

# VENCUENTRO INTERUNIVERSITARIO SOBRE COMPLEJIDAD Y SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN

## Sistemas dinámicos cognitivos: Ingeniería de Sistemas Complejos HOY



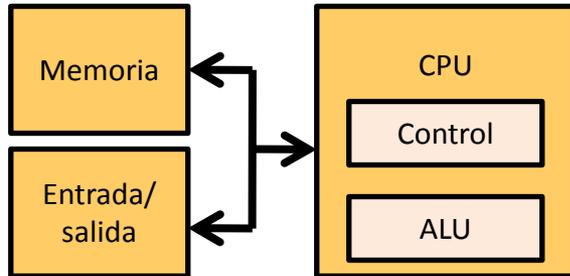
UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Marco Aurelio Alzate Monroy  
Universidad Distrital

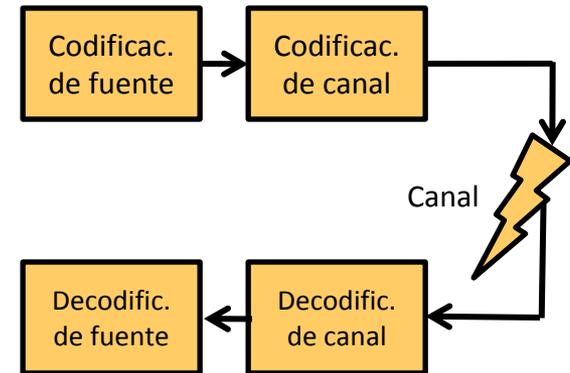
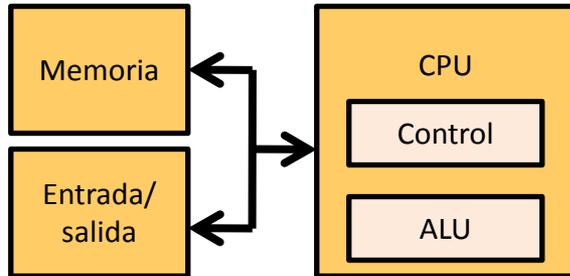


# El reduccionismo mecanicista tiene una larga historia de éxitos en la ingeniería clásica

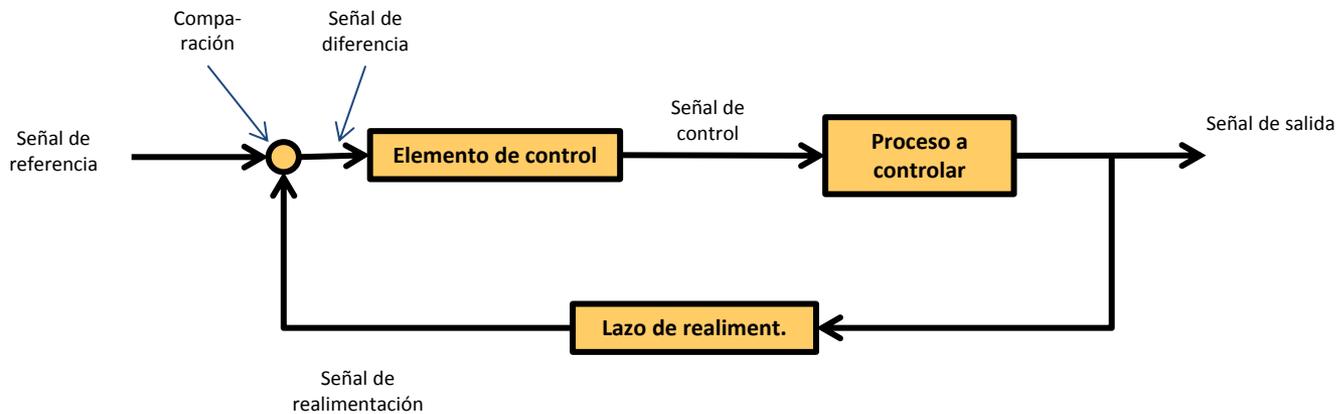
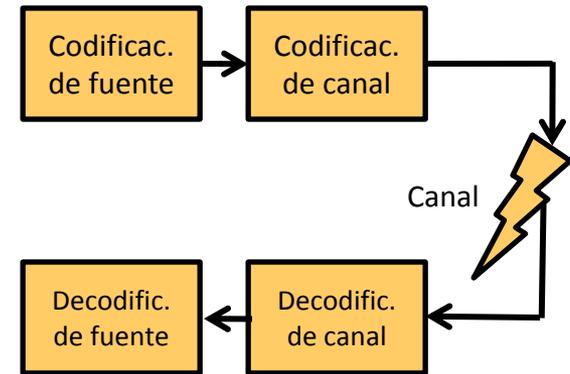
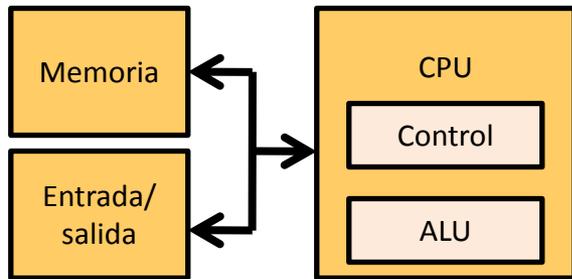
# El reduccionismo mecanicista tiene una larga historia de éxitos en la ingeniería clásica



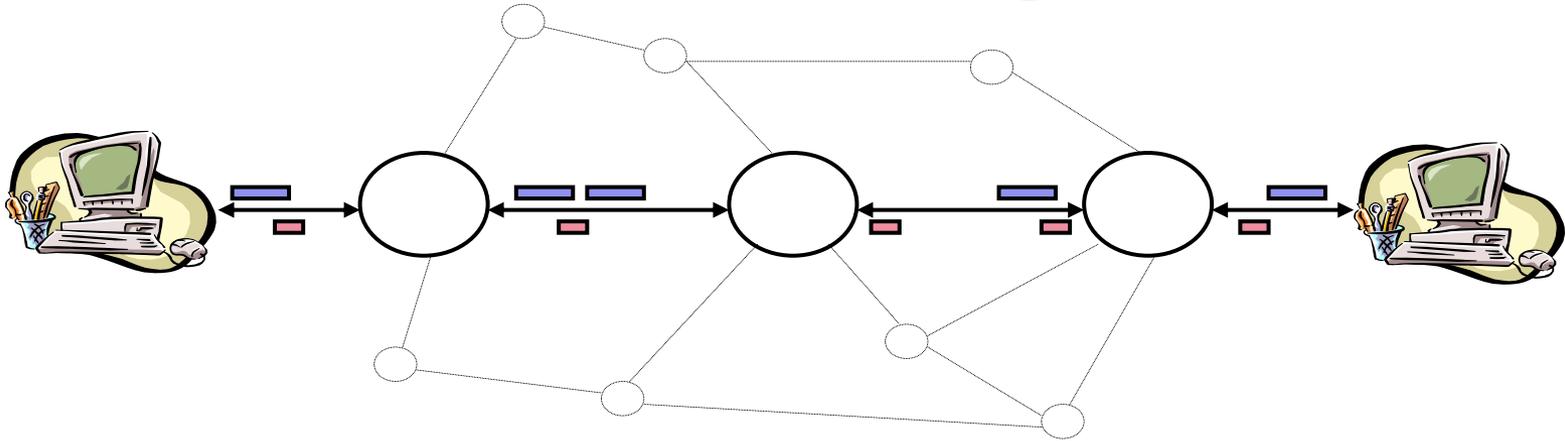
# El reduccionismo mecanicista tiene una larga historia de éxitos en la ingeniería clásica



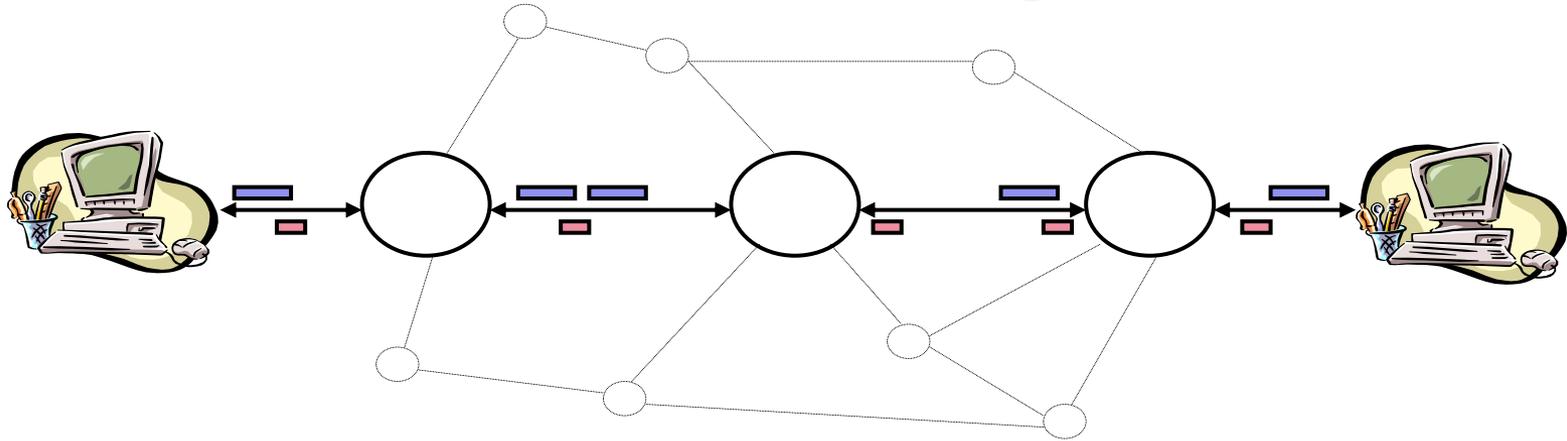
# El reduccionismo mecanicista tiene una larga historia de éxitos en la ingeniería clásica



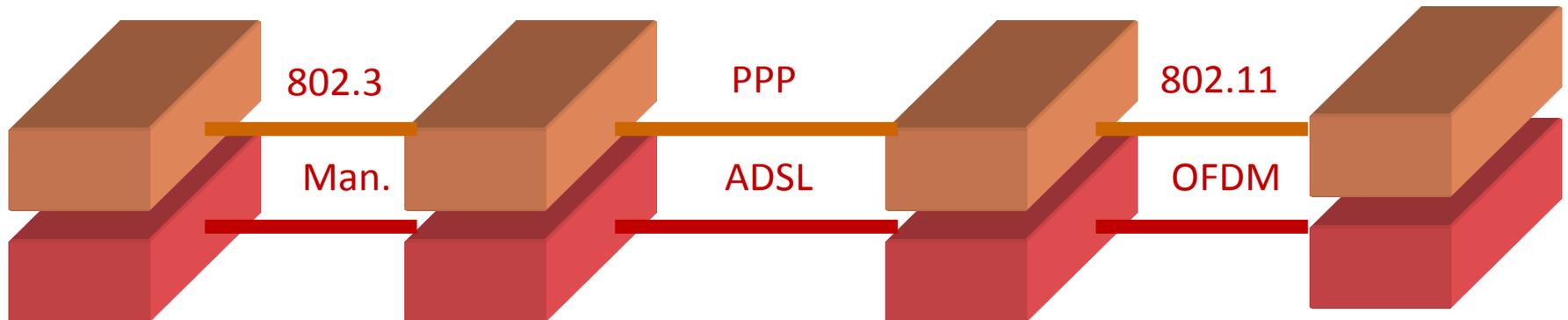
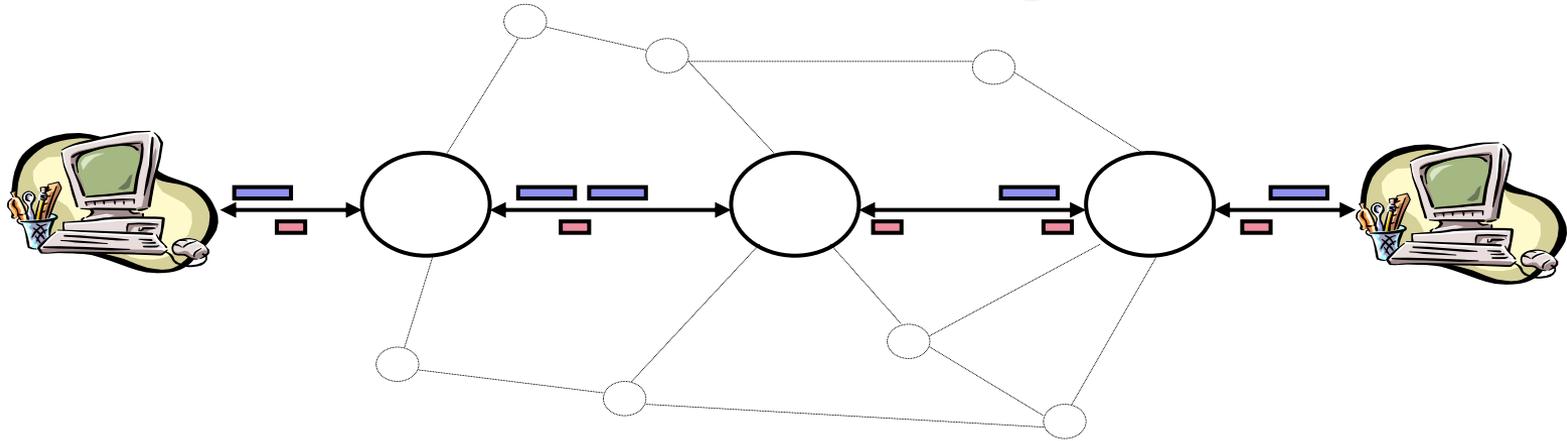
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



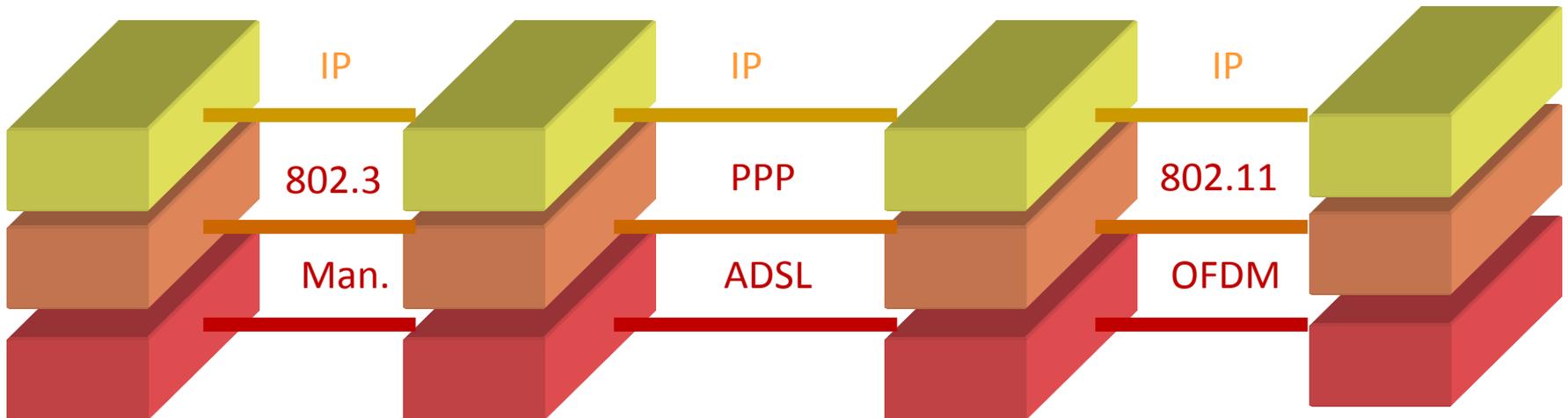
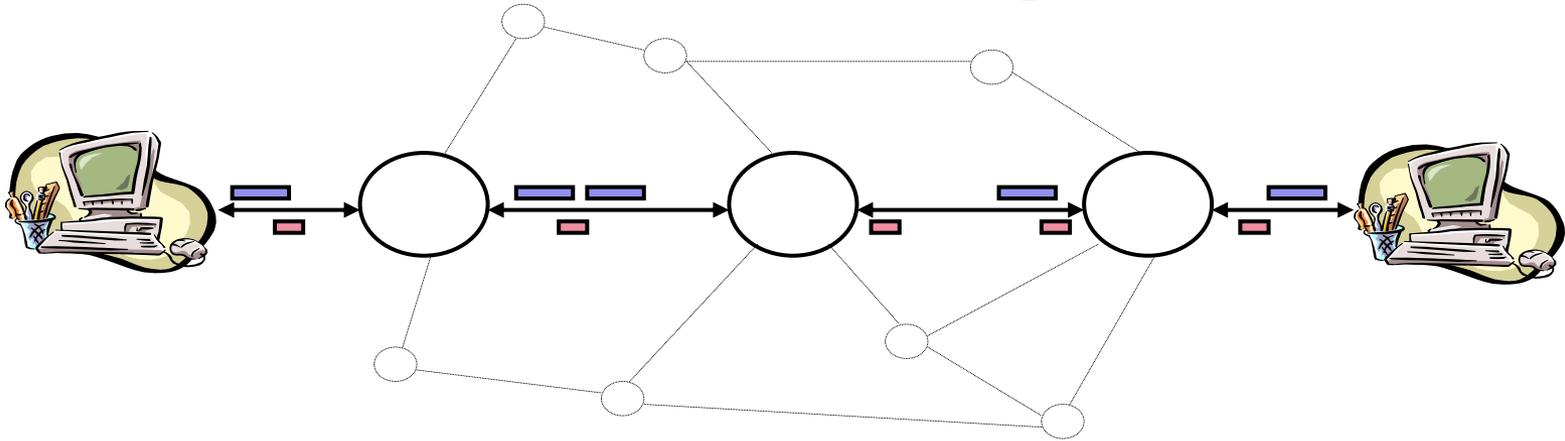
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



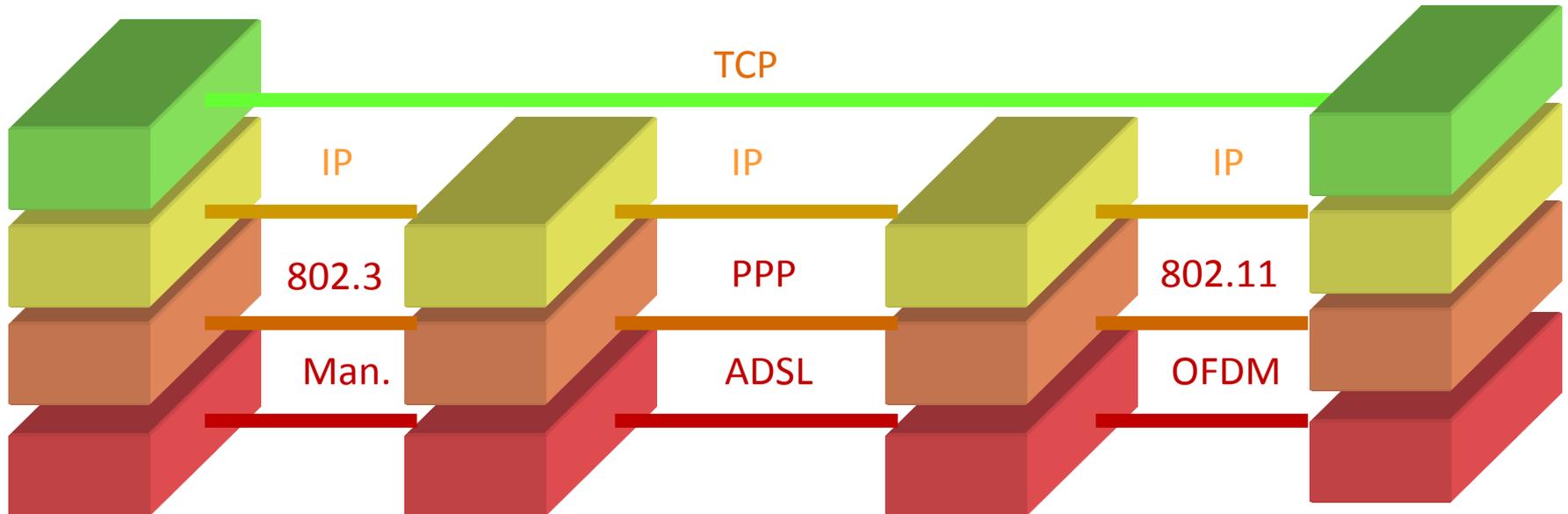
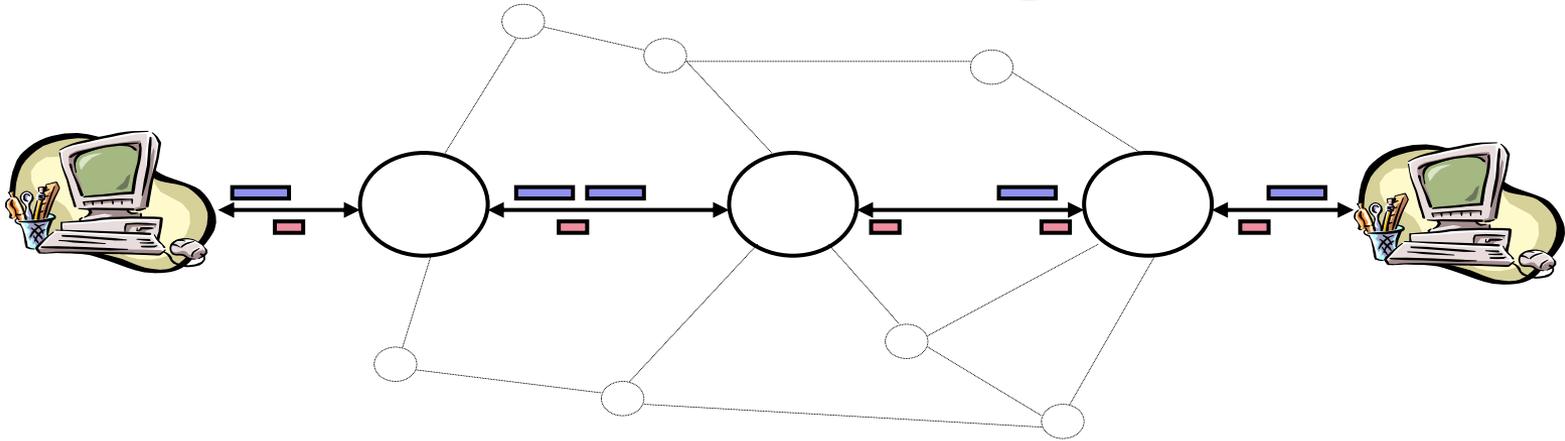
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



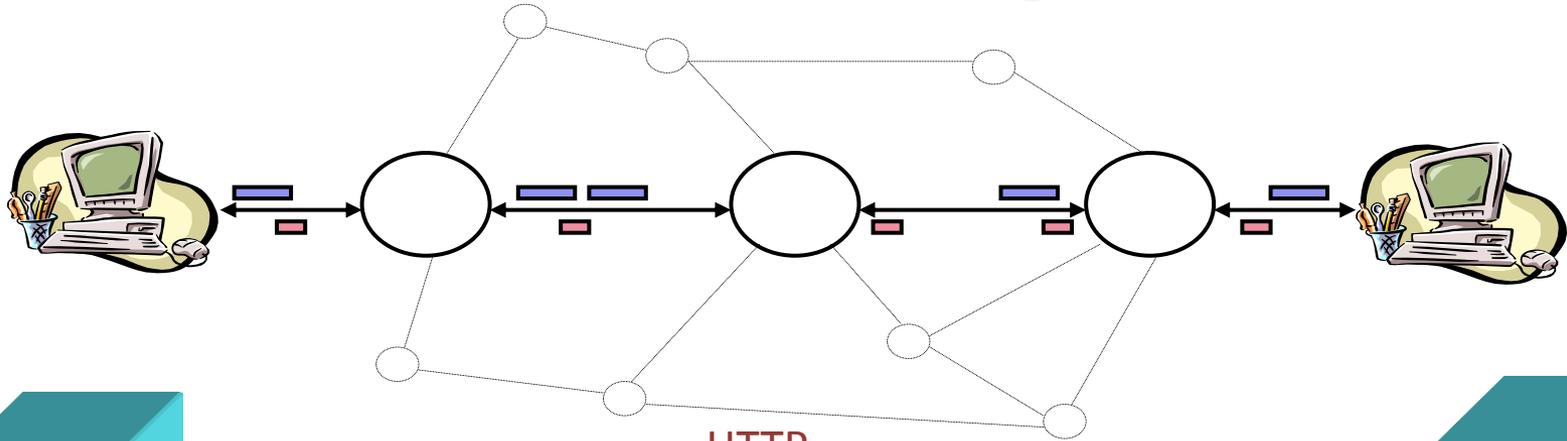
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



HTTP

TCP

IP

IP

IP

802.3

PPP

802.11

Man.

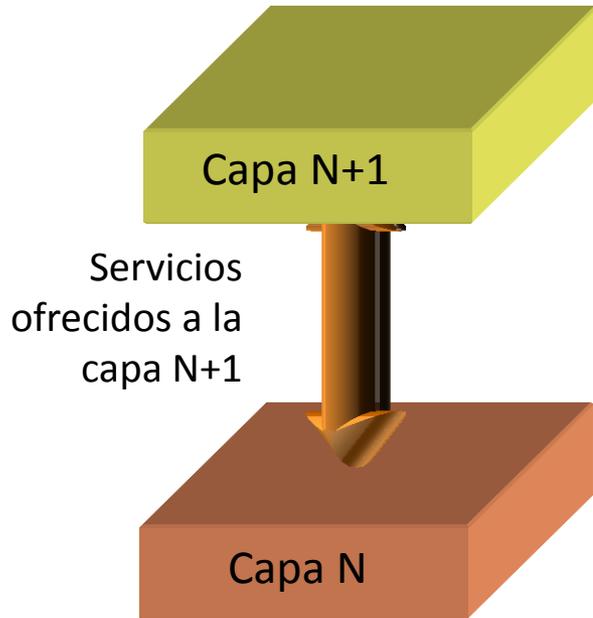
ADSL

OFDM

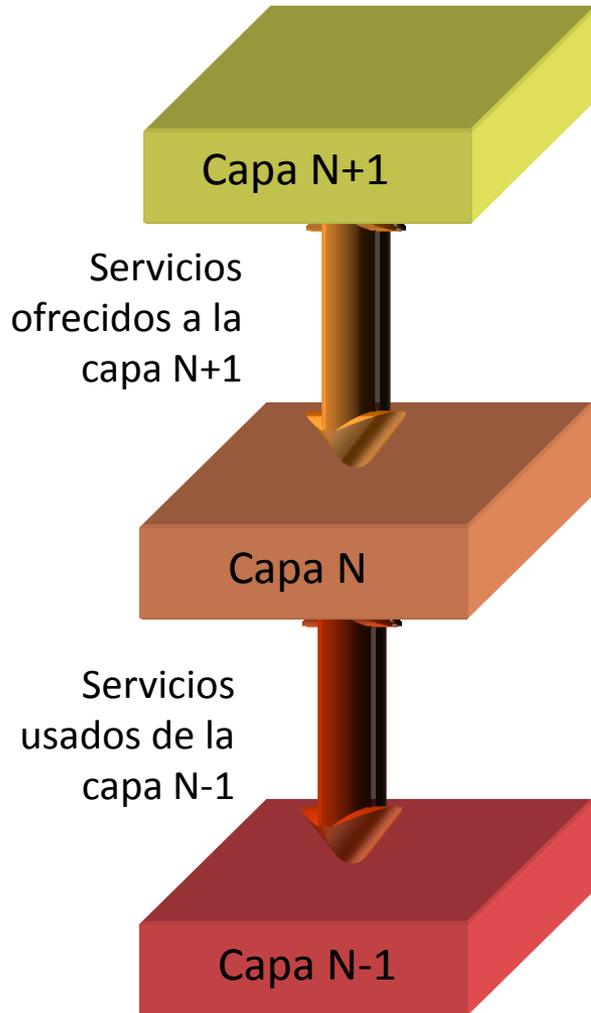
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



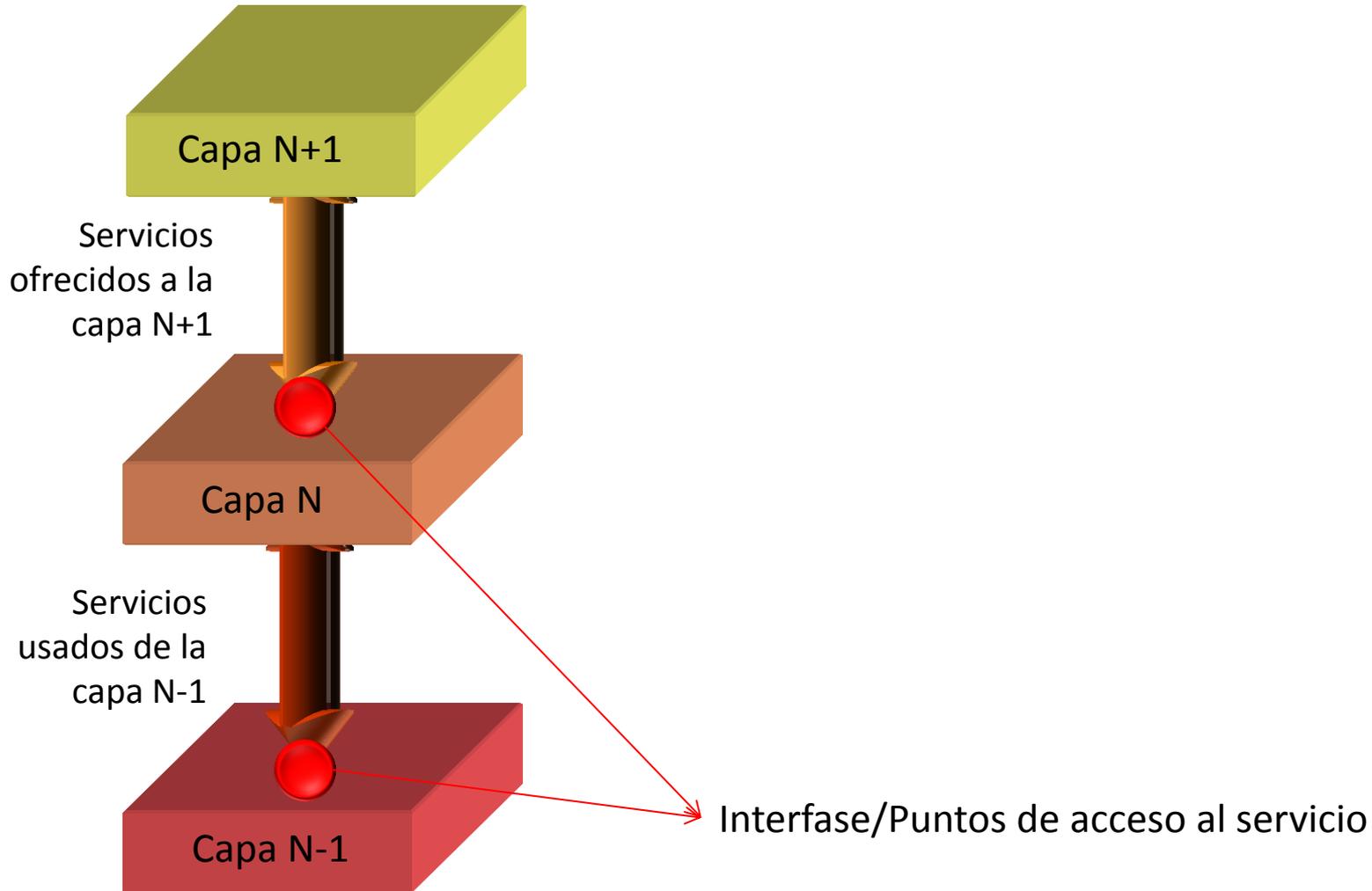
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



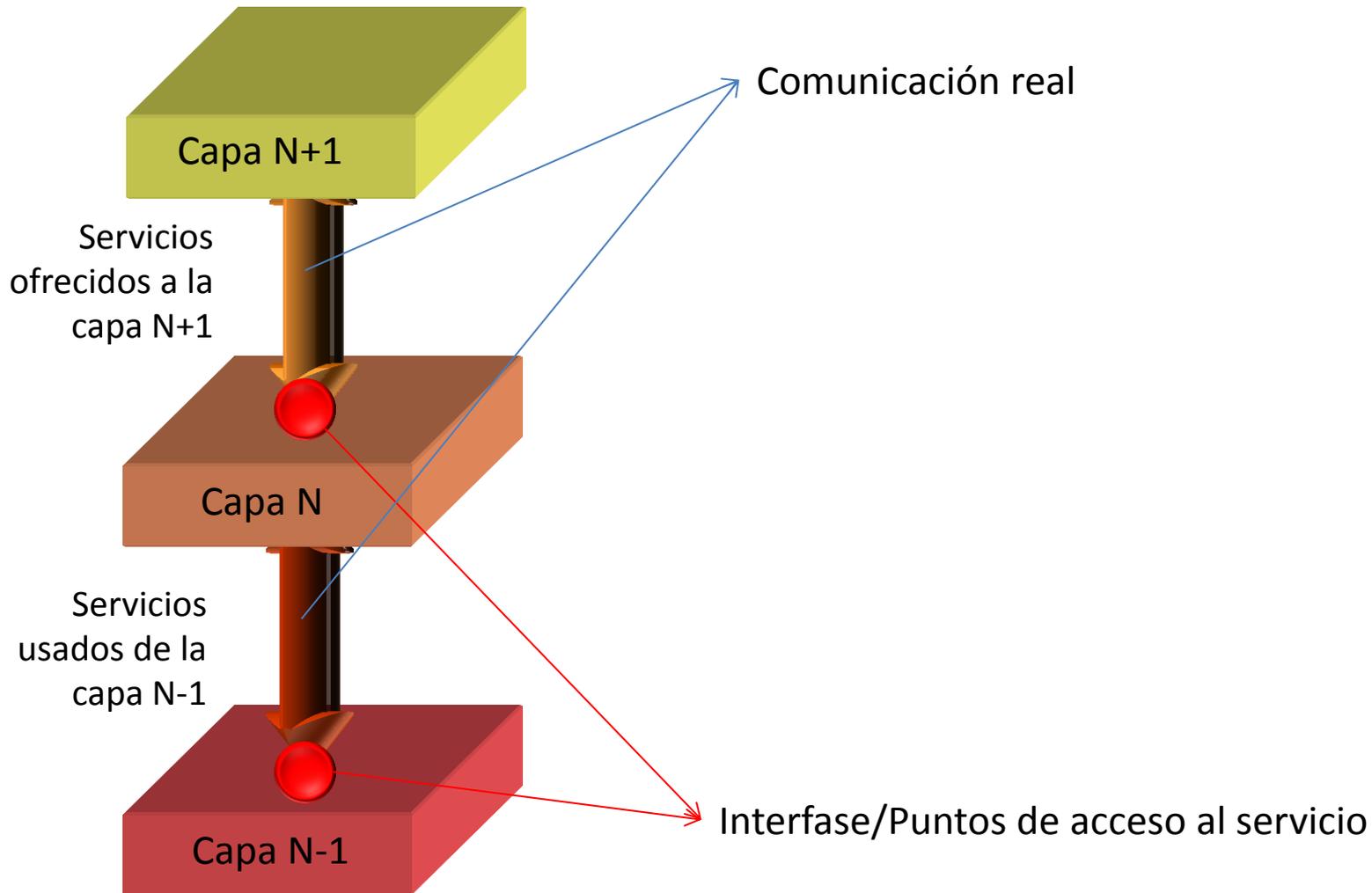
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



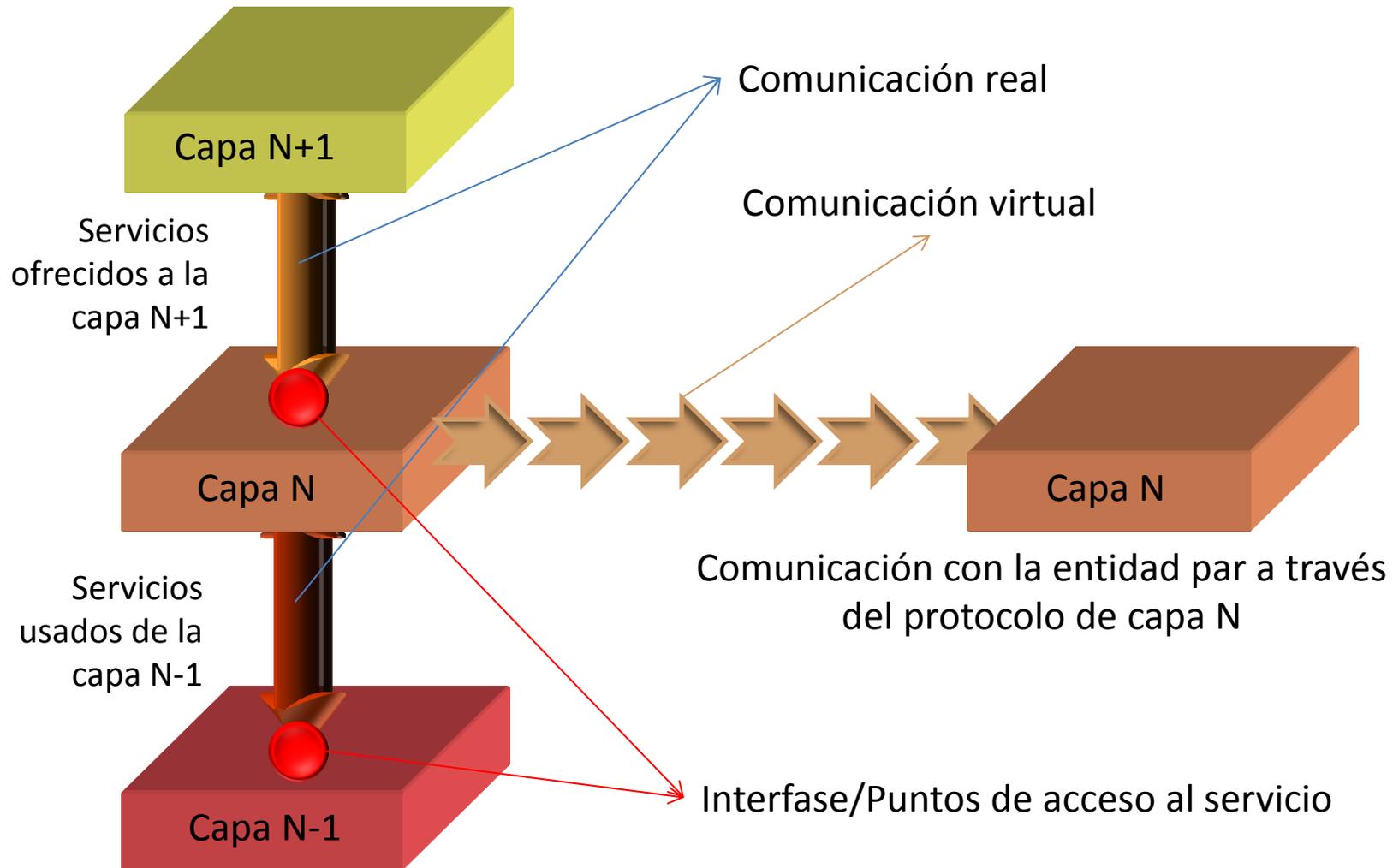
# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería



# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería

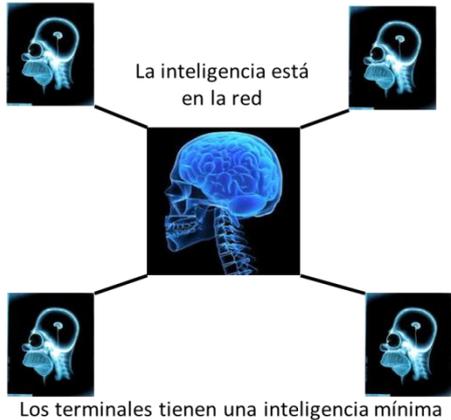


# El máximo logro del reduccionismo mecanicista en la historia de la ingeniería

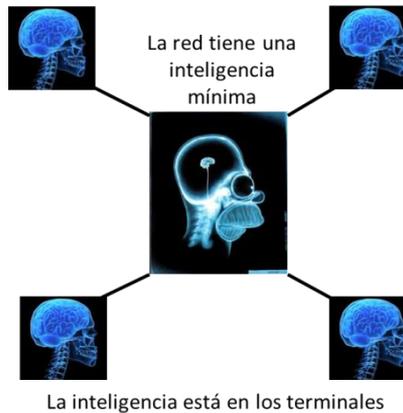


# Todas las condiciones para la Complejidad

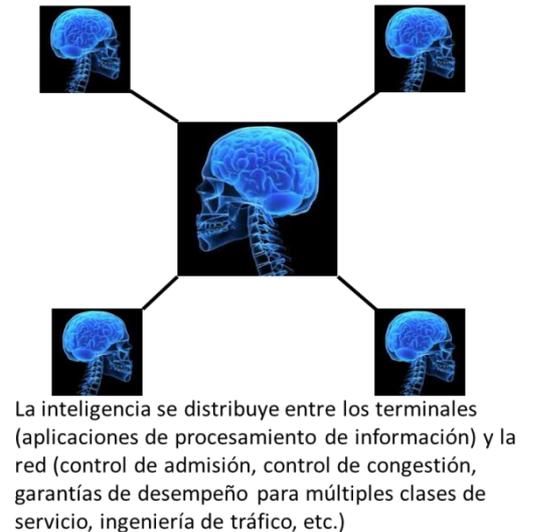
## Del Modelo de la red telefónica



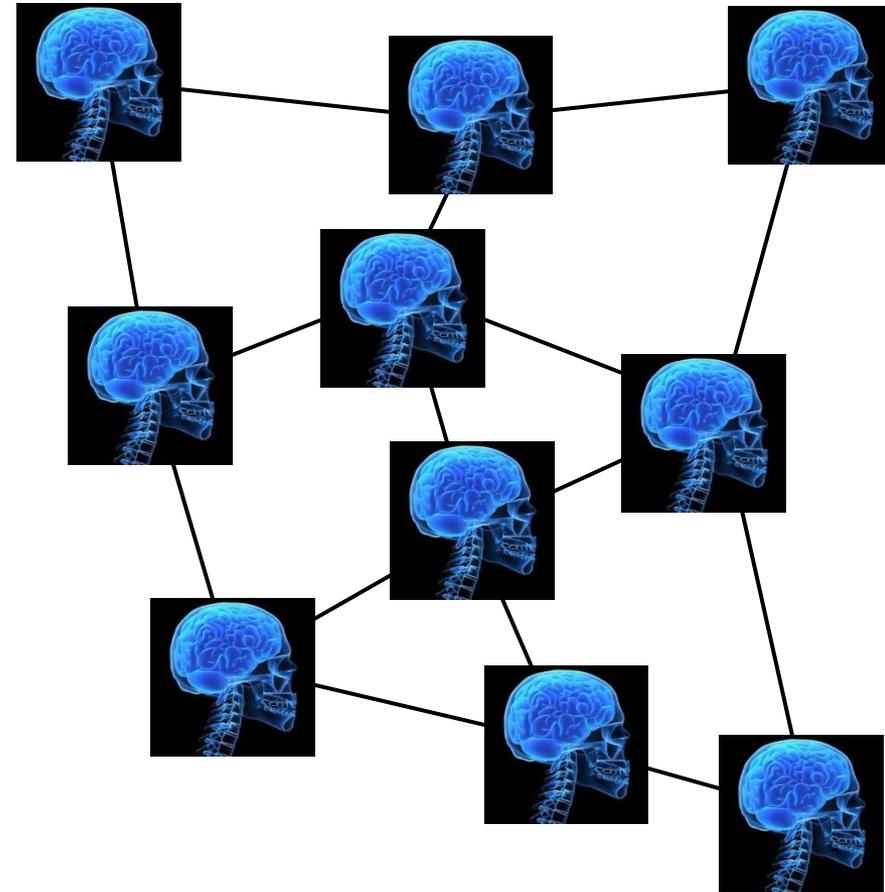
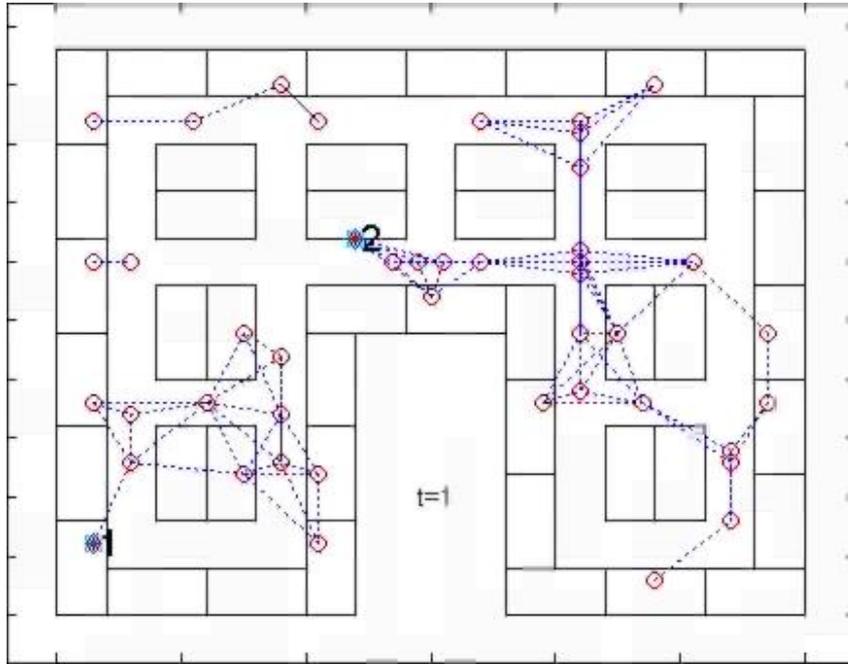
## Al Modelo de la red IP



## Al modelo de red multiservicios de hoy

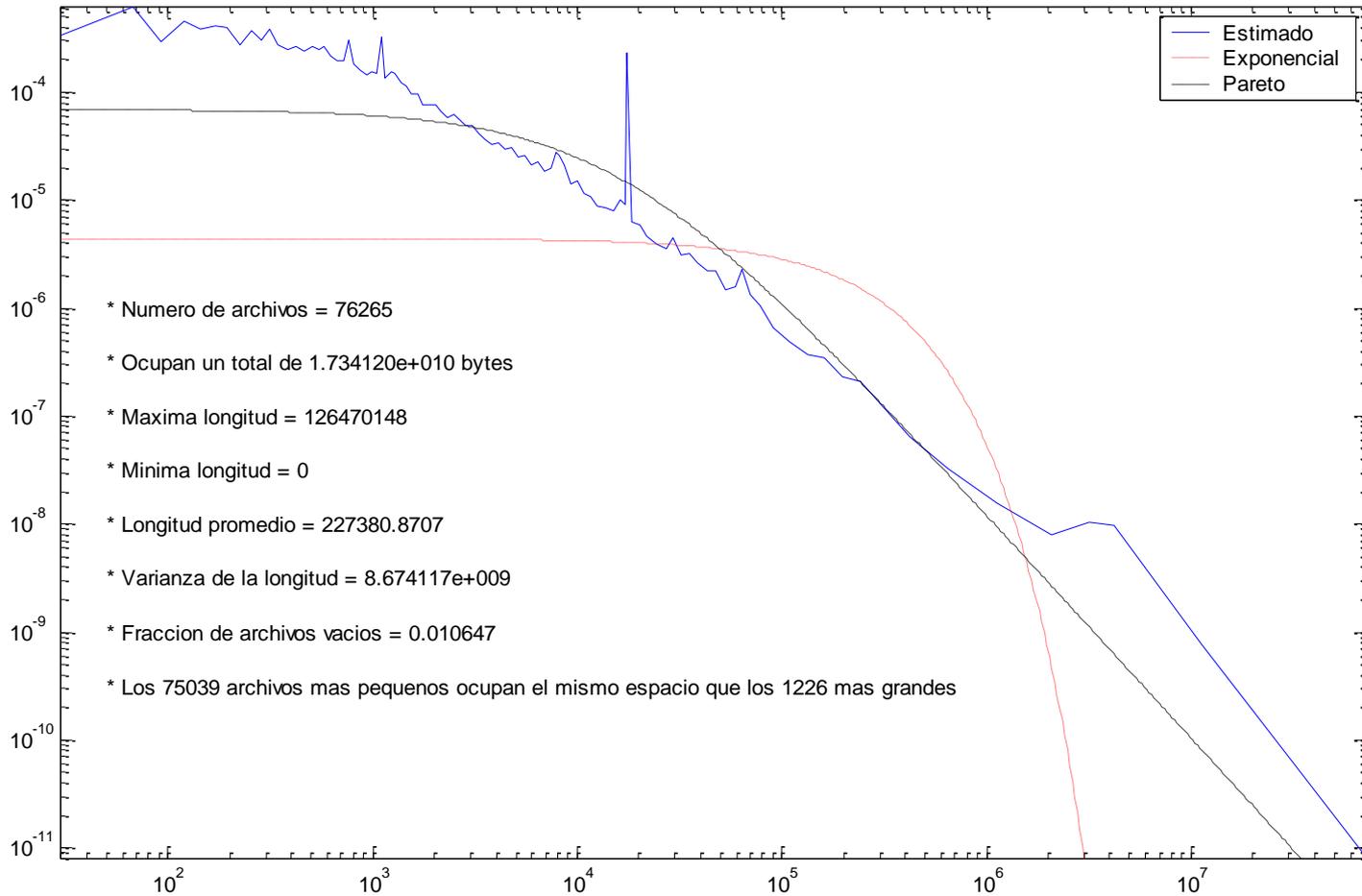


# Todas las condiciones para la Complejidad

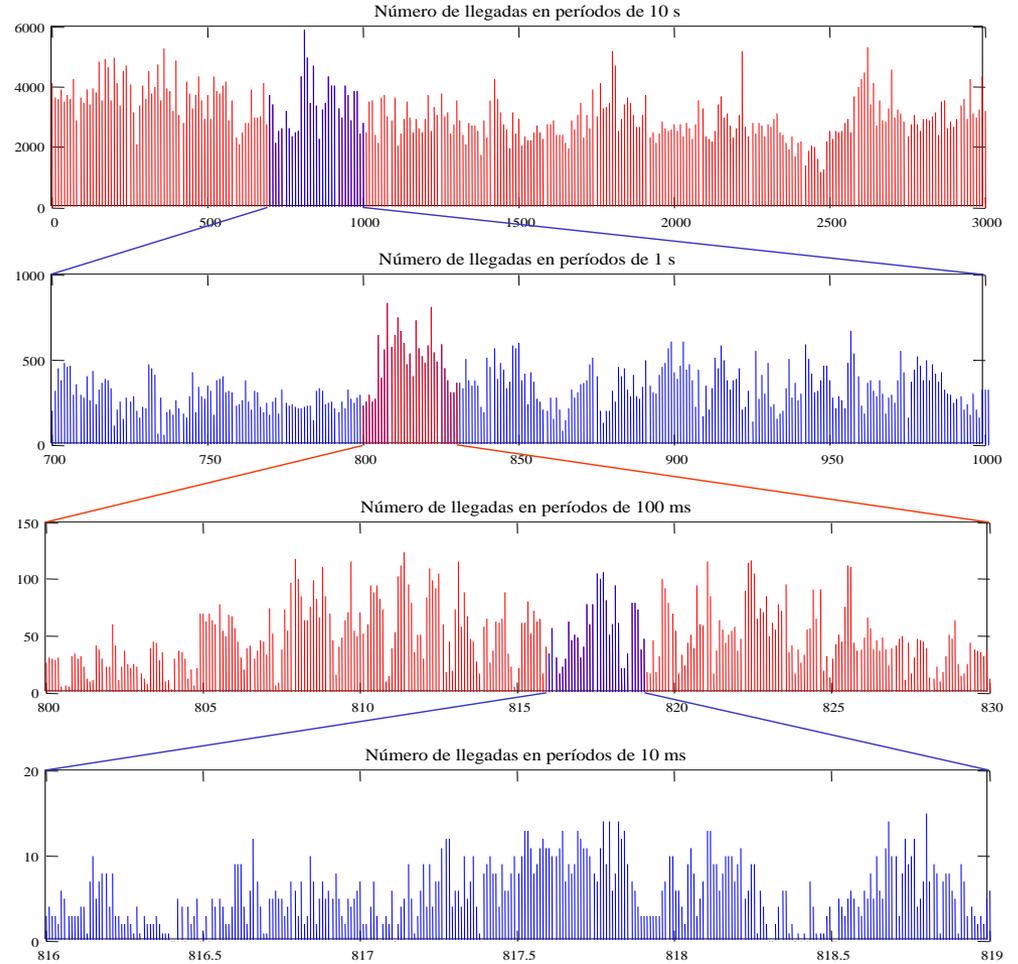
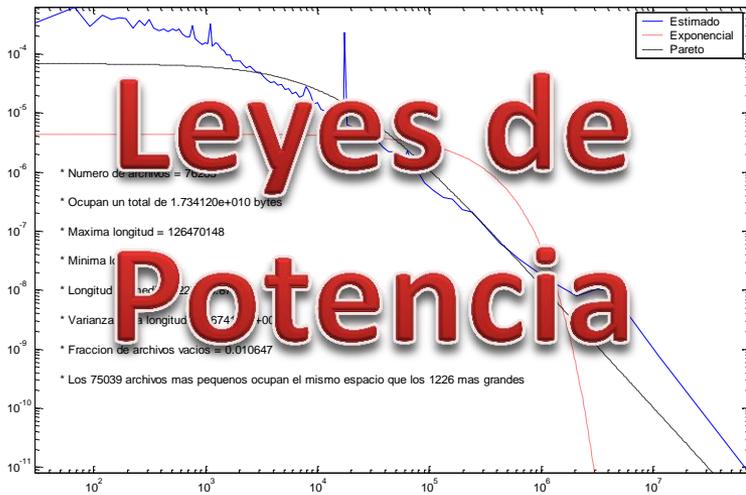


A agentes inteligentes y autónomos que compiten (y cooperan) entre ellos para utilizar recursos escasos y de capacidad limitada

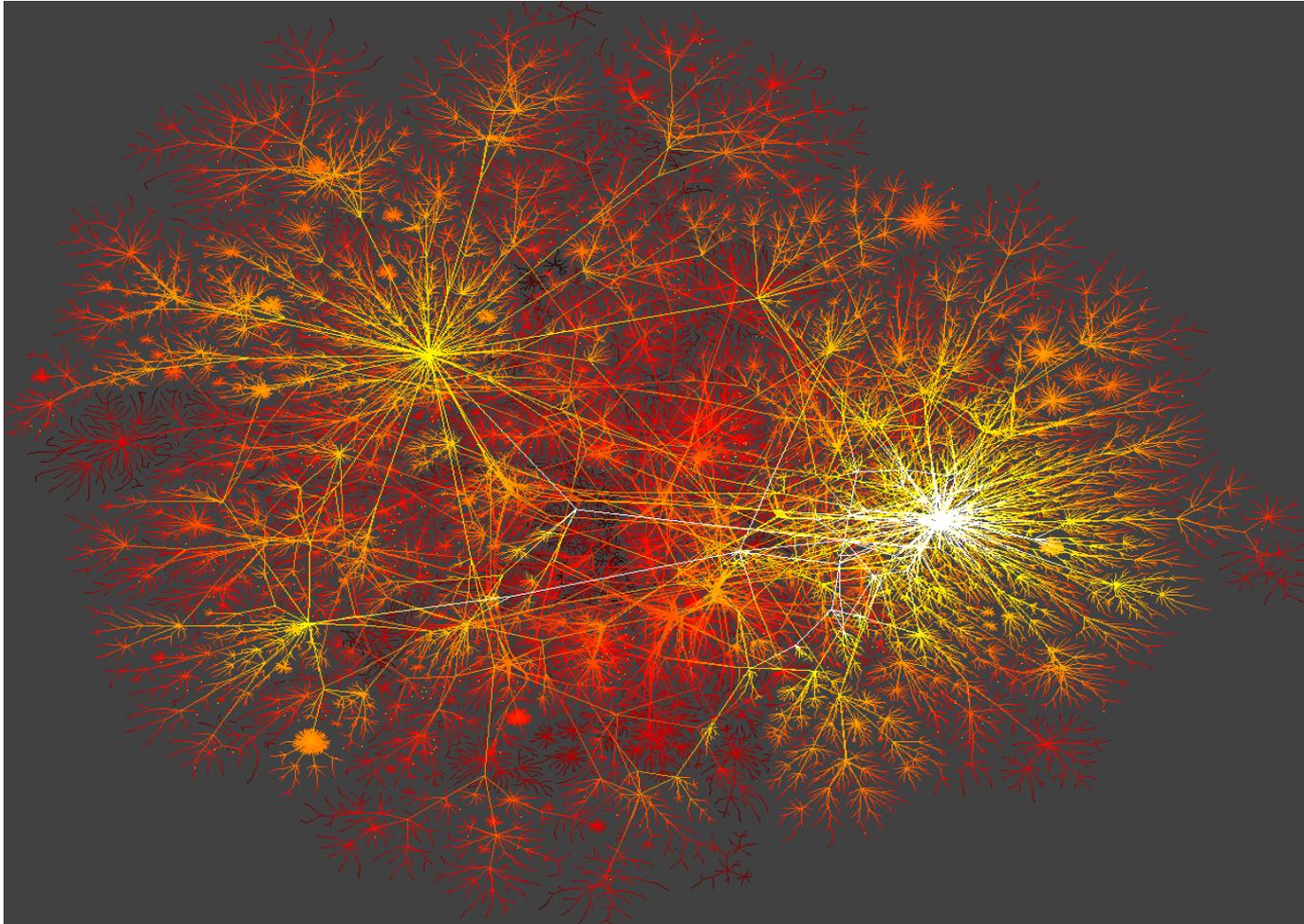
# Leyes de Potencia



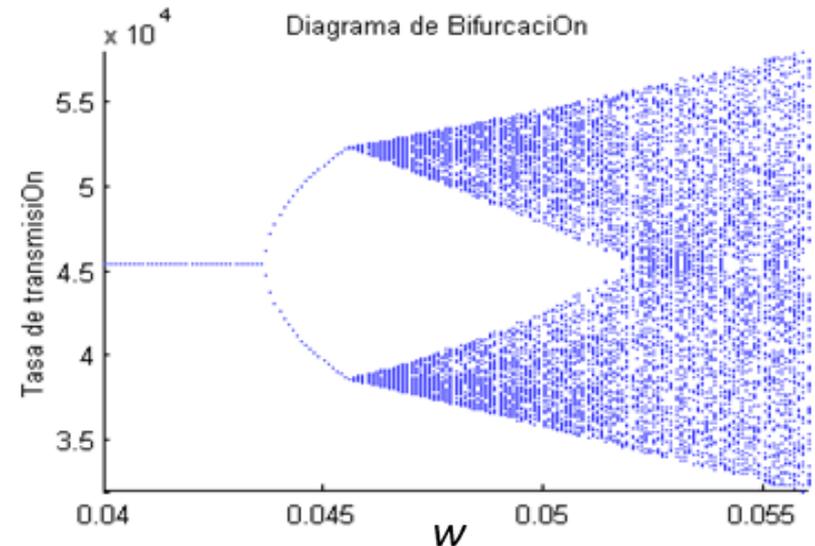
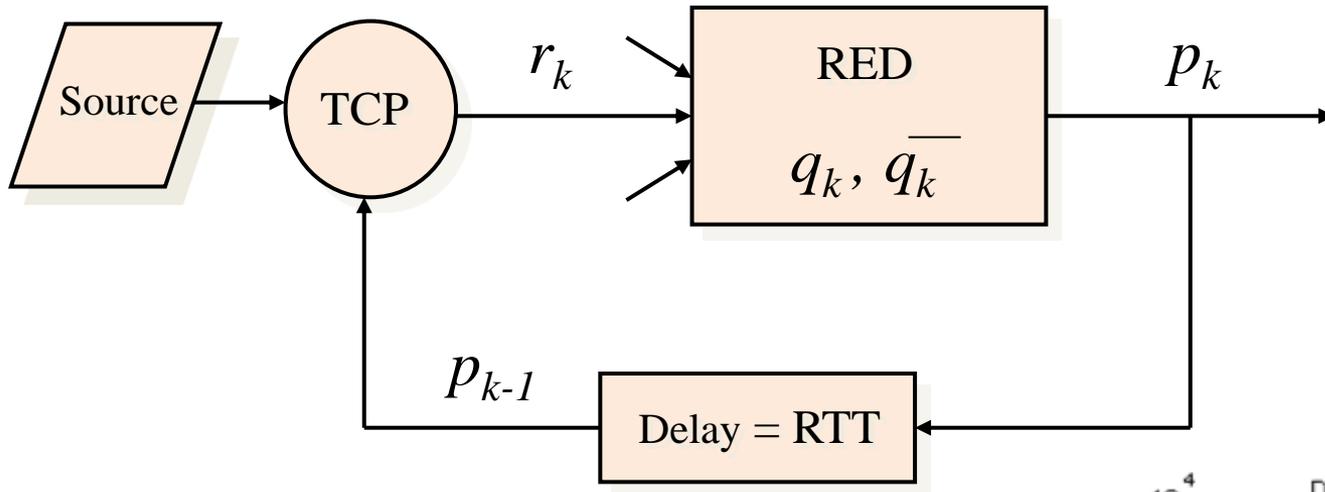
# Tráfico Fractal



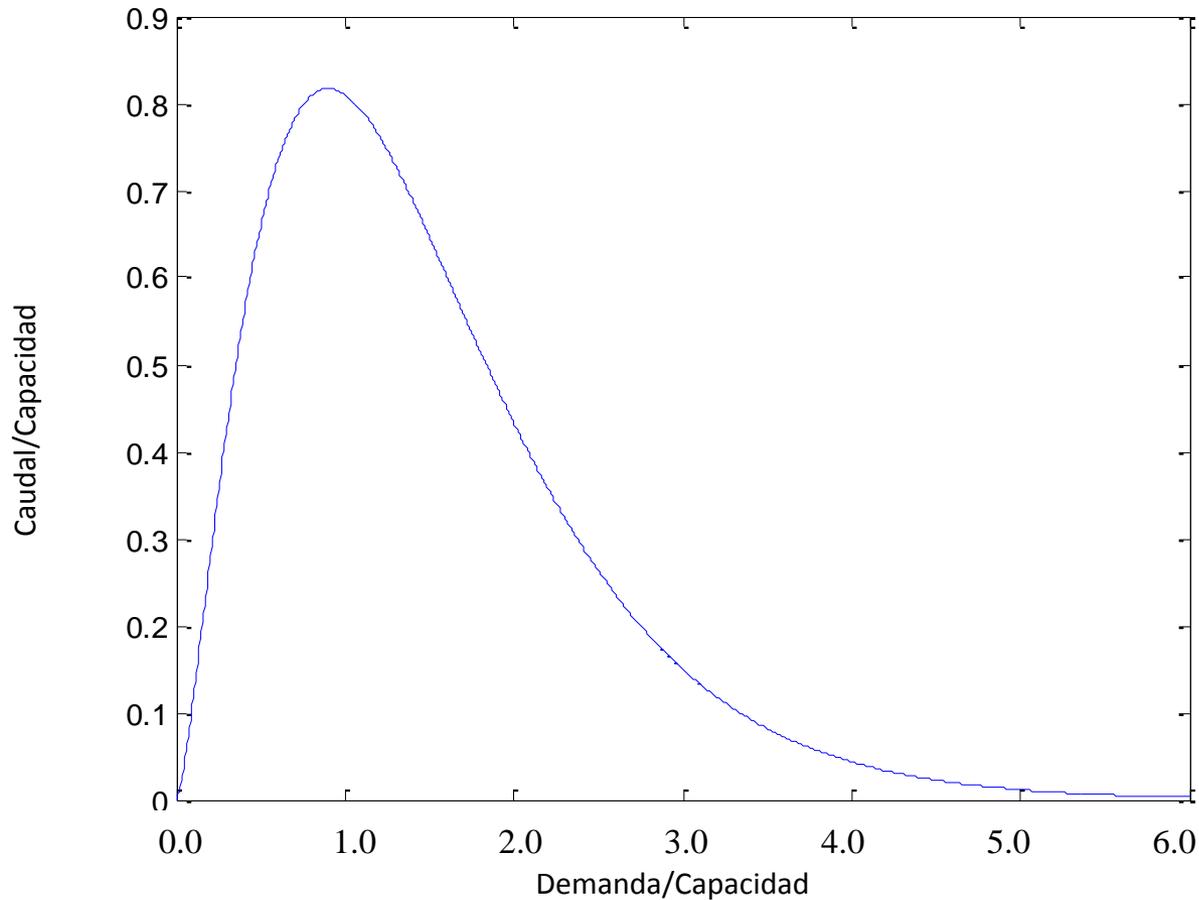
# Topologías físicas y lógicas libres de escala



# Caos potencial en las dinámicas de los Protocolos de control de congestión



# Auto-organización al borde de la congestión



# Complejidad en Redes de Comunicaciones

**Leyes de Potencia**



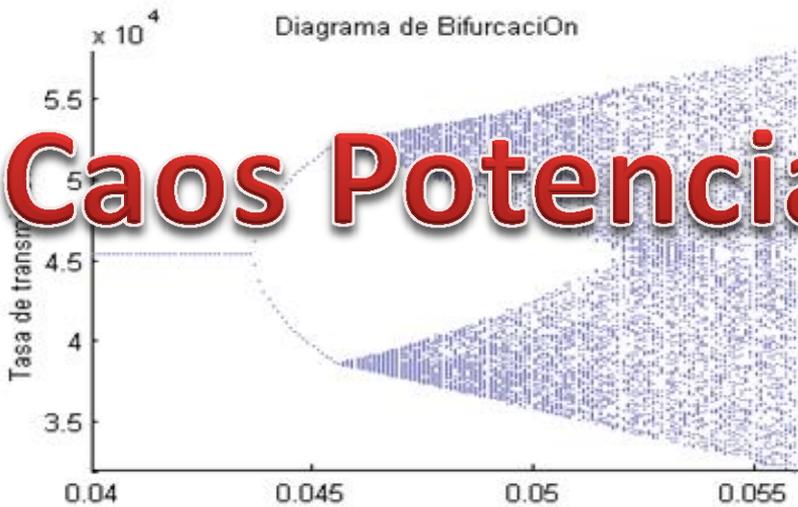
**Tráfico Fractal**



**Redes libres de escala**



**Caos Potencial**



**Auto-Organización**



# Sistemas Complejos

Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)



VENCUENTRO INTERUNIVERSITARIO SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN  
SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN

**Sistemas Dinámicos Cognitivos**  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
**Marco Aurelio Alzate Monroy**



# Sistemas Complejos

Los sistemas  
complejos

Involucran

Muchos componentes

Que interactúan  
dinámicamente

Generando

Diferentes escalas  
o niveles

donde exhiben

Comportamientos  
comunes

Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)



**Sistemas Dinámicos Cognitivos**  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
**Marco Aurelio Alzate Monroy**



# Sistemas Complejos

Los sistemas complejos

Involucran

Muchos componentes

Que interactúan dinámicamente

Generando

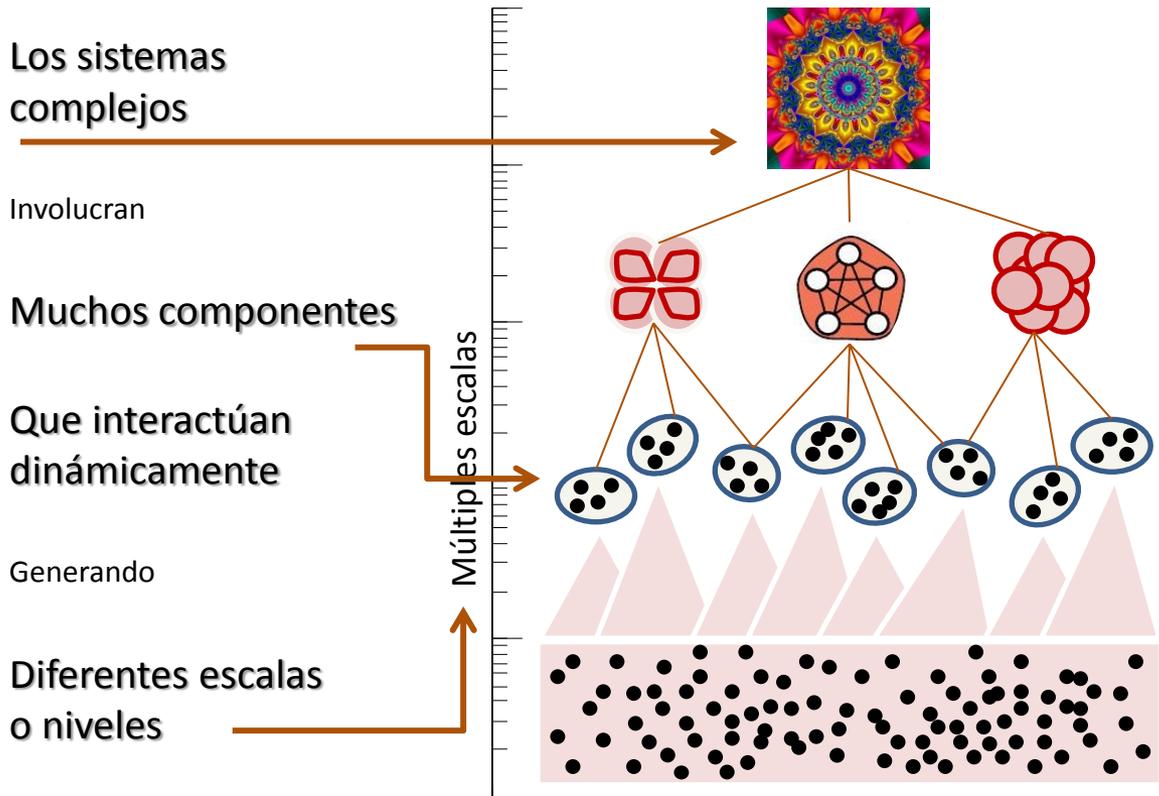
Diferentes escalas o niveles

donde exhiben

Comportamientos comunes



# Sistemas Complejos

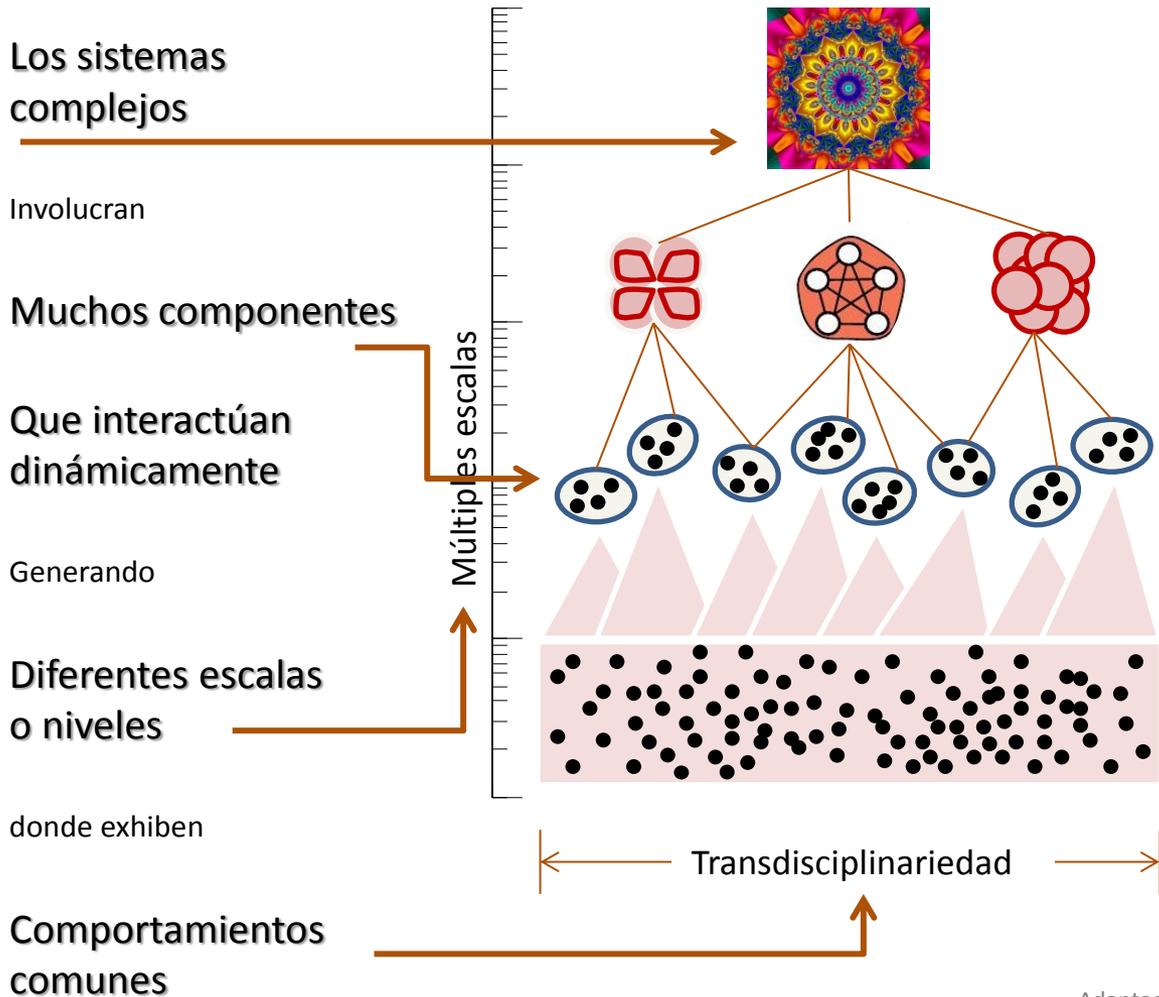


donde exhiben

Comportamientos comunes

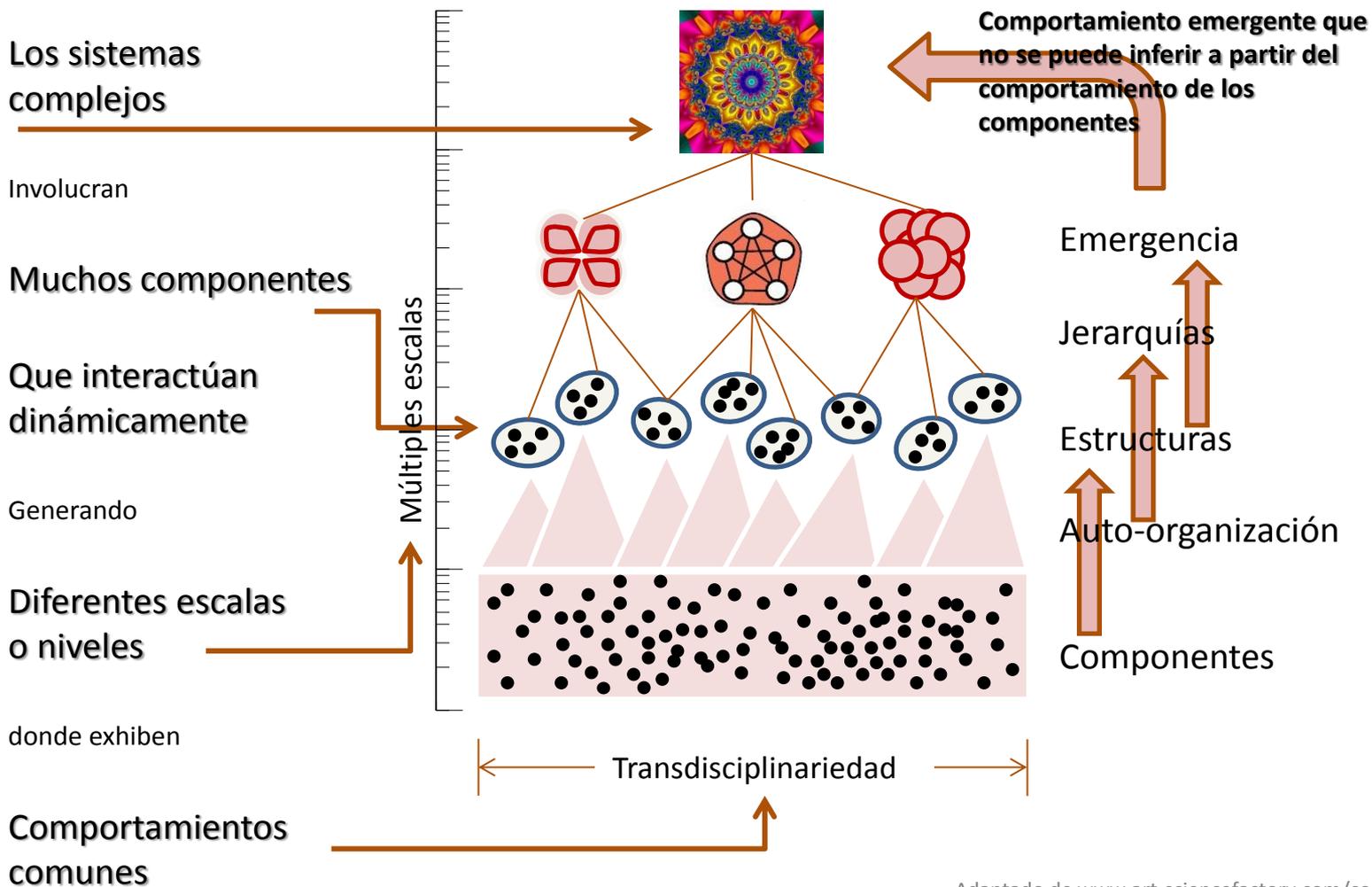
Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)

# Sistemas Complejos



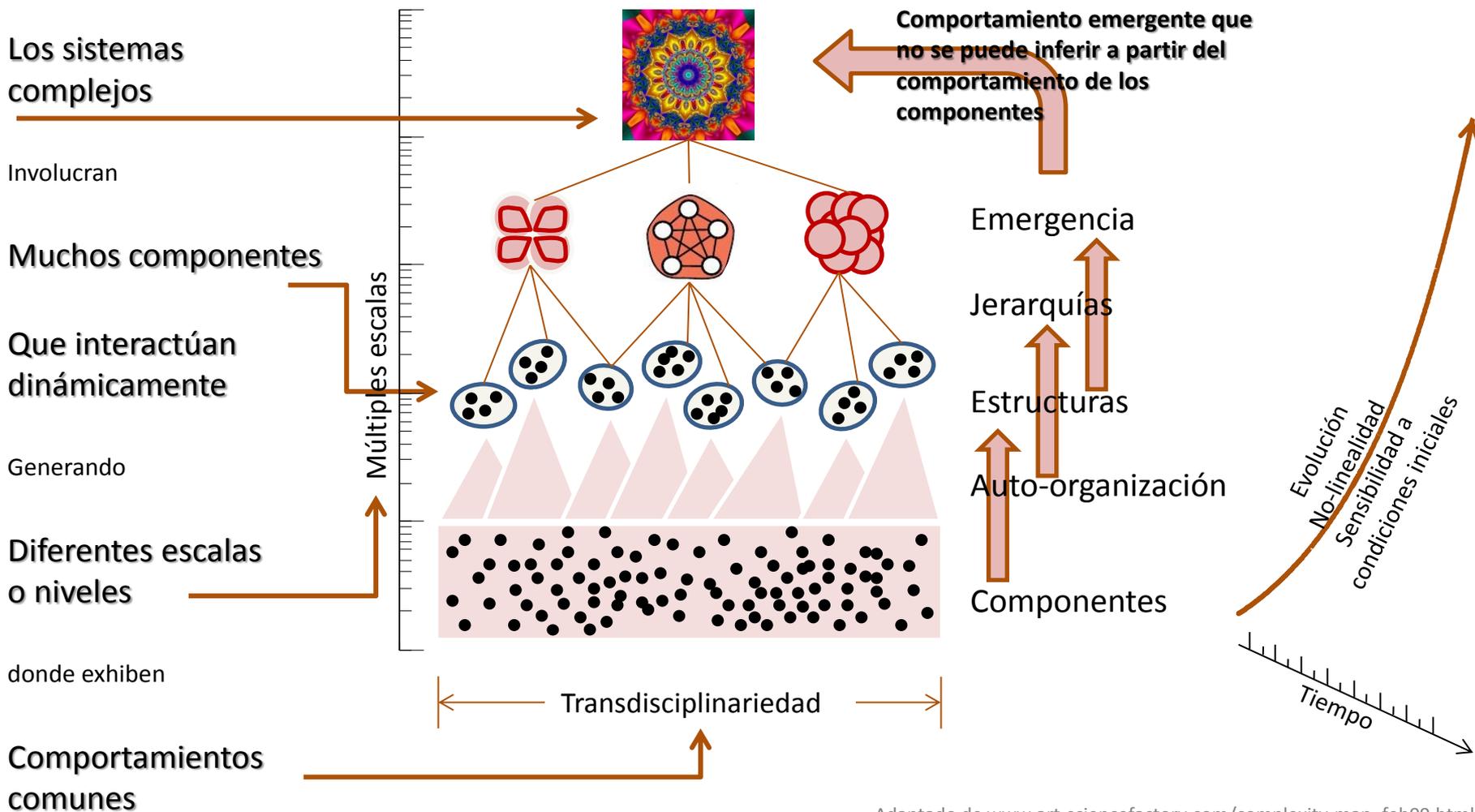
Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)

# Sistemas Complejos



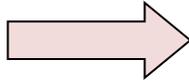
Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)

# Sistemas Complejos



Adaptado de [www.art-sciencefactory.com/complexity-map\\_feb09.html](http://www.art-sciencefactory.com/complexity-map_feb09.html)

# Complejidad en Redes de Comunicaciones



**Componentes sencillos**  
**Interacciones sencillas**

**Comportamiento emergente**  
**auto-organizado**

**SOC/EOC**

Self-organized criticality/  
Edge of chaos  
(propio de la mecánica estadística)

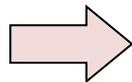
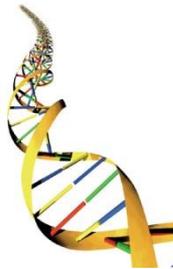
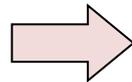
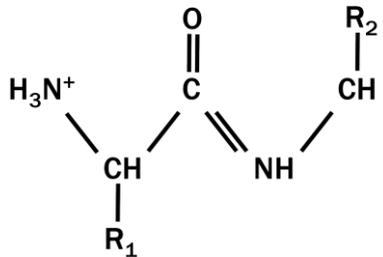
# Complejidad en Redes de Comunicaciones



**Componentes sencillos**  
**Interacciones sencillas**

**Comportamiento emergente**  
**auto-organizado**

**SOC/EOC**  
Self-organized criticality/  
Edge of chaos  
(propio de la mecánica estadística)



**Componentes sencillos**  
**Interacciones sencillas**

**Comportamiento emergente**  
**auto-organizado**

**HOT**  
Highly Optimized Tolerance  
(propio de sistemas optimizados)  
Vida: Optimización por Evolución,  
Tecnología: Optimización por Diseño

# Razones para la Complejidad en Redes de Comunicaciones

## ▪ SOC –Self-Organized Criticality–

- Un concepto de la mecánica estadística
- La complejidad surge como una característica emergente en sistemas homogéneos con interacciones locales simples
- Los fenómenos de invarianza en la escala (como fractales y leyes de potencia) emergen en el punto crítico entre fases
- Los sistemas complejos se auto-organizan en ese punto crítico
- La complejidad emergente ocurre entre estados de orden y desorden caracterizados por transiciones de fase y bifurcaciones en interconexión de componentes genéricos.

## • HOT –Highly Optimized Tolerance–

- Los sistemas complejos en biología, ecología, tecnología, sociología, economía...
- ... han sido llevados mediante diseño o evolución a estados de alto desempeño tolerantes a incertidumbres en el ambiente y en sus componentes.
- Esto conduce a estructuras jerárquicas especializadas y modulares que “esconden” una gran complejidad,
- Haciéndolos sensibles a perturbaciones desconocidas o ignoradas durante el diseño.

# Procesos de optimización generadores de complejidad

- $U_s(x_s, p_s)$  es la función de utilidad de la fuente  $s$  al transmitir a una tasa  $x_s$  con una probabilidad de error  $p_s$ .
- $V_j(w_j)$  es la utilidad que se obtiene al disponer de  $w_j$  recursos en el nodo  $j$
- $\mathbf{R}$  es la matriz de enrutamiento, donde  $R_{ls} = 1$  indica que la fuente  $s$  utiliza el enlace  $l$
- $\mathbf{c}$  es la capacidad de los enlaces, que depende de los recursos de nivel físico y de la probabilidad de error de decodificación deseada
- $\mathbf{F}$  es la matriz de contienda

Encontrar  
 $\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{p}, \mathbf{R}$  y  $\mathbf{F}$   
tales que

$$\max \sum_s U_s(x_s, p_s) + \sum_j V_j(w_j)$$

*sujeto a*

$$\mathbf{R}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}(\mathbf{w}, \mathbf{p})$$

$$\mathbf{x} \in C_1(\mathbf{p}) \cap C_2(\mathbf{F})$$

$$\mathbf{R} \in \mathcal{R}, \mathbf{w} \in \mathcal{W}, \mathbf{F} \in \mathcal{F}$$

# Procesos de optimización generadores de complejidad

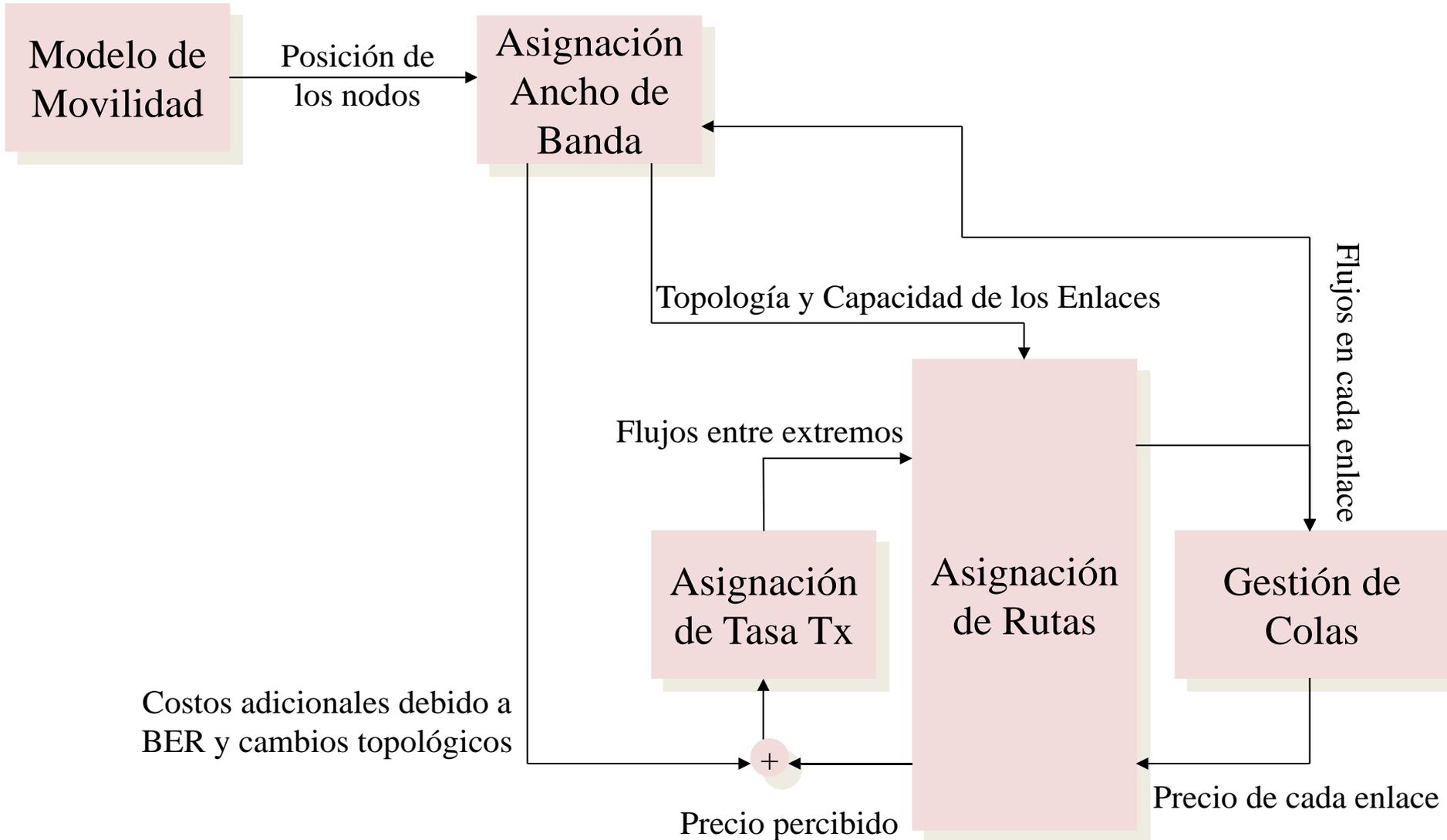
- $U_s(x_s, p_s)$  es la función de utilidad de la fuente  $s$  al transmitir a una tasa  $x_s$  con una probabilidad de error  $p_s$ .
- $V_j(w_j)$  es la utilidad que se obtiene al disponer de  $w_j$  recursos en el nodo  $j$
- $\mathbf{R}$  es la matriz de enrutamiento, donde  $R_{ls} = 1$  indica que la fuente  $s$  utiliza el enlace  $l$
- $\mathbf{c}$  es la capacidad de los enlaces, que depende de los recursos de nivel físico y de la probabilidad de error de decodificación deseada
- $\mathbf{F}$  es la matriz de contienda

Encontrar  
 $\mathbf{x}, \mathbf{w}, \mathbf{p}, \mathbf{R}$  y  $\mathbf{F}$   
tales que

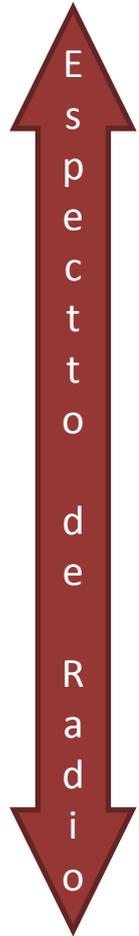
$$\begin{cases} \max \sum_s U_s(x_s, p_s) + \sum_j V_j(w_j) \\ \text{sujeto a} \\ \mathbf{R}\mathbf{x} \leq \mathbf{c}(\mathbf{w}, \mathbf{p}) \\ \mathbf{x} \in C_1(\mathbf{p}) \cap C_2(\mathbf{F}) \\ \mathbf{R} \in \mathcal{R}, \mathbf{w} \in \mathcal{W}, \mathbf{F} \in \mathcal{F} \end{cases}$$

**Solución distribuida  
basada en percepción  
local, mediante  
aprendizaje, evolución,  
adaptación ...  
Optimización Emergente**

# Complejidad en Redes de Comunicaciones

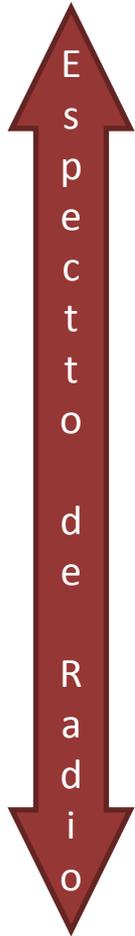


# Redes Cognitivas

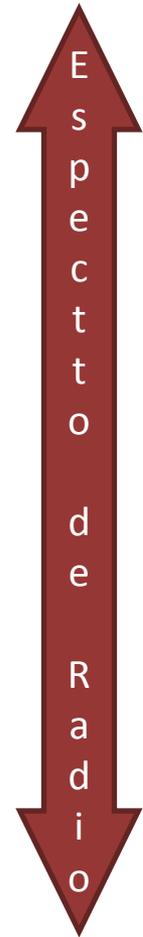


# Redes Cognitivas

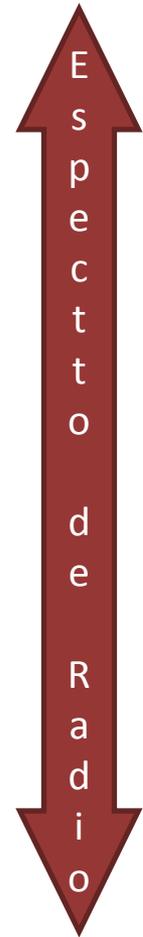
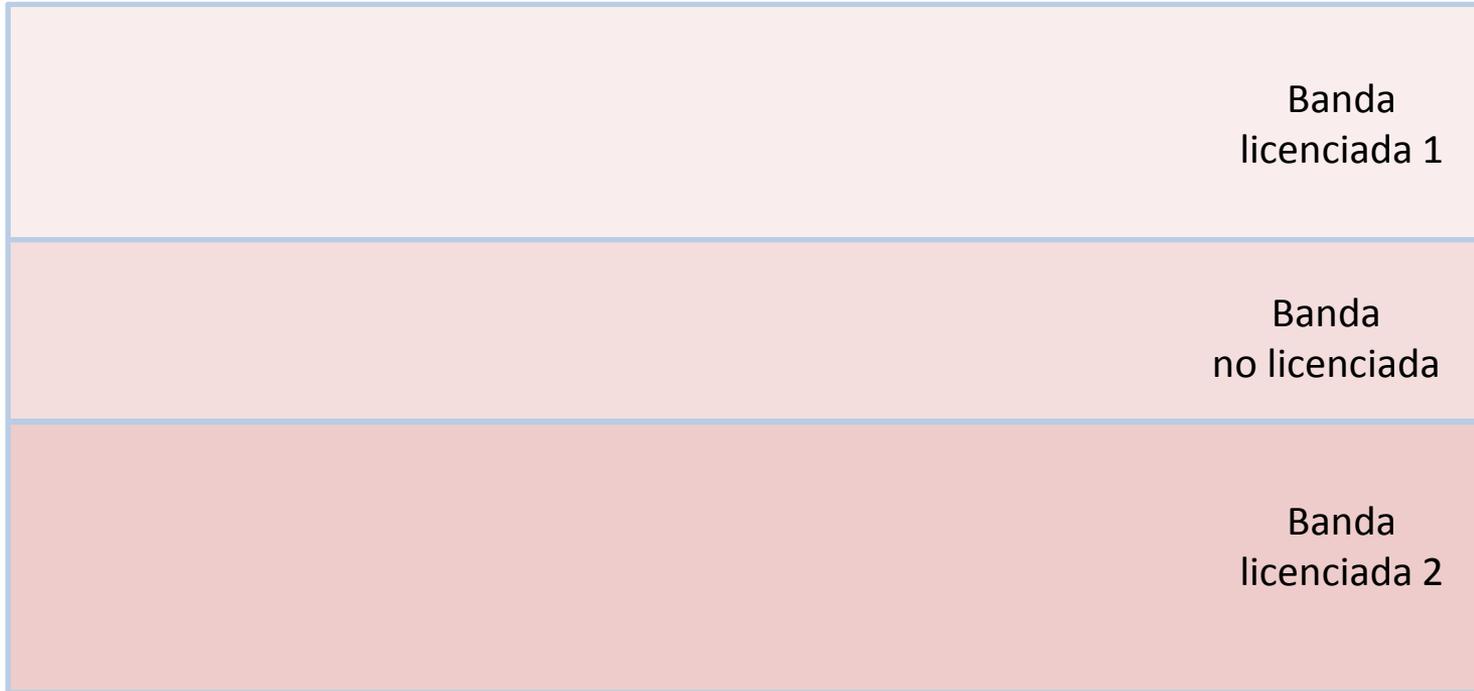
Banda  
licenciada 1



# Redes Cognitivas



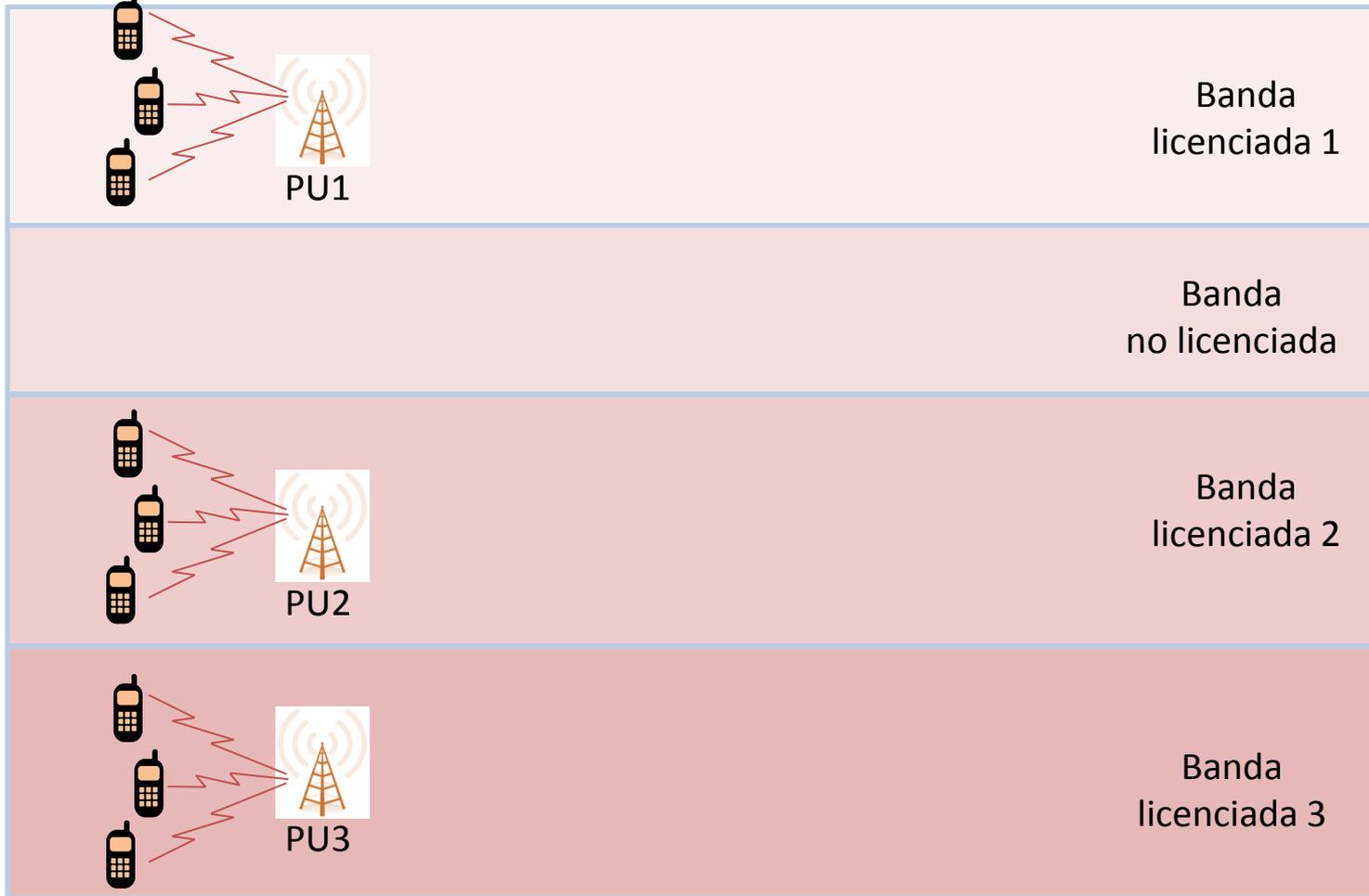
# Redes Cognitivas



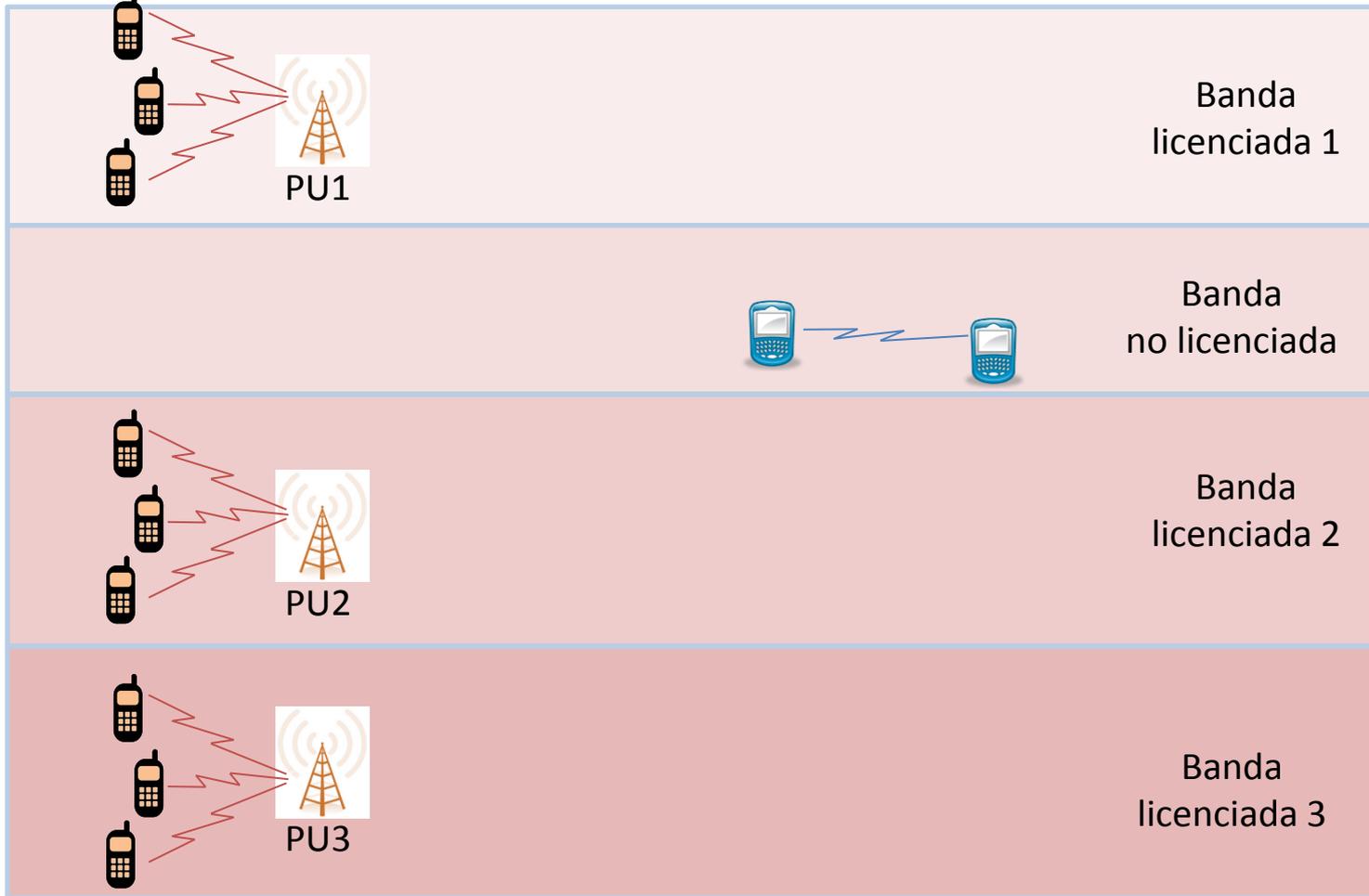
# Redes Cognitivas



# Redes Cognitivas

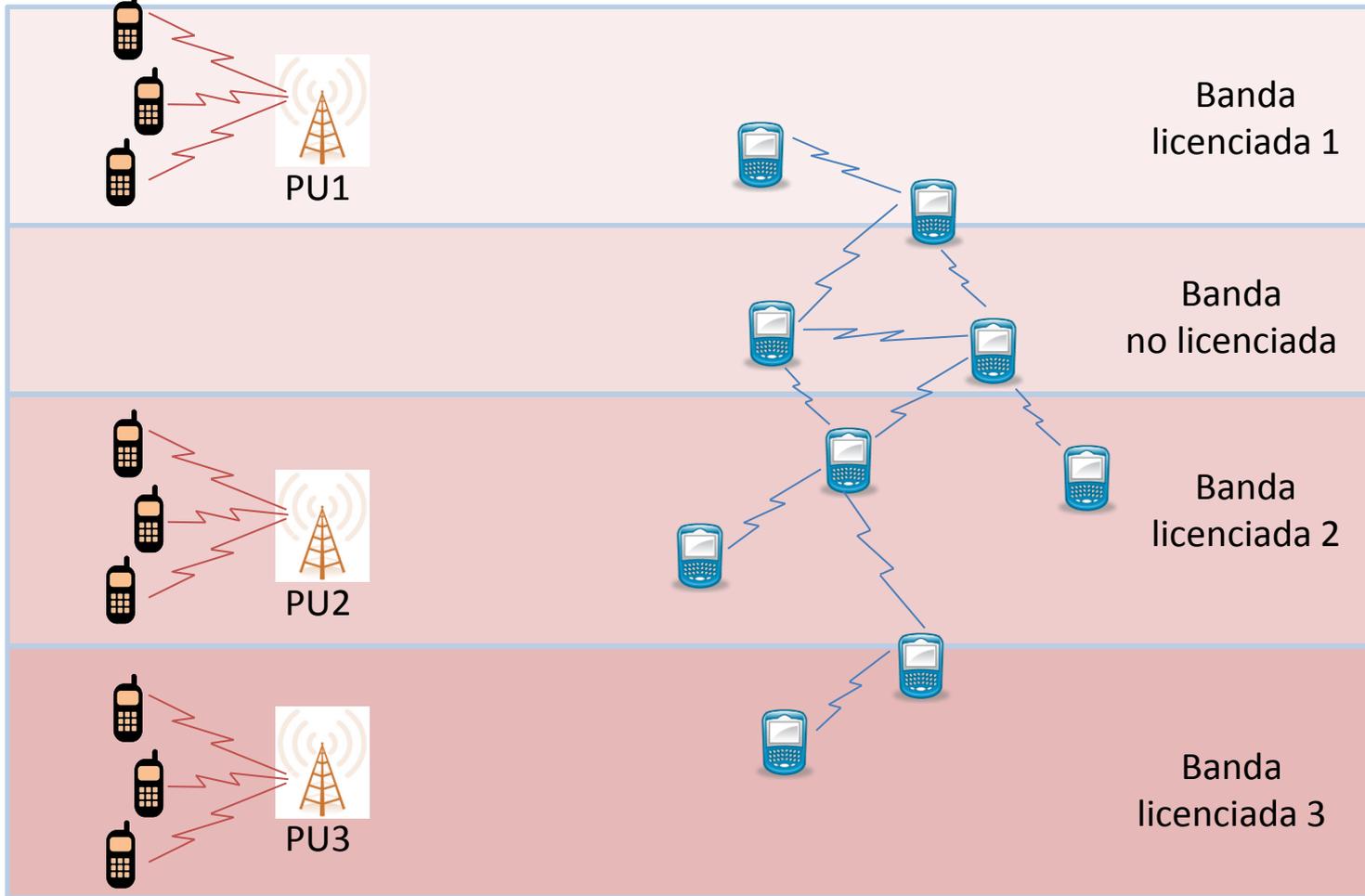


# Redes Cognitivas

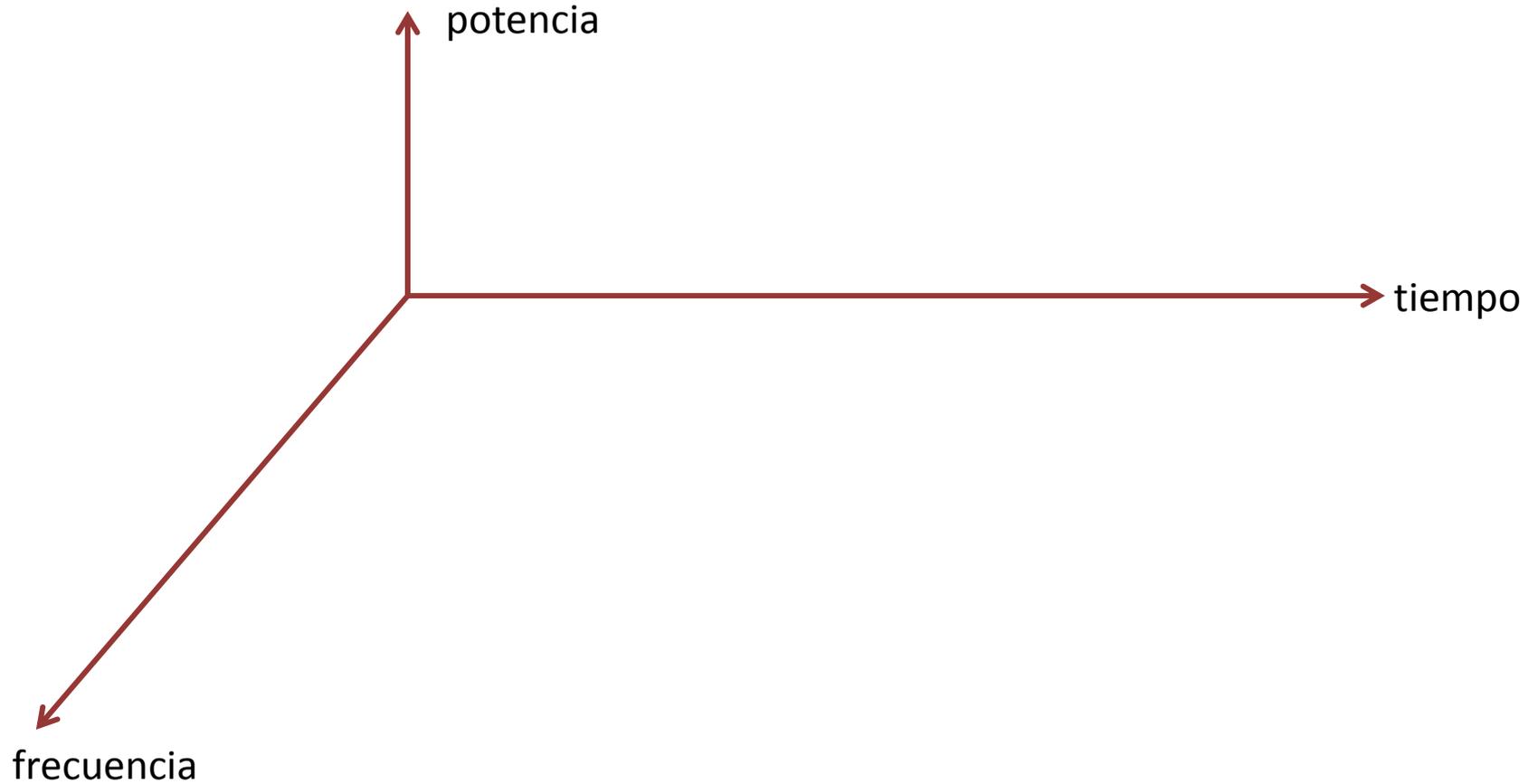


E  
s  
p  
e  
c  
t  
r  
o  
  
d  
e  
  
R  
a  
d  
i  
o

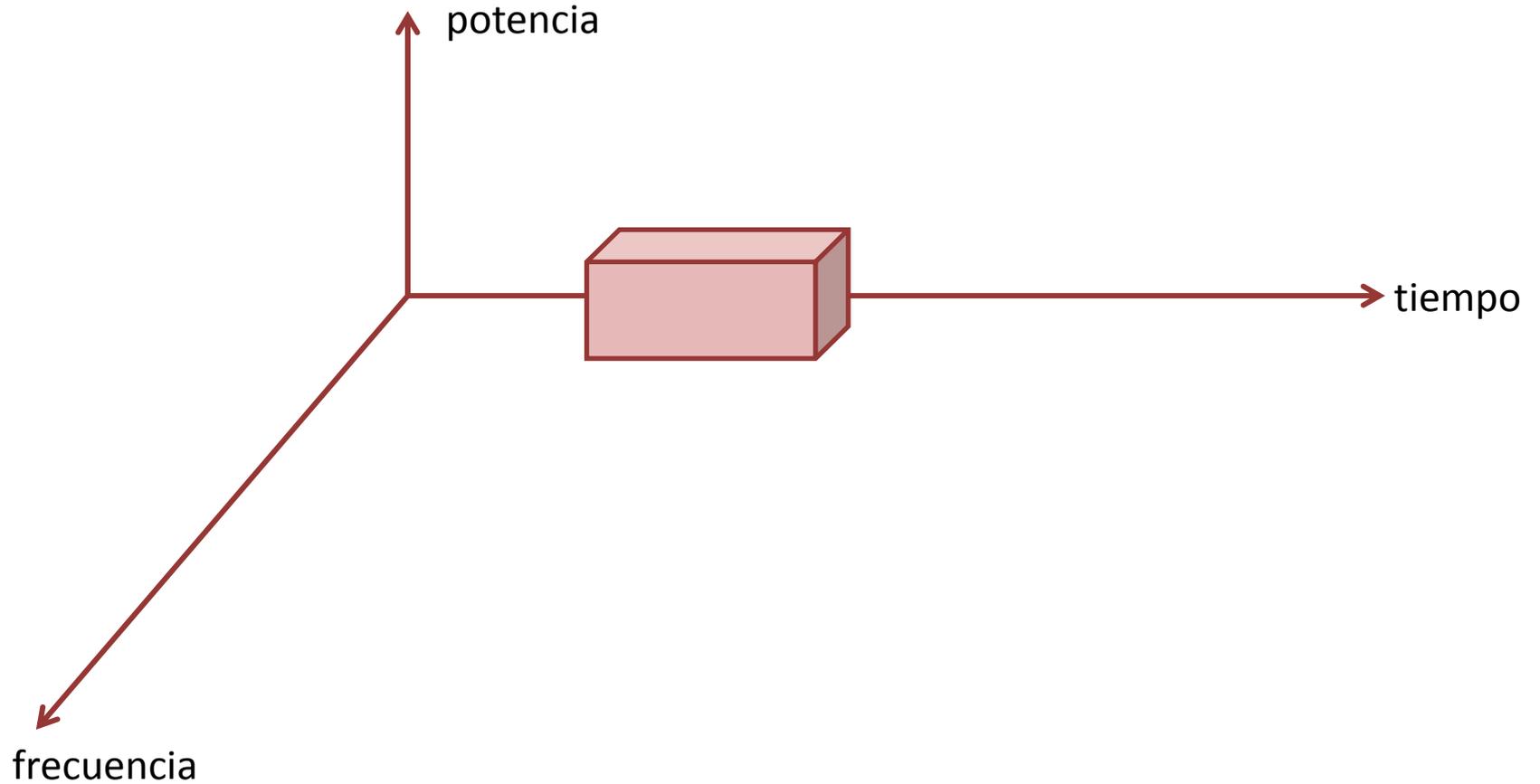
# Redes Cognitivas



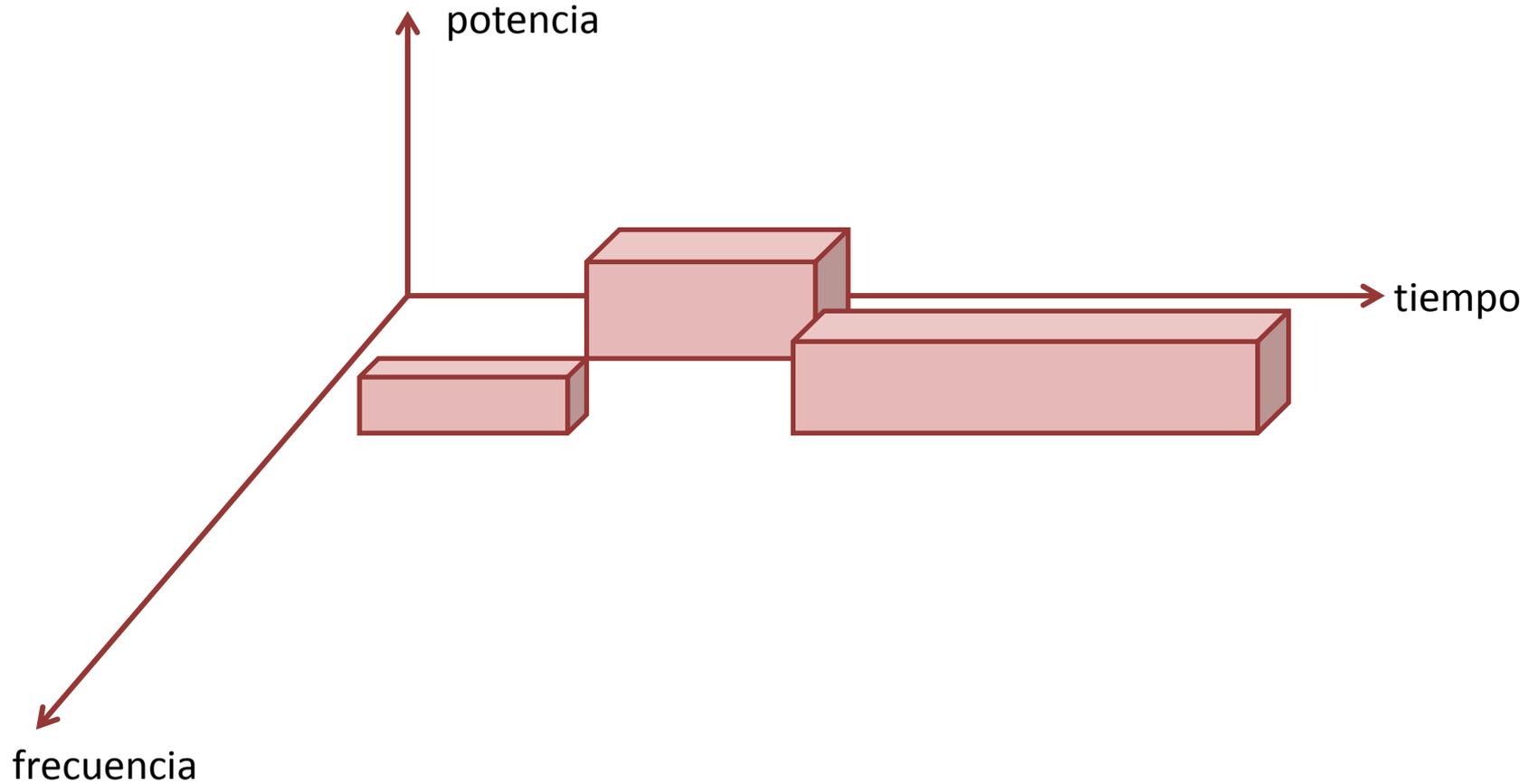
# Redes Cognitivas



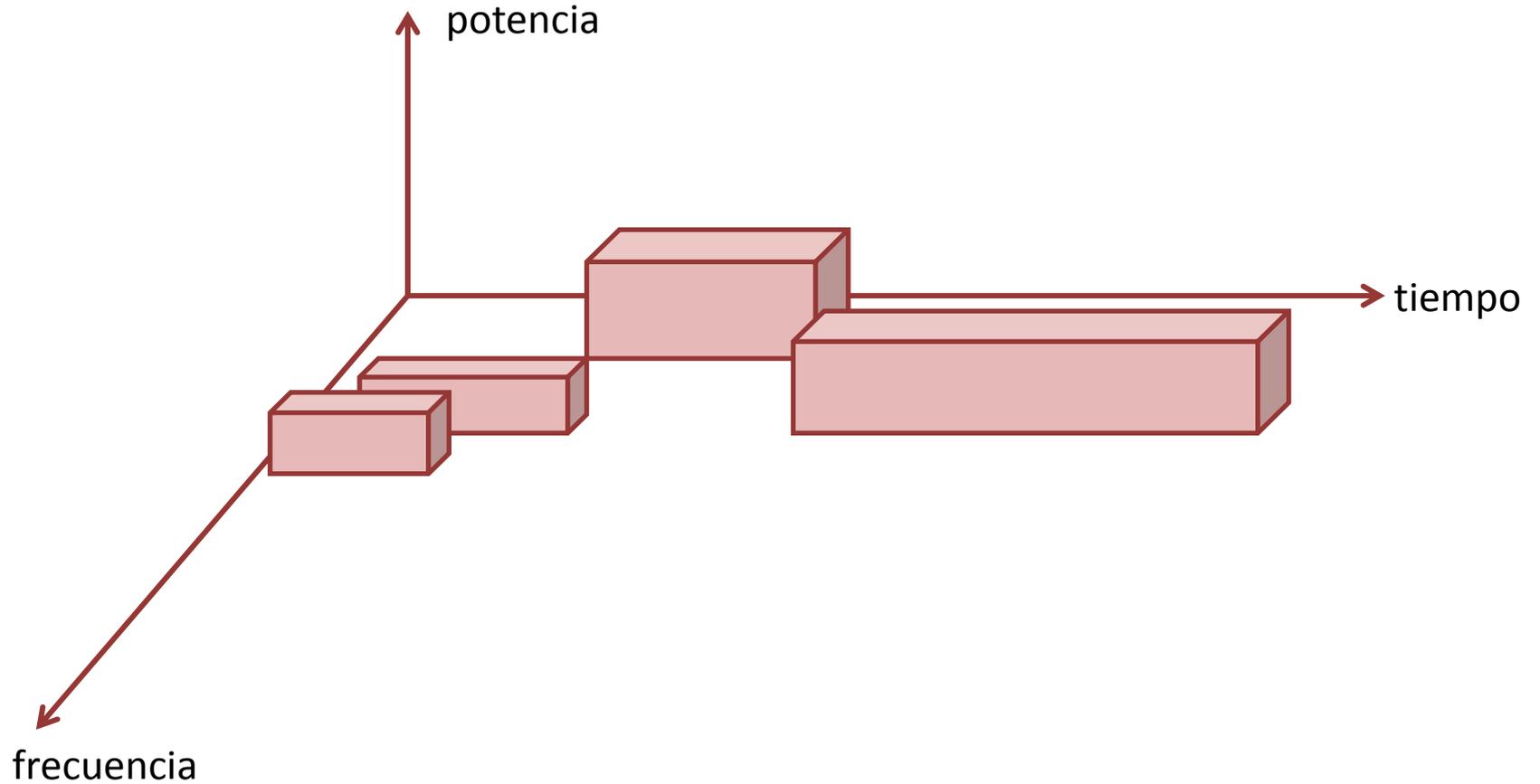
# Redes Cognitivas



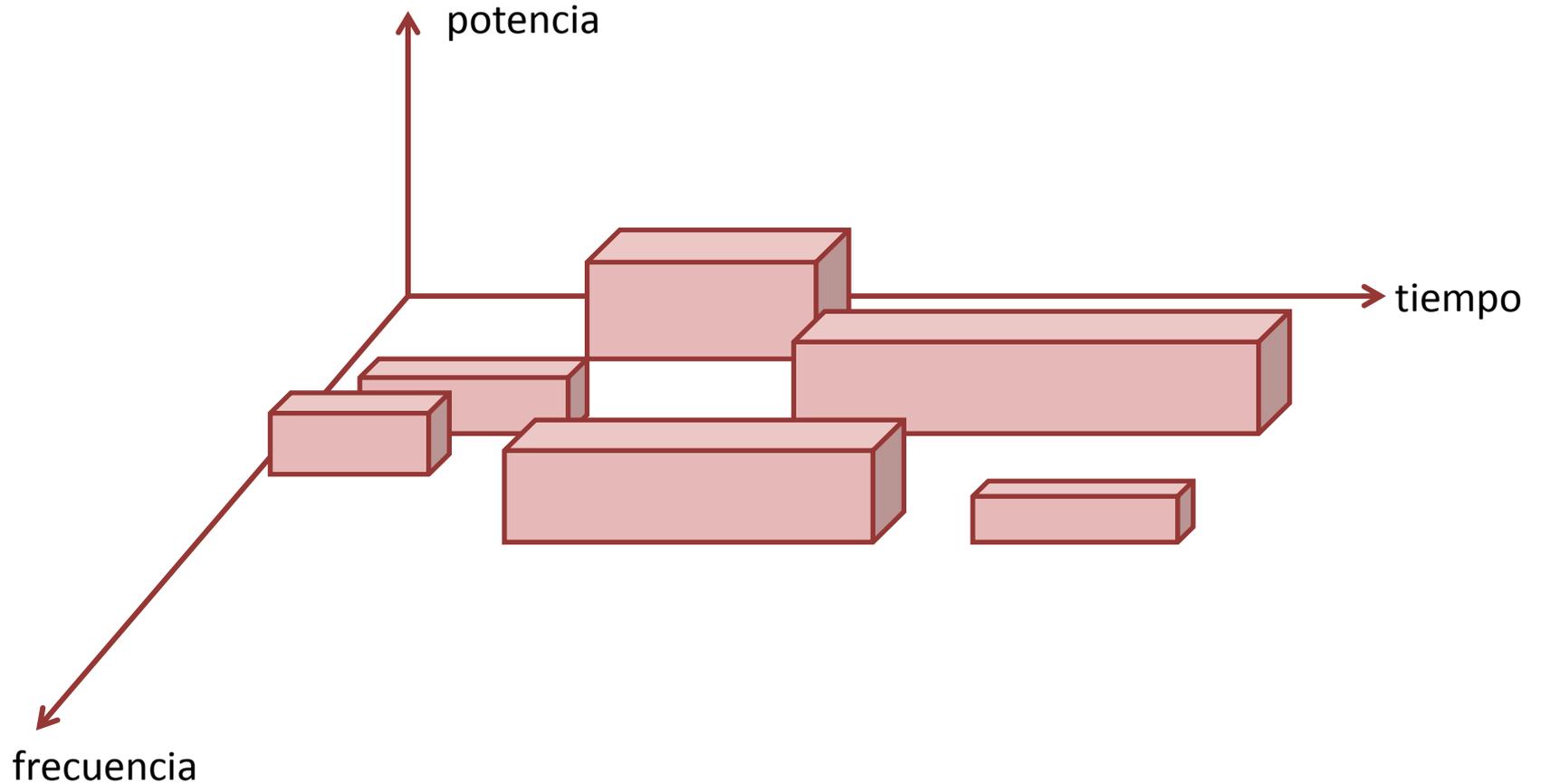
# Redes Cognitivas



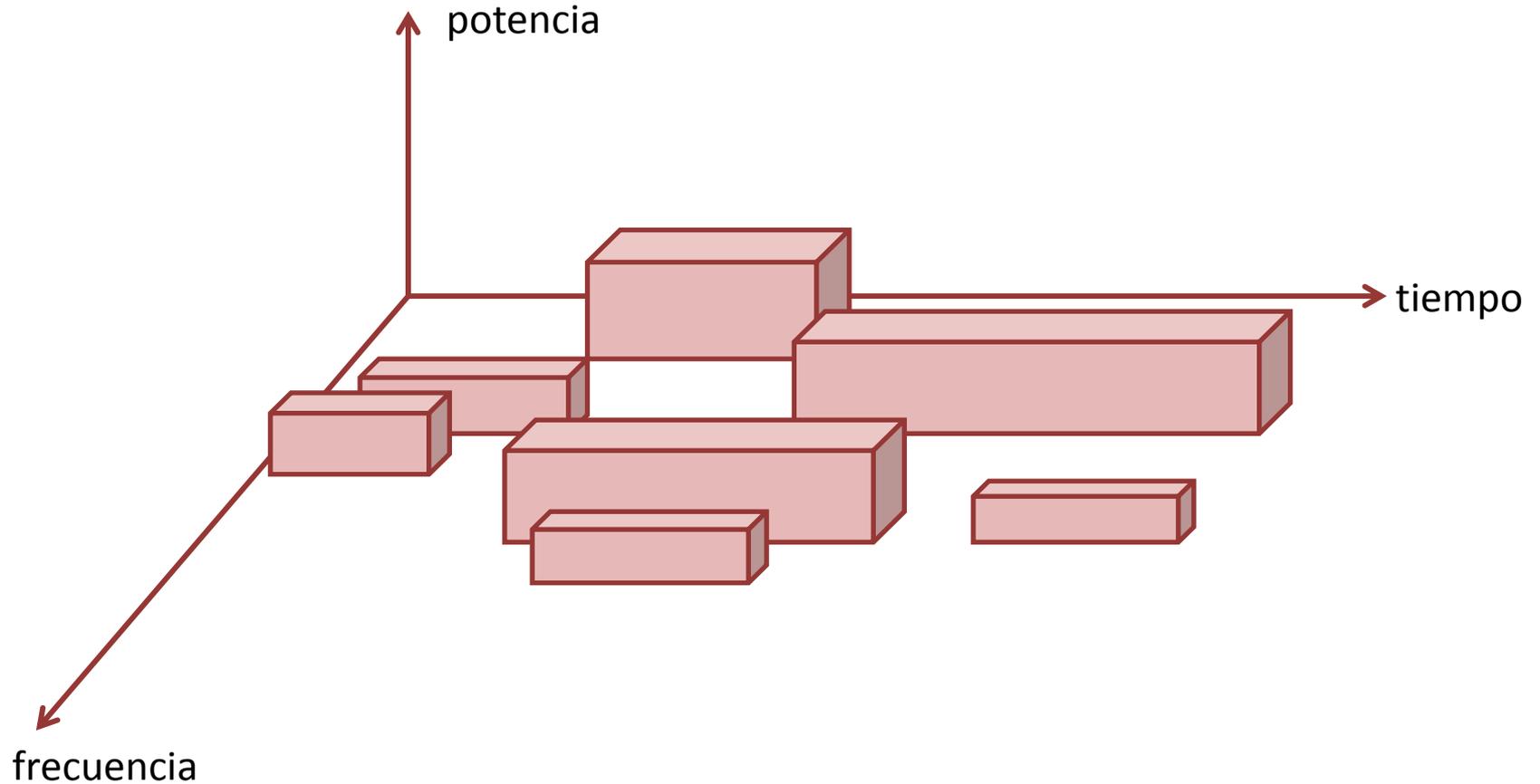
# Redes Cognitivas



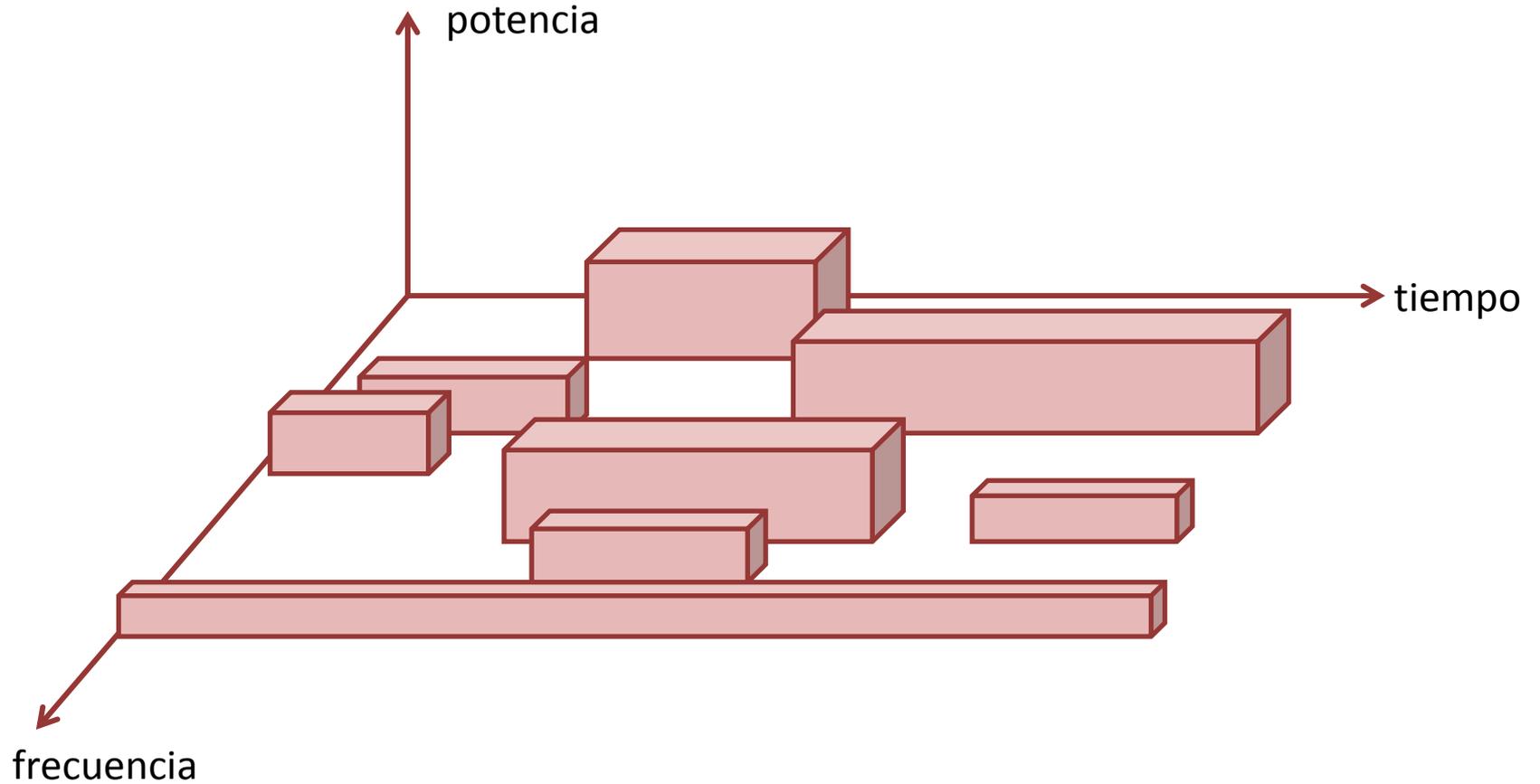
# Redes Cognitivas



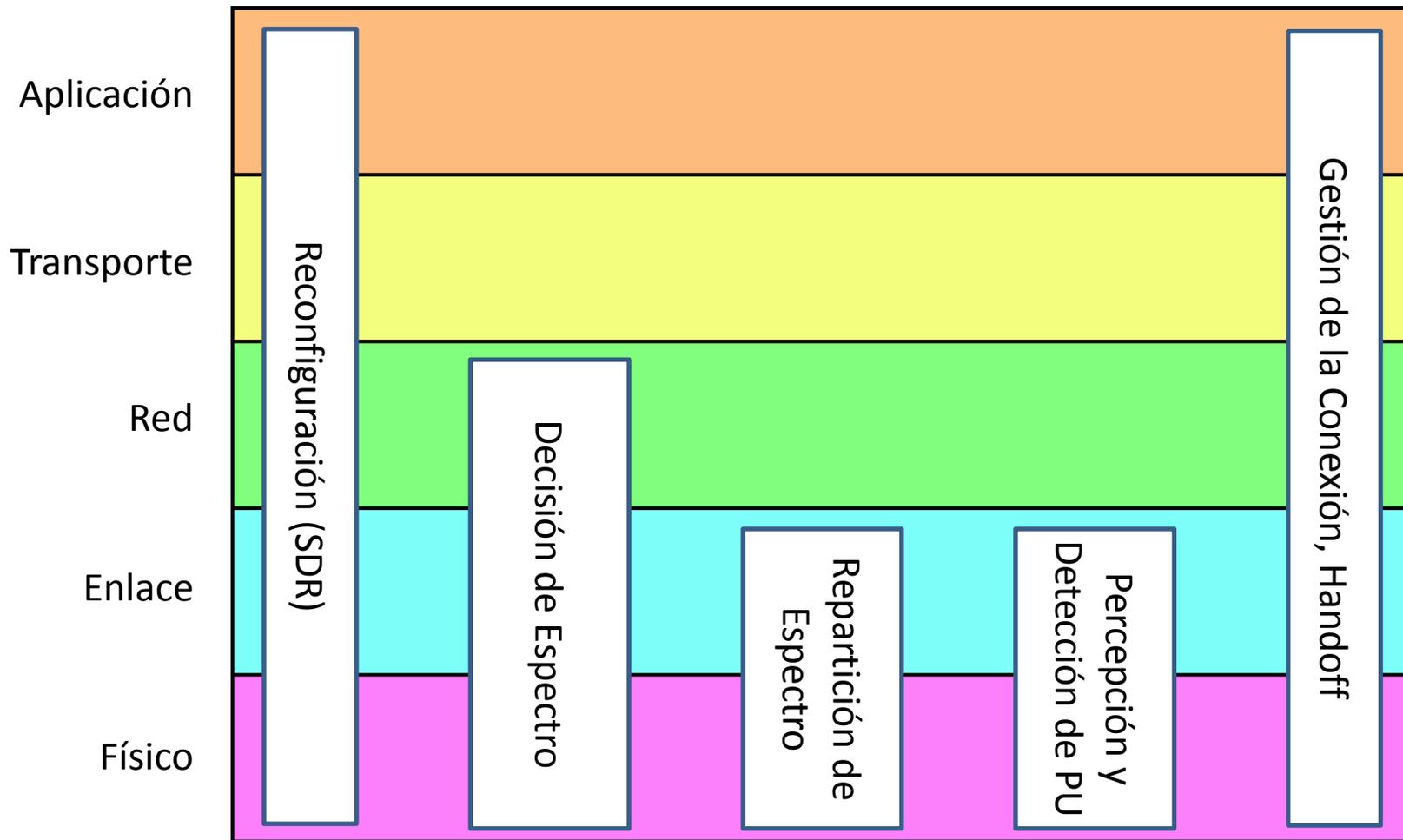
# Redes Cognitivas



# Redes Cognitivas



# Diseño *Cross-Layer* de Redes Cognitivas

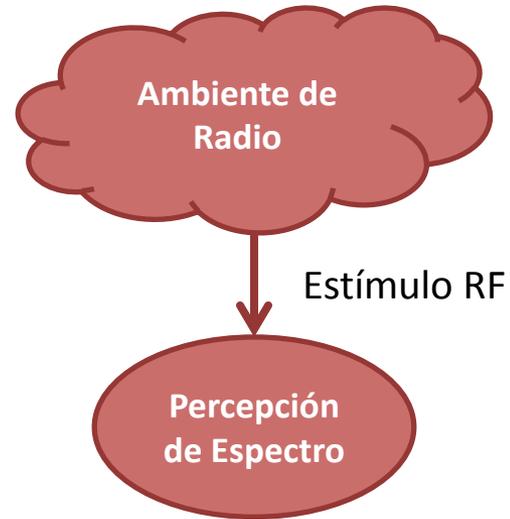


# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?

Ambiente de  
Radio

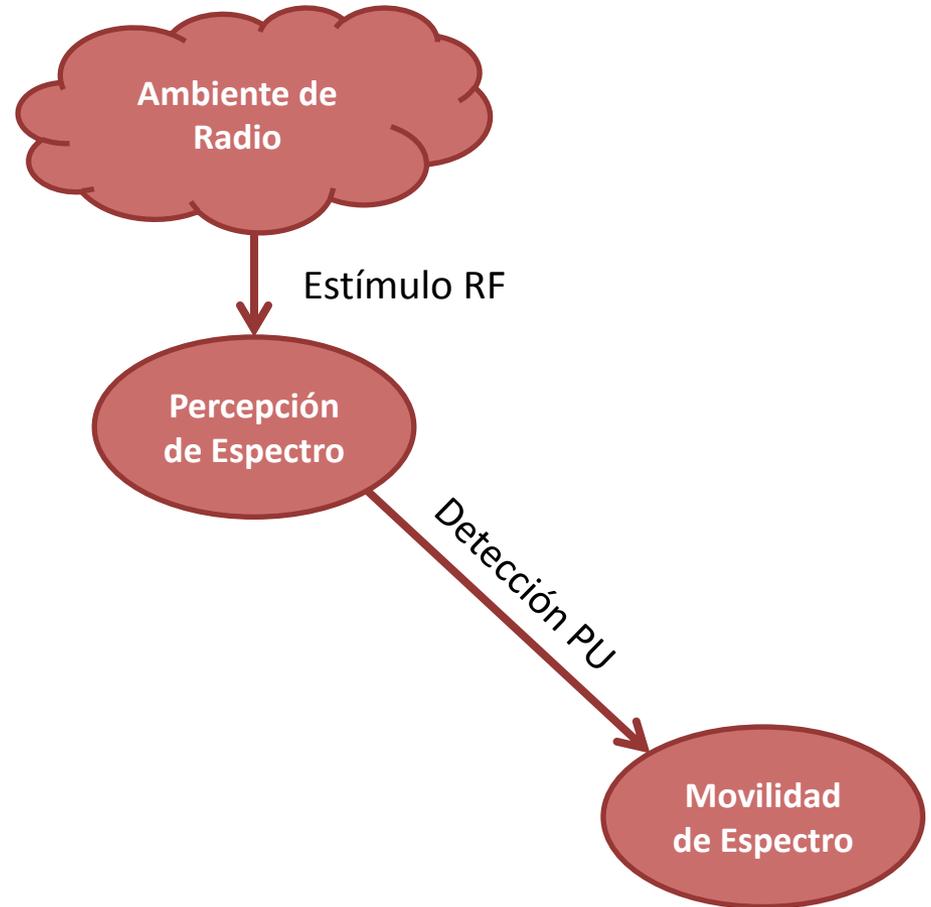
[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?



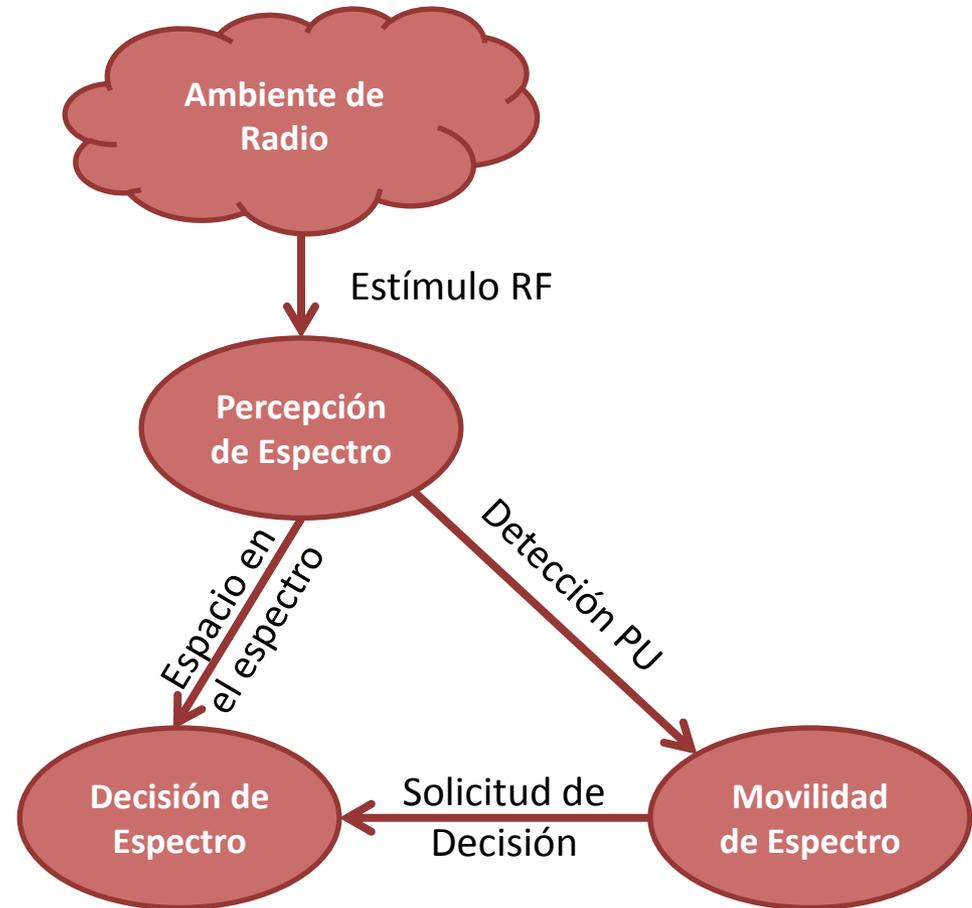
[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?



[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?



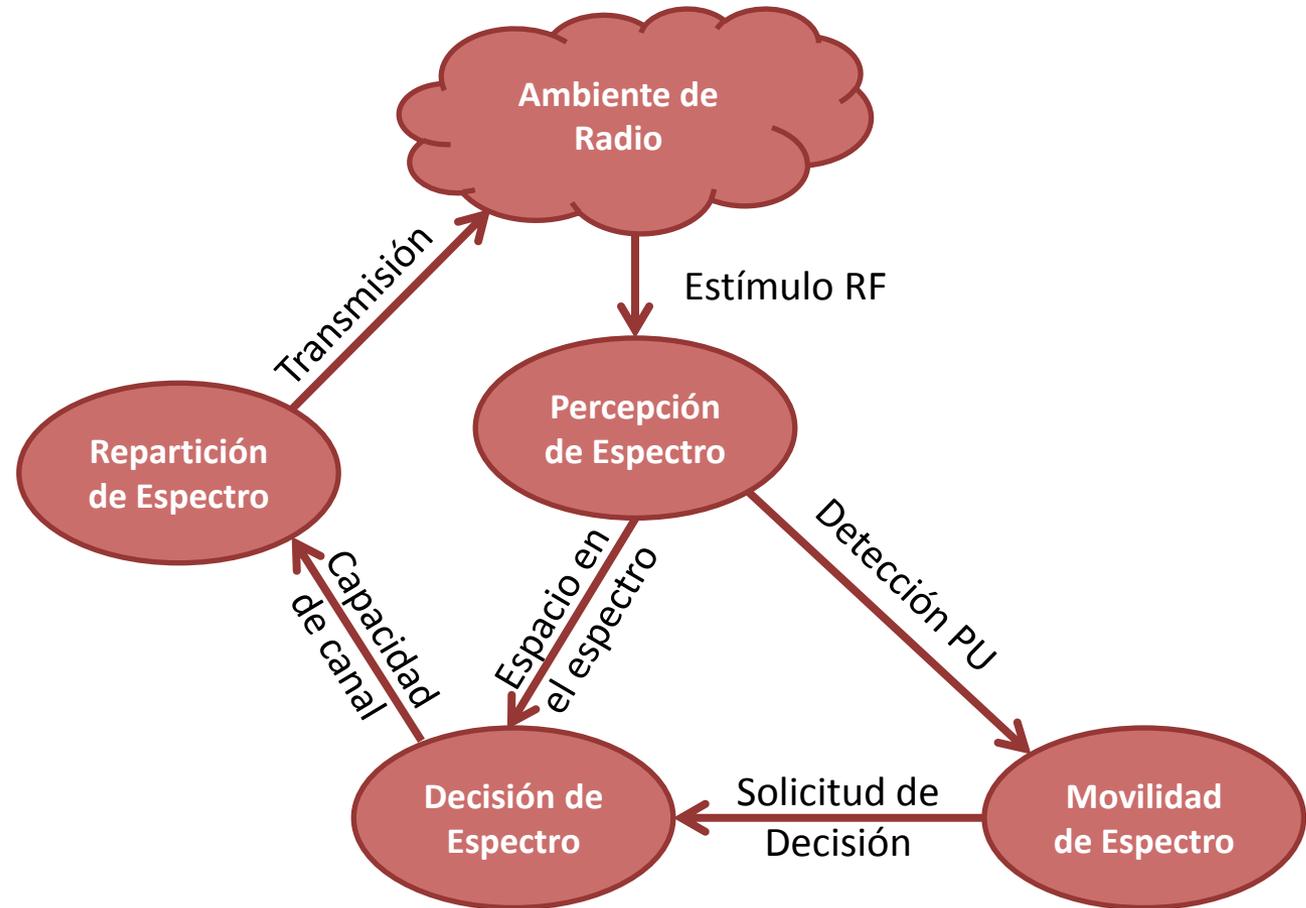
[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?



[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?



[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# ¿Qué hay de Cognitivo en una Red Cognitiva?

- **Percepción**
- **Aprendizaje**
- **Adaptación**



[Akyildiz, Lee, Chowdhury, 2009]

# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

---

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995



VENCUENTRO INTERUNIVERSITARIO SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN  
SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN

**Sistemas Dinámicos Cognitivos**  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
**Marco Aurelio Alzate Monroy**



# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995

# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999

# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995

# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a radio knowledge representation language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio provides an ideal platform for the realization of cognitive radio

# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995

**“Networks of such radios are Complex Adaptive Systems [2], the study of which is an emerging discipline concerned with the nonlinear behavior of large collections of adaptive entities that have complex interactions”.**

# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999

# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995

**“Networks of such radios are Complex Adaptive Systems [2], the study of which is an emerging discipline concerned with the nonlinear behavior of large collections of adaptive entities that have complex interactions”.**

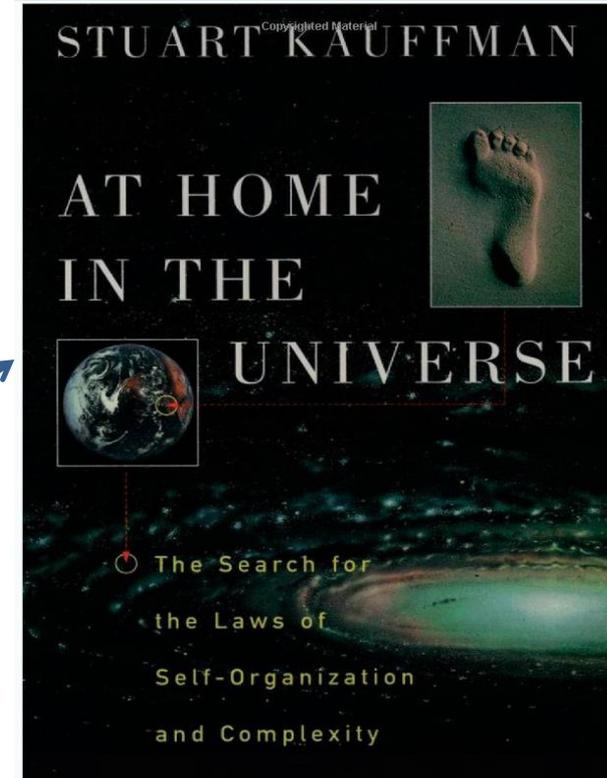
# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999



# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995



# Cognitive Dynamic Systems

BY SIMON HAYKIN

McMaster University, Hamilton, ON, Canada

Vol. 94, No. 11, November 2006 | PROCEEDINGS OF THE IEEE



VENCUENTRO INTERUNIVERSITARIO SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN  
SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN

# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999

Sistemas Dinámicos Cognitivos  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
Marco Aurelio Alzate Monroy



# The Software Radio Architecture

As communications technology continues its rapid transition from analog to digital, more functions of contemporary radio systems are implemented in software, leading toward the software radio. What distinguishes software radio architectures? What new capabilities are more economically accessible in software radios than digital radios? What are the pitfalls? And the prognosis?

Joe Mitola

IEEE Communications Magazine • May 1995



# Cognitive Dynamic Systems

BY SIMON HAYKIN

McMaster University, Hamilton, ON, Canada

Vol. 94, No. 11, November 2006 | PROCEEDINGS OF THE IEEE

Veo la emergencia de una nueva disciplina, llamada “Sistemas Dinámicos Cognitivos”, que se construirá sobre ideas del procesamiento estadístico de señales, el control estocástico y la teoría de la información, y que tejera estas ideas ya bien desarrolladas con nuevas ideas tomadas de la neurociencia, la teoría del aprendizaje estadístico y la teoría de juegos. La nueva disciplina proporcionará herramientas formales de diseño para una nueva generación de sistemas dinámicos inalámbricos como la radio cognitiva y el radar cognitivo, en los que la eficiencia, la efectividad y la robustez serán las principales características de desempeño.

(...)

Como definición operativa, digo que los sistemas dinámicos cognitivos construyen reglas de comportamiento temporal, mediante el aprendizaje continuo a partir de las interacciones experimentales con el ambiente, por lo que podrán enfrentar las incertidumbres propias de dicho ambiente.



# Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal

JOSEPH MITOLA III AND GERALD Q. MAGUIRE, JR.  
ROYAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY

## Abstract

Software radios are emerging as platforms for multiband multimode personal communications systems. Radio etiquette is the set of RF bands, air interfaces, protocols, and spatial and temporal patterns that moderate the use of the radio spectrum. Cognitive radio extends the software radio with radio-domain model-based reasoning about such etiquettes. Cognitive radio enhances the flexibility of personal services through a Radio Knowledge Representation Language. This language represents knowledge of radio etiquette, devices, software modules, propagation, networks, user needs, and application scenarios in a way that supports automated reasoning about the needs of the user. This empowers software radios to conduct expressive negotiations among peers about the use of radio spectrum across fluents of space, time, and user context. With RKRL, cognitive radio agents may actively manipulate the protocol stack to adapt known etiquettes to better satisfy the user's needs. This transforms radio nodes from blind executors of predefined protocols to radio-domain-aware intelligent agents that search out ways to deliver the services the user wants even if that user does not know how to obtain them. Software radio [1] provides an ideal platform for the realization of cognitive radio.

IEEE Personal Communications • August 1999



Sistemas Dinámicos Cognitivos  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
Marco Aurelio Alzate Monroy

Copyrighted Material

# Cognitive Dynamic Systems

Perception–Action Cycle,  
Radar, and Radio

*Simon Haykin*

CAMBRIDGE

© Cambridge  
University  
Press  
2012



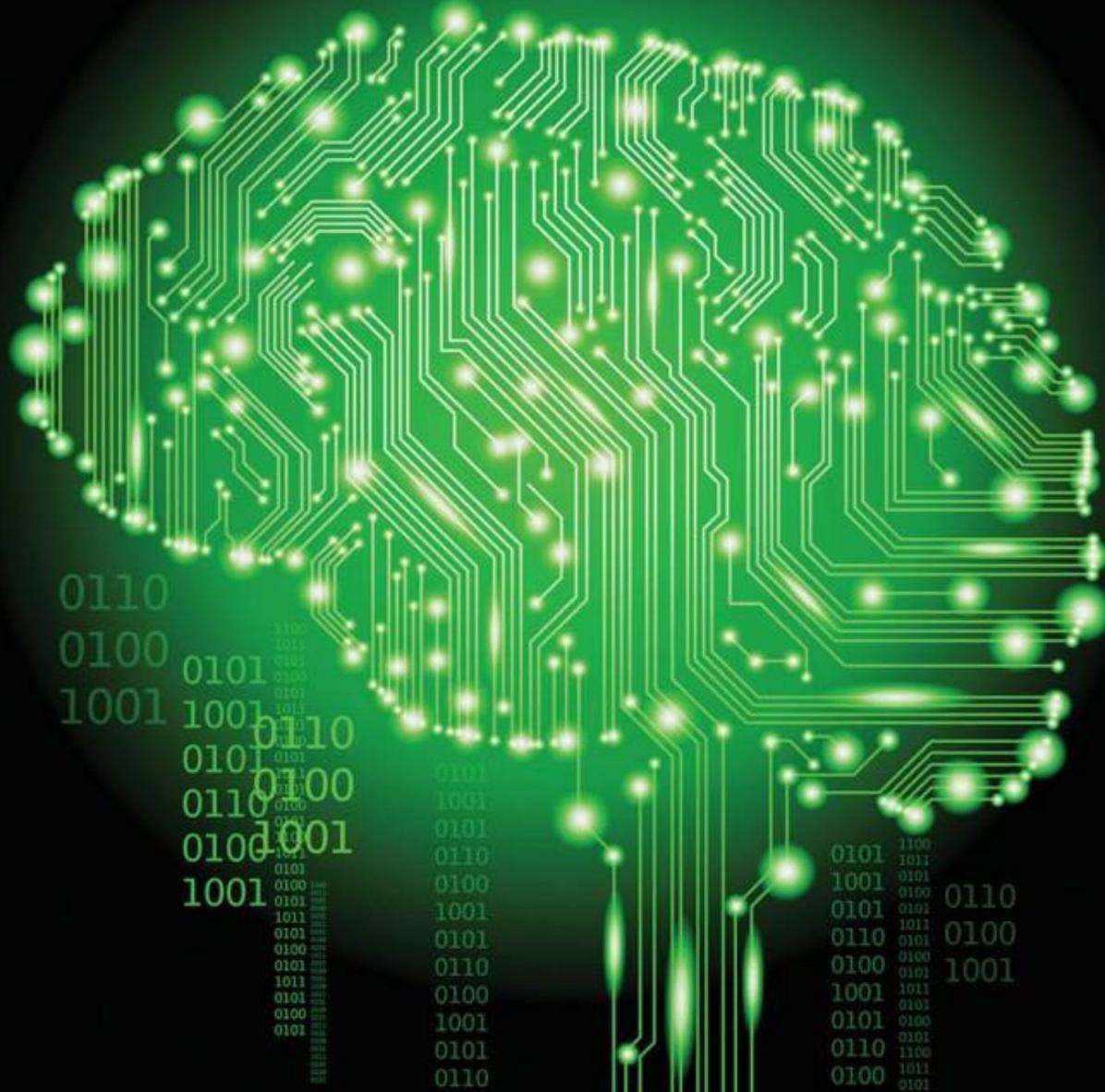
VENCUENTRO  
INTERUNIVERSITARIO SOBRE Y  
COMPLEJIDAD Y EDUCACIÓN

SIMPOSIO INTERNACIONAL SOBRE  
COMPLEJIDAD  
Y EDUCACIÓN

**Sistemas Dinámicos Cognitivos**  
Ingeniería de Sistemas Complejos HOY  
Marco Aurelio Alzate Monroy

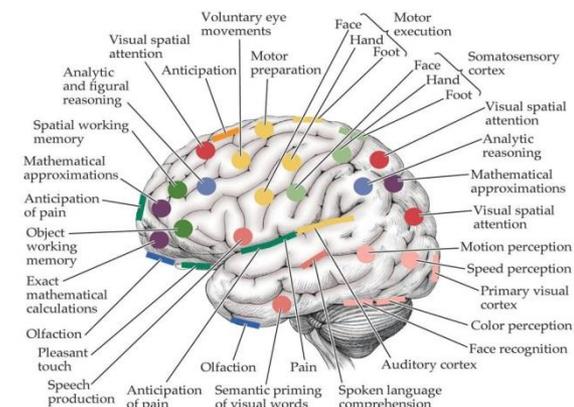
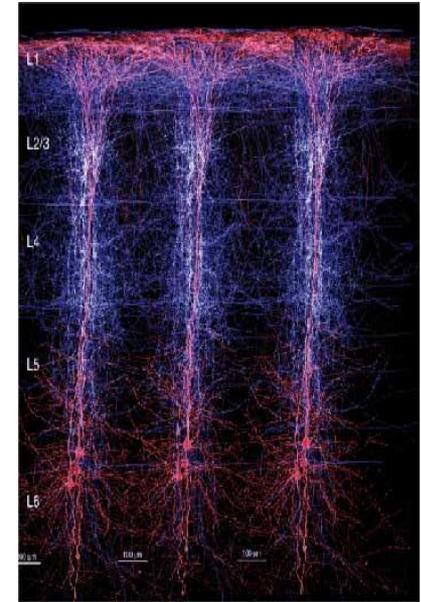


# El cerebro humano como paradigma de sistema cognitivo

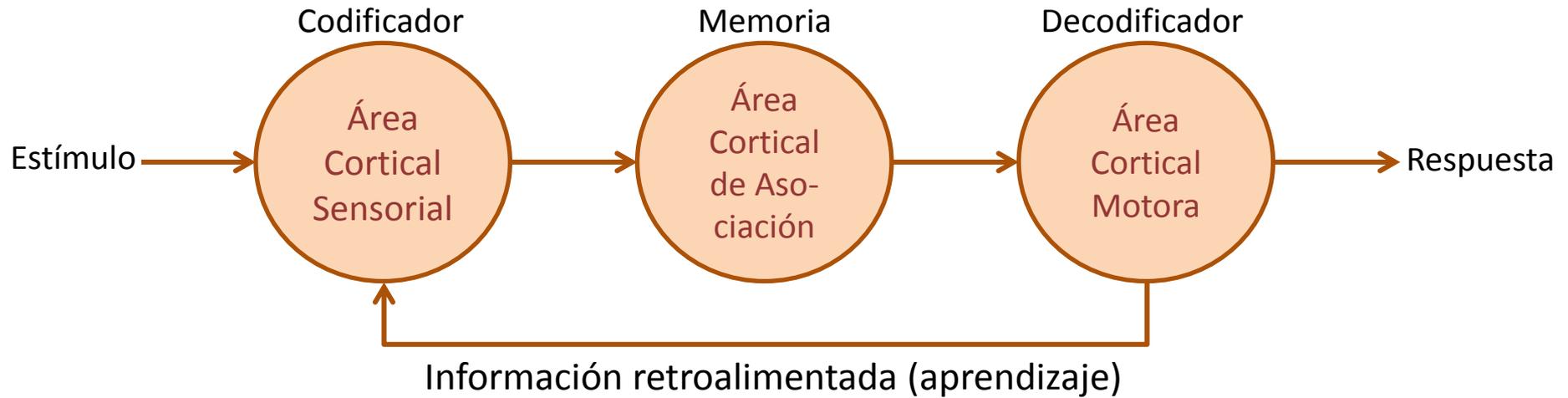


# El cerebro humano como paradigma de sistema cognitivo

- Joaquín Fuster
- Un altísimo porcentaje del procesamiento de información en el cerebro se realiza en la corteza cerebral
- La corteza cerebral está organizada en minicolumnas (ordenamientos verticales de entre 80 y 240 neuronas). Existen cerca de 200 millones de minicolumnas.
- Las columnas corticales parecen ser unidades jerárquicas de reconocimiento de patrones. La memoria y el conocimiento se representan en la interacción distribuida, y altamente superpuesta, de estas minicolumnas corticales.
- Aunque no tienen una estructura uniforme, todas parecen usar un algoritmo básico de procesamiento de información: Diferentes tipos de entradas sensoriales (visual, auditiva, etc.) se codifican de una manera estándar antes de alimentar este algoritmo básico de procesamiento.
- Las cinco funciones cognitivas (atención, percepción, memoria, lenguaje e inteligencia) se basarían en transacciones neuronales al interior de las minicolumnas y entre ellas.
- El paradigma de Fuster se convierte en un marco de referencia para los sistemas dinámicos cognitivos.

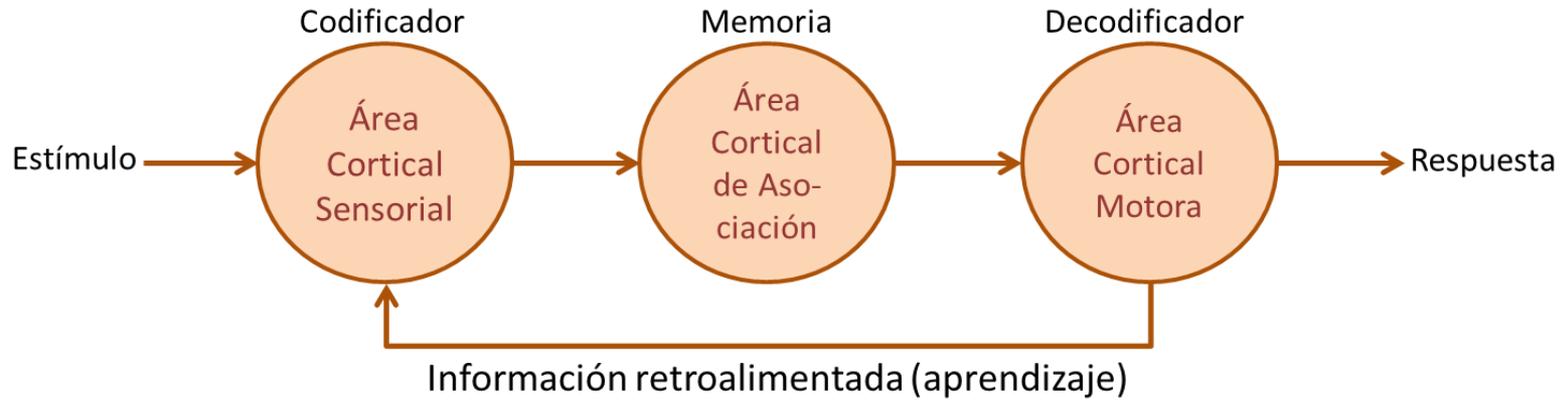


# El cerebro humano como paradigma de sistema cognitivo

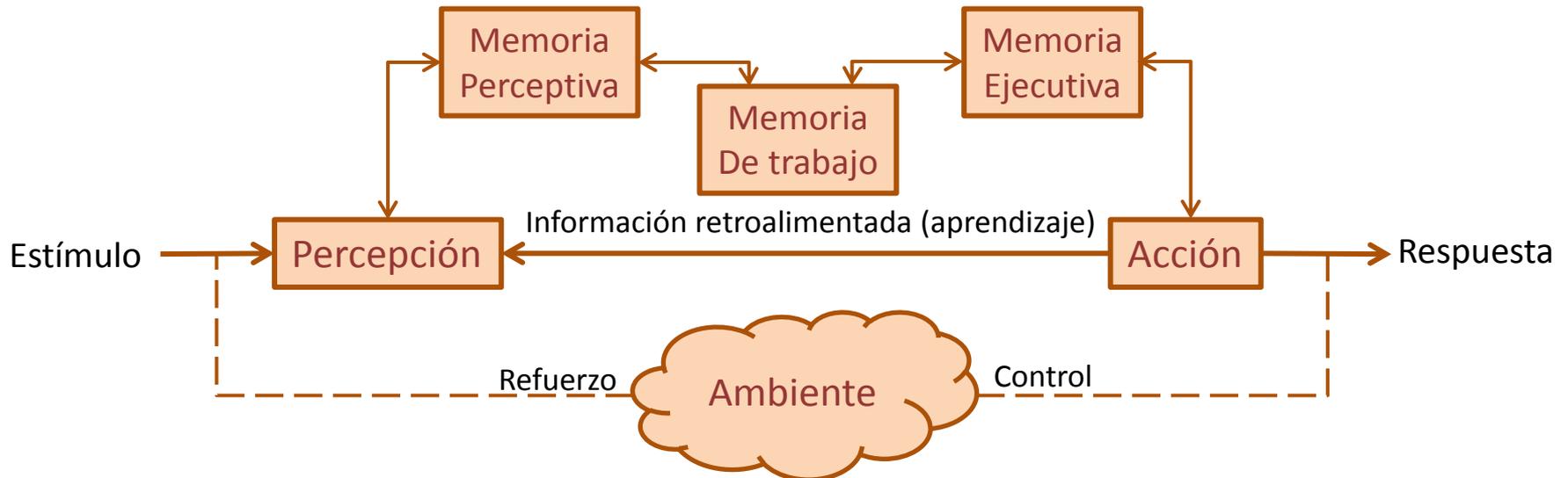


M.S. Gazzaniga (ed.), "The Cognitive Neurosciences", 4th Edition, MIT Press, 2009

# El cerebro humano como paradigma de sistema cognitivo



M.S. Gazzaniga (ed.), "The Cognitive Neurosciences", 4th Edition, MIT Press, 2009



S. Haykin, "Cognitive Dynamic Systems", Cambridge University Press, 2012

# Sistema Dinámico Cognitivo

Un Sistema Dinámico Cognitivo es

# Sistema Dinámico Cognitivo

**Un Sistema Dinámico Cognitivo es**

- **Un Sistema Complejo**

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
- Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
  - Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente
  - Desarrollo de **reglas de comportamiento** que le permitan actuar sobre el ambiente

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
  - Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente
  - Desarrollo de **reglas de comportamiento** que le permitan actuar sobre el ambiente
- Realizadas en **tiempo real**

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
  - Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente
  - Desarrollo de **reglas de comportamiento** que le permitan actuar sobre el ambiente
- Realizadas en **tiempo real**
- Con el propósito de llevar a cabo algunas **tareas prescritas**

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
  - Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente
  - Desarrollo de **reglas de comportamiento** que le permitan actuar sobre el ambiente
- Realizadas en **tiempo real**
- Con el propósito de llevar a cabo algunas **tareas prescritas**
- De manera **efectiva, eficiente y confiable**

# Sistema Dinámico Cognitivo

## Un Sistema Dinámico Cognitivo es

- Un **Sistema Complejo**
- Capaz de desarrollar un **comportamiento emergente**
- Al **procesar información** en el transcurso del tiempo
- Mediante las siguientes funciones
  - **Percepción** del ambiente
  - **Aprendizaje** del ambiente
  - **Adaptación** a sus variaciones estadísticas
  - Construcción de un **modelo predictivo** sobre un conjunto prescrito de aspectos de interés del ambiente
  - Desarrollo de **reglas de comportamiento** que le permitan actuar sobre el ambiente
- Realizadas en **tiempo real**
- Con el propósito de llevar a cabo algunas **tareas prescritas**
- De manera **efectiva, eficiente y confiable**
- A pesar de las **incertidumbres en el ambiente**.

# Disciplinas fundamentales para el diseño de Sistemas Dinámicos Cognitivos

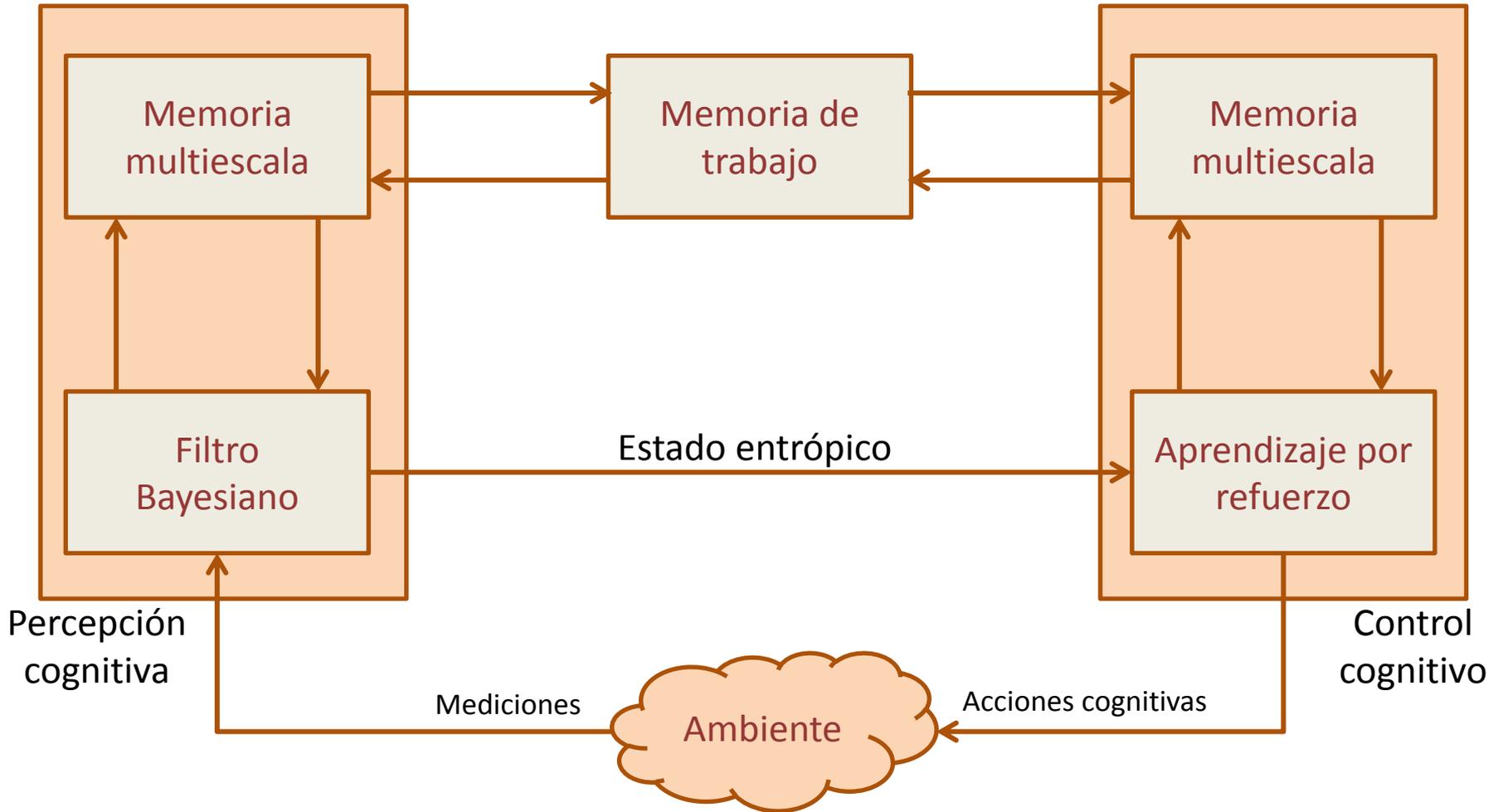
- Procesamiento estadístico de señales
- Teoría Bayesiana de detección y estimación
- Teoría de la Información
- Teoría de Control
  - Control no-lineal
  - Control óptimo
  - Control estocástico
  - Control robusto
- Programación dinámica
- Teoría del aprendizaje mecánico (*machine learning*) y la inteligencia computacional
- Teoría de autómatas celulares y vida artificial
- Teoría de la computación
  - Computación bio-inspirada
  - Computación biológica
- ...

# Disciplinas fundamentales para el diseño de Sistemas Dinámicos Cognitivos

- Procesamiento estadístico de señales
- Teoría Bayesiana de detección y estimación
- Teoría de la Información
- Teoría de Control
  - Control no-lineal
  - Control óptimo
  - Control estocástico
  - Control robusto
- Programación dinámica
- Teoría del aprendizaje mecánico (*machine learning*) y la inteligencia computacional
- Teoría de autómatas celulares y vida artificial
- Teoría de la computación
  - Computación bio-inspirada
  - Computación biológica
- ...

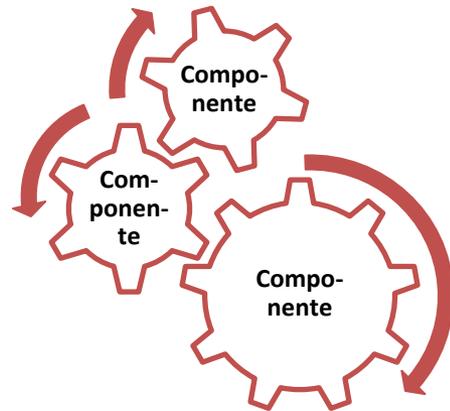
**¡Teoría de  
Sistemas  
Complejos!**

# Estructura de un sistemas dinámico cognitivo



# Ingeniería Clásica

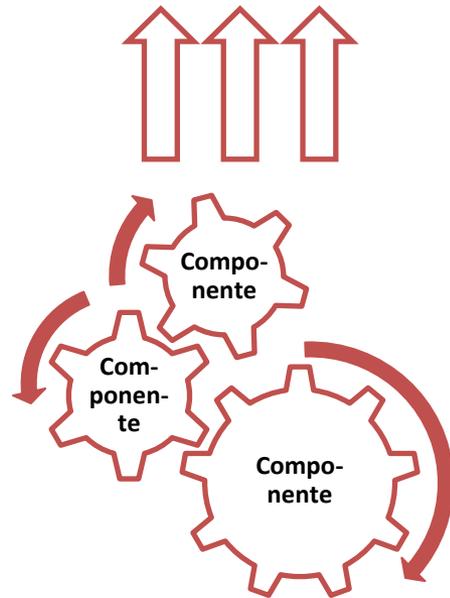
La estructura de sistema refleja su funcionalidad



# Ingeniería Clásica

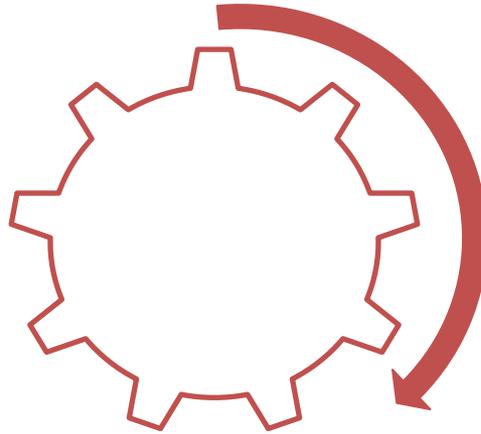
La funcionalidad completa surge de las funciones llevadas a cabo por cada componente

La estructura de sistema refleja su funcionalidad

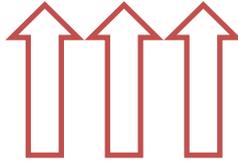


# Ingeniería Clásica

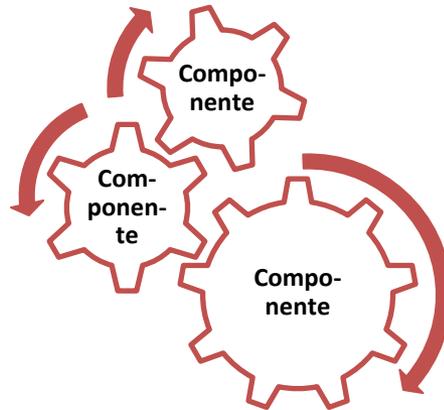
Comportamiento global deseado



La funcionalidad completa surge de las funciones llevadas a cabo por cada componente

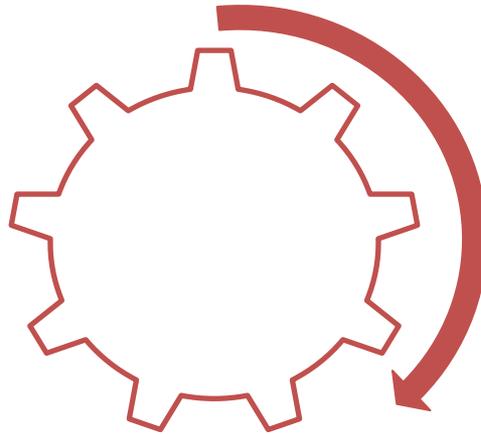


La estructura de sistema refleja su funcionalidad

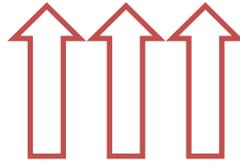


# Ingeniería Clásica

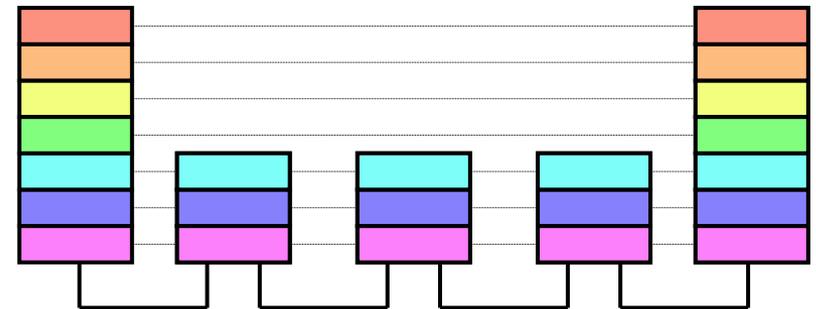
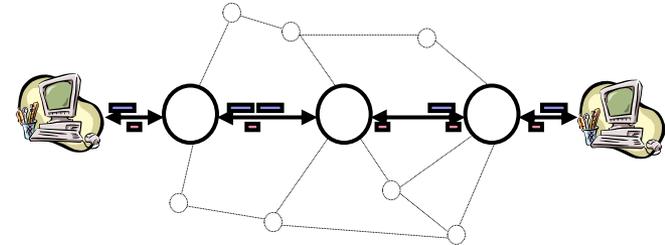
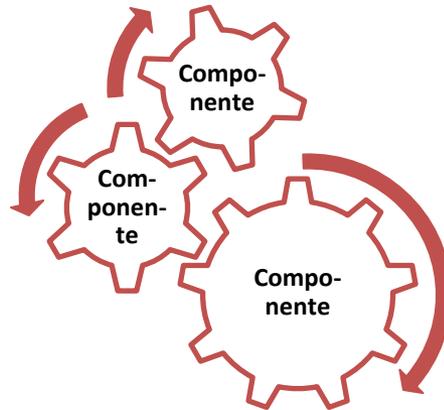
Comportamiento global deseado



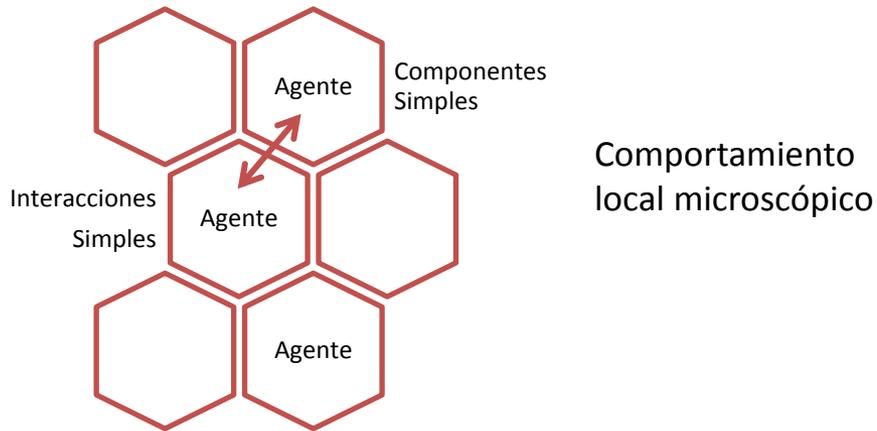
La funcionalidad completa surge de las funciones llevadas a cabo por cada componente



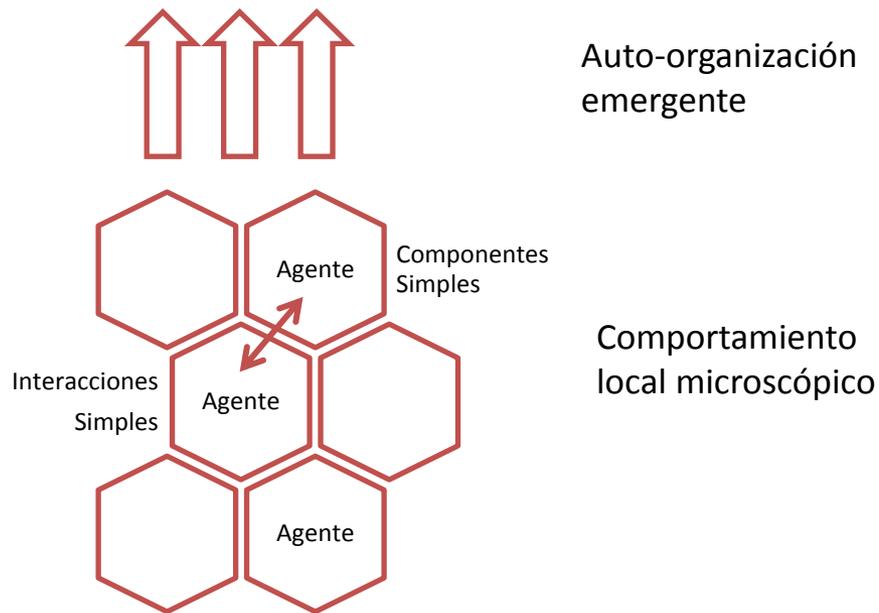
La estructura de sistema refleja su funcionalidad



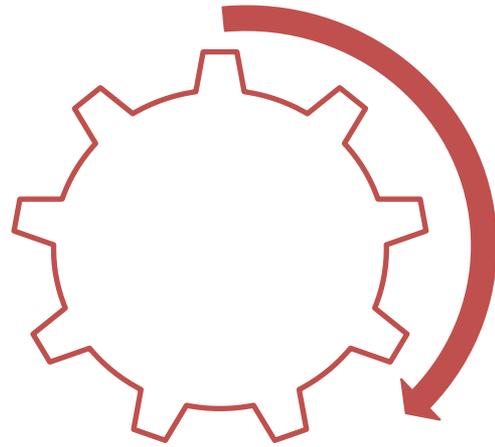
# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



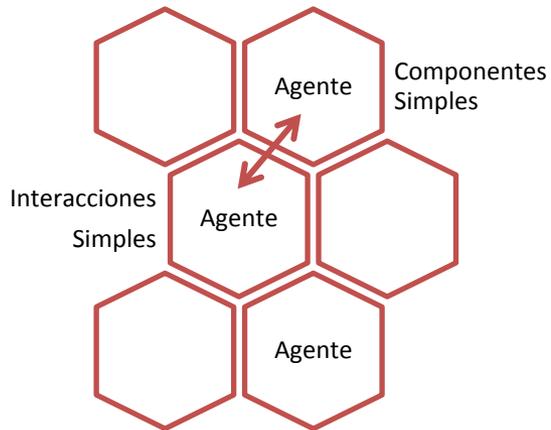
# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



Comportamiento  
global macroscópico

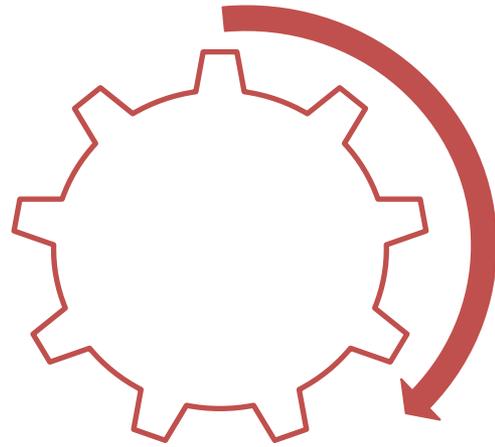


Auto-organización  
emergente

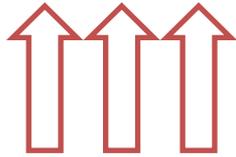


Comportamiento  
local microscópico

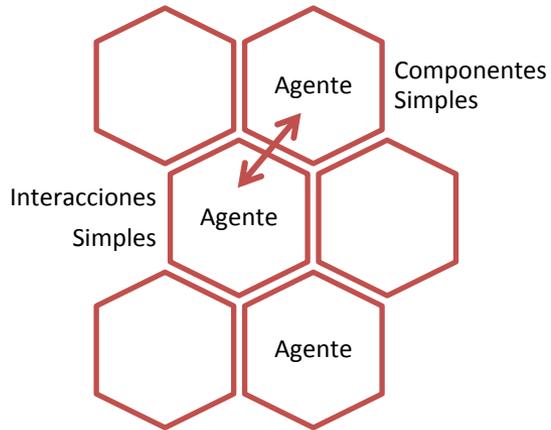
# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



Comportamiento global macroscópico



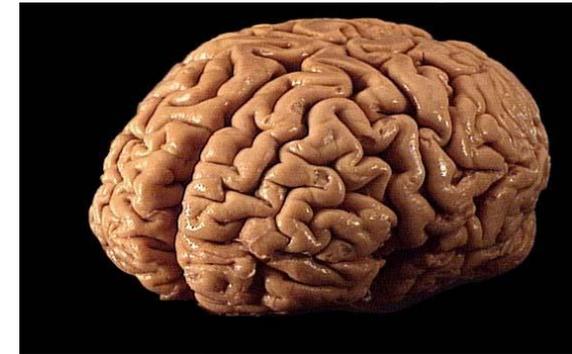
Auto-organización emergente



Comportamiento local microscópico

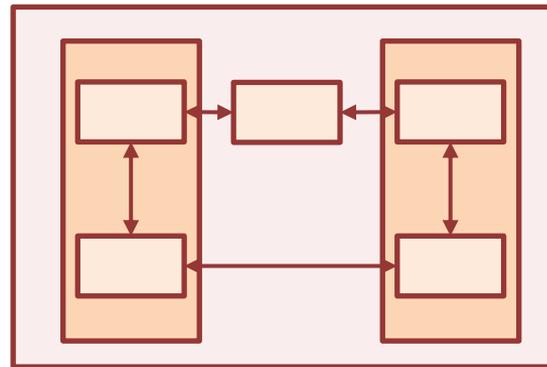


<http://www.tech-faq.com/swarm-intelligence.html>

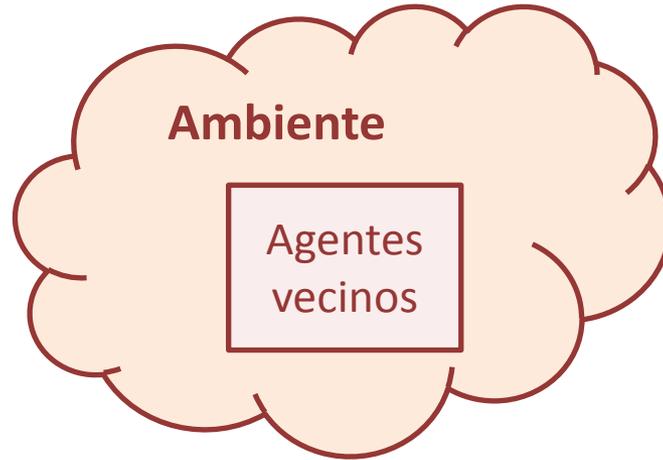


# Ingeniería de sistemas complejos –sistemas dinámicos cognitivos –

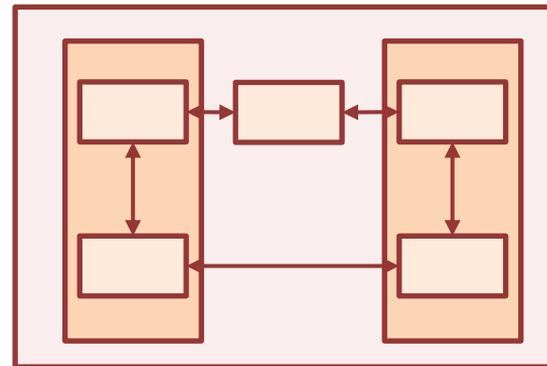
## Agente Cognitivo



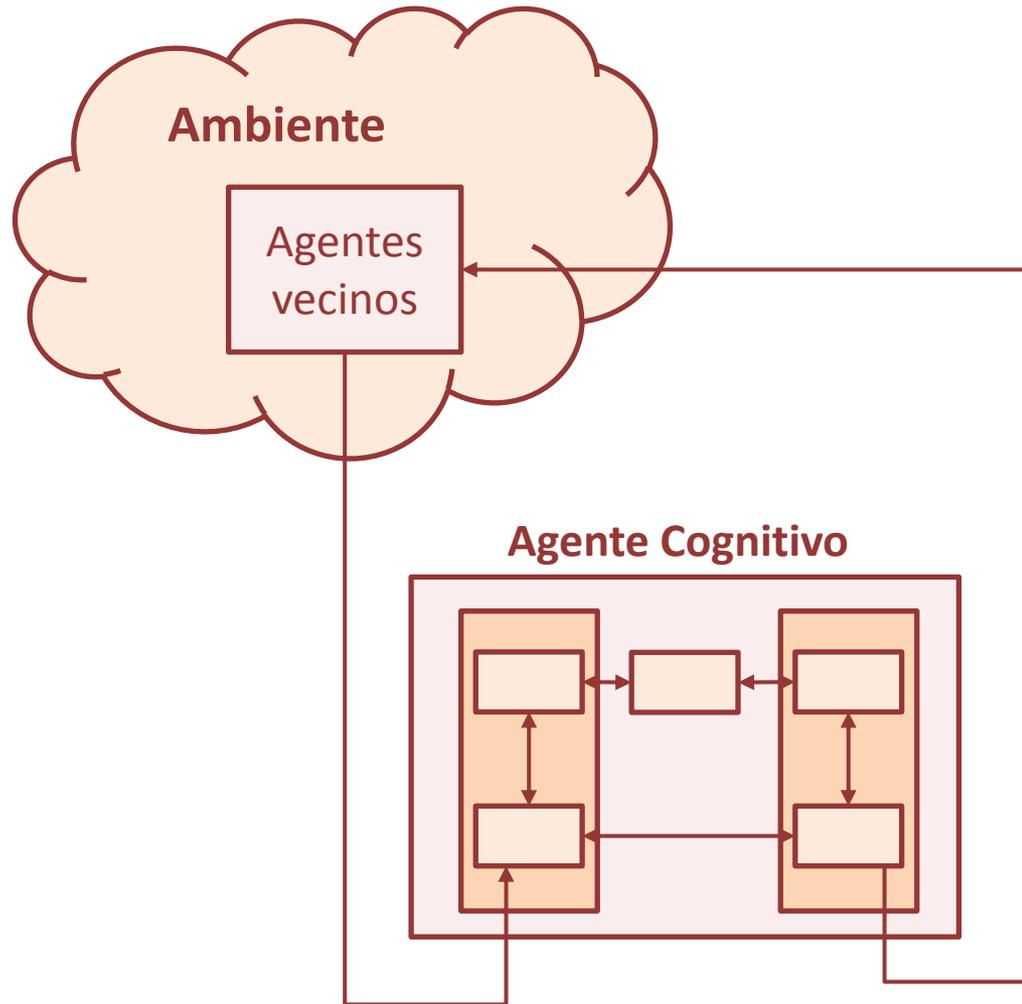
# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



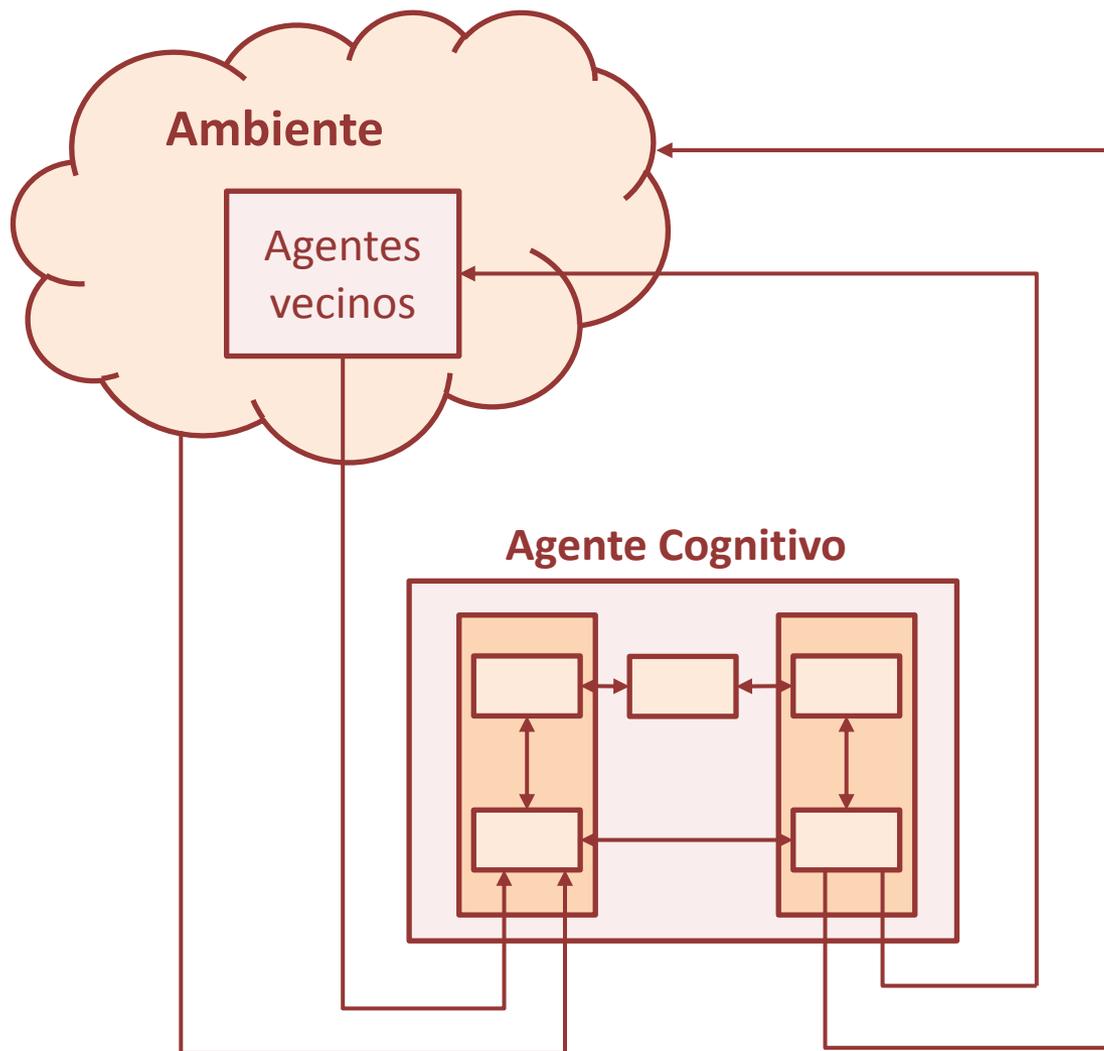
## Agente Cognitivo



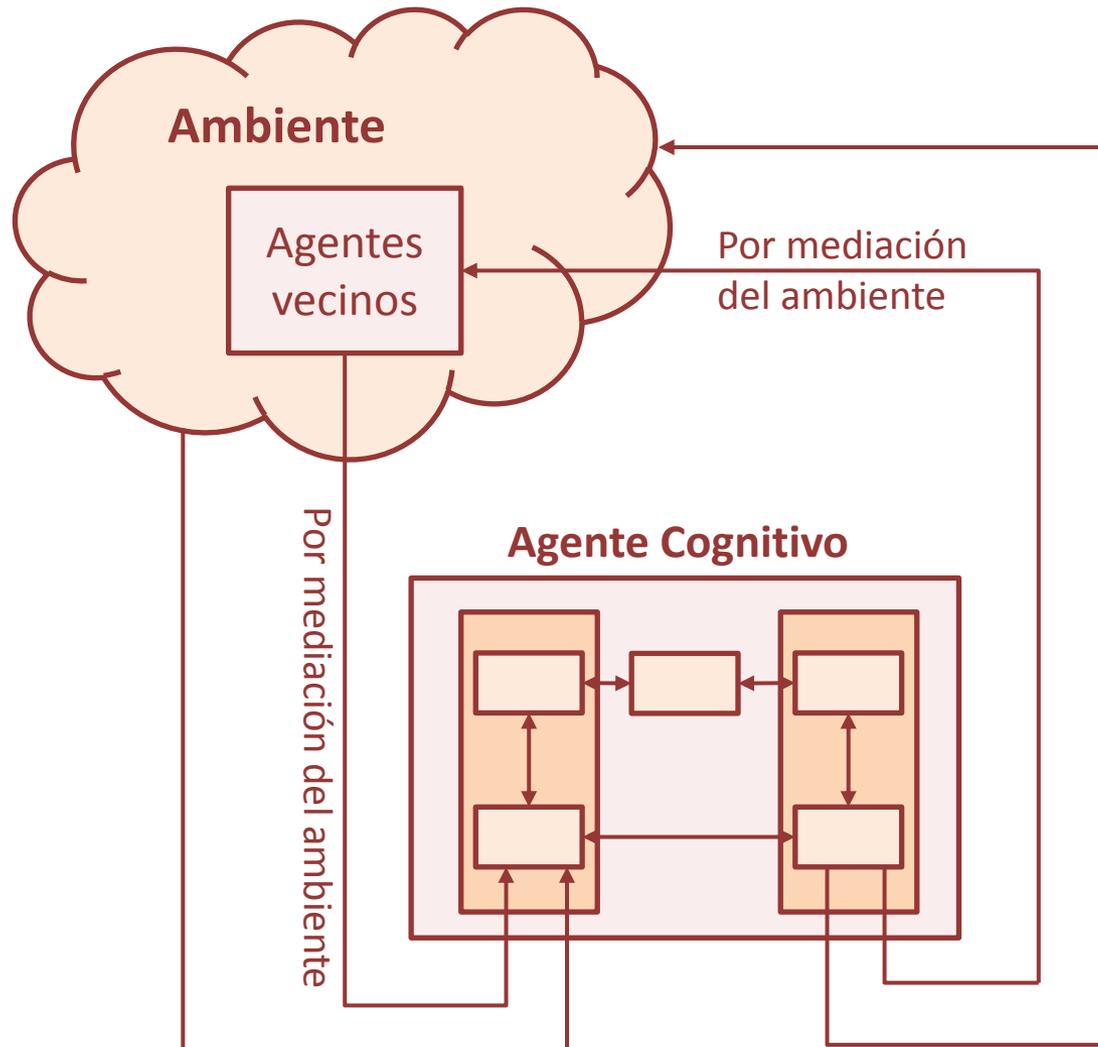
# Ingeniería de sistemas complejos –sistemas dinámicos cognitivos –



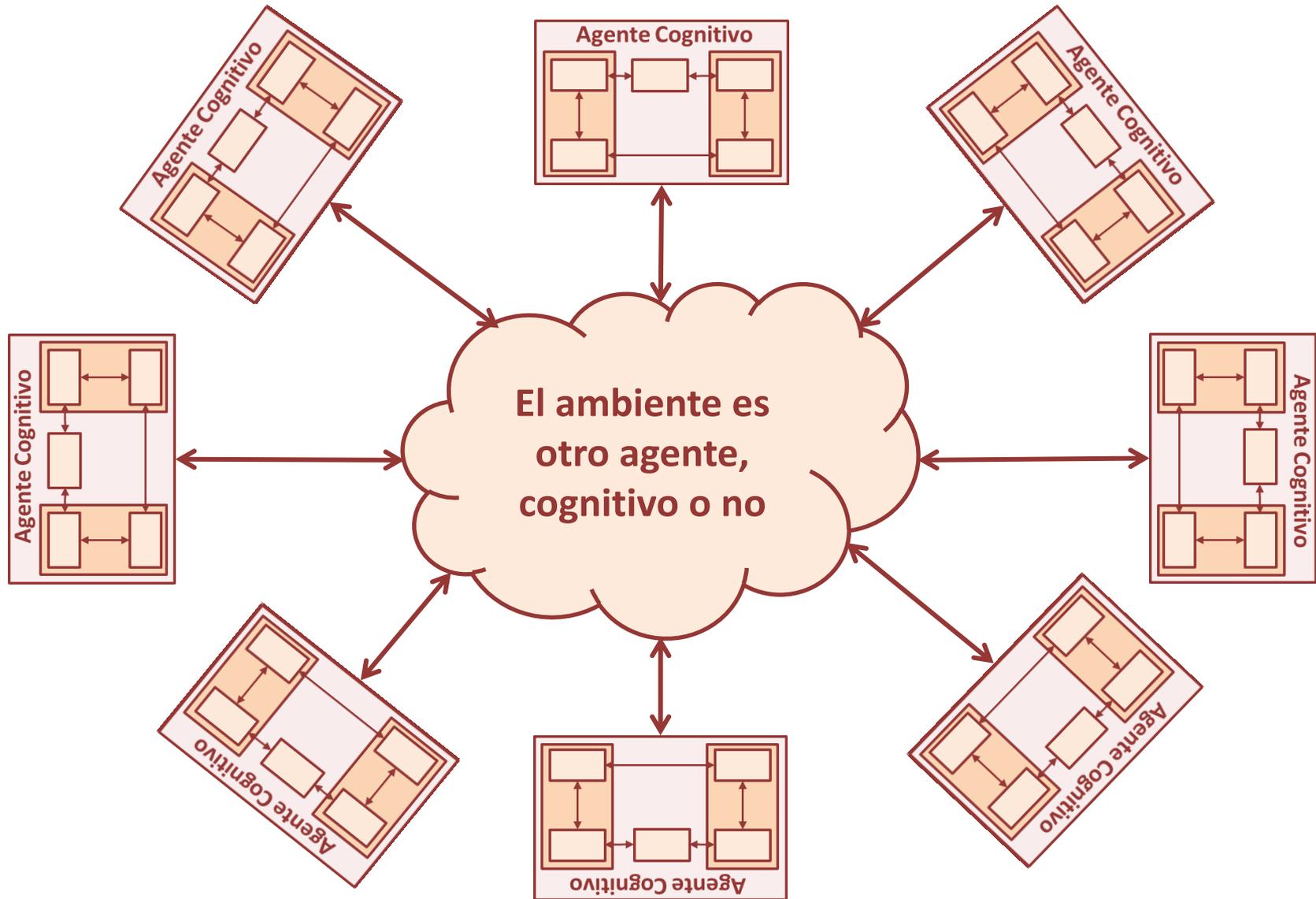
# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



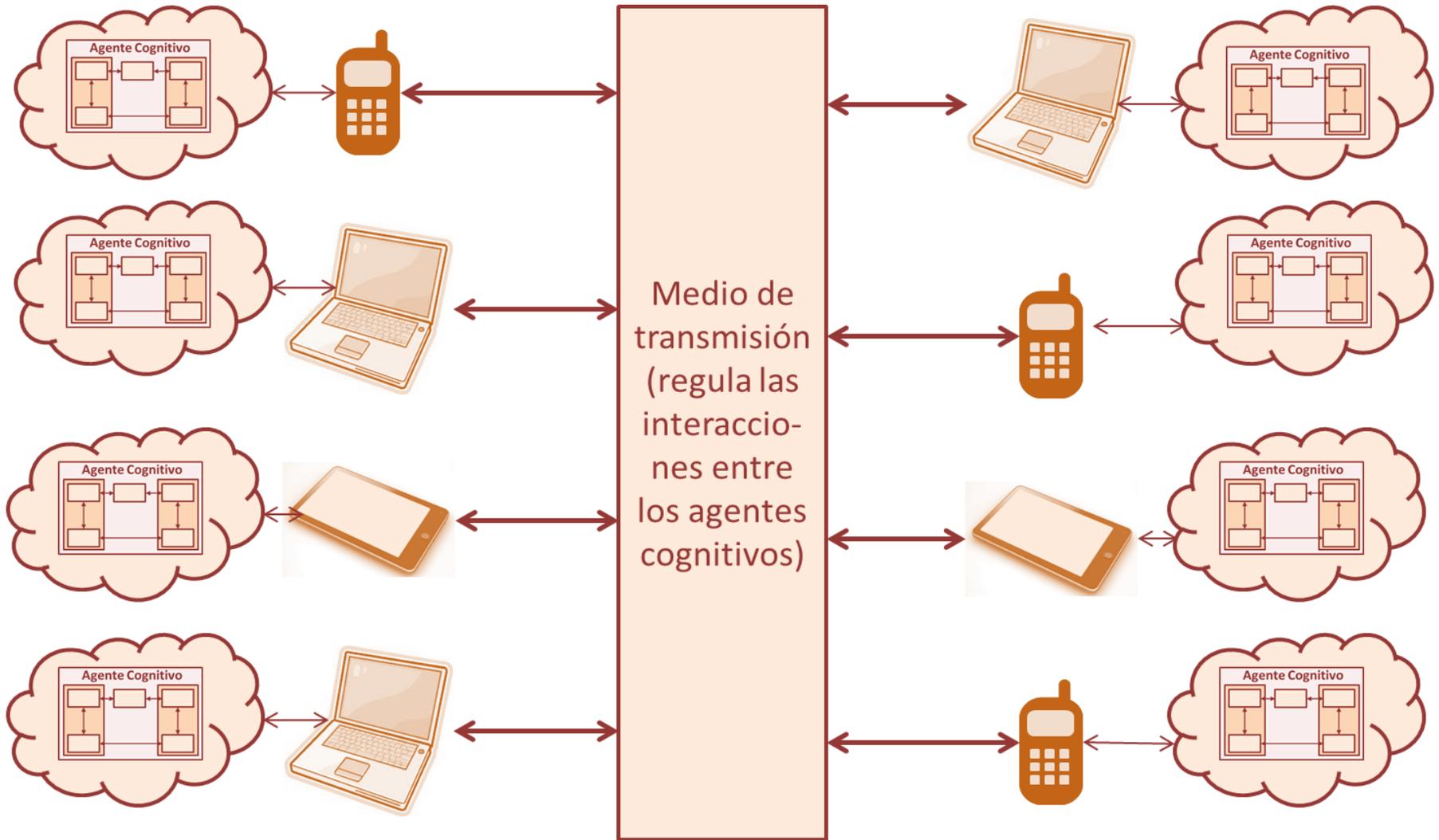
# Ingeniería de sistemas complejos –sistemas dinámicos cognitivos –



# Ingeniería de sistemas complejos – sistemas dinámicos cognitivos –



# Redes inalámbricas ad hoc



Edgar Aguirre, "Sistemas Multigentes y redes MANET", tesis de maestría UD

# Estimación del estado del ambiente

Modelo de Espacio de Estados

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k$$

$\vec{x}_k$  : estado del sistema en el instante  $k$

$\vec{\omega}_k$  : Ruido en el instante  $k$  del proceso

Modelo de las mediciones

$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k$$

$\vec{y}_k$  : Observación en el instante  $k$

$\vec{v}_k$  : Ruido en el instante  $k$  de la observación

$a(\vec{x}_{k-1}, k)$ : Función no lineal que depende de la naturaleza física del sistema bajo estudio

$b(\vec{x}_{k-1}, k)$ : Función no lineal que depende de la instrumentación utilizada

# Estimación del estado del ambiente

Modelo de Espacio de Estados

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k$$

$\vec{x}_k$  : estado del sistema en el instante  $k$

$\vec{\omega}_k$  : Ruido en el instante  $k$  del proceso

Modelo de las mediciones

$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k$$

$\vec{y}_k$  : Observación en el instante  $k$

$\vec{v}_k$  : Ruido en el instante  $k$  de la observación

$a(\vec{x}_{k-1}, k)$ : Función no lineal que depende de la naturaleza física del sistema bajo estudio

$b(\vec{x}_{k-1}, k)$ : Función no lineal que depende de la instrumentación utilizada

El agente cognitivo dispone de una secuencia de observaciones  $\vec{Y}_k = \{ \vec{y}_i \}_{i=1}^k$

$$\hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right]$$

# Estimación del estado del ambiente

El agente cognitivo dispone de una secuencia de observaciones  $\vec{Y}_k = \{ \vec{y}_i \}_{i=1}^k$

$$\hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right]$$

**Filtro Bayesiano que minimiza la probabilidad de equivocarse**

# Estimación del estado del ambiente

El agente cognitivo dispone de una secuencia de observaciones  $\vec{Y}_k = \{ \vec{y}_i \}_{i=1}^k$

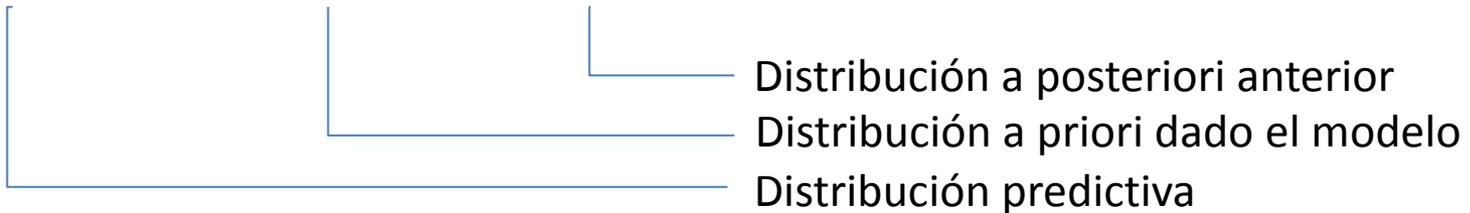
$$\hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right]$$

**Filtro Bayesiano que minimiza la probabilidad de equivocarse**

Típicamente se usa una solución iterativa:

1. Predicción:

$$P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_{k-1} \right] = \int_{\mathbb{R}^n} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{x}_{k-1} \right] P \left[ \vec{x}_{k-1} \mid \vec{Y}_{k-1} \right] d\vec{x}_{k-1}$$



# Estimación del estado del ambiente

El agente cognitivo dispone de una secuencia de observaciones  $\vec{Y}_k = \{ \vec{y}_i \}_{i=1}^k$

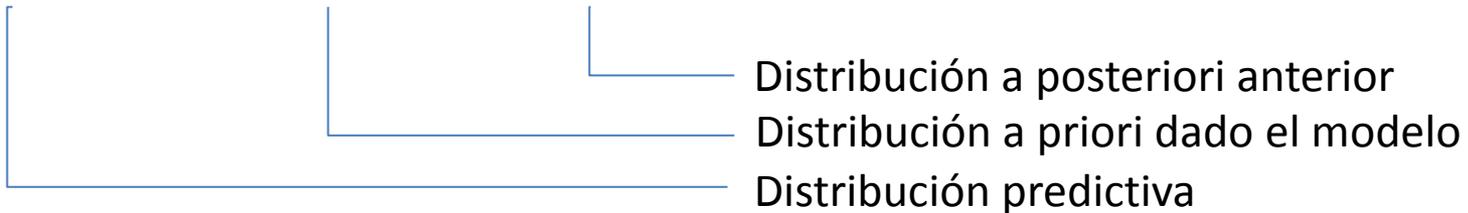
$$\hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right]$$

**Filtro Bayesiano que minimiza la probabilidad de equivocarse**

Típicamente se usa una solución iterativa:

1. Predicción:

$$P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_{k-1} \right] = \int_{\mathbb{R}^n} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{x}_{k-1} \right] P \left[ \vec{x}_{k-1} \mid \vec{Y}_{k-1} \right] d\vec{x}_{k-1}$$



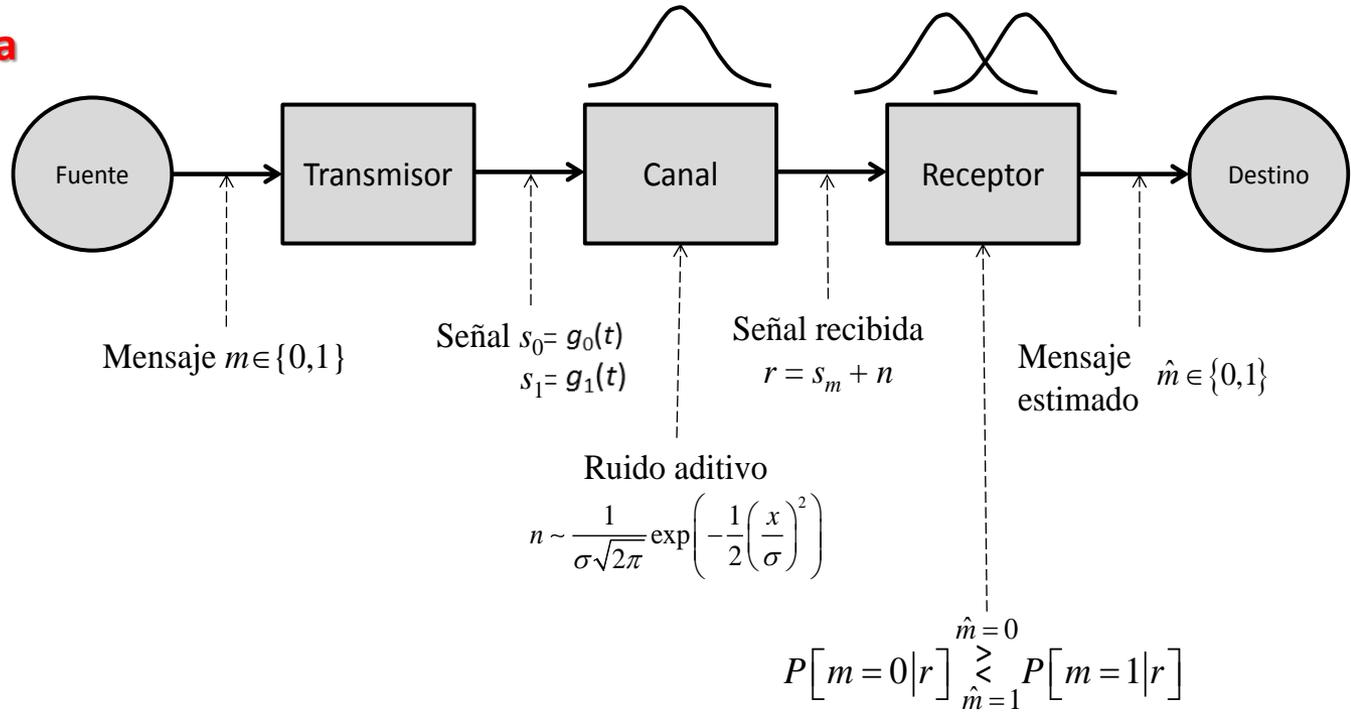
2. Actualización:

$$P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right] = \frac{P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_{k-1} \right] P \left[ \vec{y}_k \mid \vec{x}_k \right]}{\int_{\mathbb{R}^n} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_{k-1} \right] P \left[ \vec{y}_k \mid \vec{x}_k \right] d\vec{x}_k}$$

Likelihood (¿verosimilitud?)

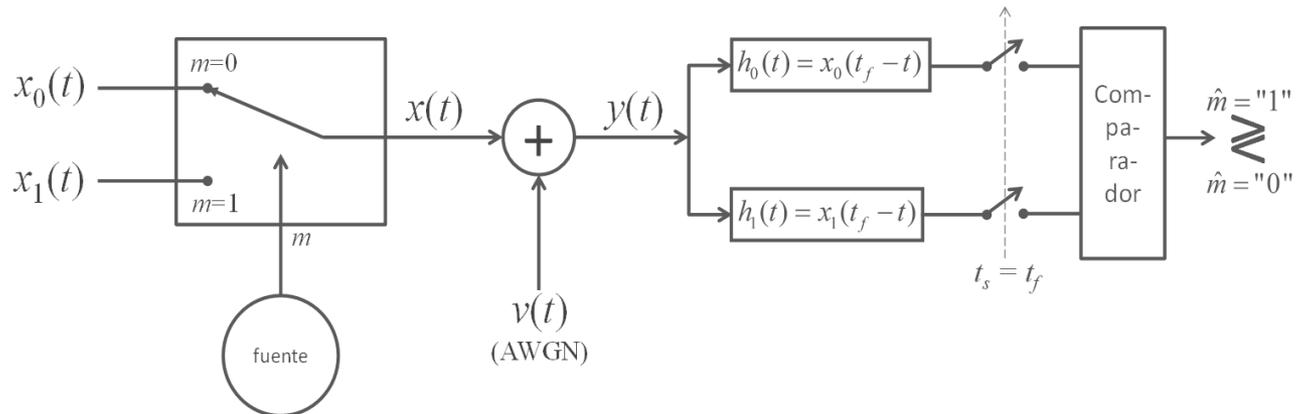
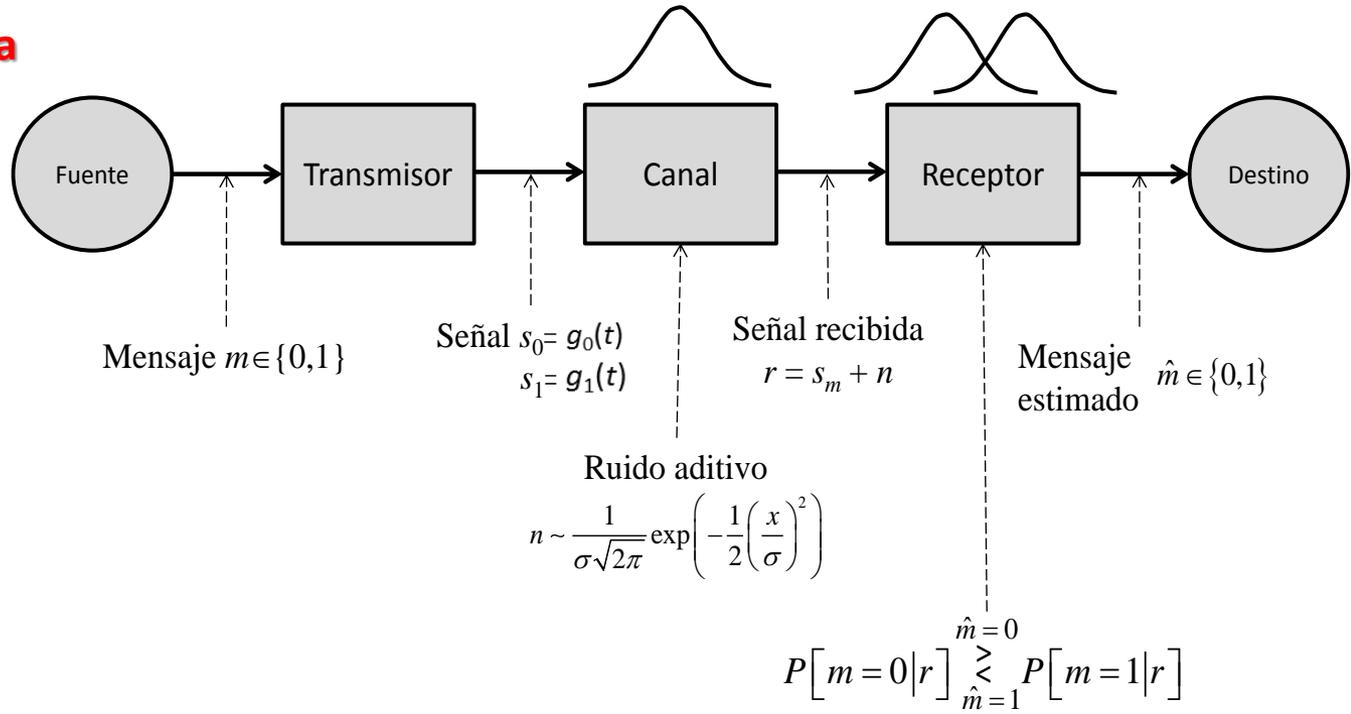
# Estimación del estado del ambiente

## Solución típica



# Estimación del estado del ambiente

## Solución típica



# Estimación del estado del ambiente

## Solución típica



$$amor_{hoy} = \arg \max_{a_{hoy}} P \left[ a_{hoy} \left| \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right. \right]$$

# Estimación del estado del ambiente

## Solución típica



$$amor_{hoy} = \arg \max_{a_{hoy}} P \left[ a_{hoy} \left| \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right. \right]$$

$$P \left[ NoMeAma \left| \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right. \right] \begin{matrix} \text{"no"} \\ \geq \\ \text{"si"} \end{matrix} P \left[ SíMeAma \left| \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right. \right]$$

# Estimación del estado del ambiente

## Solución típica



$$amor_{hoy} = \arg \max_{a_{hoy}} P \left[ a_{hoy} \mid \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right]$$

$$P \left[ NoMeAma \mid \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right] \begin{matrix} \text{“no”} \\ \gg \\ \text{“sí”} \end{matrix} P \left[ SíMeAma \mid \left\{ actitud_i \right\}_{i=antier}^{hoy} \right]$$

En general así nos comportamos los seres humanos, con modelos racionales o no (típicamente, no)



$$\begin{aligned} \bar{x}_k &= a(\bar{x}_{k-1}, k) + \bar{\omega}_k \\ \bar{y}_k &= b(\bar{x}_{k-1}, k) + \bar{v}_k \\ \hat{\bar{x}}_k &= \arg \max_{\bar{x}_k} P \left[ \bar{x}_k \mid \bar{Y}_k \right] \end{aligned}$$

# Estimación del estado del ambiente

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_k &= a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k \\ \vec{y}_k &= b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P \left[ \vec{x}_k \mid \vec{Y}_k \right]$$

# Estimación del estado del ambiente

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_k &= a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k \\ \vec{y}_k &= b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P[\vec{x}_k | \vec{Y}_k]$$



$a$  y  $b$  lineales  
 $\omega$  y  $v$  Gaussianos } Filtro Kalman

# Estimación del estado del ambiente

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_k &= a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k \\ \vec{y}_k &= b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P[\vec{x}_k | \vec{Y}_k]$$



$a$  y  $b$  lineales  
 $\omega$  y  $v$  Gaussianos } Filtro Kalman

Otro caso } Filtro Kalman no-lineal  
Redes neuronales  
Métodos basados en Kernel  
Modelos gráficos probabilísticos  
Expectation-Maximization  
Etc.

# Estimación del estado del ambiente

$$\left. \begin{aligned} \vec{x}_k &= a(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{\omega}_k \\ \vec{y}_k &= b(\vec{x}_{k-1}, k) + \vec{v}_k \end{aligned} \right\} \hat{\vec{x}}_k = \arg \max_{\vec{x}_k} P[\vec{x}_k | \vec{Y}_k]$$

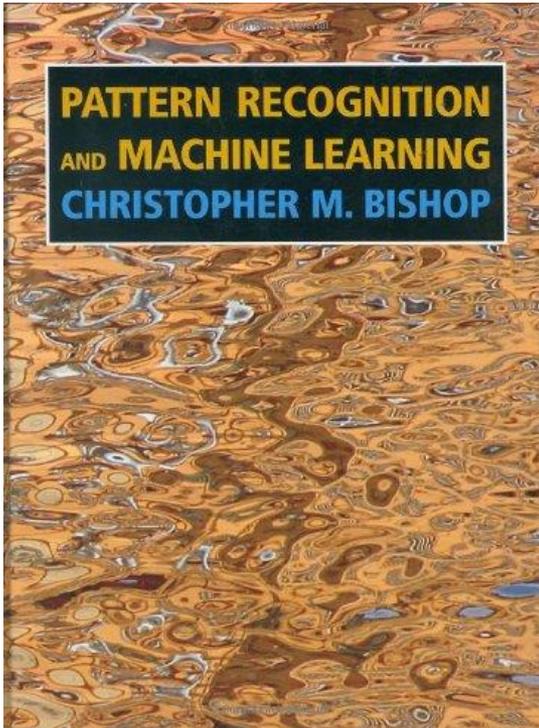


$a$  y  $b$  lineales  
 $\omega$  y  $v$  Gaussianos

Filtro Kalman

Otro caso

Filtro Kalman no-lineal  
Redes neuronales  
Métodos basados en Kernel  
Modelos gráficos probabilísticos  
Expectation-Maximization  
Etc.



# Acción sobre el ambiente

Si el **filtro bayesiano** es el fundamento teórico para la **percepción**  
La **programación dinámica** es el fundamento teórico para la **acción**

# Acción sobre el ambiente

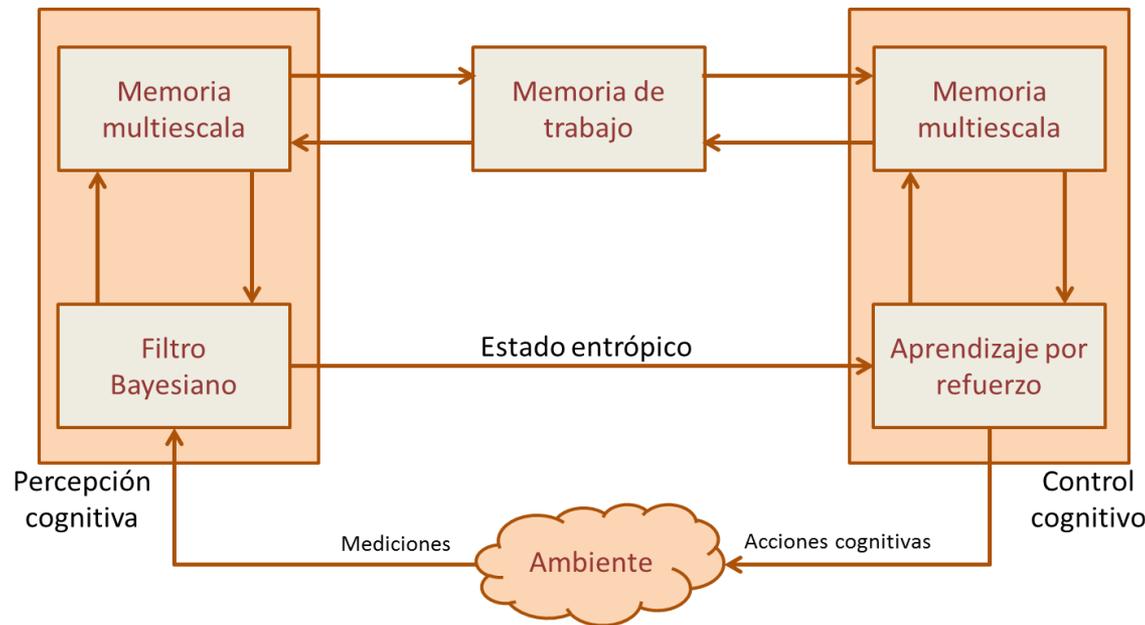
Si el **filtro bayesiano** es el fundamento teórico para la **percepción**  
La **programación dinámica** es el fundamento teórico para la **acción**

Necesidad de **aprender a tomar decisiones** mejorando el desempeño a largo plazo, aún a costa de sacrificar el desempeño a corto plazo

# Acción sobre el ambiente

Si el **filtro bayesiano** es el fundamento teórico para la **percepción**  
La **programación dinámica** es el fundamento teórico para la **acción**

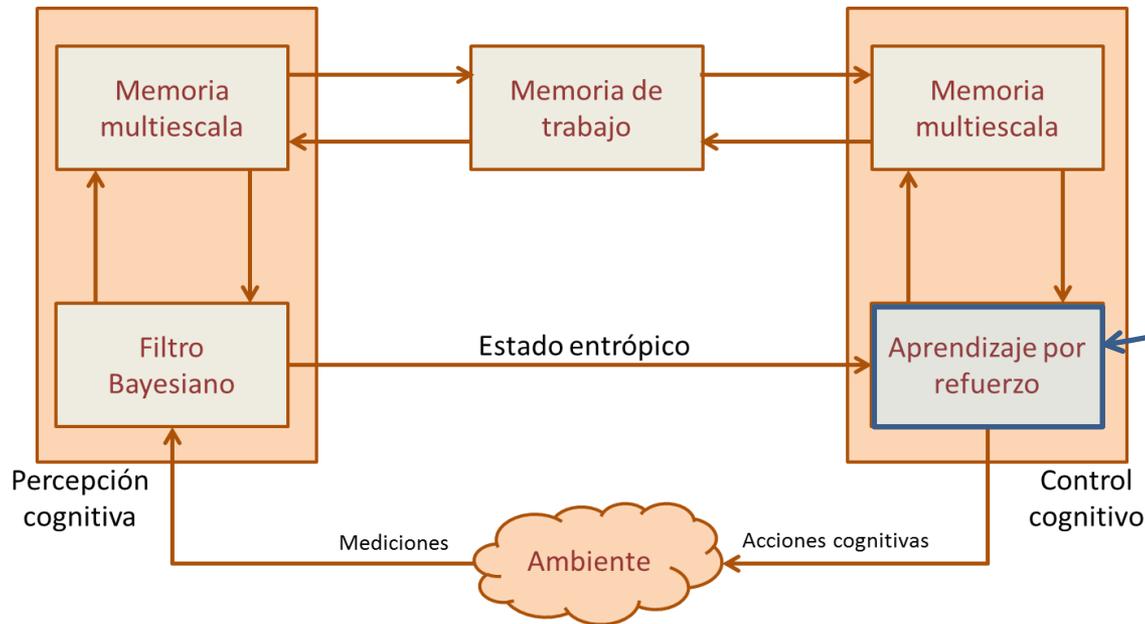
Necesidad de **aprender a tomar decisiones** mejorando el desempeño a largo plazo, aún a costa de sacrificar el desempeño a corto plazo



# Acción sobre el ambiente

Si el **filtro bayesiano** es el fundamento teórico para la **percepción**  
La **programación dinámica** es el fundamento teórico para la **acción**

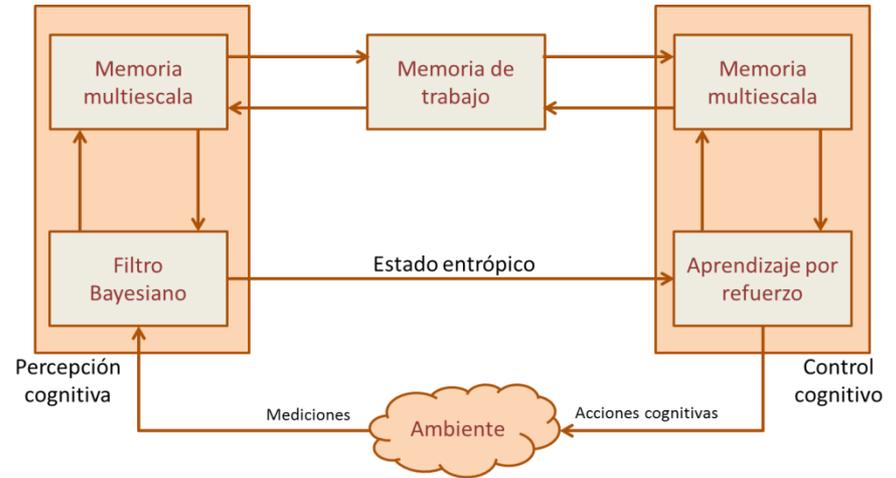
Necesidad de **aprender a tomar decisiones** mejorando el desempeño a largo plazo, aún a costa de sacrificar el desempeño a corto plazo



# Acción sobre el ambiente

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{\omega}_k$$

$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{v}_k$$



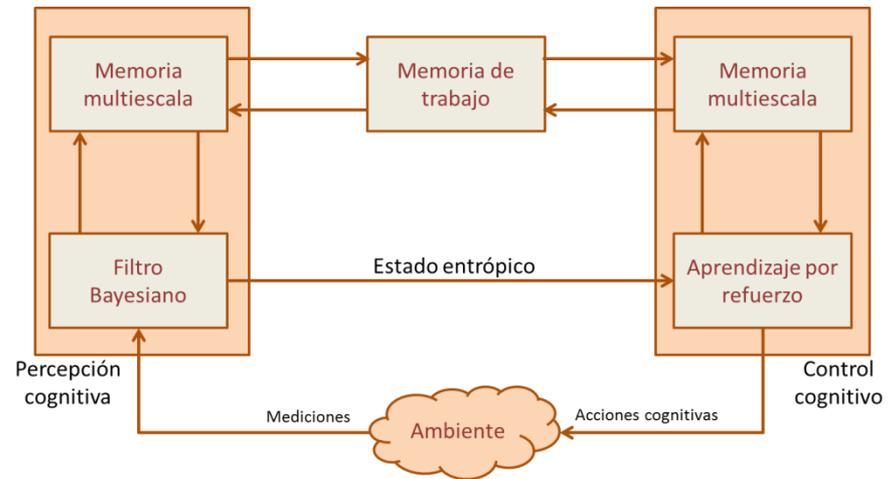
# Acción sobre el ambiente

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{\omega}_k$$

$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{v}_k$$

## Control óptimo

1. Programación dinámica, Ecuaciones de Bellman, Ruta más corta, Procesos de decisión de Markov
2. Ecuaciones Hamilton-Jacobi-Bellman
3. Principio Máximo de Pontryagins, métodos de gradiente descendiente
4. Relaciones con la mecánica clásica (mínima energía)
5. Regulador lineal-cuadrático, Ecuaciones de Riccati
6. Dualidad
7. Teoría de Juegos



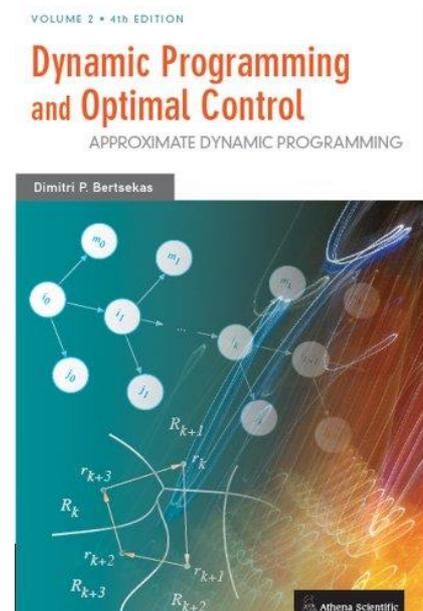
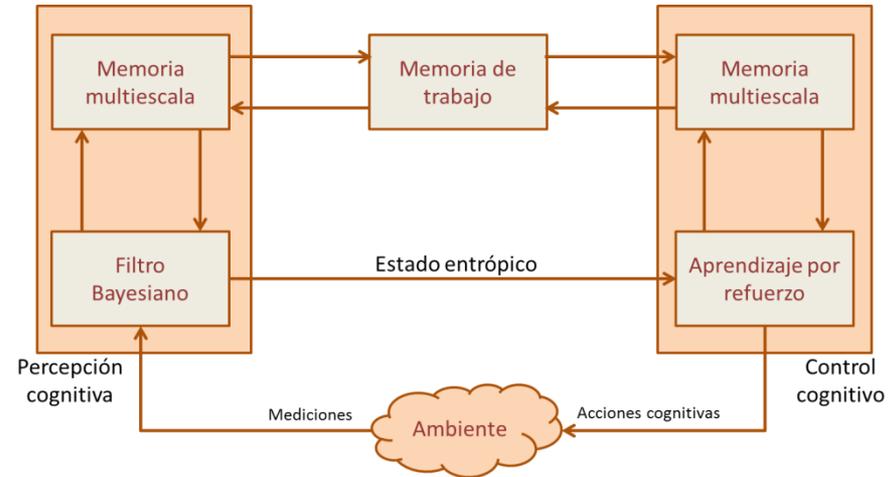
# Acción sobre el ambiente

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{\omega}_k$$

$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{v}_k$$

## Control óptimo

1. Programación dinámica, Ecuaciones de Bellman, Ruta más corta, Procesos de decisión de Markov
2. Ecuaciones Hamilton-Jacobi-Bellman
3. Principio Máximo de Pontryagins, métodos de gradiente descendiente
4. Relaciones con la mecánica clásica (mínima energía)
5. Regulador lineal-cuadrático, Ecuaciones de Riccati
6. Dualidad
7. Teoría de Juegos



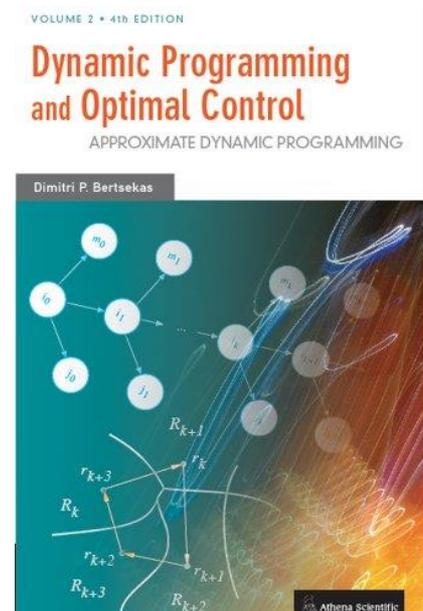
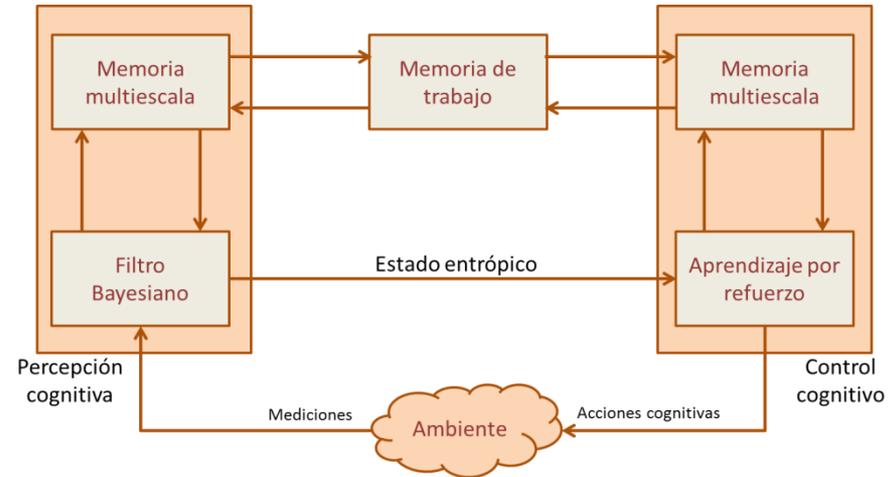
# Acción sobre el ambiente

$$\vec{x}_k = a(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{\omega}_k$$

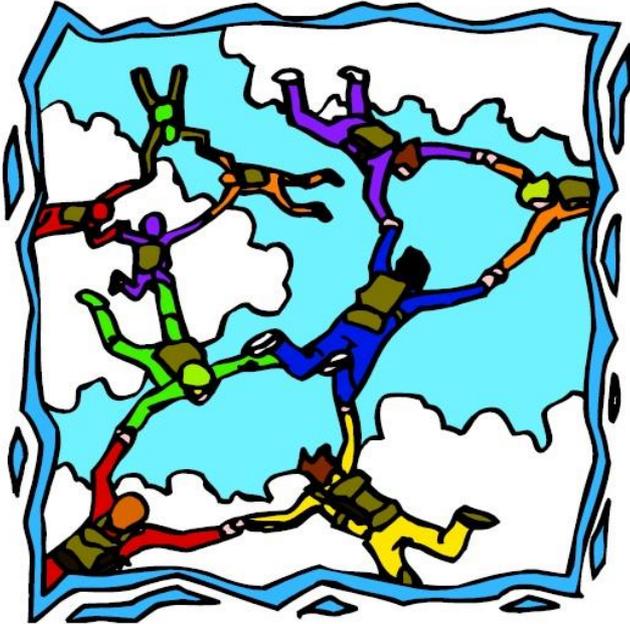
$$\vec{y}_k = b(\vec{x}_{k-1}, \vec{u}_k, k) + \vec{v}_k$$

## Control óptimo

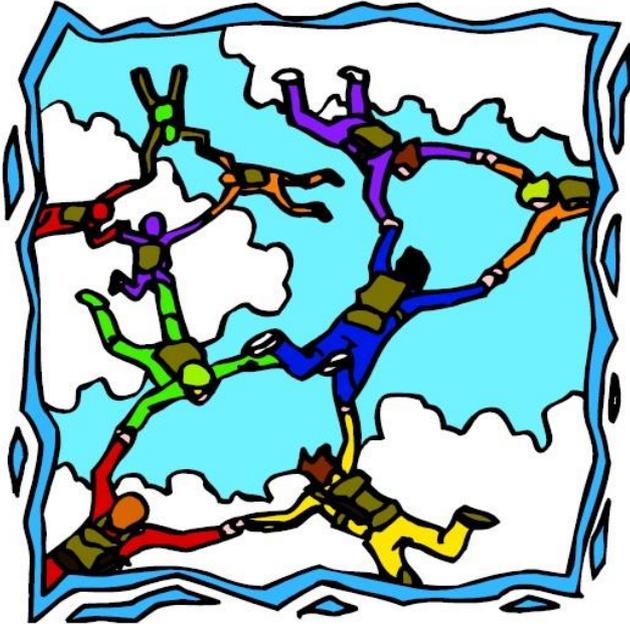
1. Programación dinámica, Ecuaciones de Bellman, Ruta más corta, Procesos de decisión de Markov
2. Ecuaciones Hamilton-Jacobi-Bellman
3. Principio Máximo de Pontryagins, métodos de gradiente descendiente
4. Relaciones con la mecánica clásica (mínima energía)
5. Regulador lineal-cuadrático, Ecuaciones de Riccati
6. Dualidad
7. Teoría de Juegos



# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



Serie de Complejidad de Springer-Verlag  
([www.springer.com/complexity](http://www.springer.com/complexity))

- “Los sistemas complejos están compuestos por muchos agentes que interactúan entre ellos, con la capacidad de generar comportamientos colectivos macroscópicos que se manifiestan en la formación espontánea de estructuras temporales, espaciales o funcionales. Modelos de tales sistemas se pueden aplicar exitosamente en diversas situaciones de la realidad como el clima, la emisión láser coherente, sistemas de reacción-difusión químicas, redes celulares biológicas, dinámicas del mercado de valores, redes de comunicaciones, movimientos tectónicos, tráfico urbano e interurbano, el cerebro humano, formación de opinión en sistemas sociales, etc. En todas ellas se puede distinguir auto-organización, dinámicas no-lineales, sinergismo, emergencia...”

# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



**Agentes cognitivos**

# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?

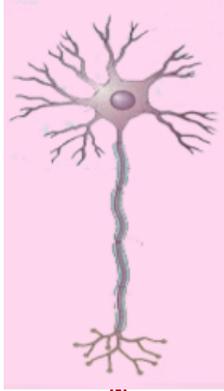


**Agentes cognitivos**



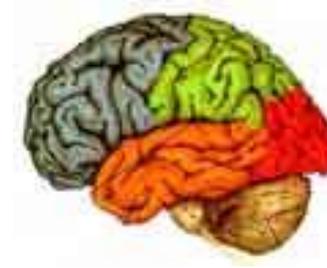
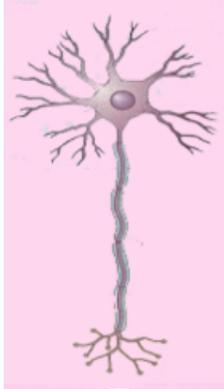
**Comportamiento emergente auto-organizado**

# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



**Agentes cognitivos**

# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



**Agentes cognitivos**

**Comportamiento emergente auto-organizado**

# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



**Agentes cognitivos**

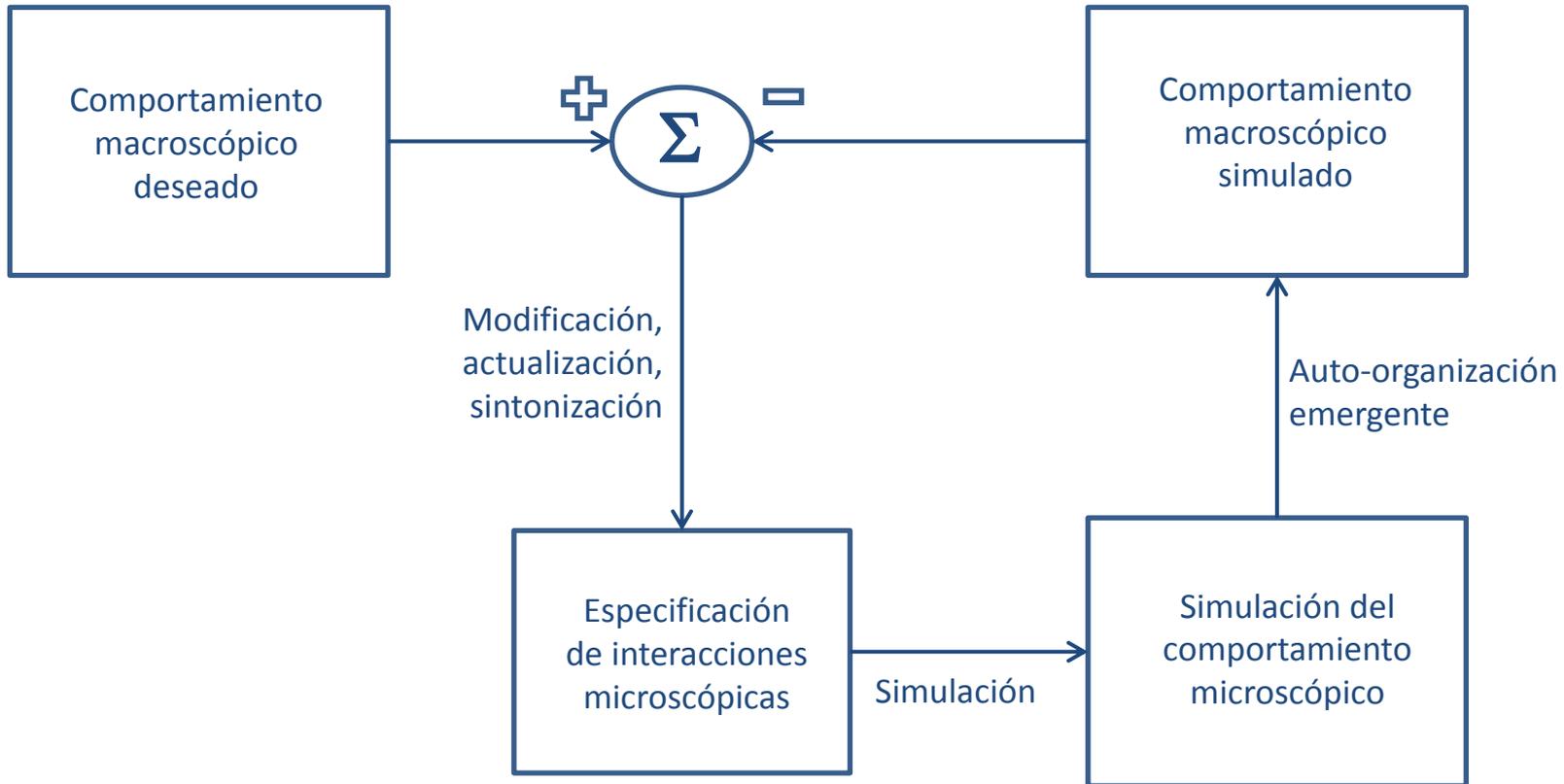
# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



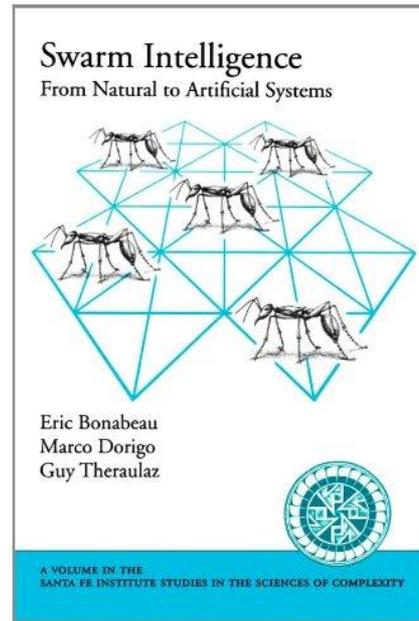
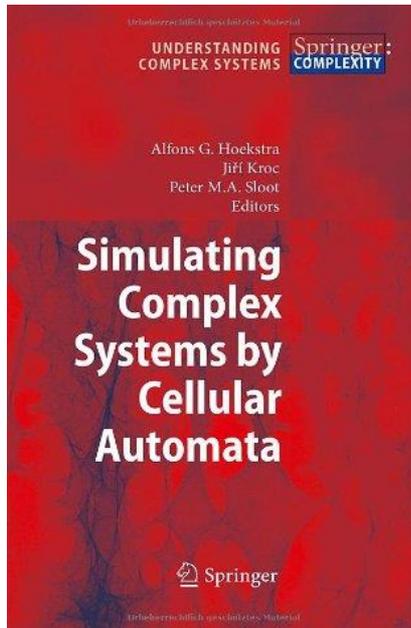
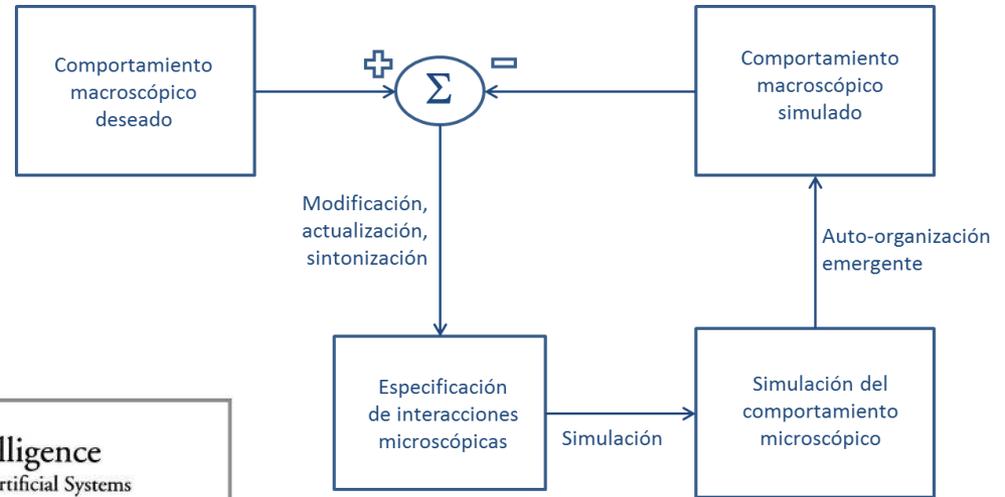
**Agentes cognitivos**

**Comportamiento emergente auto-organizado**

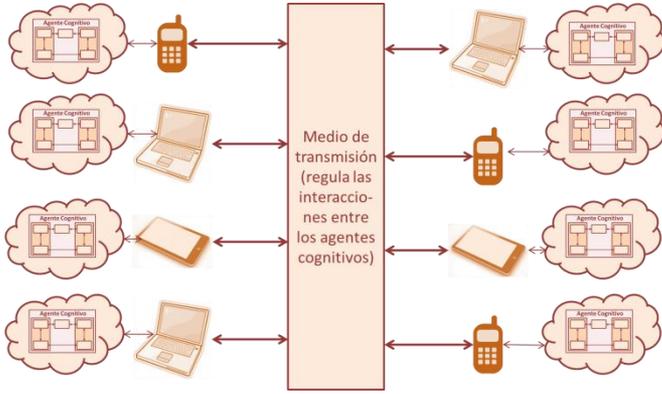
# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?



# OK. Diseñado el agente cognitivo ¿Y el sistema entero?

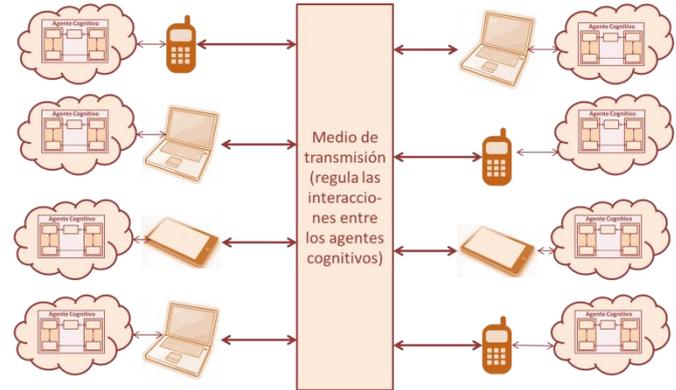


# Experiencia personal con redes inalámbricas ad hoc

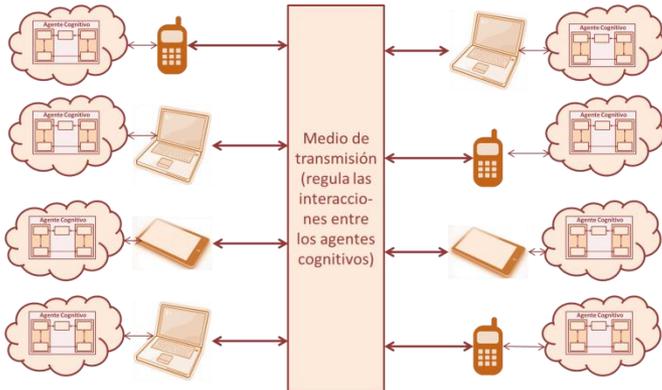


Mejia, Peña, Alzate, Muñoz, Esparza  
 "Distributed Emergent Cooperation through Adaptive Evolution in Mobile Ad Hoc Networks", Elsevier Journal on Ad Hoc Networks, 2012

Alzate, Puerta, Aguirre "Effects of Topology and Mobility in Bio-Inspired Synchronization of Mobile Ad Hoc Networks", IEEE Latincom, 2010



Alzate, Mejia, Peña, Labrador  
 "Achievable Transmission Rate in an IEEE 802.11 MANET" Revista de Ingeniería Universidad de Antioquia, 2012

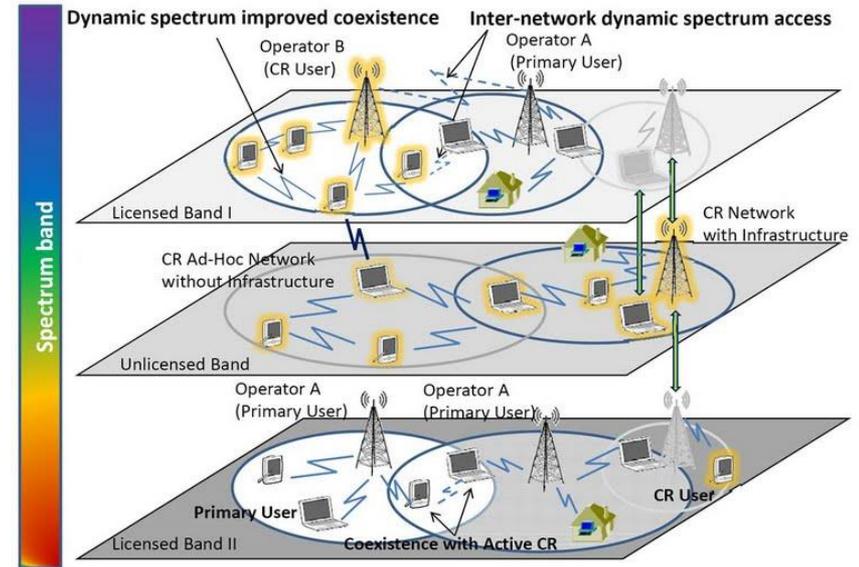


# ¡Gracias!

# Sistema Dinámico Cognitivo

Algunas aplicaciones:

- Radio cognitiva
- Radar cognitivo
- Software cognitivo
- Control cognitivo
- Optimización cognitiva
- ...
- ...



# Sistema Dinámico Cognitivo

Algunas aplicaciones:

- Radio cognitiva
- Radar cognitivo
- Software cognitivo
- Control cognitivo
- Optimización cognitiva
- ...
- ...
- control de tráfico urbano cognitivo
- Prevención, detección y cura cognitiva de cáncer
- Seguridad alimentaria cognitiva
- Participación democrática cognitiva
- Sistemas cognitivos de salud pública
- Sistemas cognitivos de manejo de basuras
- Sistemas cognitivos de protección ambiental
- ...

