

Técnicas Bioinspiradas para Control Distribuido

Nicanor Quijano

Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Universidad de los Andes

Bogotá, Colombia

Diciembre 10, 2008

Contenido

- Resumen

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

Contenido

Resumen

Contenido

● **Resumen**

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- Qué es Bio-inspiración?



- *Ideal Free Distribution*



- *Replicator Dynamics*



- *Honey Bee Social Foraging*



- Conclusiones

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- Resumen
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Biomimicry

Control Inteligente

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- Resumen
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- ★ “Control Inteligente”: estudio de cómo lograr automatización y control por medio de emular/imitar sistemas biológicos inteligentes.
- ★ El control inteligente agrupa un conjunto de métodos para explotar la bioimitación en la automatización.
- ★ Los métodos “biológicamente inspirados” pueden ser clasificados de acuerdo a las células, órganos, organismos, y poblaciones jerárquicas en biología.
- ★ Ejemplos:
 - Organismos Individuales: seres humanos con experiencia en la solución de un problema.
 - Grupo Coordinado de Organismos: abejas resuelven el problema de ir a por comida.

Control Inteligente

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- **Control Inteligente**
- Resumen
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- ★ Biólogos ven su campo por lo general jerárquico (i.e., nivel inferior célula, tejido, órgano, organismo, niveles de población).
- ★ **Grupos de Organismos:**
 - Simples sistemas de control que se utilizan en los organismos, y cómo cuando están juntos como grupos estos se comunican y una coordinación emerge vía comunicación de sus actos => *self-organization in distributed autonomous MAS.*
 - Grupo de organismos organizados de tal forma que existe una jerarquía que realiza un objetivo de control vía coordinación de sus acciones.
- ★ **Evolución: “Biology is Engineering” D. Dannett.**

Control Inteligente vs Convencional?

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- **Control Inteligente**
- Resumen
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- ★ *Biomimicry* provee un marco en el cual se pueden desarrollar sistemas complejos de control y automatización.
- ★ Sistemas biológicos proveen otra forma de ver las dinámicas, funcionalidades, diseño, y operación de sistemas de control complejos de gran escala.
Una visión alternativa nos permite entender cómo mejorar algunos procesos.
- ★ Selección natural ha moldeado y mejorado las estrategias utilizadas por los animales.
- ★ **Objetivo:** Autonomía NO “Inteligencia”.

Resumen

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- **Resumen**
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- ★ El diseño bioinspirado busca extraer ideas de la naturaleza para poder construir soluciones tecnológicas más óptimas y robustas.

Resumen

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- **Resumen**
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ El diseño bioinspirado busca extraer ideas de la naturaleza para poder construir soluciones tecnológicas más óptimas y robustas.



★ **Objetivo:** Utilizar el IFD para ilustrar modelos y sistemas de control distribuido.

Resumen

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- **Resumen**
- Resumen
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- ★ El diseño bioinspirado busca extraer ideas de la naturaleza para poder construir soluciones tecnológicas más óptimas y robustas.
- ★ .
- ★ **Objetivo:** Utilizar el IFD para ilustrar modelos y sistemas de control distribuido.
- ★ .
- ★ Se revisan los conceptos detrás del IFD...
 - **N. Quijano and K. M. Passino, The ideal free distribution: Theory and engineering application, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B, vol. 37, pp. 154-165, Feb 2007**

Resumen, cont.

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- Resumen
- **Resumen**
- Resumen

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ Sus extensiones...

- **A.D. Pantoja and N. Quijano, Modeling and Analysis for a Temperature System Based on Resource Dynamics and the Ideal Free Distribution, in Proceedings of the 2008 American Control Conference, 2008, pp. 3390-3395.**
- **E. Ramírez and N. Quijano, Dynamic Resource Allocation Applied to Water Distribution Systems, In preparation, 2008.**

Resumen, cont.

Contenido

Biomimicry

- Definiciones
- Control Inteligente
- Resumen
- Resumen
- **Resumen**

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ Y la teoría de *Honey Bee Social Foraging*...

- N. Quijano and Kevin M. Passino, Honey Bee Social Foraging Algorithms for Resource Allocation: Theory and Application, Submitted for journal publication, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Part B, 2007.
- Pablo Ñañez and Nicanor Quijano, Honey Bee Social Foraging for Urban Traffic Control, Submitted to the IEEE American Control Conference, 2009.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Ideal Free Distribution

Ideal Free Distribution

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Fretwell and Lucas (1970) introducen el concepto de Ideal Free Distribution (IFD) \Rightarrow cómo los animales se distribuyen a través de los diferentes hábitats.

Ideal Free Distribution

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Fretwell and Lucas (1970) introducen el concepto de Ideal Free Distribution (IFD) \Rightarrow cómo los animales se distribuyen a través de los diferentes hábitats.

- ★ **Ideal:** los animales pueden sensor perfectamente la calidad de todos los hábitats

Ideal Free Distribution

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Fretwell and Lucas (1970) introducen el concepto de Ideal Free Distribution (IFD) \Rightarrow cómo los animales se distribuyen a través de los diferentes hábitats.



★ **Ideal:** los animales pueden sensor perfectamente la calidad de todos los hábitats



★ **Free:** los animales pueden dirigirse a cualquier hábitat



IFD: Suposiciones

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- **Suposiciones**
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Las suposiciones originalmente planteadas están relacionadas con:

- ★ Las habilidades competitivas de los animales son las mismas.
- ★ Los animales deben ser omniscientes.
- ★ No existe un “costo” para desplazarse entre hábitats.
- ★ No existe interferencia entre los diferentes competidores.
- ★ Los recursos son fijos, tanto en espacio como en tiempo.
- ★ Tasa de adquisición de los recursos afecta escogencia del *patch*.
- ★ Distribución de los animales está dada por la max. de la *fitness*.

Extensiones Teóricas del IFD

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- **Extensiones**
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

■ Extensiones Biológicas

- ★ **Parker y Sutherland:** utilizan suposiciones más realísticas en cuanto a la explotación de los recursos, la interferencia, y el cleptoparasitismo.
- ★ **Bernstein, Kacelnik, y Krebs:** demuestran experimentalmente cómo los animales alcanzan un IFD a pesar de que tienen que aprender cuál es la *suitability* de un lugar, y de que existe un costo a pagar cuando se va de un lugar a otro.
- ★ **Lessels:** demuestra limitación de los recursos, utilizando las condiciones de una cosecha en pie.

Extensiones Teóricas del IFD

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

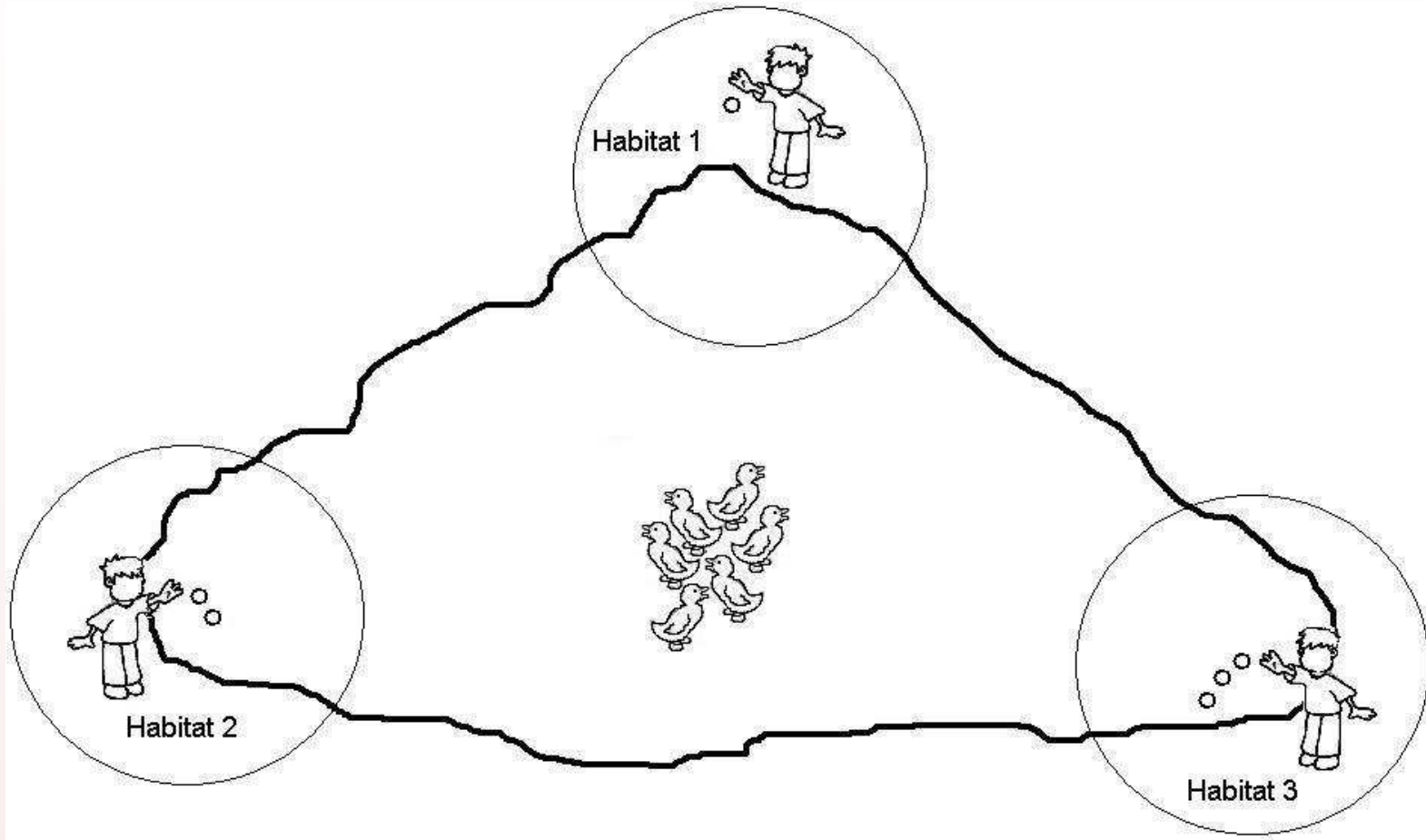
■ Extensiones Biológicas

- ★ **Parker y Sutherland:** utilizan suposiciones más realísticas en cuanto a la explotación de los recursos, la interferencia, y el cleptoparasitismo.
- ★ **Bernstein, Kacelnik, y Krebs:** demuestran experimentalmente cómo los animales alcanzan un IFD a pesar de que tienen que aprender cuál es la *suitability* de un lugar, y de que existe un costo a pagar cuando se va de un lugar a otro.
- ★ **Lessels:** demuestra limitación de los recursos, utilizando las condiciones de una cosecha en pie.

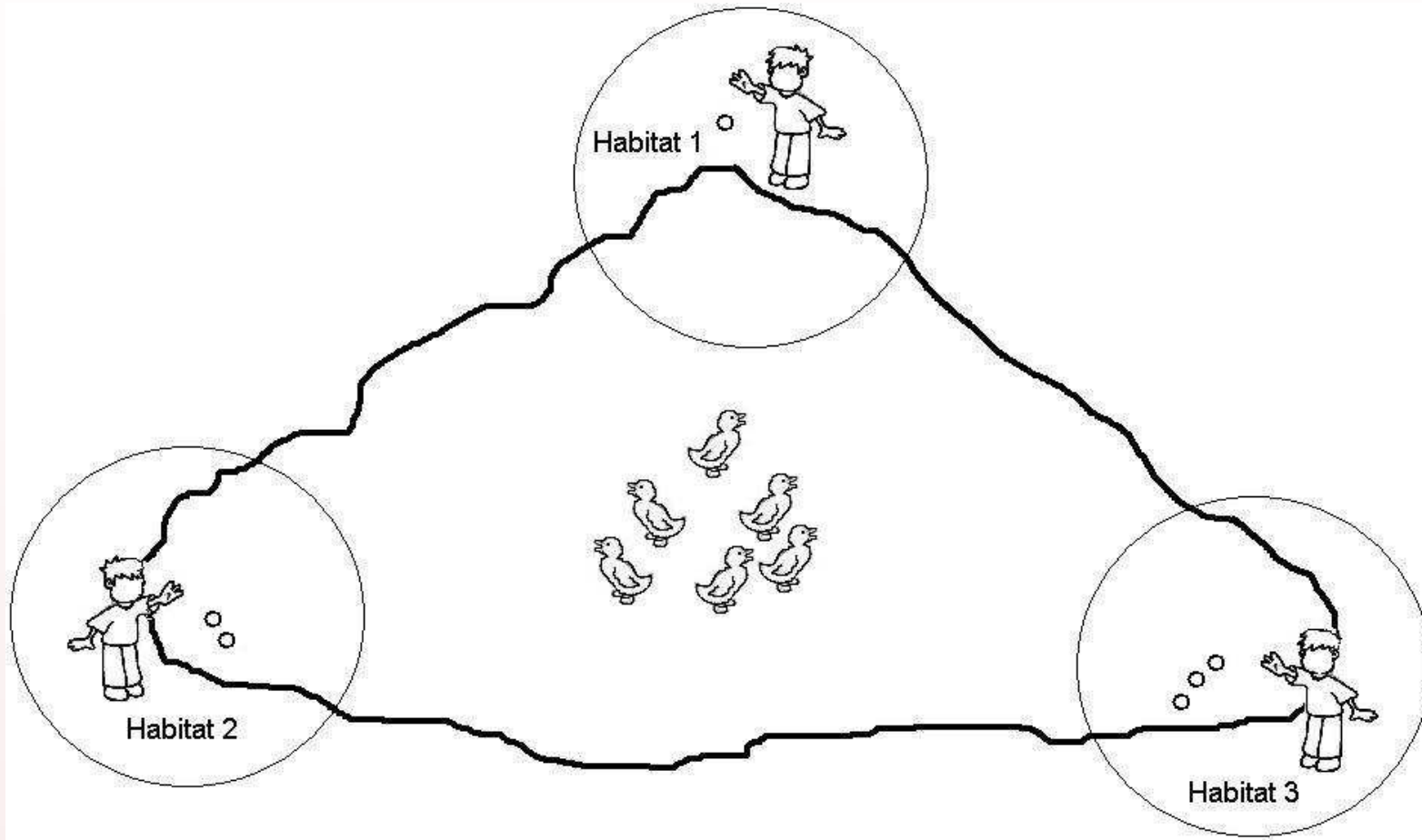
■ Extensiones Matemáticas/Ingeniería

- ★ **Cressman y Krivan.; Quijano, Finke, Pantoja y Passino.**

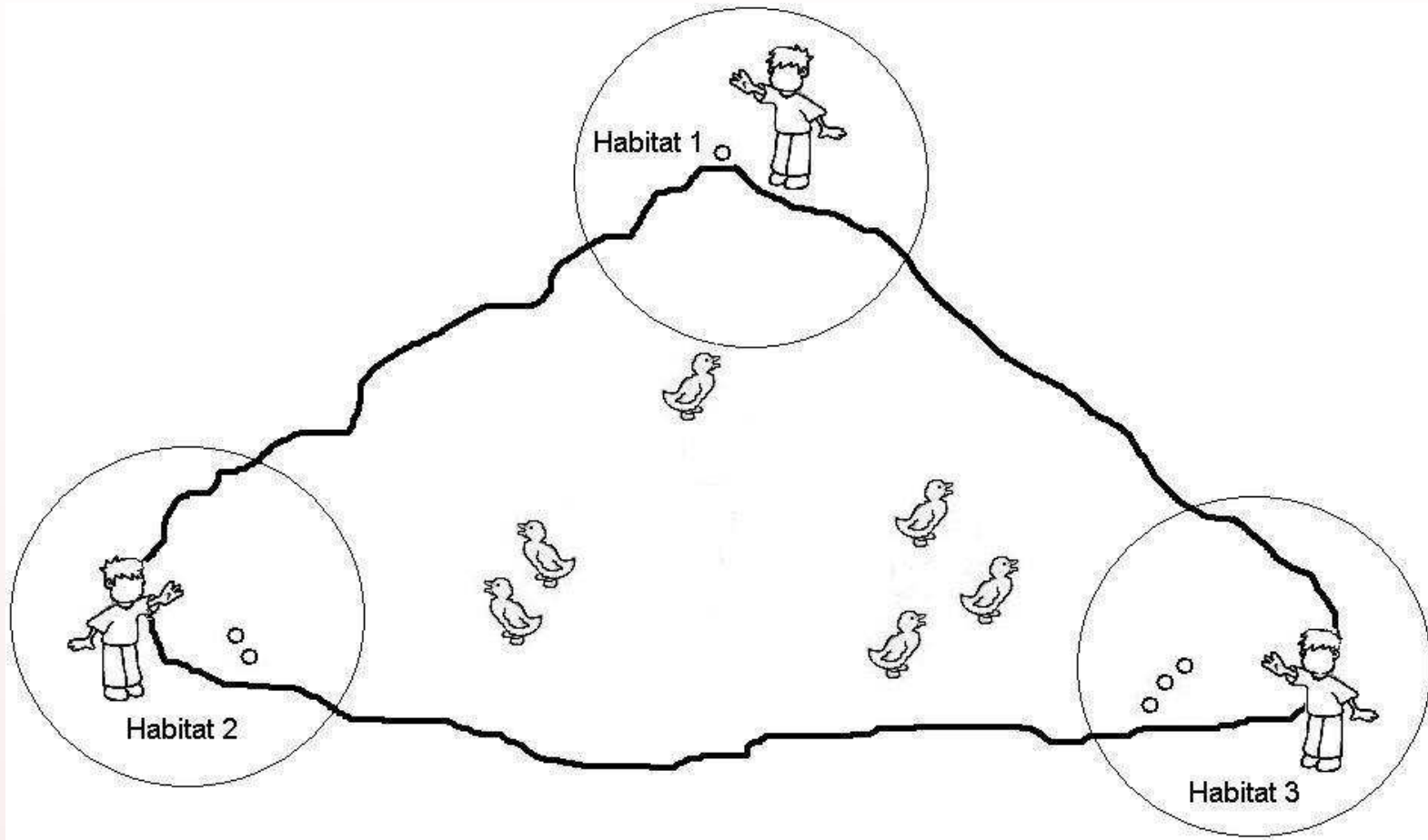
Gráficamente...



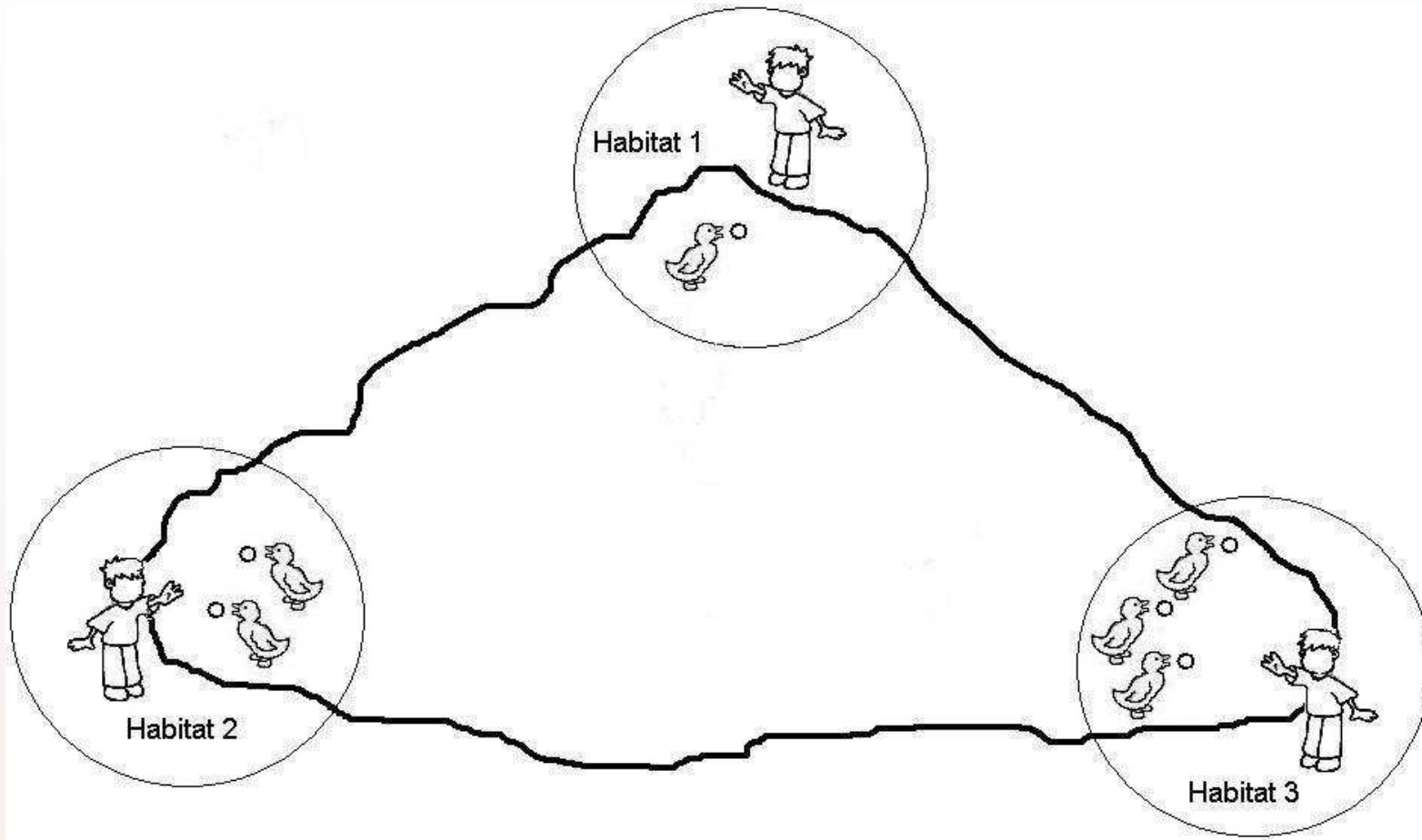
Gráficamente...



Gráficamente...



Gráficamente...



Ejemplo

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- **Ejemplo**
- Notación

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

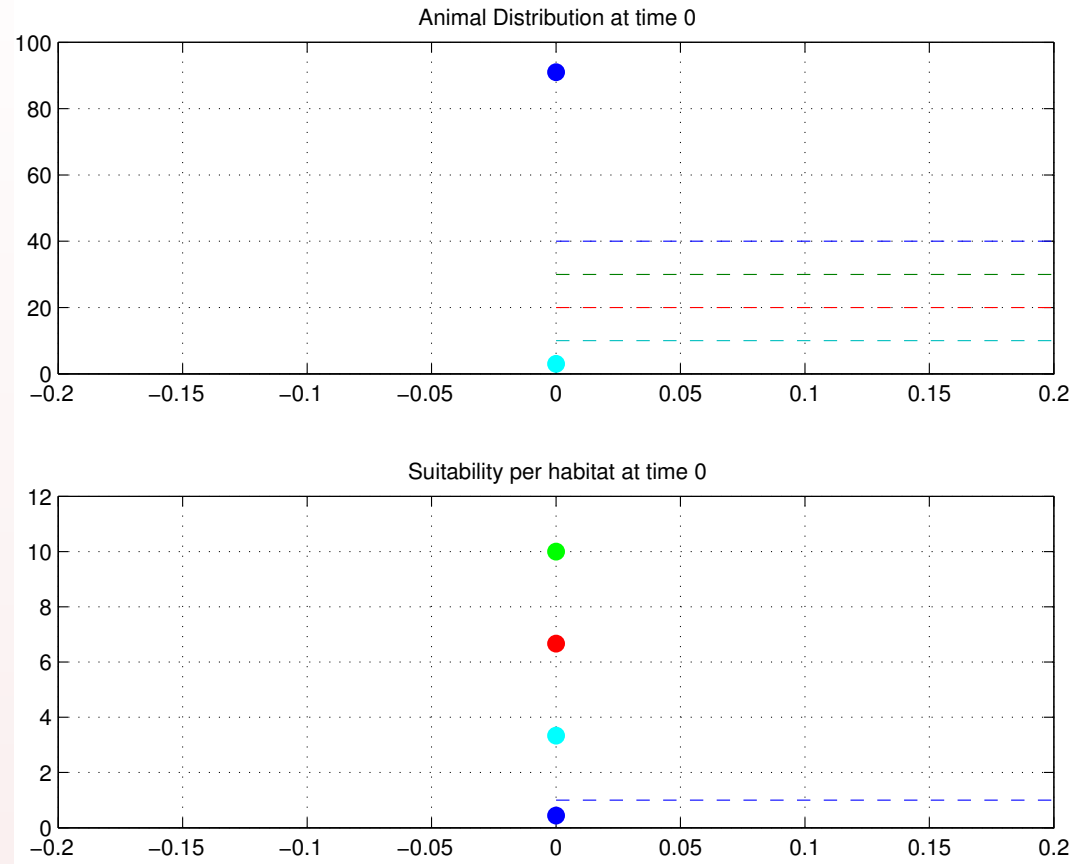


Figura 1: Ideal Free Distribution.

Notación Matemática

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- **Notación**

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

→ N hábitas disjuntos

→ x_i : número total de animales en el habitat i^{th}

→ $\sum_{i=1}^N x_i = P > 0$

→ $b_i \geq 0$: constante

→ $\sum_{i=1}^N a_i > 0$ and $a_i \geq 0$ for all $i = 1, 2, \dots, N$

→ c_i y m son constantes positivas

Notación, cont.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- **Notación**

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

→ La *suitability function* s_i para el hábitat i^{th} se define como

$$s_i = \frac{a_i^{\frac{1}{m}}}{c_i x_i + b_i} \quad (1)$$

→ Esta *suitability* está correlacionada con la *fitness*.

Notación, cont.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

- IFD
- Suposiciones
- Extensiones
- Gráficamente...
- Ejemplo
- **Notación**

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

→ La *suitability function* s_i para el hábitat i^{th} se define como

$$s_i = \frac{a_i^{\frac{1}{m}}}{c_i x_i + b_i} \quad (1)$$

→ Esta *suitability* está correlacionada con la *fitness*.

En el IFD, los animales se distribuyen tal que para cada $i, j = 1, 2, \dots, N$,

$$\frac{c_i x_i + b_i}{c_j x_j + b_j} = \frac{a_i^{\frac{1}{m}}}{a_j^{\frac{1}{m}}}$$

proporción relativa de animales

proporción relativa de la calidad

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

- Replicator
- Modelo

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Replicator Dynamics

Replicator Dynamics

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

● Replicator

● Modelo

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- ★ Replicator dynamics: modelo sencillo inspirado en la evolución de cómo *natural selection via differential fitness* afecta las proporciones de los animales utilizando diversas estrategias.

Replicator Dynamics

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

● Replicator

● Modelo

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ Replicator dynamics: modelo sencillo inspirado en la evolución de cómo *natural selection via differential fitness* afecta las proporciones de los animales utilizando diversas estrategias.



★ Los replicator dynamics estándar se basan en una población homogénea que participa en un juego homogéneo \Rightarrow Individuos sólo pueden seleccionar estrategias puras.



★ Estrategias mixtas: se refiere a un estado de la población donde sus componentes corresponden a una proporción de individuos que están genéticamente programados para jugar una estrategia pura.

Replicator Dynamics, cont.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

● Replicator

● Modelo

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ Taylor y Jonker asumen originalmente que:

- Cada individuo está genéticamente programado para utilizar la misma estrategia pura toda su vida.
- Cuando un individuo tiene un heredero, éste le transmite la misma estrategia que ha utilizado.
- La fitness de cada individuo cambia proporcionalmente a la reproducción neta de la población.

★ p_i : fracción de ind. utilizando estrategia pura i

$$p_i = \frac{x_i}{\sum_{j=1}^N x_j}$$

★ Sea $\Delta = \left\{ p \in \mathbb{R}_+^N : \sum_{i=1}^N p_i = 1 \right\}$ el simplex que define el subconjunto de espacio de estado.

Replicator Dynamics, cont.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

● Replicator

● **Modelo**

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

★ Los replicator dynamics están dados por

$$\frac{\dot{p}_i}{p_i} = \beta_i \left[\left\{ \text{fitness de animales que usan la estrategia } i \in H \right\} - \left\{ \text{average fitness en la población} \right\} \right]$$

Es decir,

$$\frac{dp_i(t)}{dt} = p_i(t) (f(i) - \bar{f})$$

★ Pero $f(i) - \bar{f}$ mide la desviación desde el punto de vista del IFD (esto estaría cuantificado por la *habitat matching rule*)

★ La *fitness* promedio es

$$\bar{f} = \sum_{j=1}^N p_j f(j)$$

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

- Control Temperatura
- Max. Unif.
- Jacobiano
- Jacobiano, cont...
- Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Control de Temperatura

Modelo Térmico

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

● Control Temperatura

● Max. Unif.

● Jacobiano

● Jacobiano, cont...

● Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Si se tuviera un sistema de múltiples zonas (donde una zona está compuesta por una lámpara y un sensor), un modelo simple sería:

$$\rho V_i C_v \dot{T}_i = -U A (T_i - T_a) + k_i x_i$$

Donde:

- T_i es la temperatura en la zona i^{th} .
- ρ , V_i y C_v son la densidad del aire, el volumen de la zona, y la capacidad calorífica.
- $U A$ es el *overall heat transfer coefficient*.
- k_i es una const. prop. para el voltaje aplicado y la capacidad calorífica de la lámpara

Modelo Térmico, cont'd

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

● Control Temperatura

● Max. Unif.

● Jacobiano

● Jacobiano, cont...

● Experimental Results

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

El modelo térmico asociado con los replicator dynamics viene dado por:

$$\begin{aligned}\dot{x}_i &= x_i \left((B - T_i) - \frac{1}{P} \sum_{j=1}^N x_j (B - T_j) \right) \\ \dot{T}_i &= -a_i T_i + b_i x_i + a_i T_a\end{aligned}\quad (2)$$

Sistema de Control Nonlinear

Punto de Equilibrio

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

- Control Temperatura
- **Max. Unif.**
- Jacobiano
- Jacobiano, cont...
- Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

La temperatura final viene dada por

$$T_i^* = T_a + \frac{P}{\sum_{j=1}^N \frac{a_j}{b_j}} \quad (3)$$

la cual es constante para todo i .

Máxima Temperatura Uniforme para todas las Zonas

Método Indirecto de Lyapunov

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

● Control Temperatura

● Max. Unif.

● Jacobiano

● Jacobiano, cont...

● Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- Se analiza el modelo lineal y su Jacobiano...
- Se asume que las N zonas son las mismas, i.e., $a_i = a$ y $b_i = b$ para todo $i = 1, \dots, N$.
- Los puntos de equilibrio serían

$$x_i^* = \frac{P}{N}$$

$$T_i^* = T_a + \frac{bP}{4a}$$

para todo i .

Jacobiano

El Jacobiano sería:

$$\left(\begin{array}{cc|cc}
 \frac{\partial f_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_1}} & \dots & \frac{\partial f_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_{N-1}}} & \dots & \frac{\partial f_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_1}} & \dots & \frac{\partial f_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_N}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{\partial f_{N-1}(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_1}} & \dots & \frac{\partial f_{N-1}(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_{N-1}}} & \dots & \frac{\partial f_{N-1}(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_1}} & \dots & \frac{\partial f_{N-1}(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_N}} \\
 \hline
 \frac{\partial g_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_1}} & \dots & \frac{\partial g_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_{N-1}}} & \dots & \frac{\partial g_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_1}} & \dots & \frac{\partial g_1(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_N}} \\
 \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 \frac{\partial g_N(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_1}} & \dots & \frac{\partial g_N(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{x_{N-1}}} & \dots & \frac{\partial g_N(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_1}} & \dots & \frac{\partial g_N(e_{x_i}, e_{q_i})}{\partial e_{q_N}}
 \end{array} \right)$$

Jacobiano, cont...

$$J(e_{x_i}^*, e_{q_j}^*) = \left(\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{(N-1)^P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} & \dots & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{P}{N^2} & \frac{(N-1)^P}{N^2} & \dots & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} & \dots & \frac{(N-1)^P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ \hline -b & 0 & \dots & 0 & -a & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -b & \dots & 0 & 0 & -a & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -b & 0 & 0 & \dots & -a & 0 \\ b & b & \dots & b & 0 & 0 & \dots & 0 & -a \end{array} \right)$$

Jacobiano, cont...

$$J(e_{x_i}^*, e_{q_j}^*) = \left(\begin{array}{cccc|cccc} 0 & 0 & \dots & 0 & \frac{(N-1)^P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} & \dots & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{P}{N^2} & \frac{(N-1)^P}{N^2} & \dots & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & -\frac{P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} & \dots & \frac{(N-1)^P}{N^2} & -\frac{P}{N^2} \\ \hline -b & 0 & \dots & 0 & -a & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & -b & \dots & 0 & 0 & -a & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & -b & 0 & 0 & \dots & -a & 0 \\ b & b & \dots & b & 0 & 0 & \dots & 0 & -a \end{array} \right)$$

Los valores propios de J_e se pueden encontrar gracias a,

$$J_e \equiv \left(\begin{array}{c|c} O_{(N-1) \times (N-1)} & Q_{(N-1) \times N} \\ \hline B_{N \times (N-1)} & A_{N \times N} \end{array} \right)$$

Schur's Complement

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

● Control Temperatura

● Max. Unif.

● Jacobiano

● **Jacobiano, cont...**

● Experimental Results

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- El complemento de Schur de una matriz cuadrada no singular A se define como $(J_e/A) = O - QA^{-1}B$.
- El determinante de J_e está dado por $\det(J_e) = \det(A)\det(J_e/A)$.
- Entonces las raíces de $\det(\lambda I - J_e) = 0$ serían

$$\det(\lambda I - J_e) = \det(\lambda I - A)\det(\lambda I - Q(\lambda I - A)^{-1}B) = 0$$

Eigenvalues

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

- Control Temperatura
- Max. Unif.
- Jacobiano
- **Jacobiano, cont...**
- Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Los eigenvalues son

- $\lambda = -a$ and $\lambda = \frac{-Na \pm \sqrt{N^2 a^2 - 4bNP}}{2N}$ con multiplicidad $N - 1$.

Los eigenvalues tienen parte real negativa porque a , b , P , y N , son constantes positivas.

Eigenvalues

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

- Control Temperatura
- Max. Unif.
- Jacobiano
- **Jacobiano, cont...**
- Experimental Results

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

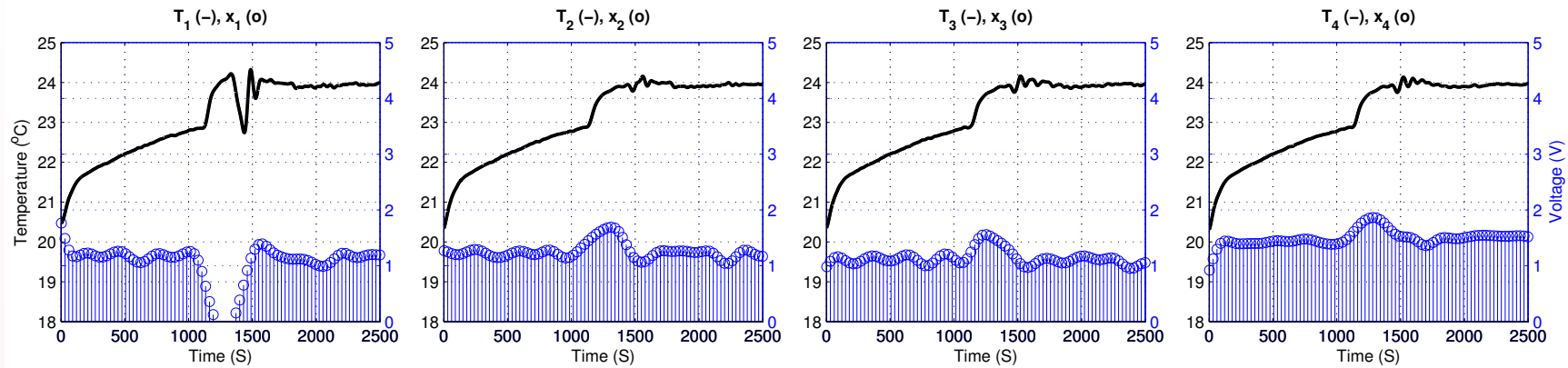
Los eigenvalues son

- $\lambda = -a$ and $\lambda = \frac{-Na \pm \sqrt{N^2 a^2 - 4bNP}}{2N}$ con multiplicidad $N - 1$.

Los eigenvalues tienen parte real negativa porque a , b , P , y N , son constantes positivas.

El punto de equilibrio es localmente asintóticamente estable.

Experimental Results



Parameters: $T_a = 20,5 \text{ } ^\circ\text{C}$

$v_1(0) = 2,5 \text{ V}$, $v_2(0) = 1,25 \text{ V}$, $v_3(0) = 0,75 \text{ V}$ and $v_4(0) = 0,5 \text{ V}$.

Disturbance in $t = 1100\text{s}$ in zone 1

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

- Sistema de N

Tanques

- Análisis de Estabilidad

- Tres Tanques

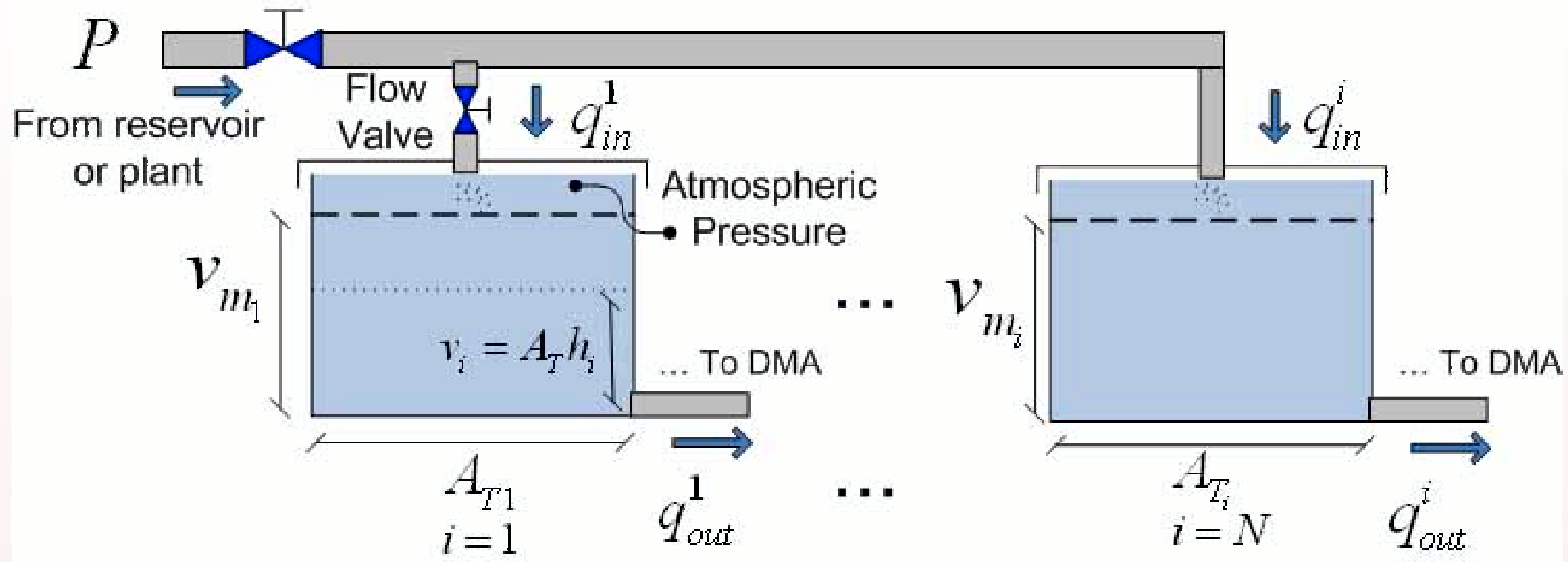
Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Water Distribution Systems

Sistema de N Tanques

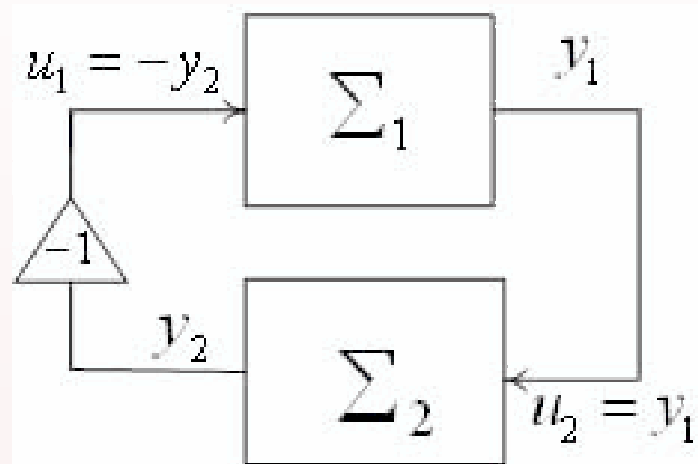


$$\dot{v}_i = x_i - c_i \sqrt{v_i}$$

$$\dot{x}_i = x_i \left(\frac{-k_i}{v_{m_i}} v_i + k_i - \frac{1}{P} \sum_{j=1}^N x_j \left(\frac{-k_j}{v_{m_j}} v_j + k_j \right) \right)$$

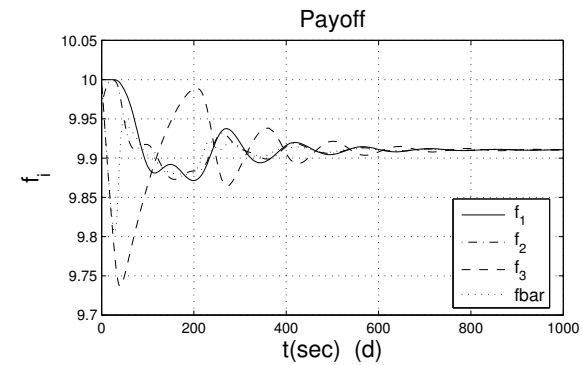
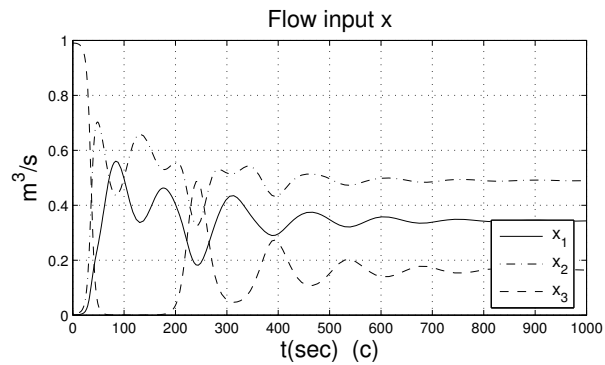
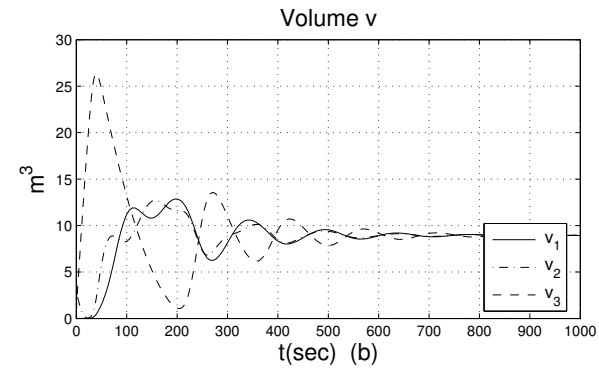
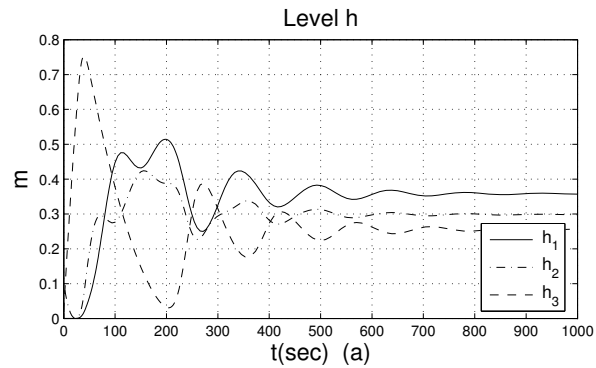
Análisis de Estabilidad

Para este caso el sistema se puede ver como un sistema interconectado con realimentación negativa, i.e.,



El análisis de estabilidad de los puntos de equilibrio se basa en las propiedades de pasividad \Rightarrow éstos son **LAS**.

Tres Tanques



a) Nivel de Cada Tanque

b) Volumen

c) Flujo de Entrada

d) Payoff

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

- Conceptos
- Algoritmo
- Forrajeo Social en Abejas

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

Honey Bee Social Foraging

Honey Bee Social Foraging Algorithm

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

● **Conceptos**

● Algoritmo

● Forrajeo Social en
Abejas

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

Modelado del forraje social de las abejas, el cual necesita de

- Representación dónde se realiza la búsqueda.
- Descarga del nectar.
- Decisiones basadas en la fuerza del baile.
- Asignación de los exploradores.
- Reclutamiento en el *dance floor*.
- Interacción con otras colmenas.



Algoritmo social bee foraging

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

● Conceptos

● **Algoritmo**

● Forrajeo Social en Abejas

Simulación de una Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

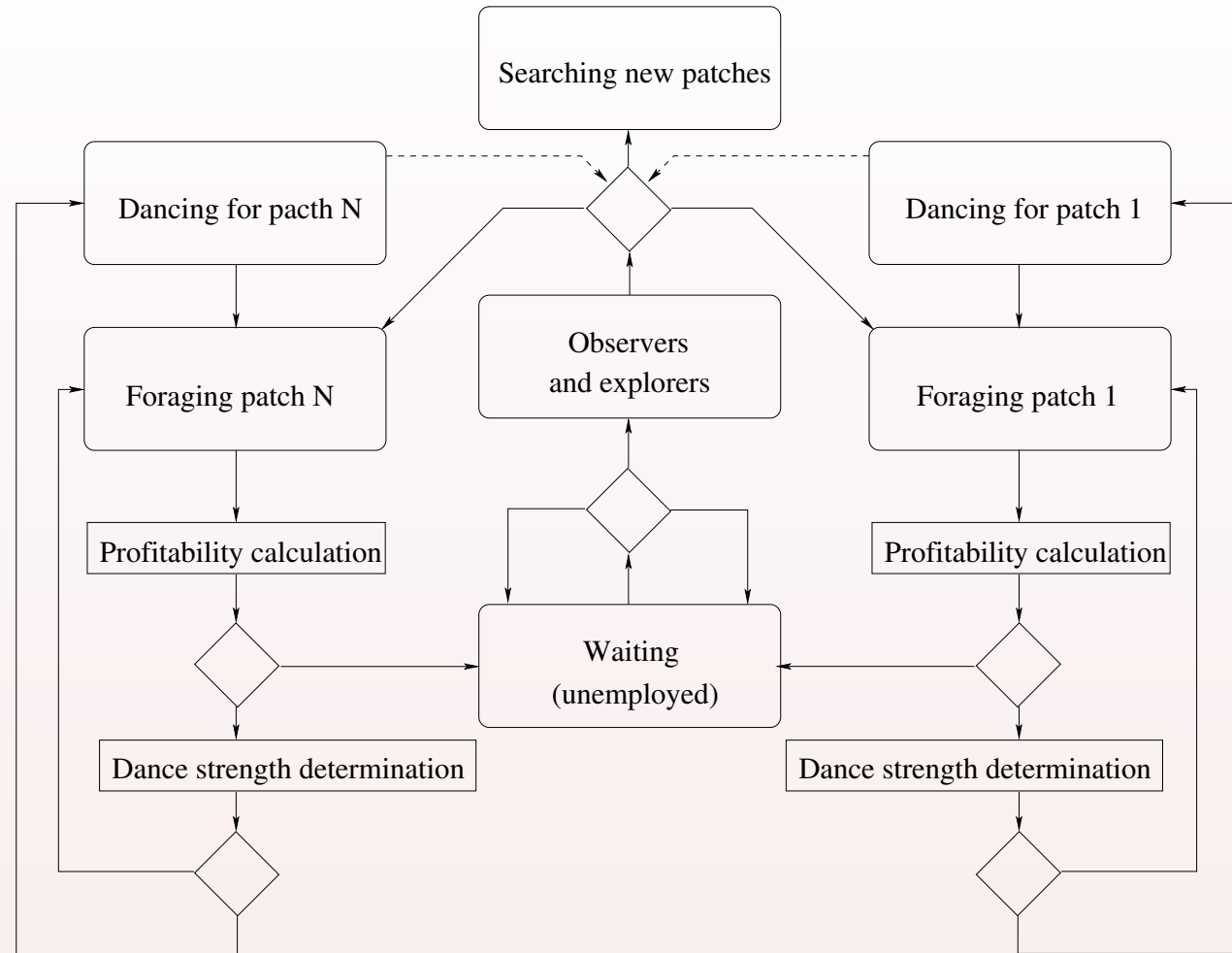


Figura 2: Roles, flujo de información, organización y estructura del modelo de la colonia.

Dance Strength Determination

Before we determine the dance strength...

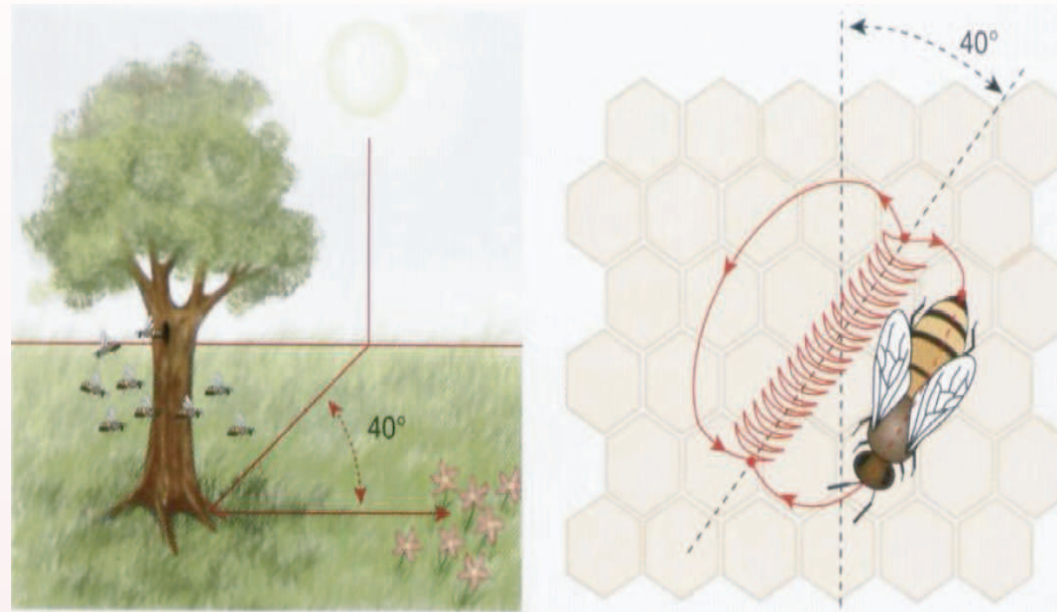


Figura 3: Honey Bee Waggle Dance. Figure taken from “Group Decision Making in Honey Bee Swarms,” Seeley, Visscher, and Passino.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

● Conceptos

● **Algoritmo**

● Forrajeo Social en Abejas

Simulación de una Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Forrajeo Social en Abejas

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

- Conceptos

- Algoritmo

- **Forrajeo Social en Abejas**

- Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

- Conclusiones y Otras Aplicaciones

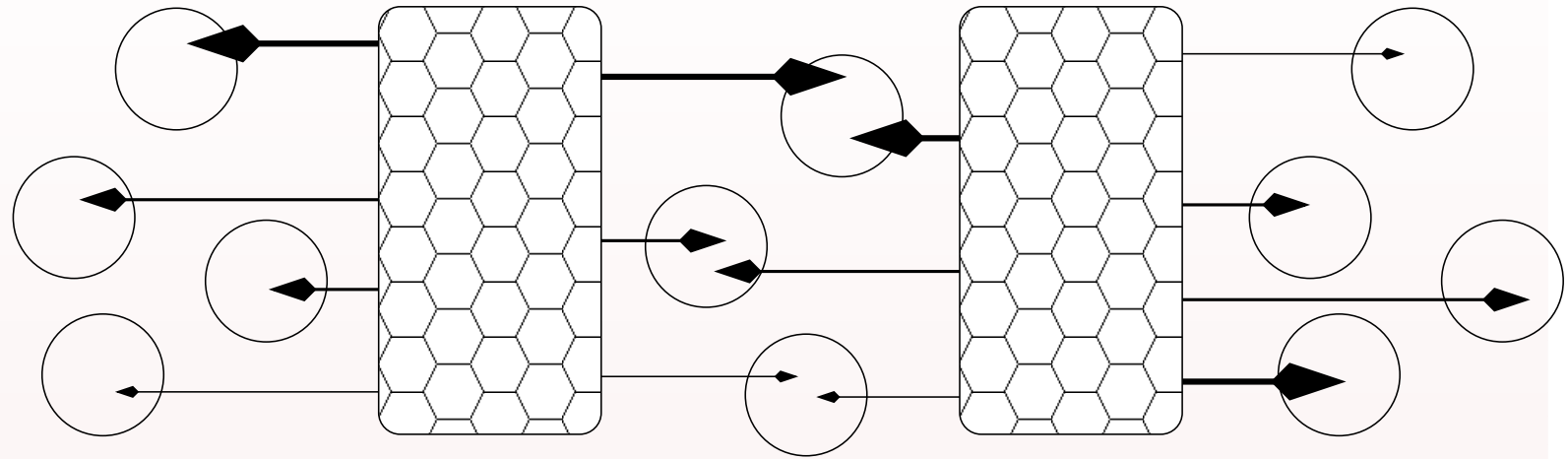


Figura 4: Asignación dinámica de abejas obreras.

Se demuestra que el IFD es un punto óptimo global para una sola y múltiples colmenas. Para el caso de n -colmenas, el hecho de que el IFD sea un punto óptimo global significa que si la asignación de las obreras de todas las colmenas excepto una están en el IFD, entonces la colmena “diferente” debe distribuir sus obreras de acuerdo al IFD si quiere maximizar su rentabilidad.

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

**Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante**

- Intersección Simple
- Simulación
- Resultados 1
- Resultados 2
- Resultados 3
- Resultados 4

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Intersección Simple

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

● Intersección Simple

● Simulación

● Resultados 1

● Resultados 2

● Resultados 3

● Resultados 4

Conclusiones y Otras Aplicaciones

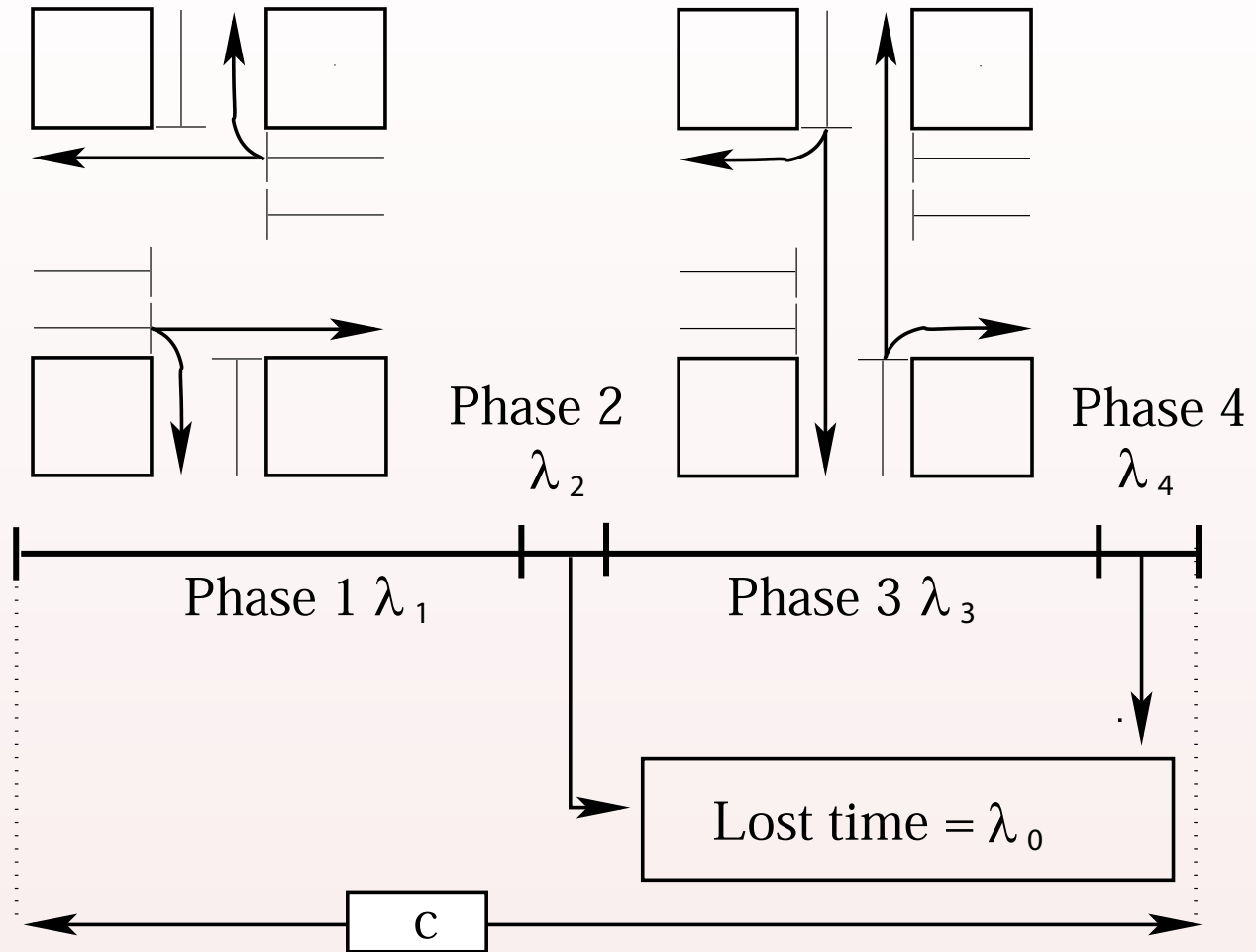


Figura 5: Fases de la intersección controlada con semáforos.

Simulación

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

- Intersección Simple
- **Simulación**
- Resultados 1
- Resultados 2
- Resultados 3
- Resultados 4

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- ★ **Objetivo: disminuir las filas $q_1(k)$ y $q_2(k)$, $k = 1, 2, \dots, Ne$.**
- ★ Ne : número de expediciones de la colmena.
- ★ Cada fase tiene asociado un hábitat i en el entorno simulado.
- ★ Los hábitats son porciones circulares de un plano cuadrado.
- ★ El número de abejas en el hábitat i es x_i , por lo tanto $\sum_{i=1}^N x_i = B$ que es el total de las abejas, y el total de tiempo disponible para asignar a las i fases.

Resultados con Flujo por Debajo del Punto de Saturación

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

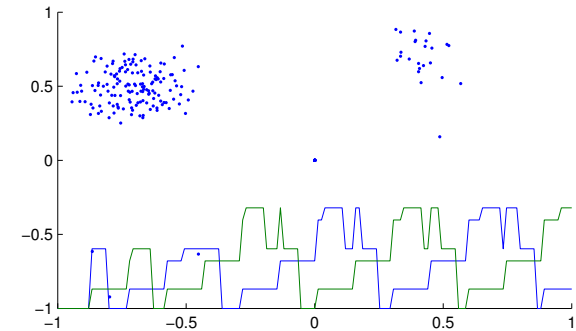
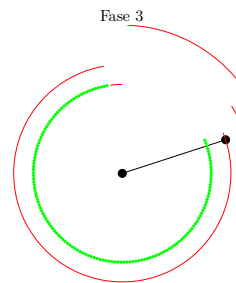
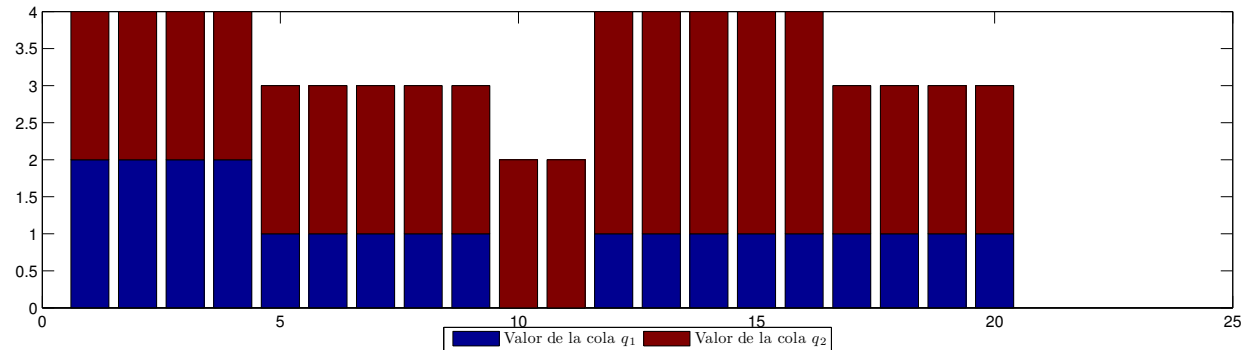
Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

- Intersección Simple
- Simulación
- **Resultados 1**
- Resultados 2
- Resultados 3
- Resultados 4

Conclusiones y Otras Aplicaciones



Emergencia de un IFD Bajo Condiciones de Saturación

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

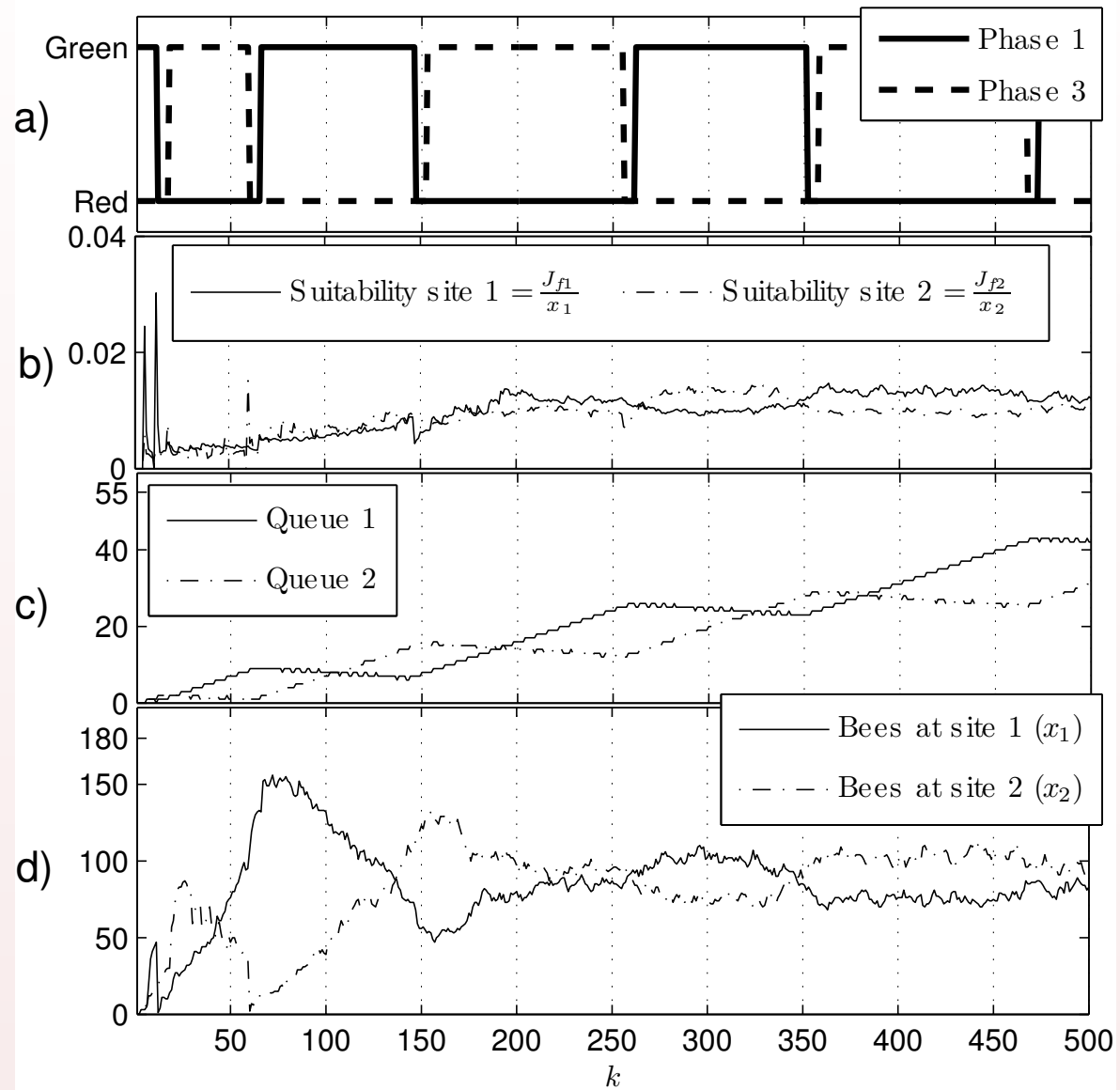
Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

- Intersección Simple
- Simulación
- Resultados 1
- **Resultados 2**
- Resultados 3
- Resultados 4

Conclusiones y Otras Aplicaciones



Modelo del Proceso Estocástico de Llegada de Vehículos

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

- Intersección Simple
- Simulación
- Resultados 1
- Resultados 2
- **Resultados 3**
- Resultados 4

Conclusiones y Otras Aplicaciones

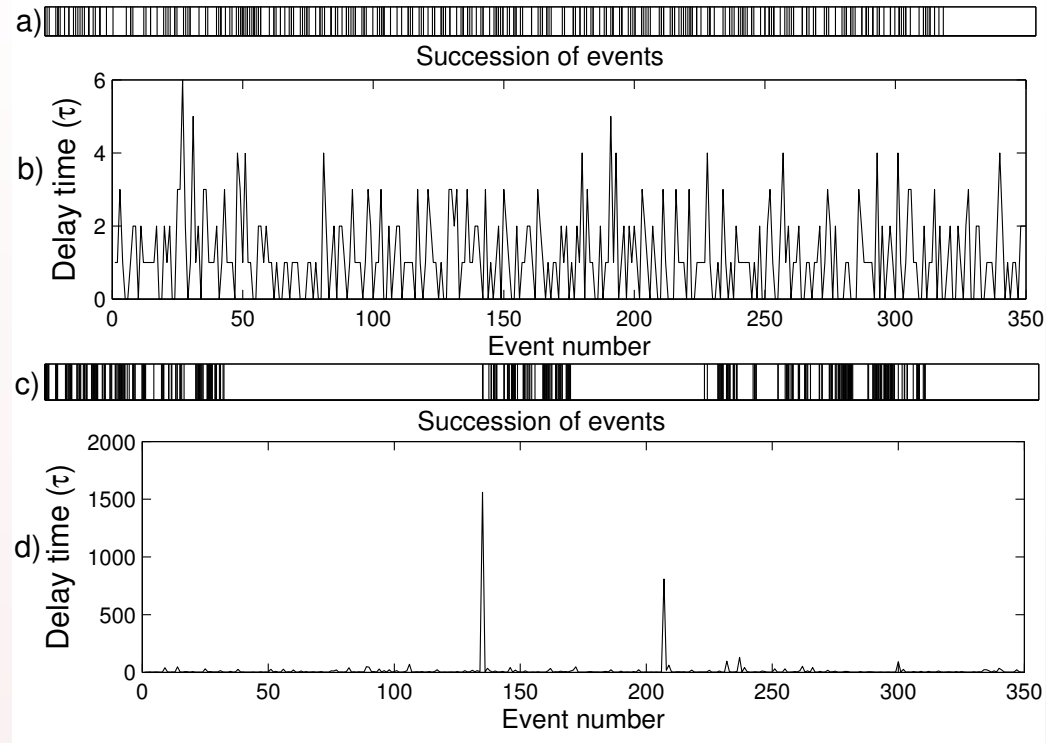


Figura 6: Differences in a stochastic process between a Poisson distribution and a heavy tailed distribution.

Emergencia de un IFD para Llegadas Aleatorias

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

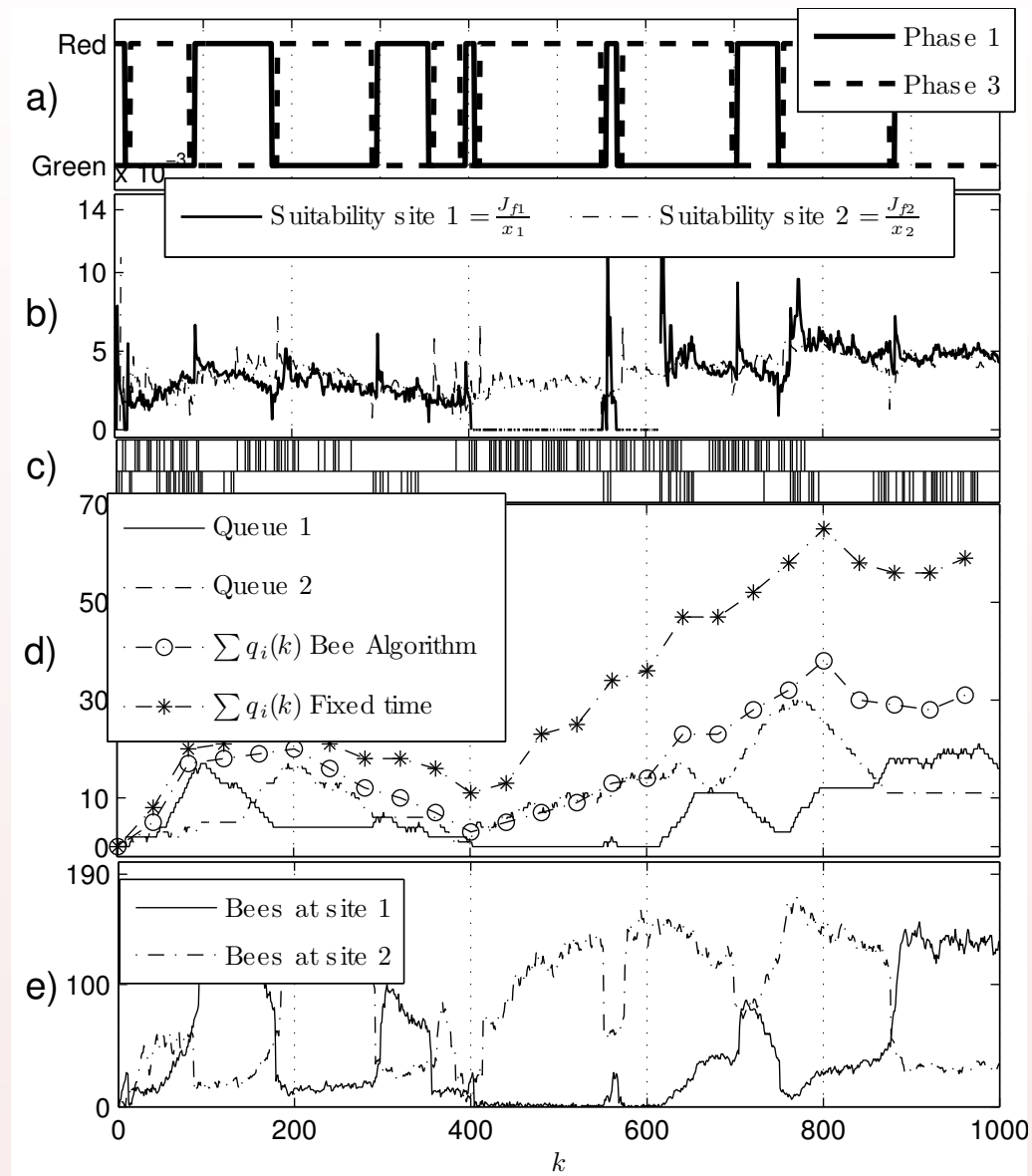
Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

- Intersección Simple
- Simulación
- Resultados 1
- Resultados 2
- Resultados 3
- **Resultados 4**

Conclusiones y Otras Aplicaciones



Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- Conclusiones
- Aplicaciones
- Agradecimientos

Conclusiones y Otras Aplicaciones

Conclusiones

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- **Conclusiones**
- Aplicaciones
- Agradecimientos

- ★ Cómo se pueden utilizar los conceptos de la naturaleza en la solución de problemas complejos de gran escala.
- ★ Existe una relación entre el IFD y la teoría de juegos evolutiva, así como un comportamiento dinámico que redundará en un punto de equilibrio asintóticamente estable.
- ★ Utilización de otra aproximación de la naturaleza, i.e., el forrajeo social.
- ★ Aplicaciones:
 - Control de temperatura con múltiples zonas que buscan una máxima temperatura uniforme.
 - Maximización uniforme del volumen en tanques de distribución y almacenamiento encontrados en WDS.
 - Control de tráfico urbano.

Aplicaciones

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution Systems

Honey Bee Social Foraging

Simulación de una Intersección Simple: Flujo Constante

Conclusiones y Otras Aplicaciones

- Conclusiones
- **Aplicaciones**
- Agradecimientos

- Scale-free Networks y el IFD: Se demuestra cómo un IFD emerge al modelar el sistema utilizando las premisas de una scale-free network.



- Pattern Recognition: utilización de los replicator dynamics para definir el tipo de cluster al que pertenecen los datos.



- Control de temperatura con múltiples zonas que buscan una máxima temperatura uniforme utilizando el algoritmo de forrajeo social de las abejas.

Agradecimientos

Contenido

Biomimicry

Ideal Free Distribution

Replicator Dynamics

Control de Temperatura

Water Distribution
Systems

Honey Bee Social
Foraging

Simulación de una
Intersección Simple:
Flujo Constante

Conclusiones y Otras
Aplicaciones

- Conclusiones
- Aplicaciones
- **Agradecimientos**

★ . . .
Andrés Pantoja, Eduardo Ramírez, Pablo Ñañez, Luis F. Giraldo,
Kevin M. Passino, Andrea Serrani, y Jorge Finke.

★ . . .
Quisiera agradecerle a José Ricardo Arteaga y a los organizadores
de este seminario por haberme invitado a dictar esta charla.

★ . . .