

# Consideraciones desde la Teoría de Redes hacia la Gestión de Fuentes de Energía Renovables: algunas pautas de diseño para Costa Rica

**Santiago Núñez Corrales**

Director de Investigación y Desarrollo Tecnológico

Viceministerio de Ciencia y Tecnología

Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones

[santiago.nunez@micit.go.cr](mailto:santiago.nunez@micit.go.cr)

# Agenda

1. Teoría de redes: propiedades de sistemas
2. Diseño dirigido por datos: estabilidad, escalabilidad y resiliencia
3. Implicaciones para estándares de interconexión: una propuesta desde ADP
4. Conclusiones

# 1. Teoría de redes: propiedades de sistemas

- Existe evidencia relevante acerca de la relación entre la topología de interconexión de redes eléctricas y parámetros tales como calidad y confiabilidad
- **Objetivo de una red eléctrica:** (1) entregar potencia a sus usuarios (2) bajo estándares de generación, transmisión y distribución reconocido (3) con un MTTF tendiente a infinito.
- **Propiedades pragmáticas:** (1) estabilidad, (2) escalabilidad, (3) resiliencia.

**Kundur, P. (1994).** *Power system stability and control* (Vol. 7). N. J. Balu, & M. G. Lauby (Eds.). New York: McGraw-hill.

**Crucitti, P., Latora, V., & Marchiori, M. (2004).** A topological analysis of the Italian electric power grid. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 338(1), 92-97.

# La Red Eléctrica como una Red Libre de Escala

Figure 1: Spatial distribution of load on the European power grid in the steady state.

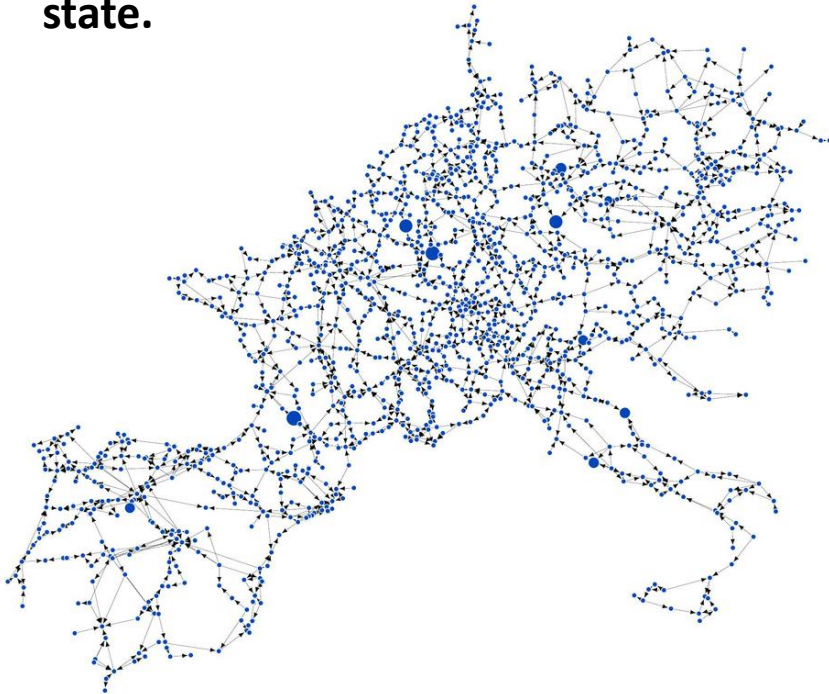
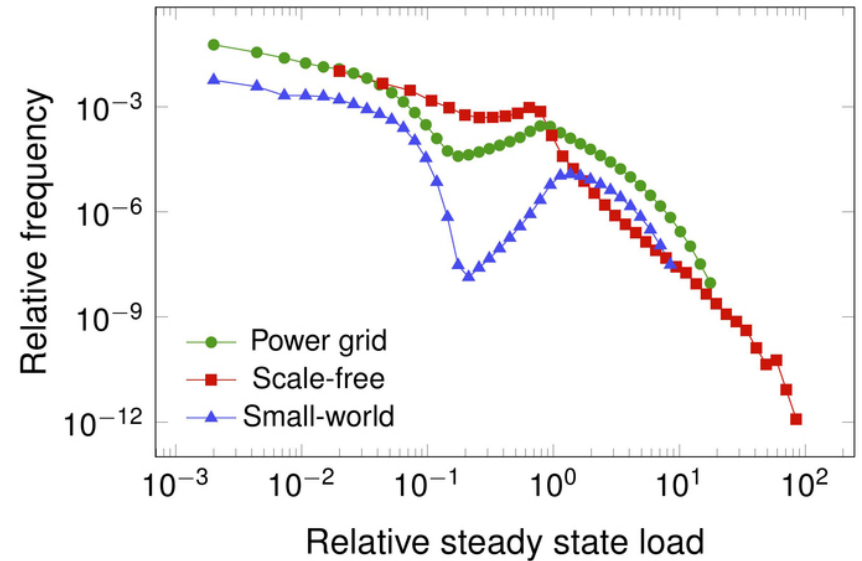


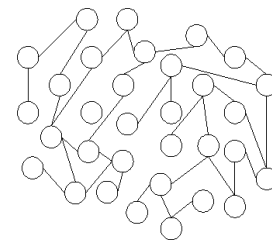
Figure 2: Relative load distribution in the steady state for different network topologies.



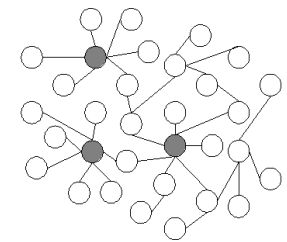
# Redes Libres de Escala

- Redes donde el grado de los nodos sigue una distribución regida por una ley de potencia.

- Origen:
  - Asociación preferencial
  - Atracción por idoneidad



(a) Random network



(b) Scale-free network

- Relación estrecha entre flexibilidad y distribución: el establecimiento de conexiones en una red libre de escala no afectan su estructura general.

# ¿Qué implicaciones existen para las Redes Eléctricas?

Objetivo	Implicación RLE	Propiedad	Implicación RLE
<b>Entrega de potencia</b>	El costo de diseño de proyectos de generación incrementa por escala de entrega	<b>Estabilidad</b>	Incrementos no planificados incrementa la vulnerabilidad por carga
<b>Estándares</b>	Sobreestimación de márgenes de tolerancia en materiales eléctricos	<b>Escalabilidad</b>	Existen límites de expansión de infraestructuras
<b>Muy bajo MTTF</b>	A mayor infraestructura, más costoso asegurar continuidad	<b>Resiliencia</b>	Fallos en plantas implica grandes porciones fuera de línea

**Yijia, C. X. S. K. C. (2007).** Structural Vulnerability Analysis of Large Power Grid Based on Complex Network Theory [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 10, 026.

**Arianos, S., Bompard, E., Carbone, A., & Xue, F. (2009).** Power grid vulnerability: A complex network approach. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 19(1), 013119.

**Guohua, Z., Ce, W., Jianhua, Z., Jingyan, Y., Yin, Z., & Manyin, D. (2008, April).** Vulnerability assessment of bulk power grid based on complex network theory. In *Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008. DRPT 2008. Third International Conference on* (pp. 1554-1558). IEEE.

## 2. Diseño dirigido por datos: estabilidad, escalabilidad y resiliencia

- ¿Cuáles son estrategias viables para diseños de redes estables, escalables y resilientes?
  - a. Buffering\*
  - b. Balance de carga
  - c. Circuit-on-demand vs. Bandwidth-on-demand
  - d. Redundancia
  - e. Sincronización

**Kinney, R., Crucitti, P., Albert, R., & Latora, V. (2005).** Modeling cascading failures in the North American power grid. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, 46(1), 101-107.

**Cao, Y. J., Chen, X. G., & Sun, K. (2006).** Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 12, 000.

**Brummitt, C. D., D'Souza, R. M., & Leicht, E. A. (2012).** Suppressing cascades of load in interdependent networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(12), E680-E689.

**Grigsby, L. L. (Ed.). (2012).** *Power system stability and control* (Vol. 5). CRC press.

# Principios de diseño

1. Aumentar conectividad entre nodos importantes (más rutas)
2. Aumentar la cantidad de nodos pequeños y medianos de bajo costo y alta reconfigurabilidad
3. Definir una política de afinidad por nodos locales de generación/distribución

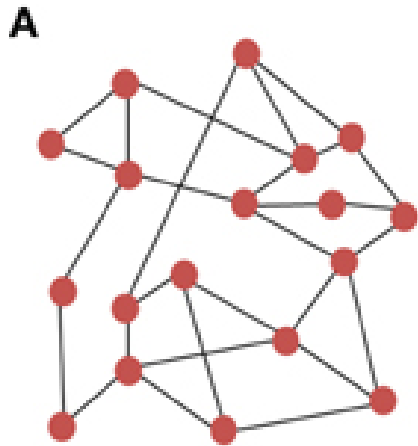
**Boyd, S., Vandenberghe, L., El Gamal, A., & Yun, S. (2001).** Design of robust global power and ground networks. In *Proceedings of the 2001 international symposium on Physical design* (pp. 60-65). ACM.

**Zhao, M., Panda, R. V., Sapatnekar, S. S., & Blaauw, D. (2002).** Hierarchical analysis of power distribution networks. *Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, IEEE Transactions on*, 21(2), 159-168.

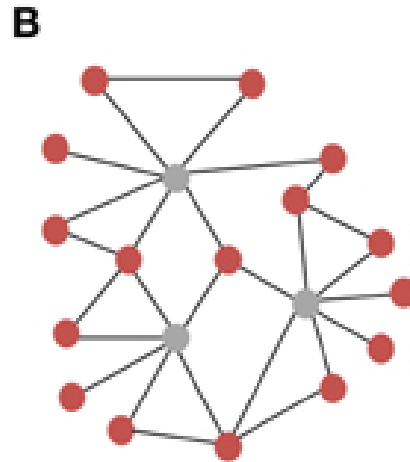
**Koç, Y., Warnier, M., Van Mieghem, P., Kooij, R. E., & Brazier, F. M. (2014).** The impact of the topology on cascading failures in a power grid model. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 402, 169-179.



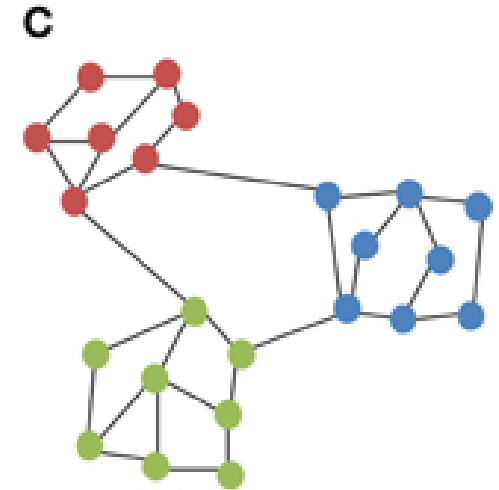
# ¿Qué sugieren estos principios?



Random Network



Scale-free Network



Modular Network

**Strogatz, S. H. (2001).** Exploring complex networks. *Nature*, 410(6825), 268-276.

**Pagani, G. A., & Aiello, M. (2013).** The power grid as a complex network: a survey. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 392(11), 2688-2700.

**Elgoyhen, A. B., Langguth, B., Vanneste, S., & De Ridder, D. (2012).** Tinnitus: network pathophysiology-network pharmacology. *Frontiers in systems neuroscience*, 6.

# Ejemplo: Buffering

- ¿Cuáles roles de amortiguación cumple el almacenamiento energético en topologías en red?
  - Transformación de potencia
  - Tiempos de transacción para nuevos circuitos
  - Fallas de potencia localizadas
- Correlatos en todos los reinos biológicos

**Pickard, W. F., Shen, A. Q., & Hensing, N. J. (2009).** Parking the power: strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply–demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(8), 1934-1945.

**Molderink, A., Bakker, V., Bosman, M. G., Hurink, J. L., & Smit, G. J. (2010).** Management and control of domestic smart grid technology. *Smart grid, IEEE transactions on*, 1(2), 109-119.

**Barton, J. P., & Infield, D. G. (2004).** Energy storage and its use with intermittent renewable energy. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 19(2), 441-448.

**Kitano, H. (2004).** Biological robustness. *Nature Reviews Genetics*, 5(11), 826-837.

# 3. Implicaciones para estándares de interconexión: una propuesta desde ADP

- ADP (Approximate Dynamic Programming)
  - Técnica de optimización continua fundamentada en aprendizaje mecánico
  - Entorno estocástico: la toma de decisiones es determinística, las condiciones para tomarlas contienen aleatoriedad
- Suposición: una red eléctrica estable, escalable y resiliente donde la medición de la oferta y la demanda es un hecho dado

**Momoh, J. (2009, March).** Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control. In *Power Systems Conference and Exposition, 2009. PSCE'09. IEEE/PES* (pp. 1-8). IEEE.

**Powell, W. B. (2007).** *Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality* (Vol. 703). John Wiley & Sons.

**Chow, J. H., Wu, F. F., & Momoh, J. A. (2005).** *Applied mathematics for restructured electric power systems* (pp. 1-9). Springer US.

# Sistemas estocásticos

$$\mathcal{S} = (X, W, U)$$

$$\begin{array}{l} x_t \in X \\ w_t \in W \\ u_t \in U \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} F : X \times Y \times W \rightarrow X \\ x_{t+1} = F(x_t, u_t, w_t) \\ \mu : X \rightarrow U \\ \mathcal{P} = (\mu_0, \mu_1, \dots) \end{array}$$

$$\begin{array}{l} x_t = Ax_t + Bu_t + w_t \\ x_t \in \mathbb{R}^n \\ u_t \in \mathbb{R}^m \\ w_t \in \mathbb{R}^n \end{array} \longrightarrow \begin{array}{l} A \in \mathbb{R}^{n \times n} \\ B \in \mathbb{R}^{n \times m} \\ u_t = Kx_t \\ K \in \mathbb{R}^{m \times n} \end{array}$$

# Sistemas estocásticos

$$x_t \in S = \{1, 2, \dots, n\} \quad U(x_t) = \{u_{t_1}, u_{t_2}, \dots, u_{t_k}\}$$
$$u_t \in U(x_t)$$

$$P_{xy}(u) = \mathbb{P} \{ x_{t+1} = y \mid x_t = x, u_t = u \}$$

$$P_{xy}(u) = \mathbb{P} \{ F(x, u, w) = y \}$$

**Ahora agregando costo:**

$$\min_{\pi} \mathbb{E} [g(x_0, u_0, x_1, u_0, \dots)]$$

# Sistemas estocásticos

**Horizonte finito:**

$$\min_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^N g(x_t, u_t, x_{t+1}) \right]$$

**Horizonte infinito:**

$$\min_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} g(x_t, u_t, x_{t+1}) \right]$$

**Horizonte infinito de costo objetivo:**

$$\min_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=M}^{\infty} g(x_t, u_t, x_{t+1}) \right] = 0$$

**Horizonte infinito con descuento:**

$$\min_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t g(x_t, u_t, x_{t+1}) \right]$$

# ¿Qué pasa en una red eléctrica?

- La cuantificación de costo es constante e ininterrumpida
- Se busca determinar costo total promedio a partir de la granularidad de las mediciones
- Interés no solamente por el caso promedio, sino por las modas de la distribución

$$\min_{\pi} \limsup_{N \rightarrow \infty} \frac{1}{N} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{N-1} g(x_t, u_t, x_{t+1}) \right]$$

# Programación Dinámica Aproximada

$$\min_{u_t} \mathbb{E} [g(x_t, u_t, x_{t+1}) | x_t]$$

$$\min_{u_t} \mathbb{E} [g(x_t, u_t, x_{t+1}) + J(x_{t+1}) | x_t]$$

Agregando la política desde el inicio del sistema:

$$\min_{\pi} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{N-1} g(x_t, \mu_t(x_t), x_{t+1}) \middle| x_0 \right]$$

$$J_k(x_k) = \min_{\mu_k, \dots, \mu_{N-1}} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=k}^{N-1} g(x_t, \mu_t(x_t), x_{t+1}) \middle| x_k \right]$$



# Programación Dinámica Aproximada

$$J_k(x_k) = \min_{\mu_k, \mu_{k+1}, \dots} \mathbb{E} \left[ \sum_{t=k}^{\infty} \alpha^{t-k} g(x_t, \mu_t(x_t), x_{t+1}) \mid x_k \right]$$

$$J_\pi(x) = \mathbb{E} \left[ \sum_{t=0}^{\infty} \alpha^t g(x_t, \mu_t(x_t), x_{t+1}) \mid x_0 = x \right]$$

**Transformando a operadores:**

$$(T_\mu J)(x) = \sum_{y \in S} p_{xy}(\mu(x)) (g(x, u, y) + \alpha J(y))$$

# Programación Dinámica Aproximada

Al agregar restricciones:

$$(TJ)(x) = \min_{u \in U(x)} \sum_{y \in S} p_{xy}(u) (g(x_t, u, y) + \alpha J(y)) \geq J(x)$$

Y para simular:

$$x_{t+1} = f(x_t, u_t, w_t)$$

$$u_t \in \arg \min_{u \in U(x_t)} \sum_{y \in S} p_{xy}(u) (g(x, u, y) + \alpha J_t(y))$$

$$(J_{t+1})(x) = \begin{cases} \sum_{y \in S} p_{xy}(u_t) (g(x, u, y) + \alpha J_t), & x = x_t \\ J_t(x) \end{cases}$$

# Caso para un sistema simple de $m$ plantas, $i$ y cliente

$c_t$  Energía requerida como disponible en  $m$  plantas

$e_t$  Energía requerida como disponible en  $m$  plantas

$\Delta_t$  Porcentaje de cambio en el consumo

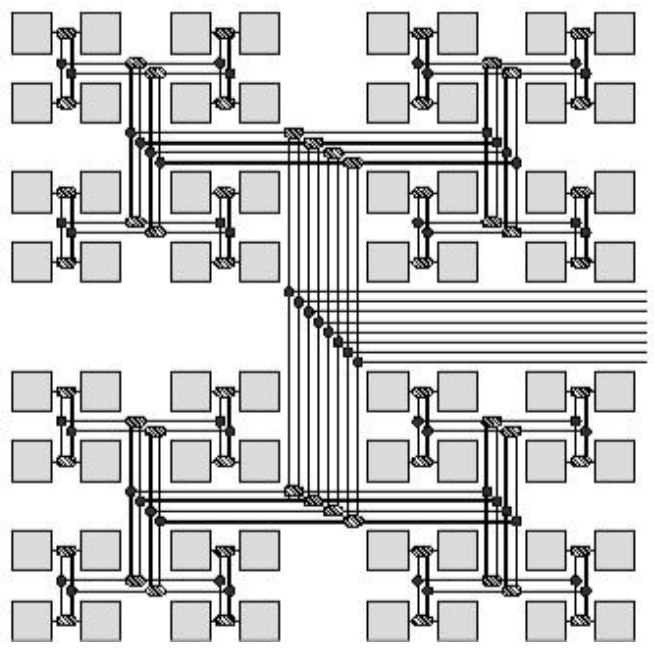
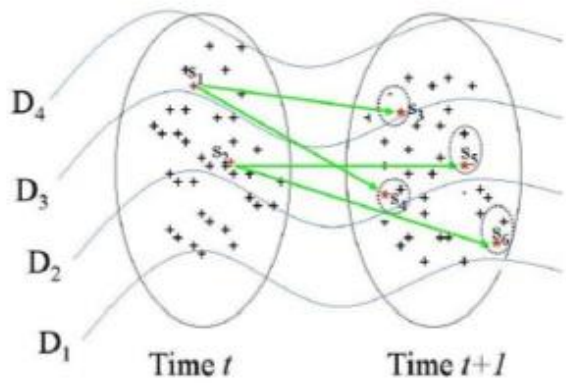
$$\Delta_{t,i} \in [-1, 1]$$

$$\Delta_t^* = \frac{\Delta_t}{\|\Delta_t\|}$$

$$A_{n \times n} = I - (\Delta_t^*)(\Delta_t^*)^T$$

$$D_{n \times m} \sum_{i=1}^n d_{i,j} = 1, \quad \forall j : 1 \dots m$$

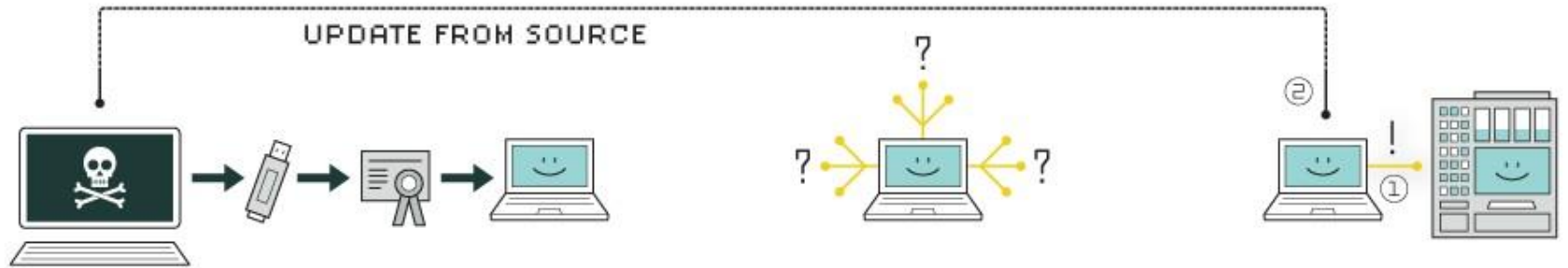
$$c_{t+1} = Ac_t + De_t + \frac{\|c_t\|}{n} \Delta_t$$



# Ciberseguridad

- La presencia de hardware y software programable para control de la oferta y demanda en fuentes renovables (usualmente no gestionables) implica un reto moderno: ciberseguridad
- Ejemplos
  - Stuxnet (2010), un virus diseñado para infectar infraestructura crítica Siemens
  - Vulnerabilidad de infraestructura SCADA (2012)

# HOW STUXNET WORKED



## 1. infection

Stuxnet enters a system via a USB stick and proceeds to infect all machines running Microsoft Windows. By brandishing a digital certificate that seems to show that it comes from a reliable company, the worm is able to evade automated-detection systems.

## 2. search

Stuxnet then checks whether a given machine is part of the targeted industrial control system made by Siemens. Such systems are deployed in Iran to run high-speed centrifuges that help to enrich nuclear fuel.

## 3. update

If the system isn't a target, Stuxnet does nothing; if it is, the worm attempts to access the Internet and download a more recent version of itself.



## 4. compromise

The worm then compromises the target system's logic controllers, exploiting "zero day" vulnerabilities—software weaknesses that haven't been identified by security experts.

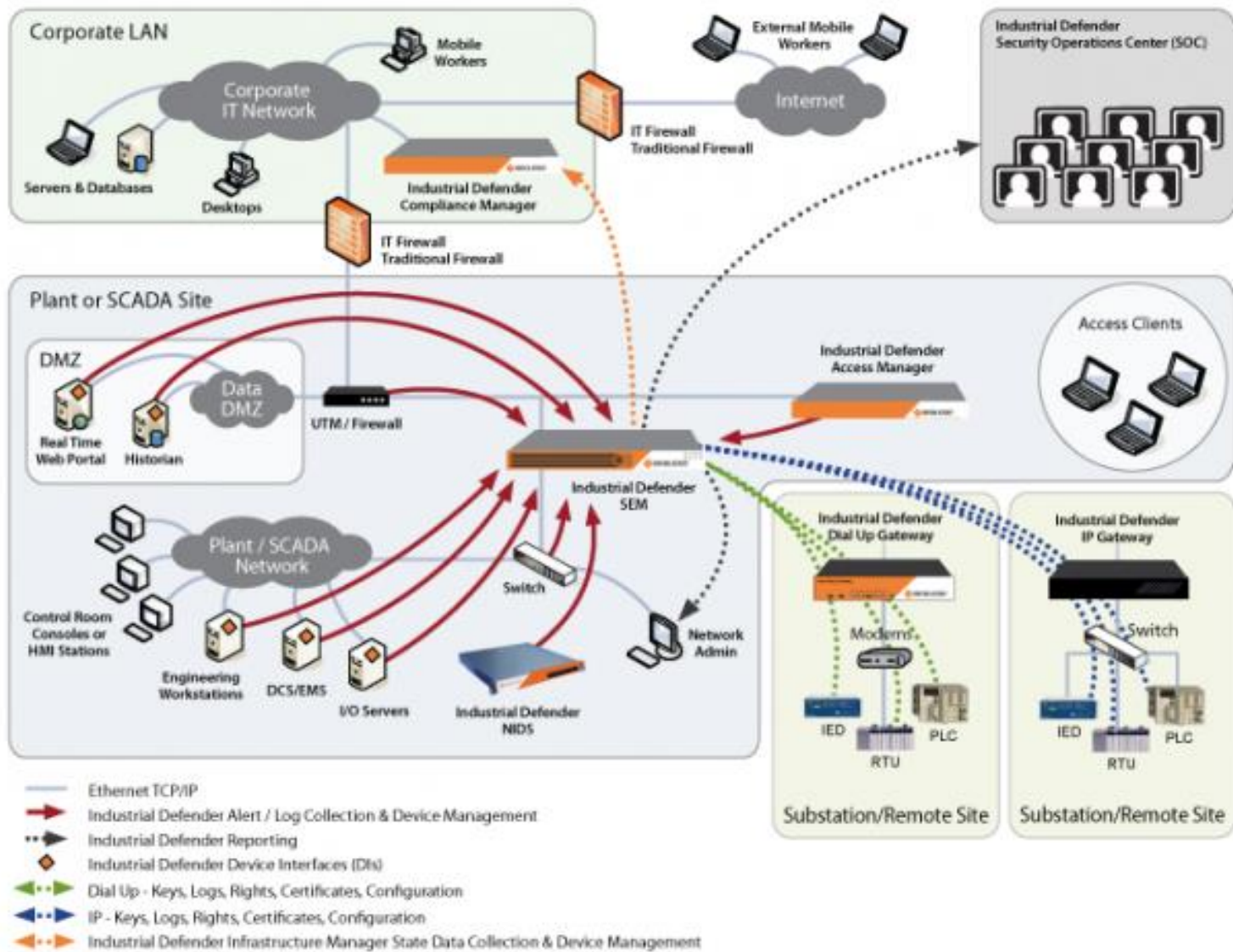
## 5. control

In the beginning, Stuxnet spies on the operations of the targeted system. Then it uses the information it has gathered to take control of the centrifuges, making them spin themselves to failure.

## 6. deceive and destroy

Meanwhile, it provides false feedback to outside controllers, ensuring that they won't know what's going wrong until it's too late to do anything about it.









# ¿Qué oportunidades tiene Costa Rica?

- Construir un marco regulatorio de generación eléctrica de avanzada, basado en evidencia y prospectiva
- Establecer reglas claras para la generación eléctrica, agnósticas de tecnologías, con referencia a mejores prácticas y estándares internacionales
- Propiciar una oleada de capital humano en Energía capaz de producir tecnologías basadas en la integración hardware-software, con calidad mundial
- Proveer un insumo clave para la distribución del espectro radioeléctrico y evaluar el rédito de la reserva de bandas con fines de comunicación hacia Smart Grid (segundo dividendo digital)

## 4. Conclusiones

- La integración de fuentes no gestionables implica dotar a las redes eléctricas de flexibilidad multinivel.
- El análisis de red eléctrica a través de la teoría de redes es esencial para determinar vulnerabilidades.
- Integrar responsablemente fuentes de energía renovables implica seguridad tecnológica alrededor de infraestructura digital.

**GRACIAS**