados se presenta el orden. Cuando el sistema está caliente existe el desorden. El campo magnético de la barra es una propiedad que se presenta gracias a la escala del sistema, es producto de una gran cantidad de componentes actuando en forma ordenada.

Otros fenómenos comunes en los sistemas se presentan en el magneto cuando pasa de su estado desordenado al ordenado. Cuando el magneto está ordenado sus átomos no interactúan entre sí, sólo están alineados gracias al campo magnético que existe. Cuando están excitados y cambiando su posición frecuentemente tampoco interactúan entre sí, cada uno se mueve en forma independiente gracias a su energía interna. Esto es, en el orden la fuerza magnética es mayor que la fuerza de la energía interna, y en el desorden sucede lo contrario. ¿Qué pasa en el límite, cuando el magneto cambia del desorden al orden y las fuerzas magnéticas y la energía interna se equilibran? Ahí sucede el caos.

En ese punto crítico los átomos que son vecinos siguen teniendo influencia magnética unos con otros, pero no se forma un campo magnético grande que los ordene a todos porque la energía interna de los átomos aún es suficiente para evitarlo. Puesto que todo átomo es vecino de alguno, todos los átomos tienen influencia sobre el sistema, esto es, se interrelacionan.

¿Qué pasa cuando los átomos interactúan? En este punto la posición de cada uno tiene influencia sobre la posición sus vecinos y afecta el arreglo general del sistema, su posición ahora no depende sólo de una fuerza magnética o del azar de un giro provocado por su energía interna, depende de la posición de sus vecinos. Aunque cada átomo sólo tiene relación con sus vecinos, estructuras complejas y correlacionadas emergen de las relaciones locales. La información local de alguna forma se propaga hacia el resto del sistema creando estructuras

que no se pueden comprender al considerar exclusivamente las propiedades de sus componentes (Solé, p. 40). Las estructuras que se forman en el magneto durante el caos son una propiedad **emergente** porque sólo se presentan cuando existe interacción entre sus átomos y no se pueden explicar con las propiedades de las partes (en este caso los átomos)¹.

Cuando las fuerzas magnéticas e internas se equilibran se presenta el caos: la configuración del sistema en su totalidad depende de las relaciones entre los átomos y no solamente de sus propiedades. El **caos** es un proceso dinámico que en el caso del magneto se presenta en forma pasajera al cruzar un punto de temperatura crítica. Es en este punto entre el orden y el desorden, en el caos, cuando se presenta la complejidad. Ahora el arreglo de los átomos es complejo, no se puede describir diciendo simplemente que están todos en la misma posición o que cambian su posición al azar. De hecho la posición de los átomos forma una figura fractal, cuya descripción requiere de un detallado recuento de la posición de cada átomo.

Otra propiedad de los eventos de caos es que sus resultados son impredecibles. Esta característica se da por dos razones: porque el resultado se puede modificar con pequeñas variaciones en las condiciones iniciales y porque pueden aparecer propiedades emergentes que no se explican con las características de los componentes del sistema.

Un experimento mental puede mostrar por qué son impredecibles los resultados del caos: supongamos que en un tiempo inicial tenemos un magneto a una temperatura inferior a la crítica y con sus átomos en posiciones definidas al azar de tal forma que la mitad está en una posición Norte y el resto en la otra posición Sur. La dinámica de este sistema lo llevará a ordenar todos los átomos en una u otra dirección, la posición en la cual se ordenen dependerá de la posición inicial de cada uno de los átomos y de los movimientos azarosos de éstos que se den durante el proceso dinámico. Dependerá también de las propiedades emergentes que surjan, en este caso de la formación de ciertos arreglos fractales que tendrán influencia en la posición final. Es completamente impredecible.

2 Sistemas complejos

El ejemplo del magneto muestra un caso pasajero de caos, durante el cual se presenta complejidad y propiedades emergentes. Aunque en muchos sistemas no biológicos el caos no es común, los científicos de la complejidad han encontrado que los sistemas biológicos funcionan al borde del caos.

Un ejemplo visual de propiedades emergentes en este tipo de sistemas se puede ver en <http://www.cmp.caltech.edu/~mcc/Patterns/index.html>. En la página se dan ejemplos de sistemas donde se forman patrones espaciales en diferentes sistemas. Estos patrones aparecen por la interrelación que existe entre los componentes del sistema (que pueden ser células), no necesitan de un controlador central para formarse, son propiedades emergentes porque se presentan cuando una gran cantidad de componentes interactúan y no se pueden predecir los patrones conociendo solamente las propiedades de las células, es necesario conocer cómo interactúan.

Debido a que los sistemas biológicos funcionan al borde del caos sus partes siempre están interrelacionadas y por lo tanto son complejos y tienen muchas propiedades emergentes. Kauffman propone que en este tipo de sistemas no aplica la segunda ley de la termodinámica (Kauffman). Una sencilla descripción de la 2ª ley se puede encontrar en la enciclopedia:

La segunda ley de la termodinámica da una definición precisa de una propiedad llamada entropía. La entropía puede considerarse como una medida de lo próximo o no que se halla un sistema al equilibrio; también puede considerarse como una medida del desorden (espacial y térmico) del sistema. La segunda ley afirma que la entropía, o sea, el desorden, de un sistema aislado nunca puede decrecer. Por tanto, cuando un sistema aislado alcanza una configuración de máxima entropía, ya no puede experimentar cambios: ha alcanzado el equilibrio. La naturaleza parece pues 'preferir' el desorden y el caos (Encarta).

En la cita el caos mencionado es sinónimo de desorden, no es el caos al que me referí en la sección pasada. La segunda ley dice pues que la naturaleza prefiere el desorden, sin embargo eso no aplica en los seres vivos, pues estos pueden ser cada vez más complejos².

Kauffman propone que en los sistemas que funcionan al borde del caos se viola el espíritu de la segunda ley de la termodinámica (que la naturaleza parece preferir el desorden) y una opuesta aplica: los sistemas que se mantienen al borde del caos parecen preferir la complejidad.

Este tipo de sistemas son los seres vivos y los sistemas de los que ellos forman parte: ecosistemas, la biosfera, colonias de insectos, la sociedad, las organizaciones humanas.

Existen también los sistemas que los seres humanos construyen: máquinas, redes de computadoras, redes de distribución de energía eléctrica, redes hidráulicas, etc. Estos sistemas pueden ser complejos, pero no funcionan al borde del caos y por lo tanto están sujetos a la 2ª ley de la termodinámica. Por tener tendencia hacia el desorden requieren de mantenimiento, es necesario que un sistema complejo no sujeto a la 2ª ley lo construya y lo mantenga funcionando.

En lo sucesivo me referiré a los sistemas biológicos y los constituidos de ellos como complejos, indicando así que sólo en ese estado pueden funcionar; o también como autosuficientes, indicando que no están sujetos a la 2ª ley. Los sistemas construidos por el hombre, que aunque pueden tener cierta complejidad no funcionan al borde del caos, los llamaré **sistemas ergódicos**, que significa que están sujetos a la 2ª ley de la termodinámica.

Los sistemas complejos utilizan su complejidad y escala para sobrevivir en su ambiente. Mientras más complejo sea su ambiente, mayor deberá ser su escala o su complejidad. Así, las especies más simples (menos complejas) como los insectos y los microorganismos utilizan la escala, multiplicándose en grandes cantidades, para sobrevivir. Los organismos más complejos, como los mamíferos, utilizan la complejidad (la conciencia es uno de los fenómenos más complejos, y le otorga muchas herramientas de sobrevivencia a los organismos que la poseen) y no requieren de tanta descendencia (ver Bar-Yam 2002).

Las organizaciones humanas también utilizan la complejidad y la escala para ejercer sus efectos en el mundo y sobrevivir en él. Inicialmente las organizaciones

utilizaban la escala para ser efectivas, tal es el caso por ejemplo de las legiones romanas. En este tipo de organizaciones la jerarquía es la guía para coordinar las acciones de cada individuo, esta coordinación se puede realizar porque el comportamiento de cada uno es muy sencillo. La efectividad de esta organización está en su escala, en la gran cantidad de individuos haciendo lo mismo.

Con la producción en serie las organizaciones se hicieron un poco más complejas. Aunque aún es una organización jerárquica, las actividades que realizan los individuos difieren de uno a otro, y pesar de que las actividades son variadas, cada persona hará las suyas en forma repetitiva. Aquí la complejidad se da en la coordinación que deberá existir entre ellos, misma que es conseguida mediante el orden jerárquico generado por el gerente de la organización. Debido a que todas las decisiones importantes deben ser tomadas por el gerente, la complejidad de estas organizaciones depende de la complejidad del gerente.

A partir de los años 70s las organizaciones se pudieron hacer aún más complejas al alejarse de la organización vertical (jerárquica) y hacerse más horizontales. Esto provoca que el gerente no sea una limitante en la información que la organización puede procesar. En este tipo de organizaciones la complejidad de la misma es mayor que la de cualquiera de los individuos que la componen (ver Watts, capítulo 9).

Debido a que la eficiencia proviene de la escala y la complejidad de la organización, pueden existir empresas pequeñas muy complejas que sean más competitivas que una empresa de gran escala. Este es el motivo de que pequeñas compañías nuevas hayan puesto en jaque a grandes empresas como IBM.

3 Sistemas ergódicos

Los sistemas construidos por el hombre también requieren de complejidad y escala para ser efectivos y satisfacer las necesidades planteadas en su diseño. Debido a que estos sistemas requieren de sistemas complejos autónomos (en el sentido de que no están sujetos a la 2ª ley y no requieren mantenimiento) que los mantengan funcionando, deberá existir una organización de personas que lo haga.

Esa organización utilizará su escala y complejidad para controlar el sistema ergódico. Por lo tanto, a la organización le conviene que el sistema ergódico sea efectivo (que satisfaga los requisitos del diseño) con la menor complejidad y escala posible, de esta forma la organización podrá ser de escala pequeña y baja complejidad.

Los sistemas ergódicos funcionan en el orden, no en el caos. Cuando sus partes interactúan de formas diferentes a las esperadas por el diseño se presenta el caos (como un fenómeno pasajero), y en este tipo de sistemas el caos implica desorden y confusión. Como mencioné arriba, los eventos de caos producen resultados impredecibles y por este motivo no son deseables en los sistemas ergódicos.

Sin embargo, aunque no son deseables, en los sistemas complejos es prácticamente imposible evitarlos. Debido a que existen muchas formas como sus componentes pueden interactuar resulta difícil prevenirlas todas. Este hecho es la

razón de que se exista la Ley de Murphy: si algo puede salir mal, saldrá mal³. A los accidentes que suceden en sistemas complejos y son ocasionados por causas impredecibles Charles Perrow les llama “accidentes normales” (Perrow).

En este punto del documento es conveniente hablar del sistema ergódico de distribución de agua potable en especial. El sistema de distribución de agua potable (SDA) requiere de una organización de personas, el organismo operador de agua potable (OOA) que lo construya y mantenga funcionando.

A continuación por SDA me referiré a toda la infraestructura requerida para llevar agua potable a la población de una comunidad, incluyo aquí la fuente, la captación, el tratamiento y el sistema de distribución en sí.

4 Sistemas de distribución de agua potable

A continuación utilizo los conceptos mencionados sobre sistemas complejos para proponer una clasificación de los estadios de desarrollo del conjunto de sistemas OOA y SDA.

4.1 Dependencia de escala

La primera etapa es la de *dependencia de escala*. En la fase inicial del desarrollo conjunto de ambos sistemas, el OOA no puede ser autosuficiente porque la escala del SDA no lo permite. Esto se debe a que el costo por lps de agua potable suministrada aumenta conforme menor sea el flujo proporcionado. Como ejemplo de las causas de este fenómeno se presenta la siguiente gráfica del precio de potabilizadoras de agua superficial por lps de capacidad.

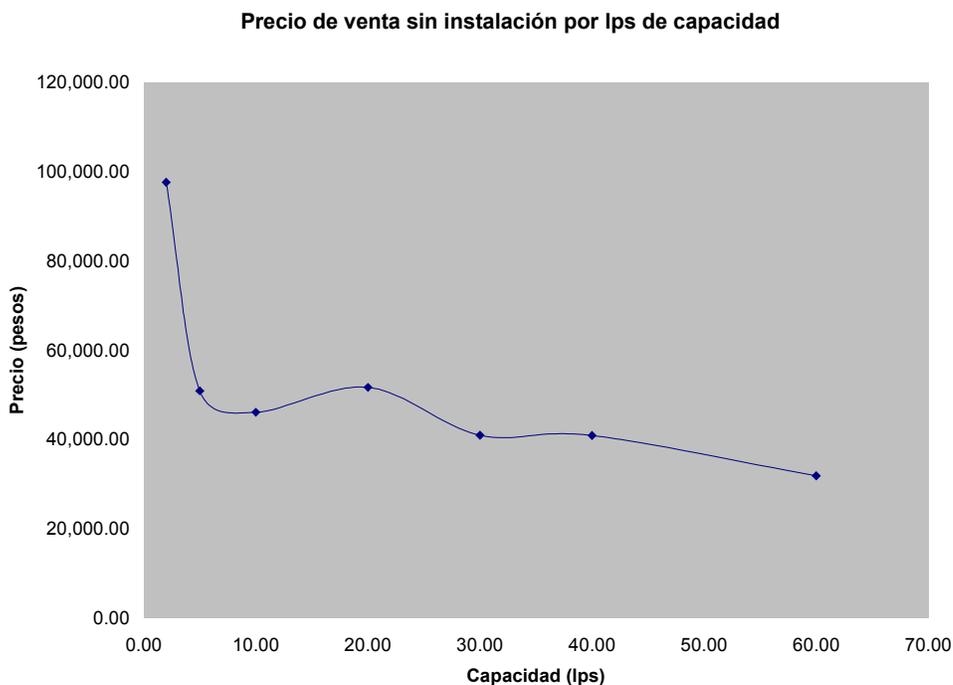


Figura 1. Precio de potabilizadoras de agua superficial por lps de capacidad.

En este período el OOA no puede ser autosuficiente aún siendo un organismo muy eficiente: su escala no se lo permite.

4.2 Dependencia administrativa

En el segundo período, llamado *dependencia administrativa*, el conjunto OOA y SDA ya tienen la escala requerida para que el OOA sea autosuficiente pero aún le falta complejidad para que sea eficiente y pueda trabajar “con número negros”. El OOA no sólo opera el SDA, también tiene que cobrar, capacitar a su propio personal, formar conciencia en la comunidad sobre el costo del agua y muchas actividades más. Si falla en cualquiera de estas tendrá problemas para ser eficiente y no será autosuficiente aunque su escala se lo permita.

4.3 Autosuficiencia

El siguiente período es el de *autosuficiencia*, que se consigue cuando la combinación de escala y complejidad le permiten al OOA operar con ganancias económicas. En esta etapa el OOA inicia la mejora de sus servicios al cliente y fortalece todos sus departamentos.

Si la escala del SDA sigue creciendo se pueden presentar problemas por la alta complejidad que el sistema puede llegar a adquirir. Debido a que en la red de agua potable todos sus nodos están interconectados la complejidad del sistema crece conforme su escala lo hace. En una red grande es difícil conocer su funcionamiento o predecir qué sucederá si se hacen algunas modificaciones, pues los sucesos que se presentan en algunos componentes del sistema afectan al resto.

Existen dos formas de **controlar** (entender el sistema y utilizar el entendimiento para modificar su comportamiento) un sistema ergódico: incrementar la escala o complejidad del OOA o reducir la escala y complejidad del SDA. La segunda alternativa será más económica pero no siempre es posible llevarla a cabo porque la reducción de la complejidad y escala del sistema de distribución se debe hacer cumpliendo con los requisitos de diseño del sistema.

Cuando un OOA se enfrenta a problemas provocados por un sistema demasiado complejo que le impiden satisfacer sus criterios de servicio (calidad del agua, cantidad de pérdidas, continuidad del servicio, etc.) entonces entra en la etapa de *autosuficiencia en la complejidad*.

4.4 Autosuficiencia en la complejidad

Esta etapa se reconoce cuando el OOA quiere incrementar la exigencia de sus criterios de servicio o cuando el sistema ha crecido tanto que su complejidad provoca problemas para controlarlo. En cualquier caso las estrategias para mejorar el control del SDA son incrementar la escala y complejidad del organismo o reducir las del sistema. Existen varias alternativas para conseguir esto.

Los procesos de sectorización buscan reducir la complejidad del SDA. Al reducir la interconectividad de la red se reduce la interdependencia de sus componentes y con esto su complejidad. Esta estrategia se utiliza también en otros sistemas ergódicos con el nombre de modulación, donde se evita al máximo la interacción entre diferentes componentes del sistema. Cuando uno falla no afecta al resto y si

lo hace (en algunos sistemas así sucede) un simple reemplazo del componente dañado restablece el sistema (ver Frame).

Perrow (p.88) realizó una tabla para identificar la complejidad en un sistema, en ella calificó con 1 si el sistema de distribución (SD, no incluye la fuente, la obra de toma, ni el tratamiento) tiene la característica de complejidad. Utilicé dos tipos de SD: abierto y sectorizado. El resultado se muestra en la siguiente tabla.

Sistemas complejos	Sistemas lineales	SD sectorizado	SD abierto con SCADA
Proximity	Spatial segregation	0	0
Common-mode connections	Dedicated connections	1	1
Interconnected subsystems	Segregated subsystems	0 En el sistema de distribución se presentan subsistemas segregados.	1
Limited substitutions	Easy substitutions	1	1
Feedback loops	Few feedback loops	0	0
Multiple and interacting controls	Single purpose, segregated controls	0	1
Indirect information	Direct information	1	1
Limited understanding	Extensive understanding	0.5	1
	Índice:	3.5	6

Tabla 1. Evaluación de la complejidad de sistemas abiertos y sectorizados según criterios de Perrow.

En la tabla se aprecia que el sistema sectorizado es menos complejo que el abierto de acuerdo a estos criterios.

Existen también herramientas tecnológicas que permiten incrementar la complejidad del OOA, por ejemplo las herramientas computacionales de simulación, que gracias a la complejidad adquirida en el organismo con su implementación permiten un mejor control (conocimiento y entendimiento) del SDA.

4.5 Autosuficiencia con vigilancia

Existe aún otra etapa que busca robustecer el sistema, se llama *autosuficiencia con vigilancia*. Robustecer el sistema significa evitar que falle o minimizar el efecto adverso que las fallas pueden tener en la calidad del agua que se suministra.

Arriba mencioné que durante el caos los resultados son imprevisibles y que en los sistemas ergódicos complejos los eventos de caos son prácticamente inevitables. En un SDA la presencia de eventos caóticos (donde la complejidad del sistema es la causa de un accidente al permitir la interrelación entre sus partes) puede no ser muy frecuente, pero éstos se pueden presentar. Además existen fallas que afectan al sistema sin necesidad de ser caóticas, fallas lineales.

Perrow menciona que un tipo de sistema será propenso a fallas (mismas que pudieran interactuar para provocar un accidente natural, o que simplemente provocan un incidente o accidente no natural)⁴ en función de los siguientes criterios (Perrow, p.371):

Criterios	Comentarios sobre el SDA
Experience with operating scale –did it grow slowly, accumulating experience (fossil fuel utility plants) or rapidly with no experience of the new configuration or volumes (nuclear power plants)?	La experiencia actual es para suministrar agua, no para evitar catástrofes
Experience with the critical phases –if starting and stopping are the risky phases, does this happen frequently (take offs and landings) or infrequently (nuclear plant outages)?	Las fases críticas son eventos ambientales. Si esto es así, no se tiene mucha oportunidad de aprovecharlos.
Information on errors –is this shared within and between the organizations? (Yes, in the Japanese nuclear power industry; barely in the U. S.) Can it be obtained, as in air transport, or does it go to the bottom with the ship?	Sólo con SV bien implementados: Requiere GIS, cierto nivel de SCADA
Close proximity of elites to the operating system –they fly on airplanes but don't ship on rusty bottoms or live next to chemical plants.	No, las elites consumen agua embotellada
Organizational control over members –solid with the naval carriers, partial with nuclear defense, mixed with marine transport (new crews each time), absent with chemical and nuclear plants (and we are hopefully reluctant to militarize all risky systems).	Ausente
Organizational density of the system's environment (vendors, subcontractors, owner's/operator's trade associations and union, regulators, environmental groups, and competitive systems) –if rich, there will be persistent investigations and less likelihood of blaming God or the operators, and more attempts to increase safety features.	Pobre

Tabla 2. Criterios para evaluar la posibilidad de accidentes en los SDA

Una forma efectiva de prevenir las fallas es mediante cajas negras, tal como se hace en los aviones. Mediante ellas es posible conocer las causas de los accidentes o incidentes y con este conocimiento se pueden tomar medidas para hacer más robusto el sistema. ¿Cuál es el equivalente de la caja negra en el SDA? El sistema de vigilancia de la calidad del agua (SV). El SV tiene la función de la caja negra: conocer las causas de los eventos de caos; y además tiene el objetivo de prevenirlas.

El SV utiliza criterios de calidad del agua para evaluar los efectos de los accidentes, esto se hace así porque su incumplimiento puede tener las consecuencias más dañinas para la población; pero también porque son los criterios más sofisticados, los que mayor complejidad y escala exigen del OOA y el SDA.

Como mencioné arriba, se puede incrementar la complejidad del OOA para tener un mejor control del sistema, específicamente, el SV requiere de un buen control del SDA que permita detectar causas. Las causas de las fallas se podrán detectar con diferentes herramientas como el SIG (Sistema de información geográfica), con el cual es posible identificar las condiciones de diferentes componentes del sistema en el momento de la falla, mismas que podrían ayudar a encontrar la causa.

Los sistemas SCADA se utilizan para recopilar información del SDA que permita un conocimiento actualizado del mismo. Cuando el SDA es muy complejo, por ejemplo cuando su red es abierta (no sectorizada), se requerirá un SCADA muy completo y sofisticado para poder conseguir un buen control del sistema.

5 Resumen de las etapas de desarrollo

En la siguiente tabla se presenta un resumen de las etapas de desarrollo de un OOA:

Etapas	Características	Objetivos	Herramientas técnicas
Dependencia de escala	El tamaño del SDA le impide al OOA ser autosuficiente	Crecimiento	Proyectos
Dependencia administrativa	El OOA es ineficiente, no ha desarrollado la capacidad administrativa para ser autosuficiente	Autosuficiencia económica	Proyectos
Autosuficiencia	El OOA es autosuficiente y se dedica a mejorar los servicios y sus departamentos	Mejora de los departamentos y el servicio	Digitalización de la red hidráulica, modelos,
Autosuficiencia en la complejidad	El OOA aprecia problemas para seguir mejorando sus servicios debido a la complejidad del SDA o la exigencia de éstos	Mejora de los criterios de servicio y vigilancia de la calidad del agua	Sectorización, modelos, SCADA, GIS
Autosuficiencia con vigilancia	El OOA implementa y opera con el SV	Robustecer del sistema	Sistema de vigilancia

La reducción de la complejidad del SDA cumple tres funciones: 1) mejora el control sobre el sistema y gracias a esto 1.1) permite la operación del sistema con criterios de servicio más estrictos y 1.2) permite la implementación de un SV (debido a que el SV funciona como una caja negra que recopila información sobre el sistema para determinar causas, es imprescindible que el sistema esté controlado y se comprenda lo que en él sucede para identificar causas); y 2), reduce las posibilidades de accidentes caóticos (naturales).

Por otro lado, el incremento de la complejidad del OOA permite el control del sistema, capacidad necesaria para prevenir accidentes y ofrecer el servicio de agua cumpliendo con estrictos criterios de calidad.

Esta clasificación de estadios de desarrollo y los conceptos de complejidad permitirán una mejor evaluación de los OOA y una mejor recomendación de los proyectos a implementar.

III Referencias

- Bar-Yam 1997 Yaneer Bar-Yam. "Dynamics of complex systems". Westview Press, 1997.
- Bar-Yam 2002 Yaneer Bar-Yam. "General features of complex systems", in in Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS), developed under the Auspices of the UNESCO, EOLSS Publishers, Oxford ,UK, <http://www.eolss.net>, 2002. [PDF file](#)
- Encarta Enciclopedia Microsoft(R) Encarta(R) 99. (c) 1993-1998 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.
- Frame J. Davidson Frame. "La nueva dirección de proyectos".
- Kauffman Stuart Kauffman. "Investigations". Oxford University Press, 2000.
- Perrow Charles Perrow. "Normal accidents. Living with High-Risk Technologies". Princeton University Press, 1999.
- Solé Ricard Solé y Brian Goodwin. "Signs of life. How complexity pervades biology". Basic Books, 2000.
- Watts Duncan J. Watts. "Six degrees. The science of a connected age", W. W. Norton & Company, 2003

IV Notas

¹ Las propiedades emergentes normalmente sí se pueden explicar conociendo varios detalles de las partes, pero primero se llega a conocer y modelar la propiedad emergente y después se buscan las propiedades de las partes que las puedan explicar. Esto es, primero se aprecian las propiedades emergentes (y en ese sentido son emergentes, porque no se conoce lo suficiente de las partes para predecirlas) y posteriormente se modela y se proponen características de los componentes en el nivel inferior que las expliquen. Existe también el concepto de “emergente radical”, para las propiedades emergentes que definitivamente no se pueden explicar con las propiedades de las partes (ver Solé, p.19). De cualquier forma, las propiedades emergentes se aprecian antes de poder predecirlas con el conocimiento de las partes y por lo tanto “no se pueden explicar con las propiedades (conocidas) de las partes”.

² En realidad los seres vivos no violan la 2ª ley, sólo su espíritu. El espíritu de 2ª ley es que la naturaleza prefiere el desorden. Una mejor interpretación de la ley dice que un sistema cerrado siempre tenderá hacia el equilibrio. Así, el sistema solar en su totalidad se está equilibrando, su entropía se incrementa y todas las formas de energía se convierten al final en calor, pero algunos subsistemas aprovechan las fuentes de energía (las solar especialmente) para mantenerse ordenados. En lugar de que la luz del sol produzca calor en la superficie de la tierra (la producción de calor es la forma más rápida de conseguir equilibrio) produce un flujo de energía a través de los seres vivos. Aunque finalmente toda la energía se convertirá en calor, en el proceso se aprovecha para mantener sistemas complejos.

³ Existen muchas versiones de esta ley. Por ejemplo las siguientes, obtenidas de <http://dmawww.epfl.ch/roso.mosaic/dm/murphy.html>:

MURPHY'S LAWS

Nothing is as easy as it looks.

Everything takes longer than you think.

Anything that can go wrong will go wrong.

If there is a possibility of several things going wrong, the one that will cause the most damage will be the one to go wrong. Corollary: If there is a worse time for something to go wrong, it will happen then.

If anything simply cannot go wrong, it will anyway.

If you perceive that there are four possible ways in which a procedure can go wrong, and circumvent these, then a fifth way, unprepared for, will promptly develop.

Left to themselves, things tend to go from bad to worse.

If everything seems to be going well, you have obviously overlooked something.

Nature always sides with the hidden flaw.

Mother nature is a bitch.

It is impossible to make anything foolproof because fools are so ingenious.

Whenever you set out to do something, something else must be done first.

Every solution breeds new problems.

⁴ Perrow (p.70) distingue entre accidentes naturales, los que son provocados por la interacción de varias fallas en sistemas complejos y que son impredecibles, y “component failure accidents” que son los que son causados por fallas previsibles. Clasifica los sistemas en cuatro partes: unidades, partes, subsistemas y sistema. Los accidentes son los que dañan algún subsistema o el sistema deteniendo el resultado esperado de los mismos. Los incidentes son los dañan las unidades o las partes y pueden o no interrumpir el resultado del sistema.