

# LAS ESCUELAS DE INGENIEROS ANTE EL RUMBO DE LA REFORMA DEL SECTOR ELÉCTRICO

Recibido: 16/04/07

Aceptado: 18/06/07

*THE SCHOOLS OF ENGINEERS FACING THE REFORMATION OF THE ELECTRIC SECTOR*

## RESUMEN

Caído en el olvido, hoy pocos recuerdan que el origen y fundamento tecnológico en torno al que gravita la reforma que, a escala mundial, sacude al sector eléctrico desde hace varios lustros es el "Modelo MIT". En este artículo se describen las circunstancias que rodearon su desarrollo y aplicación, y las consecuencias de su fracaso. Al mismo tiempo se analizan los problemas que ocasiona la desintegración vertical y otras barreras a la emergencia del control distribuido y las tecnologías de la red del futuro; para finalmente situar a las Escuelas de Ingeniería ante esta encrucijada.

**Palabras clave:** Desintegración vertical, control distribuido, red del futuro, sistemas de potencia.

## ABSTRACT

*Fallen in the forgetfulness, today few remember that the origin and technological foundation around which gravitates the reform that on world-wide scale has been shaking to the electrical sector for several lusts is "Model MIT". In this article the circumstances that surrounded their development and application, and the consequences of their failure are described. At the same time the problems are analyzed that cause the vertical disintegration and other barriers to the emergency of the distributed control and the technologies of the network of the future; finally to locate to the Schools of Engineering before this crossroads.*

Jesús M<sup>a</sup> Martín Giraldo  
Dr. Ingeniero Industrial  
Unión Fenosa



**Key words:** *Vertical disintegration, distributed control, network of the future, systems of power.*

## 1. CRÍTICA DEL "MODELO MIT"

Desarrollando la Estimación de Estado, **Schweppe** contribuyó enormemente al avance de la carrera espacial y de la balística intercontinental<sup>1</sup>, y, por extensión, al control y a la operación en tiempo real de los Sistemas de Potencia cuando más tarde introdujo en ellos esta técnica al publicar sus tres famosos artículos en las *IEEE PAS Transactions* en enero de 1970. Todo esto le reportó gran reconocimiento, enorme prestigio profesional y reputación intelectual. Desafortunadamente, hasta ahora no puede decirse lo mismo de su *Control Homeostático* (referencias 1 a 10), origen de lo que se conoce como el "modelo MIT", desarrollado en el Laboratorio de Energía del MIT (**Massachusetts Institute of Technology**), ideado en una época de euforia tecnológica marcada por la carrera espacial y utilizado como argumento tec-

nológico fundamental para sustentar la reforma que a escala mundial viene experimentando el Sector eléctrico desde hace más de tres lustros.

Para soportar su Control Homeostático, **Schweppe** inventó y patentó en 1979 el *FAPER*<sup>2</sup> (*Frequency Adaptive, Power-energy Re-scheduler*) a un dispositivo de control destinado introducir en el Sistema de Potencia un control de frecuencia basado en la demanda que complementara el del AGC (Control Automático de la Generación)<sup>3</sup>. Los controles del *FAPER* operarían a nivel cliente, administrando de manera individualizada las puntas de las cargas de cada uno de ellos, y responderían de forma también individualizada a las variaciones de frecuencia resultantes de los desequilibrios entre carga y generación de todo el sistema. Aquéllos que estén familiarizados con el AGC<sup>3</sup> comprenderán fácilmente la extraordinaria complejidad del planteamiento. Sería interesante saber cuál era la estrategia de patentes del MIT en relación con este asunto en aquella época, y

<sup>1</sup> La generalización de la Programación Dinámica permitió el desarrollo de la Teoría de la Identificación Garantizada y la Estimación de Estado, introducida simultáneamente por **Schweppe** y **Witsenhausen** en los EEUU, y por **Krasovski** y **Kurzhanski** en la URSS, todos en 1968. La teoría permitía resolver numerosos problemas de ruido gaussiano que planteaba el control y la navegación aeroespacial en aquel tiempo, y que el filtro de **Kalman-Wiener** no resolvía.

<sup>2</sup> <http://www.freepatentsonline.com/4317049.html>

<sup>3</sup> Control Automático de la Generación. Para más detalle consúltese la obra de **Nathan Cohn**, *Control of Generation and Power Flow on Interconnected Systems*, John Wiley & Sons, 1967.

quienes se mueven en el campo de la I+D saben que no es una cuestión baladí. La patente del *FAPER* ha caducado y ahora es de libre disposición. Algunas investigaciones están utilizando ahora estas ideas (11) para desarrollar dentro del campo de las actuaciones de Gestión de la Demanda lo que se conoce como Respuesta (Dinámica) de la Demanda<sup>4</sup>, que consiste en una forma avanzada de la Gestión de Carga clásica (*Load Management*).

Sin embargo, antes de continuar es importante hacer una digresión para recordar a los "olvidadizos", o decir a los jóvenes que lo desconocen, que en modo alguno se le puede atribuir a **Schweppe** la paternidad del marginalismo en el Sector Eléctrico. Con la creación de **Electricité de France** al término de la II Guerra Mundial, **Pierre Massé** y **Marcel Boiteux**, ambos de **EdF**, desarrollaron con su equipo la que se vino a llamar la *Escuela Marginalista Francesa* cuya aplicación práctica más sobresaliente fue la famosa tarifa "vert". Por consiguiente, y en relación con los precios nodales, es importante señalar que su interpretación económica era ya conocida en Europa a principio de los años 50, puesto que fue Marcel Boiteux precisamente, más conocido por sus teorías de tarificación de la punta, quien escribió junto con **Paul Stasi** un extenso artículo para las Jornadas de la **UNIPED** de Roma de 1952, en el que mostraban, más de 20 años antes que **Schweppe** y su equipo, que las leyes de **Kirchoff** hacían que el precio de la electricidad fuera diferente en cada nudo de la red y que estas diferencias estaban relacionadas con la solución de un flujo de cargas óptimo (13). Este artículo fue posteriormente incluido como el Capítulo 5 de un libro editado en 1964 por **James R. Nelson**, profesor de Economía del **Amherst College**, titulado *Marginal Cost Pricing in Practice* (15). Posteriormente, este mismo artículo se incluyó también en un libro de **Dunod** titulado *Vingt-cinq ans*

*d'économie électrique: investissements, coûts marginaux et tarifs* (16). El lector curioso que desee ampliar su información al respecto puede descargar por Internet y leer el interesante artículo del argentino **Alieto A. Guadagni**, titulado *El Marginalismo y la política de precios de las empresas nacionalizadas en Francia: El caso de l'Électricité de France* (14).

La historia del "modelo MIT" se describe en el prólogo del famoso libro *Spot Pricing of Electricity* (12). Un párrafo importante de ese prólogo es el que describe el encuentro entre el "modelo MIT" (precio "spot") y la desregulación (Reforma del Sector Eléctrico) cuando menciona los intercambios de ideas con **William Berry**, a la sazón presidente de la **Virginia Power**. Sin embargo, ese prólogo no cuenta que los trabajos del "modelo MIT" habían sido ignorados por la administración **Carter**, que en 1978 había promulgado la bien conocida ley *PURPA*<sup>5</sup>, un elemento clave del *National Energy Plan* de Carter, para estimular las energías renovables, y que hizo posible el acceso de los cogeneradores (NUGs o *non-utility generators*) a las redes de transporte de las Compañías eléctricas. El prólogo tampoco cuenta que, a principios de los años 80, el Sector Eléctrico de los EEUU experimentaba una fuerte crisis financiera en la que no vamos a entrar ahora, y que fue Berry quien propuso (17) la separación funcional de actividades del Sector Eléctrico (generación-transporte-distribución). Al principio, la propuesta de Berry no fue tenida en cuenta por muchas empresas eléctricas, pero sí se hicieron eco de ella en el DoE (**Ministerio de Energía**), puesto que en aquella época la desregulación de los monopolios era una idea central del pensamiento de la Administración **Reagan**. En 1986, Reagan nombró a **Martha Hesse** presidenta de la **FERC** (*Federal Energy Regulatory Commission*) para que promoviera la competencia en el Sector Eléctrico, y en 1987 doce compañías eléctricas lideradas por

Berry, al tanto de los trabajos de **Schweppe**, formaron el **Utility Working Group** y enviaron una carta de Martha Hesse para que promoviera la competencia en el mercado mayorista. Poco después, el **Edison Electric Institute** (la patronal eléctrica de los EEUU, similar a la **UNESA** española) se escindió en dos facciones enfrentadas, por un lado el mencionado **Utility Working Group** de **Berry**, y, por otro, el resto de las compañías eléctricas que formaron la **Electric Reliability Coalition**. Hoy, cuando el Sector Eléctrico español atraviesa estos agitados tiempos de OPAs y no puede decirse que **UNESA** viva sus mejores tiempos, sabemos bien quién tenía razón en aquella pugna del sector eléctrico estadounidense de los años 80: la desregulación o no se ha iniciado o está paralizada en numerosos Estados.

## 2. EL MEOLLO DE LA CUESTIÓN: ¿TEORÍA DE CONTROL O TEORÍA REGULATORIA?

Los ingenieros auténticos no deberían cansarse de repetir que la creación del mercado eléctrico, tratada exclusivamente hasta ahora dialécticamente, se trata más bien de un problema tecnológico, fundamentalmente de control que de otra cosa, y debe ser muy complejo cuando los avances de la Electrónica de potencia aún no han logrado resolverlo. Esto no se ha entendido debidamente y se están pagando las consecuencias de ello. Cuando hablamos de estabilidad, de colapsos de tensión... de apagones, pero también de desintegración vertical, de lo que estamos hablando es fundamentalmente de control, y hay que repetirlo tres veces: de control, de control y de control del Sistema de Potencia; esto es, de problemas que no se resuelven con una regulación cuya complejidad está alcanzando las cimas del arte barroco. A quienes reverencian a **Schweppe** les pregunto: *Cuando Schweppe hablaba del Control Homeostático, ¿de qué hablaba, de control o de regula-*

<sup>4</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Demand\\_response](http://en.wikipedia.org/wiki/Demand_response)

<sup>5</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Public\\_Utility\\_Regulatory\\_Policies\\_Act](http://en.wikipedia.org/wiki/Public_Utility_Regulatory_Policies_Act)

ción? Y esos mismos deberían echar una ojeada, por ejemplo, a los trabajos del TC57 de la CEI<sup>6</sup> para que se den cuenta de lo lejos que se encontraban Schweppe y los suyos a finales de los años 70 de haber formulado completamente todo el asunto del Control Homeostático que él propuso y de lo lejos que nos encontramos aún de tal tipo de control. En una época en la que, por ejemplo, ni siquiera se tenía aún conciencia de lo que sería el *middleware*<sup>7</sup> (véase la iniciativa *GridStat*<sup>8</sup>), Schweppe propuso un tipo de control que conducía a lo que podríamos denominar una red eléctrica *intelectrónica*, empleando un término del escritor polaco de ciencia ficción **Stanislaw Lem**<sup>9</sup>; lo que hoy se empieza a denominar *intelligrid*<sup>10</sup>, *smart grid*<sup>11</sup>, *red inteligente*<sup>12</sup>, etc., y que está exigiendo un esfuerzo normalizador sencillamente colosal. Con la perspectiva de hoy, lo que se observa es que, dejando a un lado la formulación completa del problema del control, Schweppe y su equipo se lanzaron a formular el problema económico del mercado eléctrico de precio *spot*. El resultado fue que: “*The work of Fred Schweppe put forward the vision of homeostatic control, which basically says that energy users adjust locally, and that this leads to a fully adjusted system as a*

*whole. These were the first ideas signaling the major role in customers' active adjustments to energy shortages and prices. The time has come now for working out the details of homeostatic control, since automation and its cost make this a truly viable concept. This represents a huge opportunity for using distributed sensors and controls.*” (18) La frase: “*Ha llegado el momento de trabajar en los detalles del control homeostático, ya que la automatización y su coste lo convierten en un concepto verdaderamente viable*”. **Marija Illic**<sup>13</sup> ha venido insistiendo en esto desde hace tiempo, por ejemplo, aquí está ya anticipando el “*plug and play*” de la IEC 61850: “*A future decentralized system is clearly based on the homeostatic control conceived some time ago by the late Fred Schweppe, but the basic concept needs tremendous extensions. Such systems could provide coordination through information requirements—any device attached to the power grid might be required to “announce” itself and its characteristics (how much power it uses or might generate, for example.)*” (19). Y también: “*The technology and regulatory setup of 1978 was not ready to support his vision, but contemporary developments render his ideas once again relevant.*”

(20) ¿Nadie en la Comunidad Académica hasta ahora se había percatado a lo largo de estos últimos 30 años de que el Control Homeostático no era un concepto viable que requiere tremendas extensiones?

### 3. EL FUTURO DEL CONTROL AUTOMÁTICO DE LOS SISTEMAS DE POTENCIA

Desde su nacimiento, el esquema de control de un Sistema de Potencia ha sido “*top-down*”, de arriba hacia abajo; esto es, vertical. Y este esquema atiende a una escala de tiempos que va desde los milisegundos de los regímenes transitorios hasta los años de la planificación, escala que debe ser rigurosamente observada, y que respondía a la estructura organizativa de una empresa verticalmente integrada. Con la Reforma, la separación funcional de las empresas obliga a reconvertir este esquema de control vertical en uno horizontal o jerárquico, o en términos informáticos: de control distribuido. Los reformistas dicen que esto se resuelve con Instituciones de coordinación. Cincuenta millones de neoyorquinos experimentaron en sus propias carnes los resultados de este “*planteamiento coordinador*” en agosto de 2003. La estructura del sector y organización de las empresas ha sido fácil cambiarla

<sup>6</sup> <http://www.iec.ch/cgi-bin/procgi.pl/www/iecwww.p?wwwlang=e&wwwprog=sea1112.p&progdb=db1&committee=57>

<sup>7</sup> <http://es.wikipedia.org/wiki/Middleware>

<sup>8</sup> <http://www.gridstat.net/index.html>

<sup>9</sup> <http://www.lem.pl/>

<sup>10</sup> <http://www.epri.com/IntelliGrid/>

<sup>11</sup> <http://www.smartgridnews.com/>

<sup>12</sup> *Red Inteligente*. La noción que hay detrás de la “red inteligente” es la de la reunión del “mundo de la energía”, del “mundo de las Tecnologías de la Información” (TI), y del “mundo de la Electrónica de potencia” para desarrollar las infraestructuras necesarias que soporten los sistemas de distribución en los próximos 20 o 30 años. La “red inteligente” trata de la red de distribución clásica, pero, a la vez, implica también a los dos lados del negocio de la distribución entre los que se encuentra la red eléctrica: el de la oferta y el de la demanda; incluyendo al mismo tiempo a las TI y a la Electrónica de potencia. La “red inteligente” trata, por lo tanto, de definir una arquitectura que haga posible la interoperabilidad de las tecnologías smart distribuidas de tipo *plug and work* (enchufar y funcionar) que pueden irse incorporando a la red de distribución. Tecnologías que emplean electrónica de potencia avanzada (v. gr.: transformador electrónico de potencia de alta frecuencia), esquemas avanzados de control que facilitan el abandono de los esquemas actuales de control centralizado (v. gr.: sistemas de control distribuido *peer-to-peer*), técnicas y algoritmos avanzados de tratamiento y visualización de la información (v. gr.: sistemas multi-agente, visualización multicapa), y telecomunicaciones avanzadas (v. gr.: transmisión multi-cast (multi-difusión)) para crear un “conjunto de elementos de red” que funcionen coordinadamente y en tiempo real como un sistema transaccional integrado, y permitan así la “participación horizontal” de todas las partes interesadas en el sistema de distribución.

<sup>13</sup> <http://www.ece.cmu.edu/~milic/>

mediante la Regulación, pero la Tecnología aún no ha hecho posible desarrollar los nuevos esquemas de control necesarios para hacer que ese mercado funcione. Y el *barroco regulatorio* imperante, tampoco porque estamos hablando de control de sistemas híbridos, pero híbridos no en el sentido que se entiende en el mundo del Régimen Especial de las energías renovables, sino en el sentido que se entiende en el mundo del Control Automático. Sistemas que combinan el modelado de subsistemas dinámicos continuos, basados en la utilización de ecuaciones diferenciales como medio de representación, y subsistemas de eventos discretos, basados en la utilización de autómatas o lenguajes como medio de representación. (Tiene su gracia que sean ahora los productores de Régimen Especial los que hablen de sistemas híbridos sin que nadie se quede estupefacto en las empresas eléctricas)

Los Sistemas de potencia siempre han sido sistemas híbridos, típicamente controlados mediante los modelos clásicos de modos de operación y cambios de estado. Son estos modelos los que hay que transformar

(no parchear) para soportar las nuevas funciones del mercado introducidas por la regulación. Sin embargo, y sólo por poner un ejemplo doméstico, se incentiva lo que se ha venido a denominar la “sostenibilidad técnica”<sup>14</sup> de los productores de energías renovables que se acoplan al Sistema de potencia, no digo conectan porque eléctricamente no es lo mismo conectarse que acoplarse, pero sorprendentemente no se incentiva la “sostenibilidad técnica” de la red a la que vierten dándola con ello por sentada. ¿Qué hay entonces del control de tensión, del nivel de falta, de los sistemas de protecciones y de la coordinación dinámica de estas, de la estabilidad de la red, de las corrientes de retorno y de la seguridad física de los operarios en campo en la red de distribución de media y baja tensión? Porque el problema es que los paneles fotovoltaicos de 3 kW se acabarán conectando a la red de baja tensión como ahora los aparatos de aire acondicionado. ¿Qué hay del control distribuido? Y, aunque fuera adelantarse en un territorio de futuro, a los *schweppianos* sí se les podría preguntar también, por ejemplo, ¿por

qué en lugar de tanto *barroco regulatorio* no incentivar también la investigación de los sincrofasores (21) y de los algoritmos de área extensa (22), por poner un caso, para promover la “sostenibilidad técnica” de la red?(23).

A pesar de lo que muchos pudieran pensar, y de todo ese espeso *barroco regulatorio* que se nos ha venido encima a los ingenieros “no traidores”, la generación de **Leon Kirchmayer**<sup>15</sup> no ha sido superada en logros ni está periclitada por la posterior de **Fred Scheppe**. Las comunicaciones vía satélite y el canal de tiempo de los GPS podrían introducir cambios radicales en Observabilidad y la Estimación del Estado, y, por extensión, en todo el esquema de control actual de los Sistemas de potencia. Casualmente la Estimación de Estado es el campo de conocimiento cuyo origen hay que atribuir en exclusiva a las investigaciones de Scheppe, y ahora resulta verdaderamente apasionante contemplar cómo son precisamente los trabajos de uno de los miembros destacados de la generación de Kirchmayer, **William Brownlee**<sup>16</sup> lo que constituye el ori-

<sup>14</sup> *Sostenibilidad Técnica*. En España, el R.D. 436/2004 introduce una serie de incentivos para los productores de Régimen Especial en relación con los servicios de control de tensión y el soporte de huecos de tensión destinados a facilitar lo que el regulador entiende como “sostenibilidad técnica” de los productores. Este argumento de “sostenibilidad técnica” significa que, desde el punto de vista de la gestión del sistema eléctrico, el Operador del Sistema debe incorporar nuevos criterios de gestión relacionados con una aportación masiva y a corto plazo de energía en régimen especial, con las peculiaridades que tiene su dispersión geográfica y la aleatoriedad de estas formas de producción generalmente asociadas a la generación eólica.

<sup>15</sup> Aunque ya a principios de los años 1930, se había demostrado (**Stahl** y **Steinberg**) que, despreciando las pérdidas de transporte, el despacho económico de la generación se obtenía cuando todos los grupos funcionaban al mismo coste marginal, antes de 1940 era muy difícil resolver el problema del despacho económico teniendo en cuenta dichas pérdidas porque su cálculo era muy pesado y complejo. En 1943, **George** introdujo la conocida fórmula de cálculo de las matrices B, época en la que se ya utilizaba algún calculador analógico. En 1951, **León Kirchmayer** y **Glenn Stagg** aprovechando los trabajos de George iniciaron el estudio a fondo del problema, que puede darse por resuelto con la publicación de sus dos famosos libros publicados en 1959: “Economic Operation of Power Systems”, y “Economic Control of Interconnected Systems”. Forman lo que podríamos denominar la “generación Kirchmayer”, el propio **Krichmayer**, con **Brownlee**, **Stagg**, **Brown**, **Tinny**, **Early**, **Watson**, **Steinberg**, **Smith**, **Glim**, **Stevenson**, **Ward**, **Eaton**, **Hale**, etc.

<sup>16</sup> En 1954, **William R. Brownlee** (1905-2004) introdujo en el Despacho Económico el método del ángulo de fase de la tensión (24), lo que constituía un enfoque completamente nuevo y muy útil para comprobar los cálculos de las pérdidas, y con ello convirtió a su empresa en líder del intercambio de potencia económica y de emergencia con las Compañías vecinas, y permitió a la **Southern Company Services** predecir la rentabilidad de nuevas inversiones en transporte e interconexión. Había empezado como ingeniero de protecciones en una Compañía de Teneesse y llegó a ser presidente de la Southern hasta su jubilación, registró cinco patentes, escribió numerosos artículos y le fue concedido el **Award Life** de la **Power Engineering Society**. En su método del ángulo de fase está el origen de la aplicación de los sincrofasores. Numerosos profesores de Sistemas de potencia aplican su método para introducir a sus alumnos el Despacho Económico antes de entrar en el tedioso cálculo de la matriz de pérdidas sin conocer el origen del mismo porque nadie referencia a **Brownlee**, y creyendo que se trata de un “cálculo natural” por su extraordinaria sencillez y elegancia. No era así en los años 50.

gen de los avances actuales en la Observabilidad de los Sistemas de potencia, y contemplar lo que **Schwepe** y su generación, quien sabe si cegados por el precio *spot* del mercado, no supieron predecir. **Kirchmayer** tuvo la visión de cultivar ambos campos: la Economía y el Control, y publicó el resultado de sus investigaciones en dos libros, uno dedicado a la Economía y otro dedicado al Control. Schwepe y su equipo cultivaron exclusivamente el campo económico y publicaron el resultado de sus investigaciones en el libro del que hemos hablado. Pero al Control Homeostático apenas si le dedicaron atención, probablemente porque eran conscientes de que tal tipo de control era materialmente inviable en aquella época. Por poner un caso, el *Intel 4004*, primer microprocesador comercial de la historia, se presentó en noviembre de 1971, y el 8088 en 1979, año de la patente del *FAPER*; y, además, las comunicaciones en aquellos años eran muy pobres comparadas con las de hoy. Que la Observabilidad y la Estimación de Estado acaben tomado hoy otros derroteros, y que **Brownlee** pudiera llegar a obtener renovados triunfos después de muerto como **El Cid Campeador**, mientras el mercado del precio *spot* de la generación de **Schwepe** queda en una quimera, sería toda una paradoja que los reformistas deberían saber explicar y asumir de una vez.

El asunto es si un esquema de control vertical funciona en un contexto de negocio horizontal, y parece que los hechos indican que el tema va para largo. Los tecnología de los Sistemas Multiagente que parece podría ayudar a desarrollar el concepto de Control Homeostático de **Schwepe** se encuentra en un estado muy incipiente, tanto la aplicación de los sistemas multiagentes (véase, por ejemplo, este libro en Internet *Autonomous Systems and Intelligent*

*Agents in Power System Control and Operation*<sup>17</sup> de **Christian Rehtanz**) como la *Economía basada en Agente*<sup>18</sup> están por desarrollar aún. Para tener una visión más completa del panorama, véase, por ejemplo, el artículo de **Massoud Amin** (25), pero de esta lectura téngase presente que, por ejemplo, el profesor **Cheng Ching Liu** de la **Universidad de Washington**, especialista hoy en Sistemas Multiagente, a comienzos de los 1990 lo era en la aplicación de sistemas basados en el conocimiento a los Sistemas de Potencia y ya sabemos de los nulos resultados que han dado hasta ahora la Inteligencia Artificial y los Sistemas Expertos, de manera que dentro de 30 años muy bien podríamos estar hablando de los Sistemas Multiagente como ahora lo hacemos del *FAPER* de **Schwepe**.

#### 4. NECESIDAD DE LA ELECTRÓNICA DE POTENCIA AD-INTRA

Se suele decir que la Electrónica de estado sólido trajo la primera revolución de la Electrónica, y que la Electrónica de potencia de estado sólido trajo la segunda. Es interesante advertir que la Electrónica de potencia combina las tecnologías de la era mecánica, de la era eléctrica y de la era electrónica, y que es una tecnología verdaderamente interdisciplinar. En el siglo XXI, la Electrónica de potencia será uno de los dos campos de conocimiento más importantes en una Sociedad industrial altamente automatizada de acuerdo con los pronósticos del profesor **Bose** (26). El verdadero mercado eléctrico no lo traerá la regulación, sino la Electrónica de potencia. Y es importante que esto se asuma en las Escuelas de Ingeniería y en muchas Facultades universitarias donde no se estudia Electrónica. Pero el mercado eléctrico no tendrá lugar de ninguna manera si sólo se desarrolla la Electrónica de potencia *ad-extra* del Sistema de po-

tencia, es decir, la que facilita el acoplamiento y vertido de las renovables a red, y no se desarrolla la que exige el propio Sistema de potencia *ad-intra* para absorber esa energía. Y eso es lo que está ocurriendo. Por eso, y por poner un ejemplo, cuando se pone más interés en aspectos del *barroco regulatorio* que en el transformador electrónico de potencia de alta frecuencia (27), lo que se hace es *cortoplacismo* porque, por mucho que se regule, no habrá Generación distribuida si la Electrónica de potencia y el Control distribuido no transforman la Red de Distribución, que sería incapaz de absorber una avalancha de microfuentes en los niveles de media y baja tensión, no importa lo que se empeñen en ello ecologistas, conservacionistas, medioambientalistas, eco-marxistas o como quieran llamarse, que, desde la caída del telón de acero, se mezclan churras con merinas. Porque no es suficiente elaborar estudios de gabinete diciéndolo, hay que disponer de la tecnología tangible, palpable, que se toca materialmente con las manos y se instala en la red. Los papeles de los consultores no sirven para eso. Un inversor de carburo de silicio<sup>19</sup> (por poner otro ejemplo más) no es un *dossier* de papel donde se describen las reducciones de emisiones que se pueden lograr con la generación distribuida, sino un semiconductor de potencia, un dispositivo físico tangible con el que realmente se puede lograr dicha reducción. Y lo mismo puede decirse, aunque no sean de potencia, de un DSP (procesador de señales digitales), un SoC (*System-on-Chip*), un MPSoC (*Multi-Processor-System-on-Chip*), una red de sensores sin hilos, un relé digital, etc., etc., etc.

#### 5. EL PODER REGULADORIO DE LA TECNOLOGÍA

Junto a los mercados, las normas y las leyes, **Lawrence Lessig**<sup>20</sup> ha propuesto una nueva modalidad de regu-

<sup>17</sup> <http://books.google.es/books?vid=ISBN3540402020&id=r18TcJtTkTAC&printsec=frontcover&vq=microgrid&dq=Economic+Operation+of+Power+Systems#PPA49,M1>

<sup>18</sup> <http://www.econ.iastate.edu/tesfatsi/aelect.htm>

<sup>19</sup> [http://www.kepco.co.jp/english/rd/topics/topics\\_1.html](http://www.kepco.co.jp/english/rd/topics/topics_1.html)

<sup>20</sup> <http://www.lessig.org/>

lación: la arquitectura tecnológica (la manera como se construyen las cosas). En relación con esta última, **Tsiavos, Husein, y Whitley** han argumentado que muchos no se han percatado de cómo es precisamente la tecnología la que regula a las otras modalidades de regulación: “*The changing nature of technology also affects the ability to regulate a technological infrastructure. However, the regulation literature notes that every new technology can be seen to disrupt existing regulatory regimes, not just technologies.*” Y, más adelante: “*Drawing on the Chicago School of Regulation which argues that markets and norms, together with laws play a role in controlling action, Laurence Lessig has also used ideas from Bentham and Foucault to include architecture and more particularly code/tecnology as other modalities of regulation. In his proposal for a New Chicago School, Lessig warns that it is necessary to look how code or technological architectures are also capable of regulating human action.*” (28).

Este poder regulatorio de la tecnología es evidente en el caso de Internet. Precisamente han sido las discusiones sobre la regulación de Internet las que han movido a algunos a iniciar recientemente el estudio de este poder regulatorio de la tecnología (29). Los reformistas del Sector Eléctrico prestan mucha atención a supuestas convergencias y sinergias entre las redes eléctricas y las redes de telecomunicaciones y de gas, cuando en realidad no son muchas (convergencia, sinergia e hibridación tecnológica no son sinónimos), y no están siendo capaces de percibir las que verdaderamente representaría la red eléctrica del futuro. El *barroco regulatorio* podría así entenderse como un “mecanismo de defensa” de estos

reformistas ante el emergente poder regulatorio de unas tecnologías de red que les son extrañas y no pueden domeñar. Con el *barroco regulatorio*, los reformistas posiblemente estén construyendo uno de los principales y mayores obstáculos para la adopción por el Sector Eléctrico de las tecnologías disruptivas que posibilitarían esa “Red Eléctrica Inteligente (*peer-to-peer*) del Futuro” de la que venimos hablando. Sorprende que muchos de los que se proclaman ecologistas no capten aún, simplemente por falso prejuicio y falso progresismo a la vez, el ecologismo radical que puede llegar a encarnar una red eléctrica.

## 6. ALGUNAS IDEAS SOBRE LO QUE PODRÍAN HACER LAS ESCUELAS DE INGENIERÍA

Por empezar por algo sencillo pero de envidia tecnológica para las Escuelas de Ingenieros, ¿se podría reconocer en los círculos académicos que el *modelo MIT* de **Fred C. Schweppe**, utilizado como elemento tecnológico fundamental para justificar la Reforma del Sector Eléctrico originó una profunda división en la patronal eléctrica americana, y que el control homeostático facilitador de la competencia que él predecía para comienzos del siglo XXI, es aún una quimera? ¿Se podría reconocer que las investigaciones de **Schweppe** y su equipo fueron incompletas y desequilibradas, y que prestaron más atención a los aspectos económicos que a los tecnológicos? ¿Se podría reconocer que Schweppe y su equipo no avanzaron, o mejor dicho, no avanzaron en absoluto, en el campo del Control automático y que sus avances sólo se produjeron en el campo económico y que este desequilibrio se está pagando ahora?

## Curriculum

Antes que nada, hay que tener presente algo reconocido a escala mundial: que hay un problema de *expertise* en el Sector Eléctrico, y no *salen* suficientes ingenieros eléctricos de la Universidad (30). En 2006, China habrá producido más ingenieros eléctricos que EEUU y la Unión Europea juntas. Recientemente, el *Critical Infrastructure Protection Program*<sup>21</sup> de la **George Mason University School of Law** publicó el *CIP Report*<sup>22</sup> de noviembre de 2006 dedicado a Educación y *Training*, y su artículo de fondo estaba dedicado a este problema (31). Probablemente las cosas sean distintas en un país que en otro, en una región que en otra. En EEUU se dan iniciativas como el **Center for Reforming Undergraduate Education in Electric Energy Systems**<sup>23</sup>, con sede en la **Universidad de Minnesota**, donde trabajan profesores de la talla de **Bruce Wollemberg**, que está financiado por la **NSF (National Science Foundation)**, la **NASA** y el **ORNL (Oak Ridge National Laboratory)**, y que acaba de recibir fondos de la **Oficina de Investigación Naval**<sup>24</sup> de la **US Navy** que considera a los Sistemas de potencia infraestructura crítica para la seguridad. En España, la inmediata adaptación de los programas de estudio al *Marco de Bolonia* puede ser un buen motivo para pensar al respecto.

## I+D

Organizada por la **Asociación Española para el Desarrollo de la Ingeniería Eléctrica (AEDIE)**<sup>25</sup>, en abril de 2006 tuvo lugar en Mallorca la **XVI Reunión de Grupos de Investigación de Ingeniería Eléctrica (XVIRGIE)**<sup>26</sup>. Las comunicaciones<sup>27</sup> presentadas constituyen una muestra significativa de la investigación eléctrica desarro-

<sup>21</sup> <http://cipp.gmu.edu/>

<sup>22</sup> <http://cipp.gmu.edu/news/story.php?id=134>

<sup>23</sup> <http://www.ece.umn.edu/groups/power/>

<sup>24</sup> <http://www.onr.navy.mil/>

<sup>25</sup> <http://www.aedie.org/>

<sup>26</sup> <http://www.aedie.org/principal-reunion.htm>

<sup>27</sup> <http://www.aedie.org/xvirgie/>

llada en las universidades españolas. Es muy interesante comparar estas comunicaciones, por ejemplo, con las de la Revisión Anual<sup>28</sup> de mayo de 2006 del Programa de I+D en Distribución Eléctrica<sup>29</sup> del **US DoE**, o con las de la reunión sobre Futuras Necesidades de I+D en Transporte y Distribución<sup>30</sup> celebradas en Febrero de 2006 por el US DoE para obtener *inputs* de la industria para el programa de I+D promovido por la *Ley de Política Eléctrica* de los EEUU del año 2005<sup>31</sup> (no exenta de crítica<sup>32</sup>, por cierto). Las comparaciones son odiosas, pero, salvadas las distancias, se advierte un contraste fuerte en la orientación. No estaría de más, para el ejemplo comparativo que hemos elegido de transporte y distribución, volver la vista hacia el *Programa Nacional de Energía*<sup>33</sup> (páginas 225 y 226) del *Plan Nacional de I+D+I 2004-2007*<sup>34</sup>. Sobre todo porque la electricidad habrá de ser transmitida a través de redes muchos años aún, y las conclusiones (otro ejemplo) del *“IEA-experts group on R&D priority setting and evaluation - liberalisation of the electricity market”*<sup>35</sup> tampoco dejan lugar a dudas sobre las necesidades de I+D en redes.

### El poder ecológico de la Red

Las Escuelas de Ingenieros son eso, de ingenieros, y siempre es bueno cuidar de las raíces. Dirigir una parte de los esfuerzos que ahora se dedican en ellas al cultivo del *barroco regulatorio* hacia las tecnologías de futuro de la red eléctrica puede significar mucho para hacer posible la venerada competencia, pero también el desarrollo sostenible, la eficiencia energética y la reducción de emisiones. Y puesto que sin una red trans-

formada no habrá nada de esto, se podría analizar esa tonta dicotomía



implícita que lleva a que la ideología “progresista” es la que conduce al estudio de “lo externo a la red”, y la ideología “conservadora” es la que conduce al estudio de la red, de que lo *progre* y ecológico son las renovables y lo “conservador” y contaminante es el sistema de potencia clásico. Basta con ojear los títulos de los proyectos fin de carrera de las Escuelas para concluir que esa tonta y estúpida dicotomía deja de lado progresivamente el estudio a fondo de los sistemas de potencia del futuro porque, como es natural, todos los estudiantes, que son jóvenes, también quieren ser progresistas y ecologistas al tenor de los tiempos que corren. Por eso puede ser bueno meditar sobre una cita reciente de **Miguel Castells**: *El poder se ejerce a través de las redes y los conflictos sirven para reconfigurarlas*<sup>36</sup>.

### “Aversión regulatoria a la Tecnología”

Empleando terminología regulatoria tan a la moda, podría ser bueno interrogarse, de la misma manera que la Teoría de la regulación trata el Riesgo moral y la Selección adversa, si no se estará produciendo “aversión regulatoria” a la tecnología de la red. Las Escuelas de Ingenieros, que, siguiendo la moda, tanto han aprendido de regulación estos últimos años, puede que sean las mejor indicadas para preguntarse: ¿Cómo influye el problema Principal-Agente en la evolución tecnológica del Sistema de potencia? ¿Cómo influye el tratamiento que hacen las agencias reguladoras de los asuntos del Riesgo moral y de la Selección adversa en la adopción por las empresas eléctricas de las nuevas tecnologías para el Sistema de potencia? ¿Y en la creación y adopción de estándares? ¿Y en la coordinación de plataformas, redes y observatorios tecnológicos? No parece que a esta cuestión se le haya prestado atención alguna hasta ahora y, sin embargo, los hechos en España han sido el debilitamiento de **UNESA** como ente normalizador y la desaparición de **ASINEL**. Algunos dirán que habrá sido por otras causas, pero también podría haber resultado de otra manera y, en cualquier caso, no responde a preguntas clave como: ¿Cuáles han sido los beneficios tecnológicos de ello? ¿Por qué no se aprovechó para crear en España una entidad similar a la británica **EA Technology**, la holandesa **Kema** o la noruega **Sintef**?

### Normalización

Si buscamos “IEC 62350” en *Google* restringiendo a direcciones espa-

<sup>28</sup> <http://www.energetics.com/electricdist06.html>

<sup>29</sup> <http://www.electricdistribution.ctc.com/index.htm>

<sup>30</sup> [http://www.caps.fsu.edu/EPAAct05\\_doe\\_workshop.asp](http://www.caps.fsu.edu/EPAAct05_doe_workshop.asp)

<sup>31</sup> [http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=109\\_cong\\_public\\_laws&docid=f:publ058.109](http://frwebgate.access.gpo.gov/cgi-bin/getdoc.cgi?dbname=109_cong_public_laws&docid=f:publ058.109)

<sup>32</sup> <http://www.financialsense.com/editorials/cooke/2005/0902.html>

<sup>33</sup> [http://www.mec.es/ciencia/plan\\_idi/files/Plan\\_Nacional\\_Vol\\_II.pdf](http://www.mec.es/ciencia/plan_idi/files/Plan_Nacional_Vol_II.pdf)

<sup>34</sup> [http://hispagua.cedex.es/investigacion/sistema\\_espanol\\_cte/plan\\_nacional.php?localizacion=Plan%20Nacional%20e%20I%20B%20I%202004-2007%20](http://hispagua.cedex.es/investigacion/sistema_espanol_cte/plan_nacional.php?localizacion=Plan%20Nacional%20e%20I%20B%20I%202004-2007%20)

<sup>35</sup> [http://www.oegut.at/downloads/pdf/lib\\_el\\_market.pdf](http://www.oegut.at/downloads/pdf/lib_el_market.pdf)

<sup>36</sup> *Networked Theory Conference. September 15-16, 2006. Annenberg Center.*

ñolas, nos salen 15. Que interese de verdad, uno, y sólo se puede leer por la caché, está en catalán y es una breve mención. Antes se ha mencionado el asunto de los trabajos del TC57 de



la CEI. Hay que comprender que asuntos como éstos son críticos si se persigue que las redes evolucionen “sostenible y competitivamente”. La Normalización, que siempre ha sido un asunto muy importante en el Sector Eléctrico, hoy se contempla como un subproducto menor de la Regulación. Hay que volver sobre ella, aunque sea más espesa y menos elegante que la Regulación. ¿Cómo es posible que los reformistas no se hayan dado cuenta aún de la importancia que tenía la Normalización para llevar a cabo la Reforma cuando era algo sabido (32)?

### Cobertura del gap generacional

Si tomamos 1945 como año origen de la que podríamos denominar Era Moderna del Sector Eléctrico, y utilizamos la escala de tiempos (15 años/generación) que utilizaba **Ortega y Gasset** para medir las generaciones en su obra *En torno a Galileo*, obtenemos cuatro generaciones: 1945-1960 (generación de **Kirchmayer**), 1960-1975 (generación de **Nathan Cohn**), 1975-1990 (generación de **Schwepe**), 1990-2005 (generación de la Reforma). Estudiar en las Escuelas los logros y la herencia que recibe y entrega cada generación puede que no fuera un adorno para el

*curriculum*, o una asignatura “maría”, sino más bien una buena herramienta para la toma de decisiones. Una generación completa (1990-2005) medida en esta escala de tiempos se ha formado bajo las corrientes favorables a la Reforma, sin crítica alguna a la misma; y, al mismo tiempo, la Reforma se ha llevado por delante a otra de veteranos, vía prejubilaciones y otros mecanismos, tanto en las Universidades como en las empresas del Sector Eléctrico. No se puede negar ese *gap* generacional, en gran parte alentado por los reformistas con una variada serie de argumentos, pero que ha originado una generación “cuasi-huérfana”. Una manera eficaz de sellarlo es mediante el estudio de la evolución histórica de la tecnología de los Sistemas de potencia. Por ejemplo, **Schwepe** pertenece a dos generaciones. Como “heredero” de **Kirchmayer**, pertenece a la de **Nathan Cohn**, quien se apoyó en la Estimación de Estado de Schwepe para desarrollar el Control automático de la Generación, que hizo posible toda la Economía de los intercambios y el desarrollo de los *pools* de electricidad. Después, Schwepe inició su propia generación (1975-1990), la del precio *spot*. Ya hemos argumentado suficientemente que la generación de Schwepe y su heredera, la de los reformistas, no ha sido capaz de superar ni a la **Kirchmayer** ni a la heredera de éste, la de **Cohn**. De hecho, hoy no hay tecnologías disruptivas a corto-medio plazo en el Sector Eléctrico. Hay ingenieros jóvenes hoy que no son conscientes de las escasas aportaciones de la generación de **Schwepe** al avance de los Sistemas de potencia entre 1975 y 1990 ni de la repercusión que esto tiene. La ignorancia del pasado puede conducir a errar las decisiones del futuro. ¿Qué herencia recibirá y entregará la generación 2006-2020?

Esa es una buena pregunta para responder en las Escuelas de Ingenieros.

### BIBLIOGRAFÍA

1. SCHWEPPE, Fred C. “Power Systems 2000: Hierarchy Control Strategies”. IEEE Spectrum July 1978.

2. KIRTLEY, J.L. “Homeostatic Control of Power Systems,” Fourth Energy Monitoring and Control System Conference, November 1979, Norfolk, VA.

3. SCHWEPPE, F. C., TABORS, R. D., KIRTLEY, J. L., OUTHRED, H. R., PICKEL, F. H. y COX, A. J. “Homeostatic Utility Control,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, Nº 3, May/June 1980.

4. TABORS, R. D. “Homeostatic Control: Economic Integration of Solar Technologies into Electric Power Operations and Planning,” MIT Energy Laboratory Report, No. MIT-EL-81-028, July 1981.

5. TABORS, R. D. “Economic Integration of New Energy Technologies into the Grid Using Homeostatic Control,” invited paper, IEA Conference on New Energy Conversion Technologies, April 1981.

6. TABORS, R. D., FINGER, S. y COX, A. “Economic Operation of Distributed Power Systems within an Electric Utility,” IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No. 9, September 1981.

7. TABORS, R. D., CARAMANIS, M. C. y SCHWEPPE, F. C. “Information Technology and Optimization of Electricity Generation Consumption and Distribution: The Case of Homeostatic Control,” presented at the International Workshop on Informatics for Energy Savings: Opportunities and Challenges, Rome, Italy, June 21, 1982.

8. SCHWEPPE, F. C., TABORS, R. D., KIRTLEY, J. L. “Homeostatic Control for Electric Power Usage,” IEEE Spectrum, Vol. 19, No. 7, pp. 44-48, July 1982.

9. TABORS, R. D. y SCHWEPPE, F. C. “Wisconsin Study Shows Homeostatic Control has High Potential for Industrial Loads,” Modern Power Systems, Vol. 3, No. 1, pp. 43-46, January.

10. SCHWEPPE, F. C., TABORS, R. D., KIRTLEY, J. L. “Homeostatic Control: The Utility Customer Marketplace for Electric Power,” in Local Heat and Power Generation: A New Opportunity for British Industry, Interscience Enterprise, U.K., 1983.

11. BLACK, Jason W. "Integrating Demand into the U.S. Electric Power System: Technical, Economic, and Regulatory Frameworks for Responsive Load". Tesis Doctoral de MIT. 2005.

[http://esd.mit.edu/people/dissertations/black\\_jack.pdf](http://esd.mit.edu/people/dissertations/black_jack.pdf).

12. SCHWEPPE, F. C., CARAMANIS, M. C., TABORS, R. D., y BOHN, R.E. "Spot Pricing of Electricity". ISBN 0898382602. Springer. 1988.

13. BOITEUX, Marcel. y STASI, Paul. "Sur la détermination des prix de revient de développement dans un système interconnecté de production-distribution." Jornadas de UNIPEDE. Roma. 1952.

14. GUADAGNI, Alieto A. "El Marginalismo y la Política de Precios de las Empresas Nacionalizadas en Francia: El Caso de Electricité de France". Desarrollo Económico Vol 4 N°16. 1965.

[http://www.puentes.gov.ar/educar/servlet/Downloads/S\\_BD\\_DESARROLLOECONOMICO/PD000367.PDF](http://www.puentes.gov.ar/educar/servlet/Downloads/S_BD_DESARROLLOECONOMICO/PD000367.PDF)

15. NELSON, James R. (editor), "Marginal Cost Pricing in Practice". Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, N. J., 1964, 288 pages.

16. MORLAT G., y BESSIERE F. "Vingt-cinq ans d'économie électrique: investissements, coûts marginaux et tarifs". Paris: Dunod éd. 1971.

17. BERRY, William. "The Case for Competition in the Electric Utility Industry," 110 Public Utilities Fortnightly 13 (1982)

18. ILLIC, Marija, professor of Electrical and Computer Engineering and Engineering Public Policy: "The Intellectual Challenge. Behind Bundling Diverse Energy Systems of the Future". Carnegie Mellon University, Visiting Professor, MIT Engineering Systems Division. MIT Engineering Systems Division. EDS Reports Winter 2006. [http://esd.mit.edu/esd\\_reports/winter2006/intellectual\\_challenge.html](http://esd.mit.edu/esd_reports/winter2006/intellectual_challenge.html).

19. ILLIC, Marija. "A Control Engineering Approach To Making Complex Infrastructures More Efficient And Reliable: A Core Program For ESD MIT EDS Mayo 2002.

[\[WP-2003-01.10-ESD%20Internal%20Symposium.pdf\]\(http://esd.mit.edu/WPS/ESD%20Internal%20Symposium.pdf\)](http://esd.mit.edu/WPS/ESD%20Internal%20Symposium%20Docs/ESD-</a></p>
</div>
<div data-bbox=)

20. JELINEK, Marian e ILLIC, Marija. "A Strategic Framework for Electric Energy: Technology and Institutional Factors and IT in a Deregulated Environment" (Proceedings of the NSF/DOE/EPRI sponsored Workshop on Research Needs in Complex Interactive Networks, Arlington, VA, December 2000)

<http://www.pi.energy.gov/pdf/library/docs/mitref2.pdf>.

21 ADAMIAC, Mark, PREMERLANI, William y KASZTENNY, Bogdan. GE. "Synchrophasors: Definition, Measurement, and Application". [http://www.ece.cmu.edu/~electricity-conference/Old06/Adamiak\\_Premeralni\\_Kasztenny%20SynchroPhasors.pdf](http://www.ece.cmu.edu/~electricity-conference/Old06/Adamiak_Premeralni_Kasztenny%20SynchroPhasors.pdf).

22. DONGCHEN Hu y VAITHIANATHAN "Mani" Venkatasubramanian. "New wide-area algorithms for detecting angle instability using synchrophasors". Washington State University. *Proceedings of the Western Protective Relay Conference, Spokane, WA, 2006*.

[http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2006public/mani\\_wprc.pdf](http://www.pserc.org/cgi-pserc/getbig/publicatio/2006public/mani_wprc.pdf).

23. NUQUI, Reynaldo Francisco. "State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized Phasor Measurements". 2001.

[http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07122001-030152/unrestricted/rnuqui\\_dissertation.pdf](http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-07122001-030152/unrestricted/rnuqui_dissertation.pdf).

24. BROWNLEE, W. R. "Coordination of Incremental Fuel Costs and Incremental Transmission Losses by Function of Voltage Phase Angles," *AIEE Trans., Part III, 73* (1954)

25. MASSOUD Amin. "Toward Self-Healing Energy Infrastructure Systems". IEEE Computer Applications in Power Enero 2001.

[http://160.94.126.215/amin/Amin\\_IEEE\\_CAP.pdf](http://160.94.126.215/amin/Amin_IEEE_CAP.pdf).

26. BOSE, Bimal K. "Energy, environment, and advances in power electronics". IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 15, N° 4, July 2000. Dept. of Electr. Eng., Tennessee Univ., Knoxville, TN.

[http://powerelec.ece.utk.edu/pubs/bose\\_trans\\_pe\\_july\\_2000.pdf](http://powerelec.ece.utk.edu/pubs/bose_trans_pe_july_2000.pdf).

27 RATANAPAPANACHOTE, Somnida. "Applications of an Electronic Transformer in a Power Distribution System". Tesis Doctoral de Texas A&M Univ. Agosto 2004.

<https://txspace.tamu.edu/bitstream/1969.1/2756/1/etd-tamu-2004B-ELEN-Ratanapana.pdf>.

28. TSIAVOs, Husein, y WHITLEY. "The Footprint of Regulation". *Dept. Of Information Systems*. London School of Economics and Political Sciences. 2003.

<http://personal.lse.ac.uk/whitley/allpubs/IFIP822003.pdf>.

29. MAHER, Marcus. "Complexity and Code: the Pitfalls of Regulation in Adaptive Systems". The Berkman Center for Internet & Society at Harvard Law School. Fall 1998 [http://cyber.law.harvard.edu/fall-sem98/final\\_papers/Maher.html](http://cyber.law.harvard.edu/fall-sem98/final_papers/Maher.html).

30. RAY, Dennis (PSERC) y SNYDER, Bill (KEMA). "Strategies to Address the Problem of Exiting Expertise in the Electric Power Industry". Proceedings of the 39<sup>th</sup> Hawaii International Conference on System Sciences. 2006.

<http://csdl2.computer.org/comp/proceedings/hicss/2006/2507/10/2507100246c.pdf>.

31. CIP Report. "An Emerging Issue We Cannot Ignore: Meeting the Twin Challenges of Education and an Aging Workforce in the Electric Power Industry". Critical Infrastructure Protection Program. George Mason University School of Law Nov. 2006. [http://cipp.gmu.edu/archive/cip\\_report\\_5.5.pdf](http://cipp.gmu.edu/archive/cip_report_5.5.pdf).

32. TASSEY, Gregory, GALLAHER, Michael P., JOHNSTON, Stephen A. y KIRBY, Brendan. "Changing Measurement and Standards Needs in a Deregulated Electric Utility Industry" Gregory NIST. US DoC. Mayo 2000.

<http://www.nist.gov/director/prog-ofc/report00-2.pdf>.

**NOTA.-** Todas las direcciones de Internet funcionaban el 28 de febrero de 2007. ■