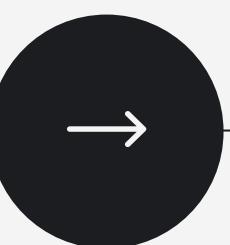


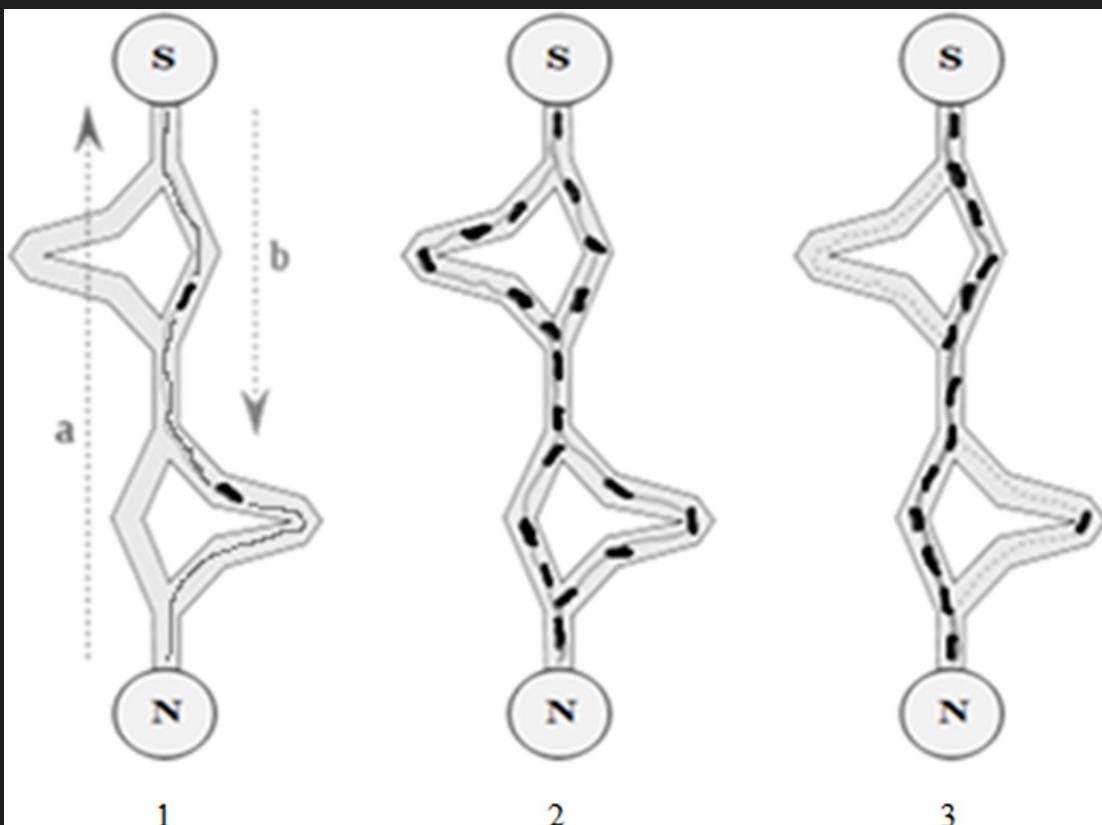
Algoritmos de Enrutamiento Basados en Inteligencia de Enjambre: Caracterización, Simulación e Implementación



AntNet

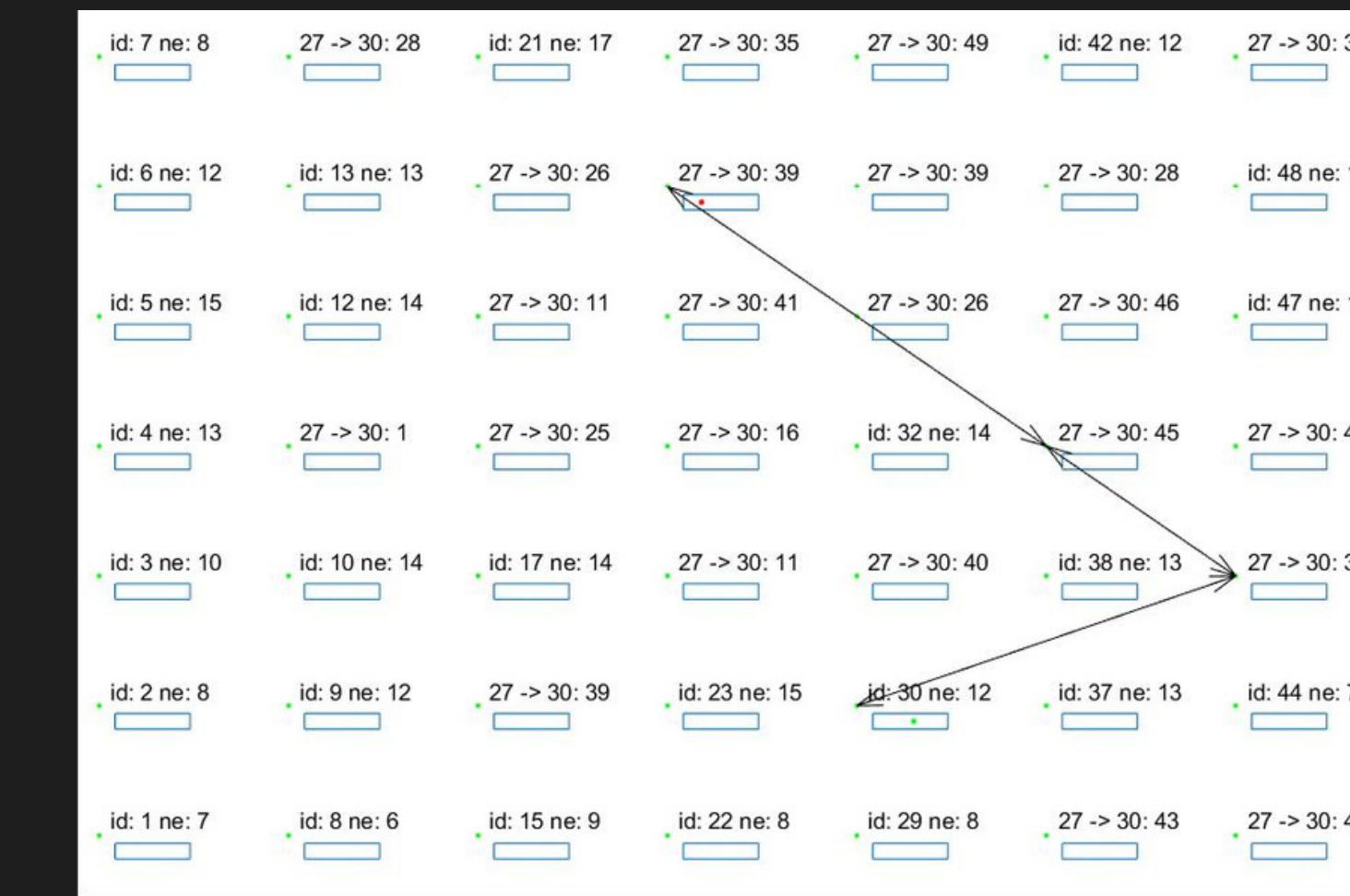
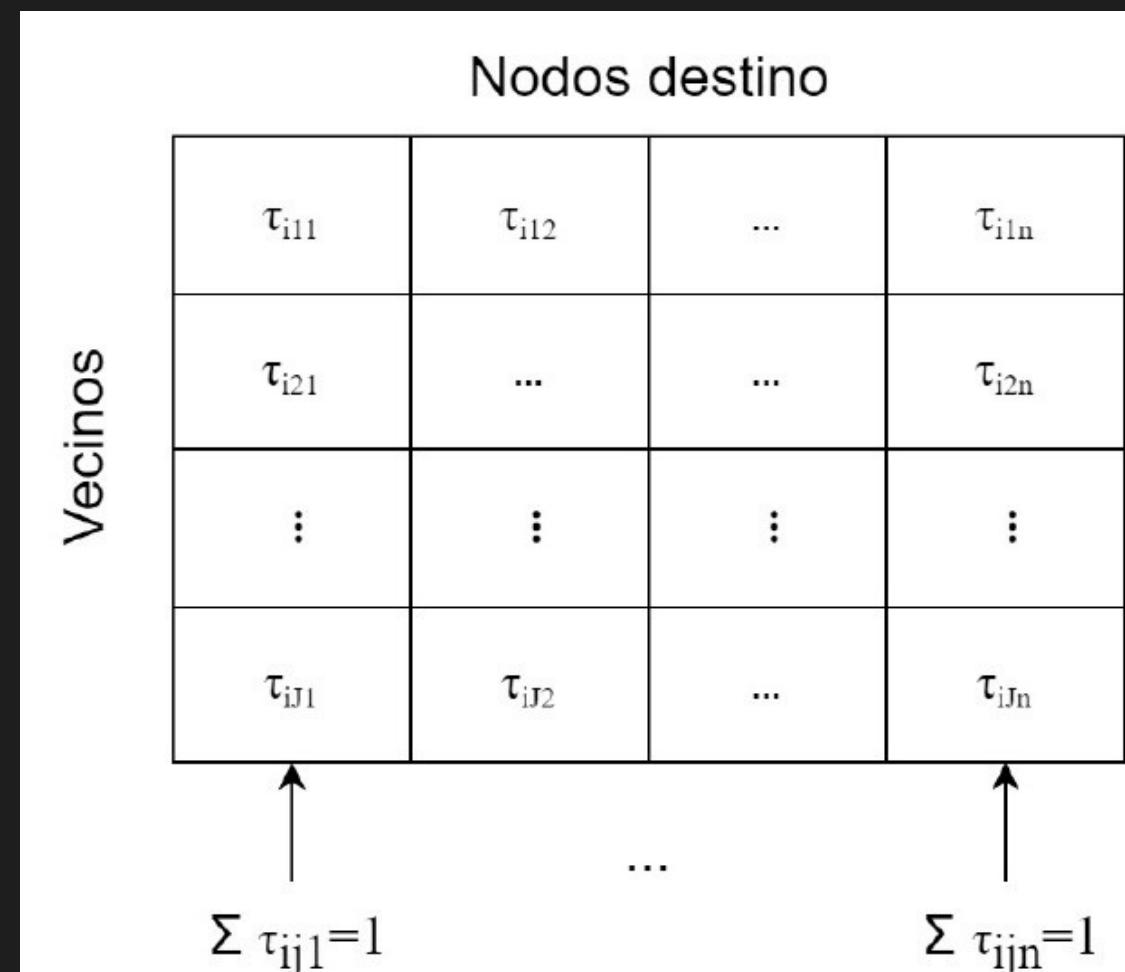
- Entendimiento
- Simulación
- Implementación en una redes inalámbricas

Ant Colony Optimization (ACO)



AntNet

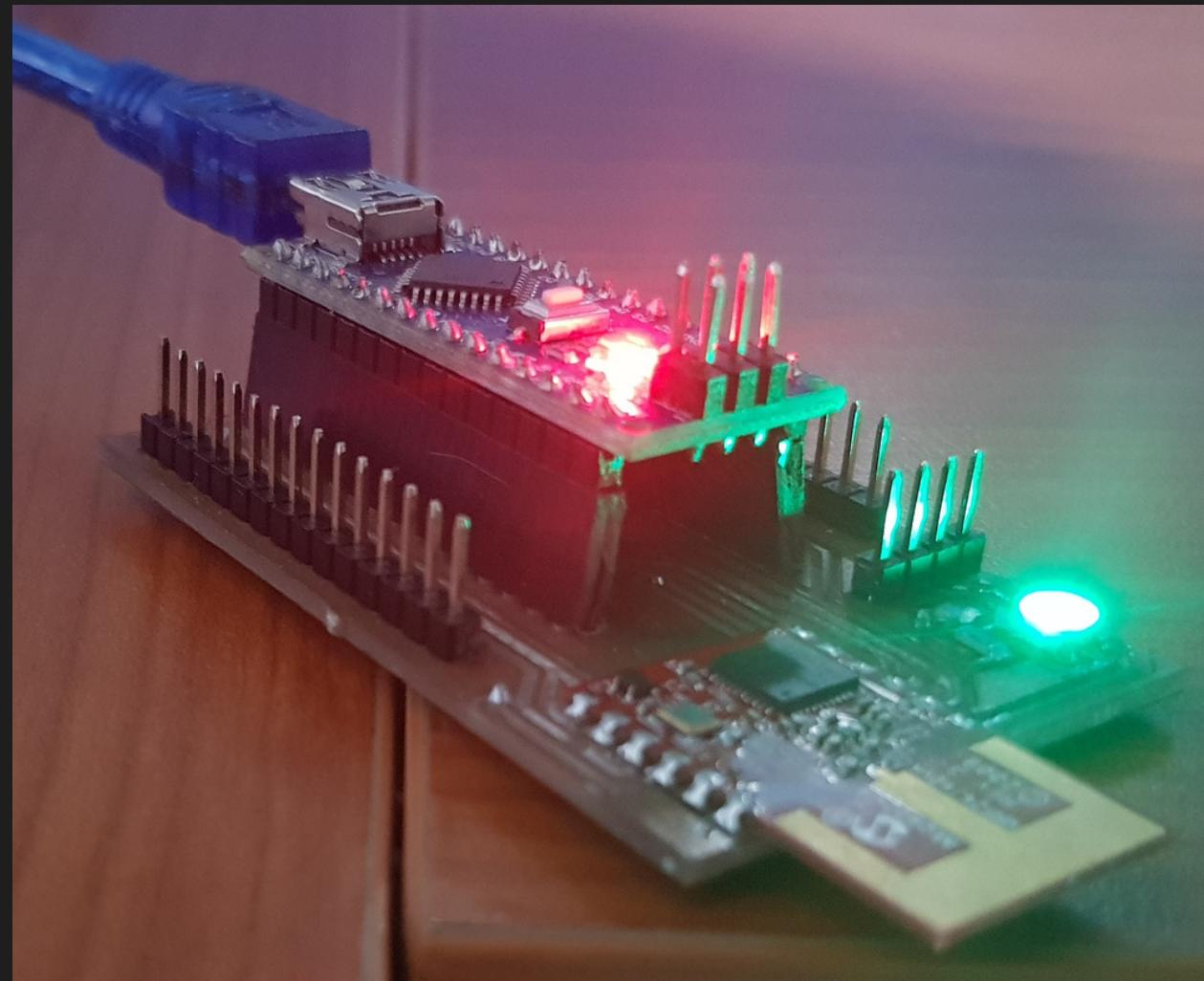
RESUMEN



RESUMEN

AntNet

Arduino/MRF24J40MA



C++/Comunicación Serial

```
COM8
Enviar
00:08:53.108 -> DEV ID: 0, DEV Address: 0x1A31
00:08:53.380 -> new neighbor
00:08:53.886 -> new neighbor
00:08:54.209 -> new neighbor
00:08:54.254 -> 0.300 0.400 0.000 0.300 36.740 1
00:08:54.438 -> 0.270 0.360 0.000 0.370 8.116 3
00:08:54.625 -> 0.343 0.324 0.000 0.333 40.964 0
00:08:54.857 -> 0.309 0.392 0.000 0.300 28.624 1
00:08:55.229 -> 0.278 0.352 0.000 0.370 7.456 3
00:08:55.416 -> 0.250 0.317 0.000 0.433 8.436 3
00:08:55.601 -> 0.225 0.285 0.000 0.489 7.792 3
00:08:55.691 -> new neighbor
00:08:55.830 -> 0.152 0.193 0.225 0.430 8.096 3
00:08:56.201 -> 0.137 0.173 0.203 0.487 6.172 3
00:08:56.431 -> 0.123 0.256 0.182 0.439 39.656 1
00:08:56.619 -> 0.111 0.230 0.164 0.495 6.824 3
00:08:56.853 -> 0.100 0.207 0.248 0.445 37.984 2
00:08:57.223 -> 0.090 0.187 0.323 0.401 37.408 2
Autoscroll Mostrar marca temporal Ambos NL & CR 115200 baudio Limpiar salida
```



Objetivo General



Establecer una base teórica y una plataforma de implementación de los algoritmos de enrutamiento basados en inteligencia de enjambre.

Objetivos Específicos

1. Caracterizar los protocolos de enrutamiento basados en inteligencia de enjambre.
2. Desarrollar una plataforma de simulación para los protocolos de enrutamiento más importantes.
3. Generar metodologías de implementación de estos protocolos.
4. Implementar un caso de uso de estos protocolos en una red inalámbrica física.



El problema de enrutar

- Ruta -> tabla de rutas
- Camino (*path*)
- Salto (*hop*)

Para cierto destino, hallar el próximo salto (Kushwaha y Kumar, 2014).

The diagram illustrates the process of finding a route through a network of nodes. On the left, a computer icon represents a source node sending data to a network of nodes. A green path is highlighted from the source node to a destination node. On the right, three routing tables are shown:

- Root's Routing Table:**

Destination	Next Hop
A::1	A::1
A::2	A::1
A::3	A::1
A::4	A::1
- A::1's Routing Table:**

Destination	Next Hop
A::2	A::2
A::3	A::3
A::4	A::3
- A::3's Routing Table:**

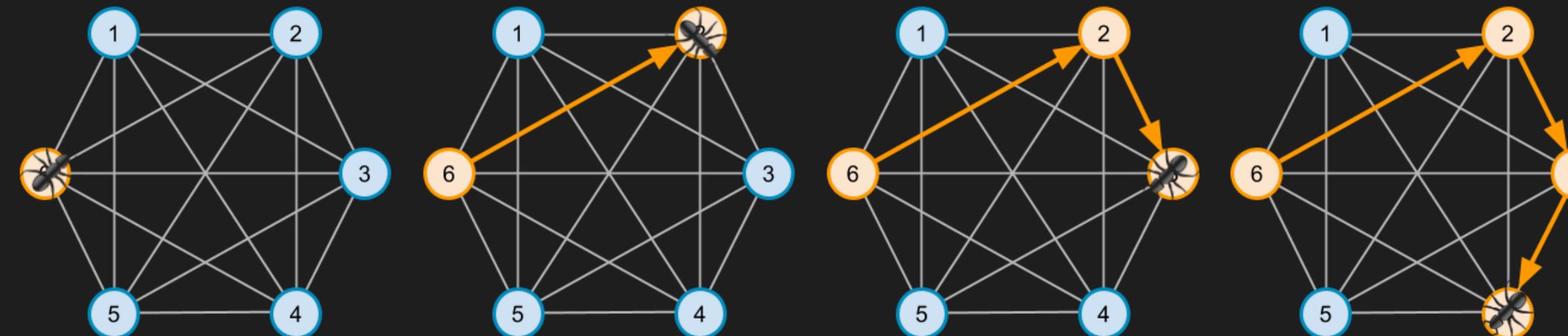
Destination	Next Hop
A::4	A::4

→

Red computacional y tabla de rutas (Fox, 2020).

Ant Colony Optimization

- Adaptación directa
- Mejor rendimiento que otros algoritmos distribuidos (Tatomir, Kroon y Rothkrantz, 2004).
- Camino más corto (shortest-path)
- Estigmergia -> feromona
- Retroalimentación positiva
- Aleatoriedad !!
- Modelo percepción - reacción !!

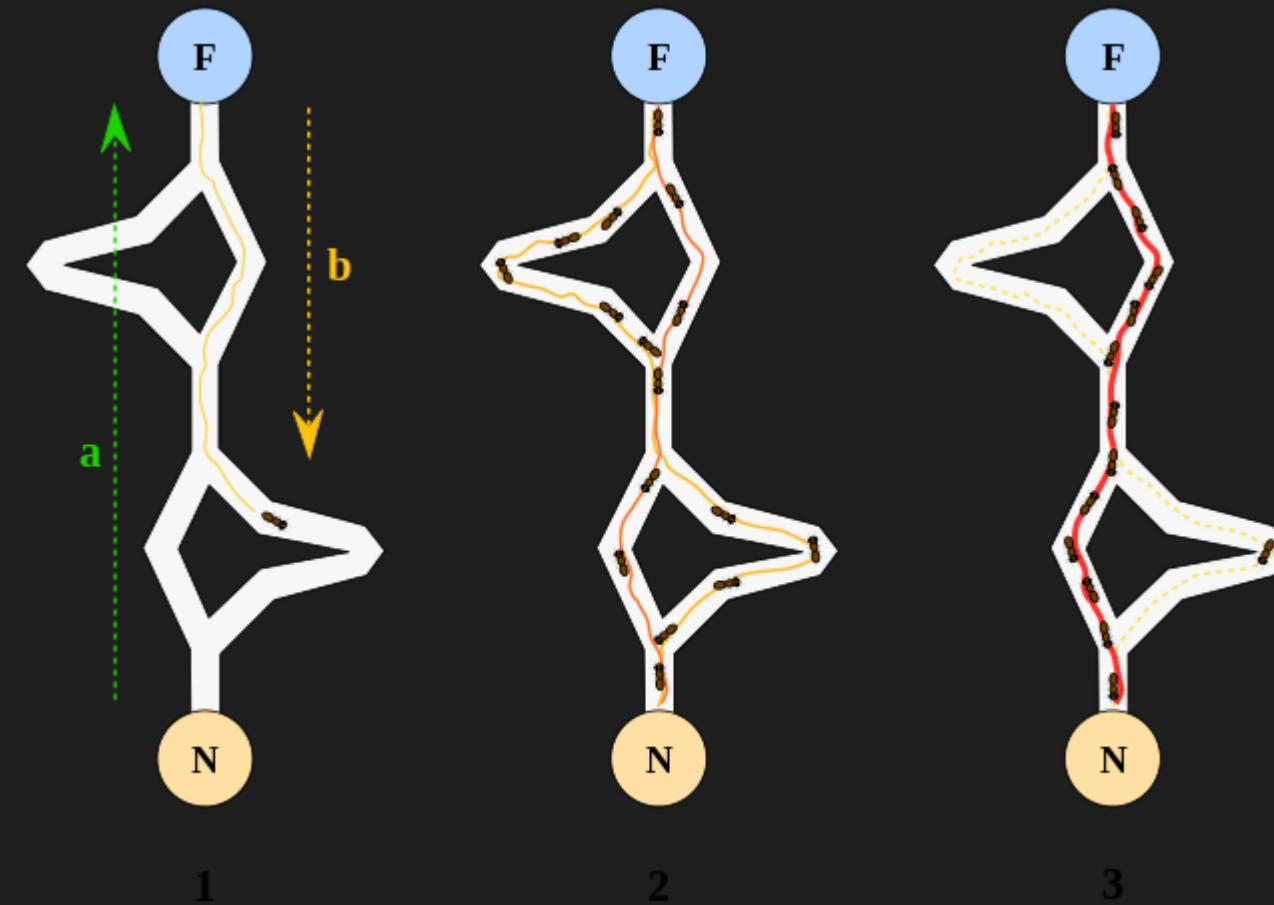


(Thiago, 2018)

Ant Colony Optimization

INTRODUCCIÓN

- Feromona -> deseable
- Misma feromona inicial
- El camino más corto es más rápido -> más feromona
- Retroalimentación positiva



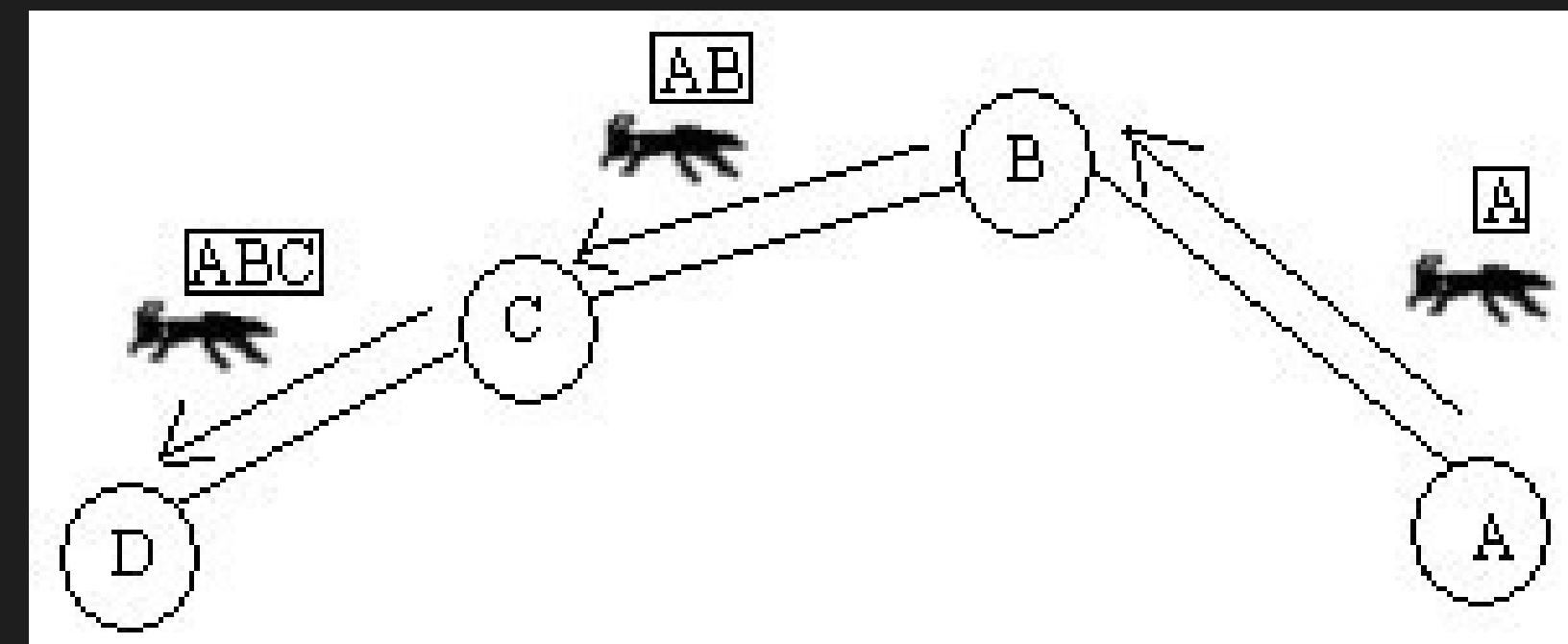
```
procedure ACO_MetaHeuristic is
    while not terminated do
        generateSolutions()
        daemonActions()
        pheromoneUpdate()
    repeat
end procedure
```



AntNet

Algoritmo de enrutamiento

- Basado en la estrategia de ACO
- Topología Plana -> todos los nodos tiene la misma operación
- Busca la minimización del tiempo de ida y vuelta o RTT (round trip time)
- Vector distancia



INTRODUCCIÓN

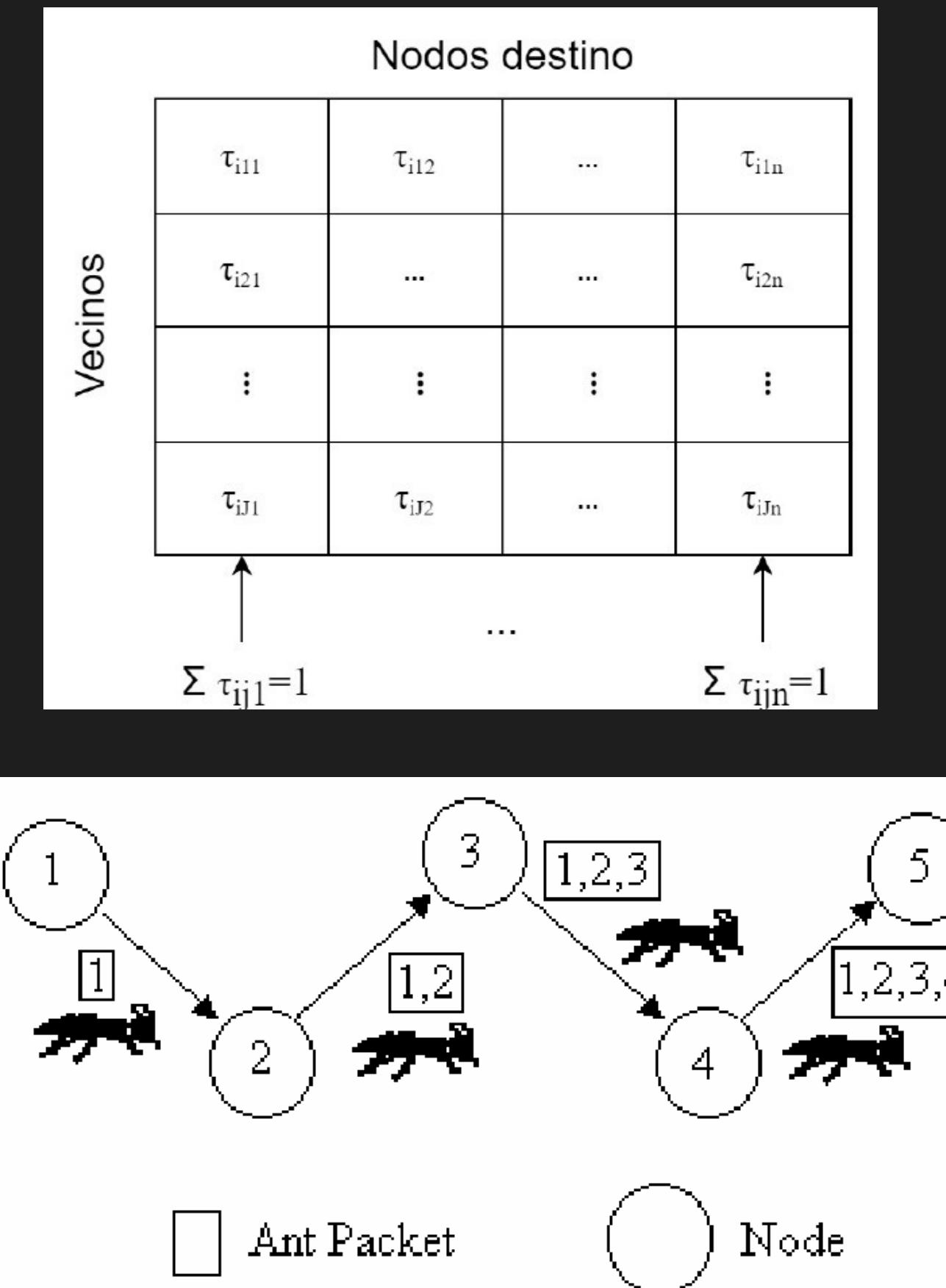
AntNet

Estructuras:

- Matriz de feromona
- Modelo de la red

Hormigas -> paquetes

- Forward
 - Generar soluciones aleatorias
 - Almacenar una pila
- Backward
 - Regresar sin bucles
 - Calcular el RTT
 - Actualizar las estructuras

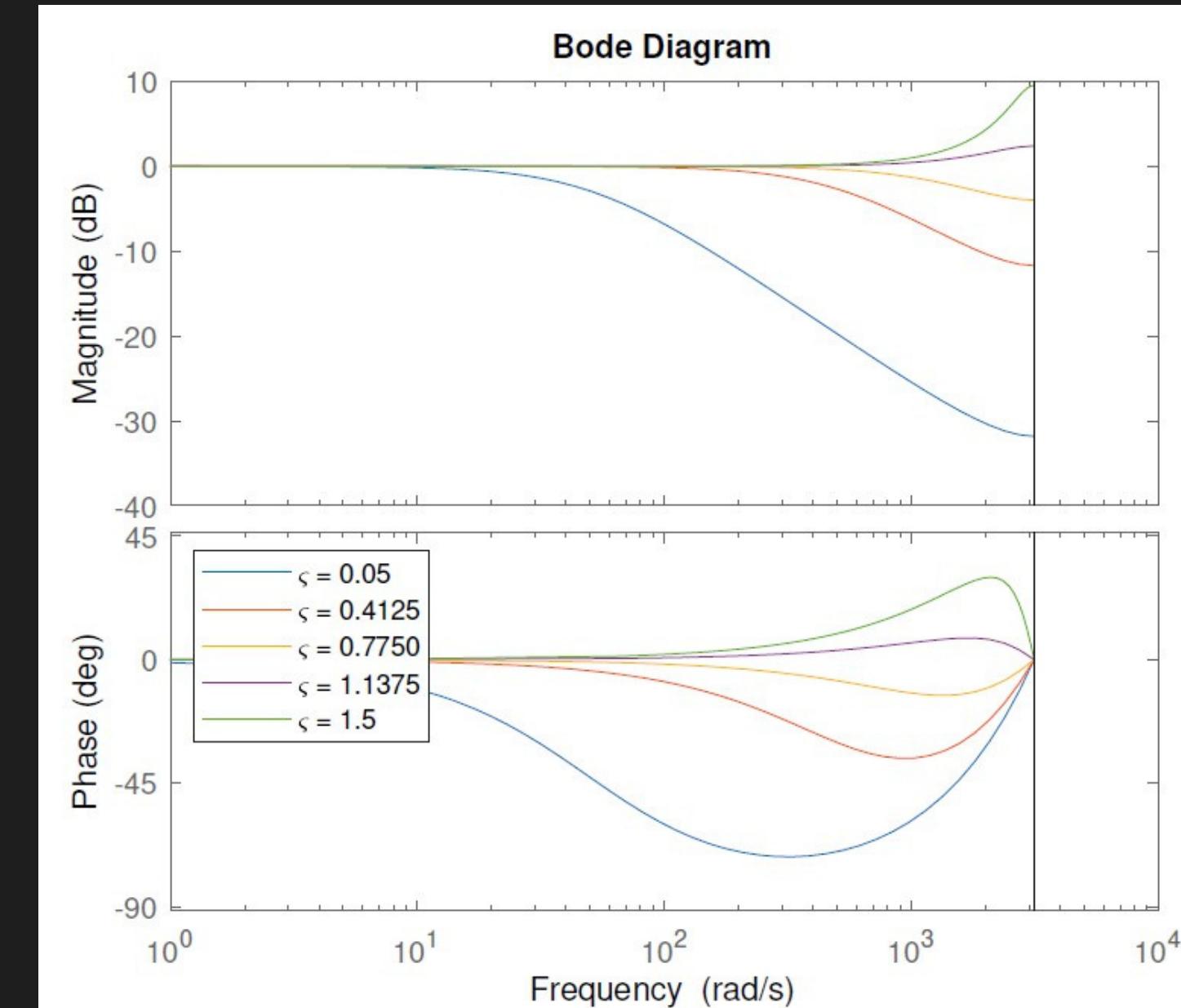


INTRODUCCIÓN

$$\begin{aligned}\mu_{i,d} &\leftarrow \mu_{i,d} + \varsigma(o_{i \rightarrow d} - \mu_{i,d}) \\ \sigma_{i,d}^2 &\leftarrow \sigma_{i,d}^2 + \varsigma((o_{i \rightarrow d})^2 - \sigma_{i,d}^2)\end{aligned}$$

$$H(z) \equiv \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{\varsigma z}{z + \varsigma - 1}$$

- Actualización del modelo del RTT



AntNet

AntNet

- Actualización de la matriz de feromona (refuerzo "r")

$$\tau_{ifd'} \leftarrow \tau_{ifd'} + r \cdot (1 - \tau_{ifd'})$$

$$\tau_{ijd'} \leftarrow \tau_{ijd'} - r \cdot \tau_{ijd'}, \quad j \neq f$$



- El problema de definir el refuerzo (qué tanto recompensar) (Middendorf y Merkle, 2006).

$$r' = c_1 \left(\frac{W}{o} \right) + c_2 \left(\frac{I_{sup} - I_{inf}}{(I_{sup} - I_{inf}) + (o - I_{inf})} \right)$$

W es el mejor valor de la media en las últimas N muestras.
Se utiliza un intervalo de confianza para el modelo del RTT.

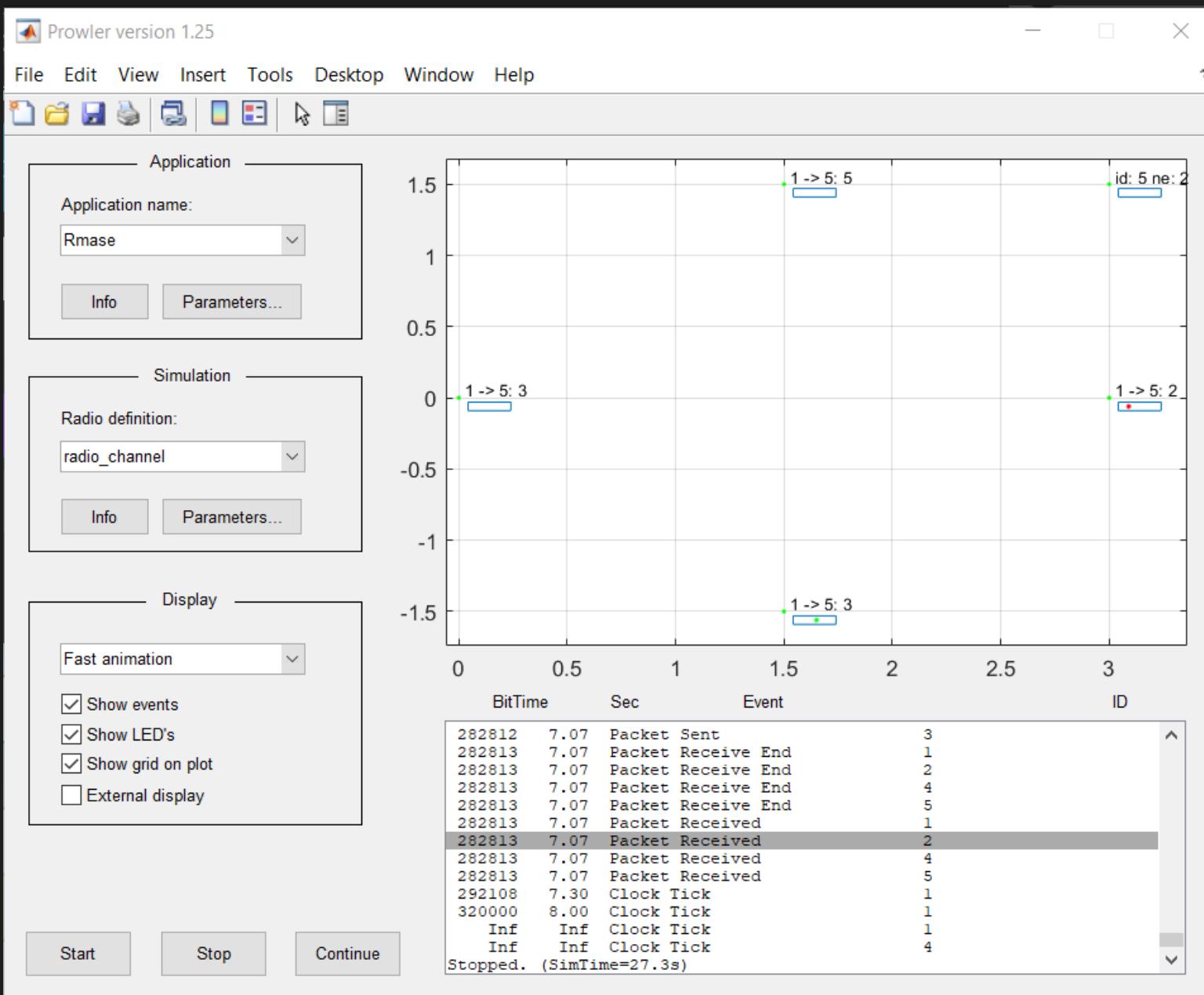
Objetivo específico

1. Caracterizar los protocolos de enrutamiento basados en inteligencia de enjambre.



Plataforma de simulación

- RMASE (Routing Modeling Application Simulation Environment) (Zungeru, Ang y Seng, 2012) y MATLAB.

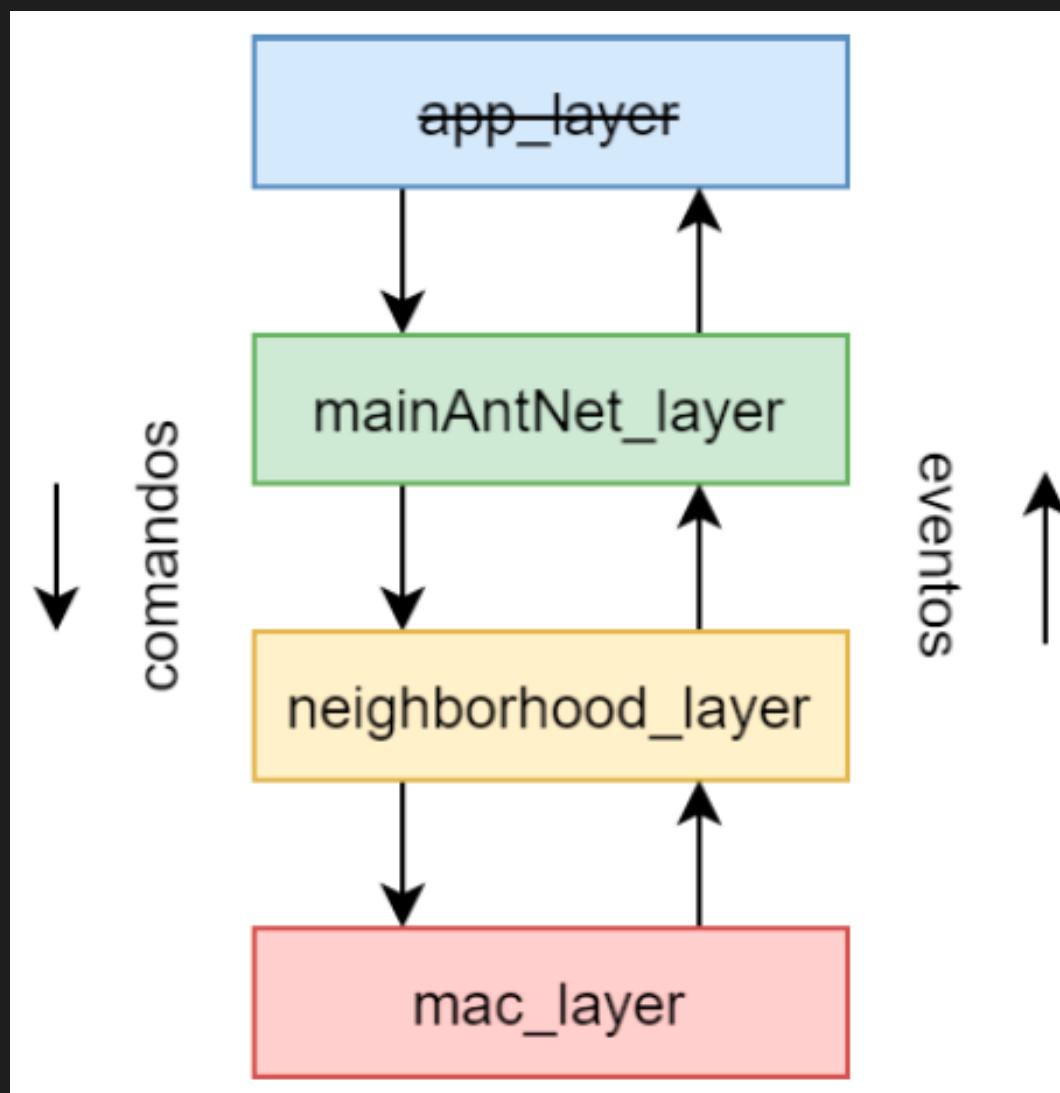


- Prowler: comunicación inalámbrica
- Topología
- Arquitectura modular
- Permite definir capas
 - Por medio de archivos .m que definen el comportamiento de los individuos



Plataforma de simulación

Arquitectura modular



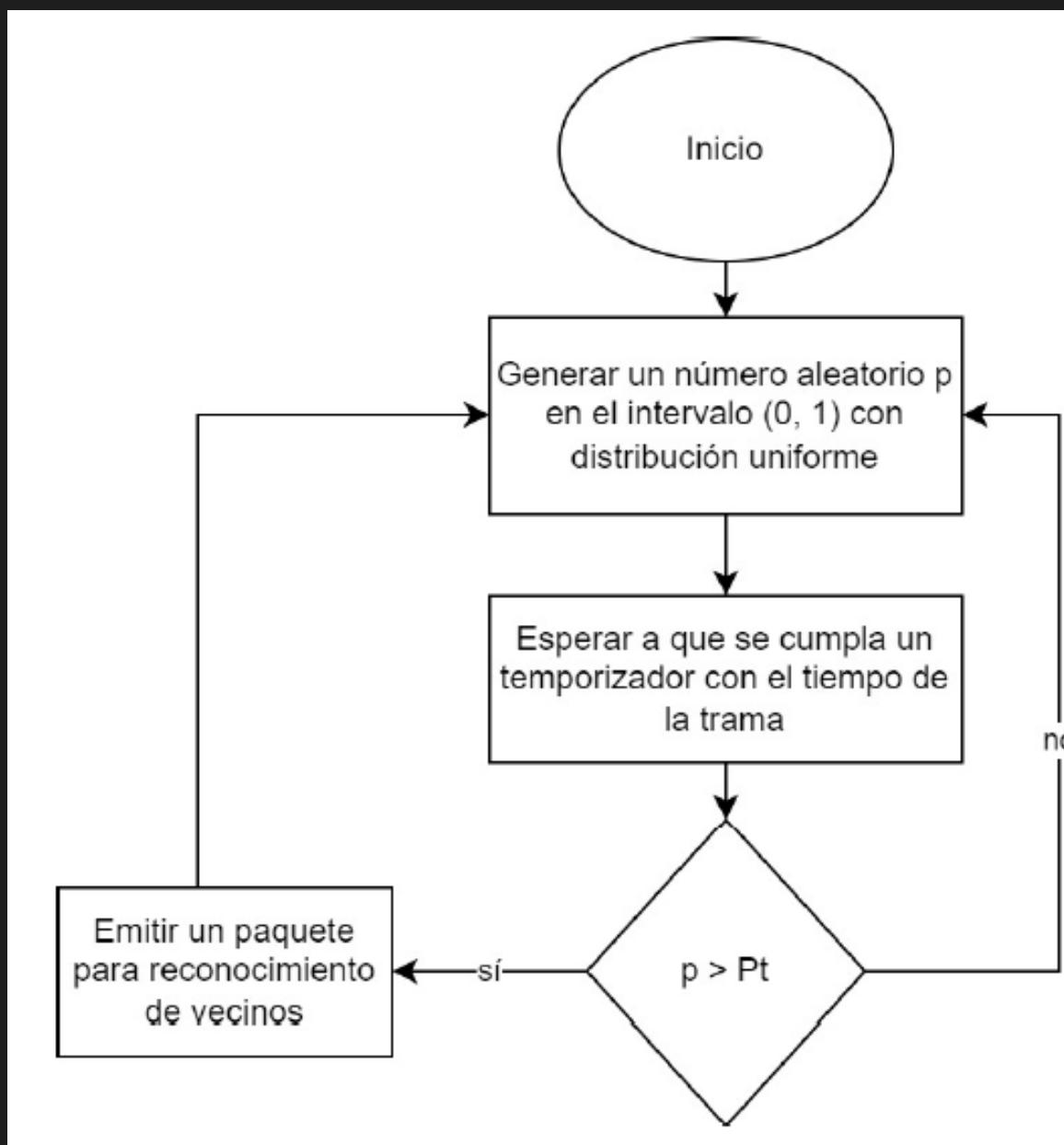
Estructura de los componentes

```
function status = mainAntNet_layer(N, S)  
% ...  
  
switch event  
case 'Init_Application',  
    % Evento de inicio del programa  
  
case 'Send_Packet',  
    % Evento para enviar paquete  
  
case 'Packet_Received',  
    % Evento para recibir paquete  
  
case 'Clock_Tick',  
    % Evento de temporizador  
end  
  
% ...  
  
% definir comandos para el componente  
end
```



Descubrimiento de vecinos

Asumiendo nodos coordinados a nivel de trama (time-slot) (Towsley, Kurose y Vasudevan, 2005).



- Descubrimiento directo
- Se envía un mensaje de descubrimiento con probabilidad:

$$P_t \approx \frac{2\pi}{k\theta}$$

Donde k es un estimado de los vecinos descubribles, se usó $k = N$



Memoria y convenciones

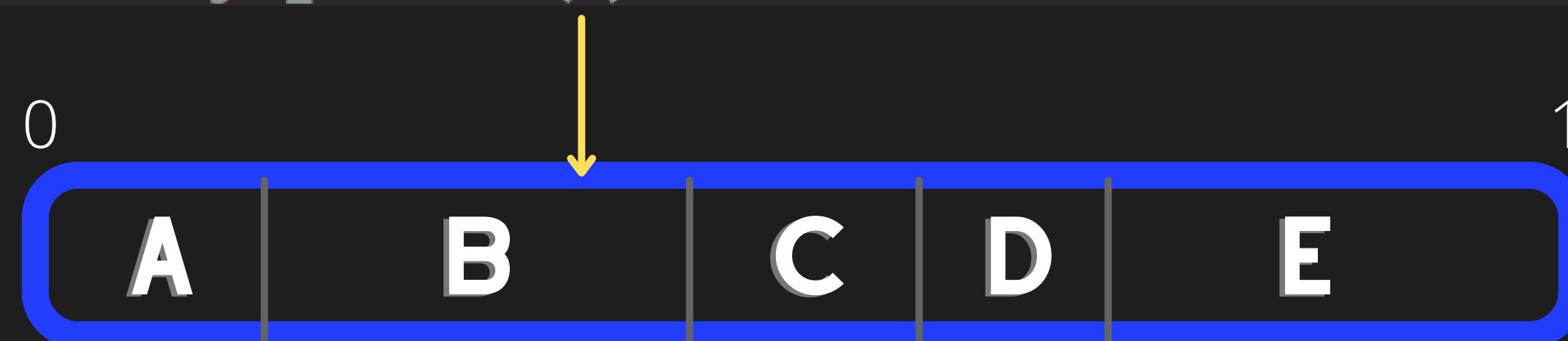
- Para la implementación, se asume que los nodos conocen las direcciones capa 3 de los otros nodos. Las variables que maneja cada nodo son
 - 'neighbors_count': un contador de vecinos
 - 'destinations': un vector fila con las direcciones de los otros nodos
 - 'T_matrix': la matriz de feromona $k \times N$
 - 'S_matrix': una matriz de $L \times N$ para los modelos del RTT
- Para el envío de paquetes se definen los siguientes identificadores:
 - 0 -> vecinos
 - 1 -> forward
 - 2 -> backward



Funciones implementadas

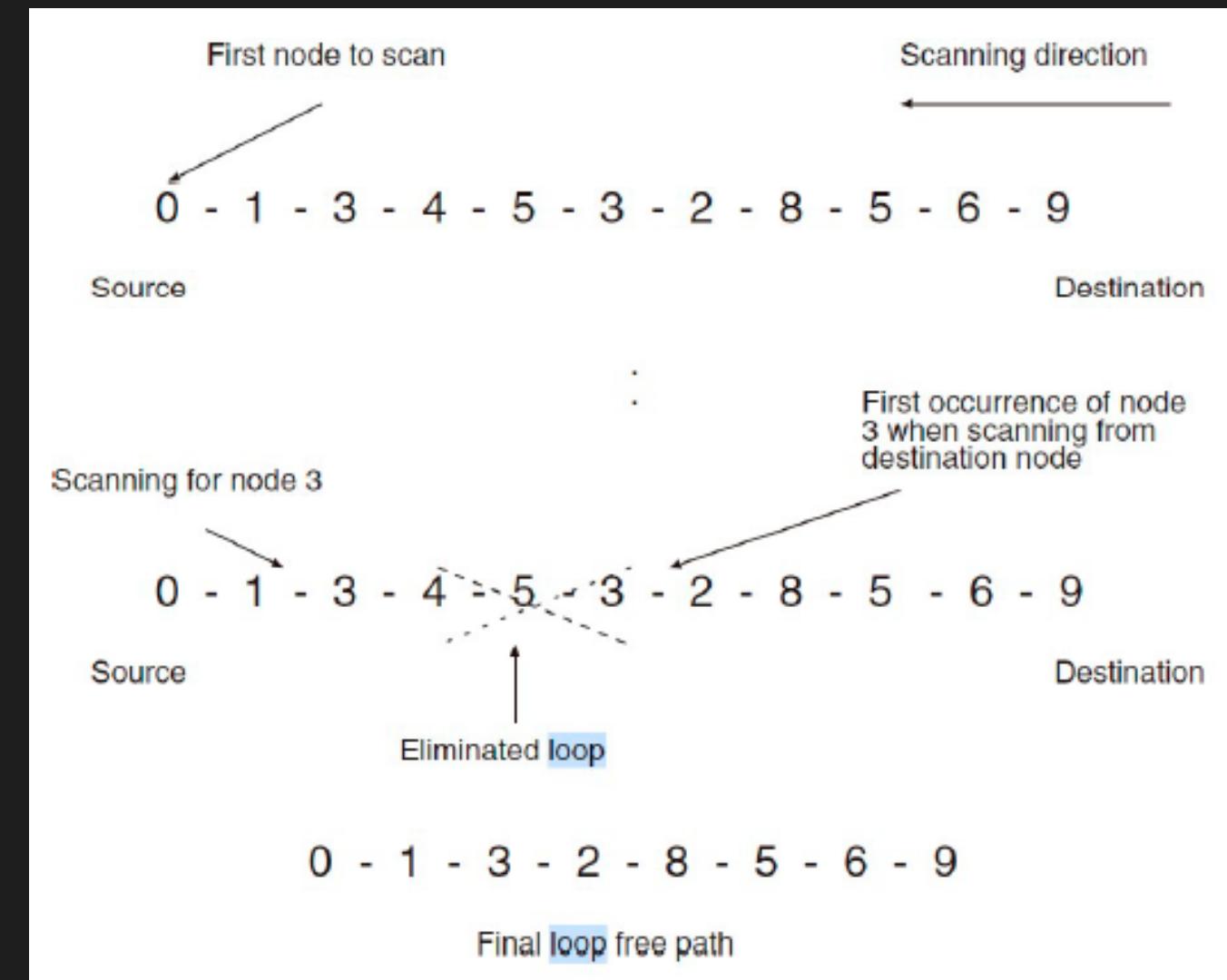
Escoger uno entre M elementos con una distribución de probabilidad dada

```
1 Function escoger_elemento(arreglo_pesos, arreglo_elementos):
2     S = sumar_elementos(arreglo_pesos)
3     arreglo_pesos = arreglo_pesos / S # normalizar la suma
4     t = numero_aleatorio(0, 1)      # número aleatorio entre 0 y 1
5     k = 0                          # primer índice del arreglo de elementos
6     suma_acumulada = arreglo_pesos(k)
7     while t > suma_acumulada
8         k = siguiente_indice()
9         suma_acumulada = suma_acumulada + arreglo_pesos(k)
10    return arreglo_elementos(k)
```



Funciones implementadas

Remover los bucles del camino de retorno para las homirgas de backward

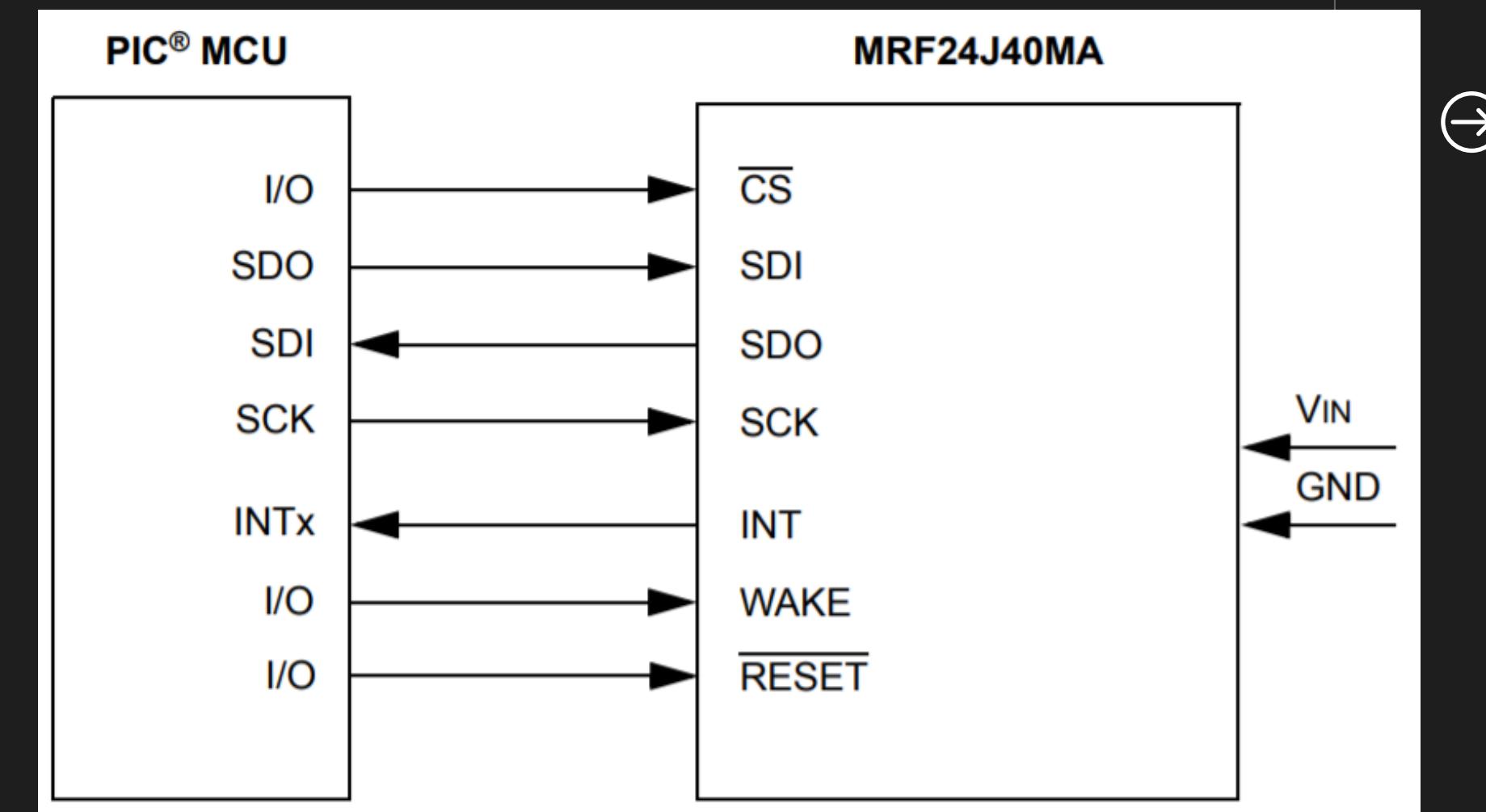


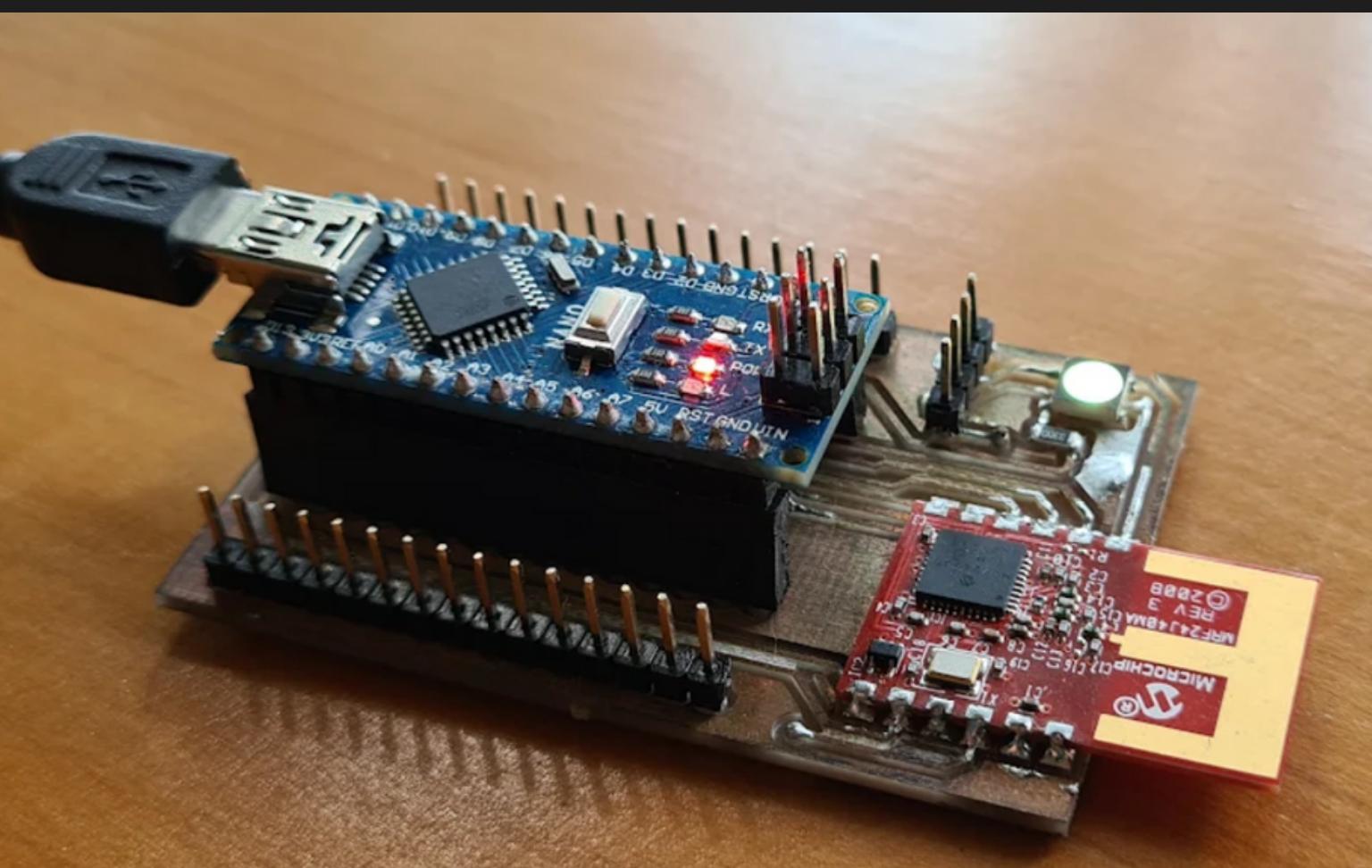
(Towsley, Kurose y Vasudevan, 2005)

Plataforma física

Arduino Nano & MRF24J40MA

- Amplia cantidad de librerías para Arduino
- Facilidad de desarrollo
- Banda de 2.4 GHz
- Hasta 400 pies
- *Protocolos P2P !!*
 - *Arduino 33 IoT*

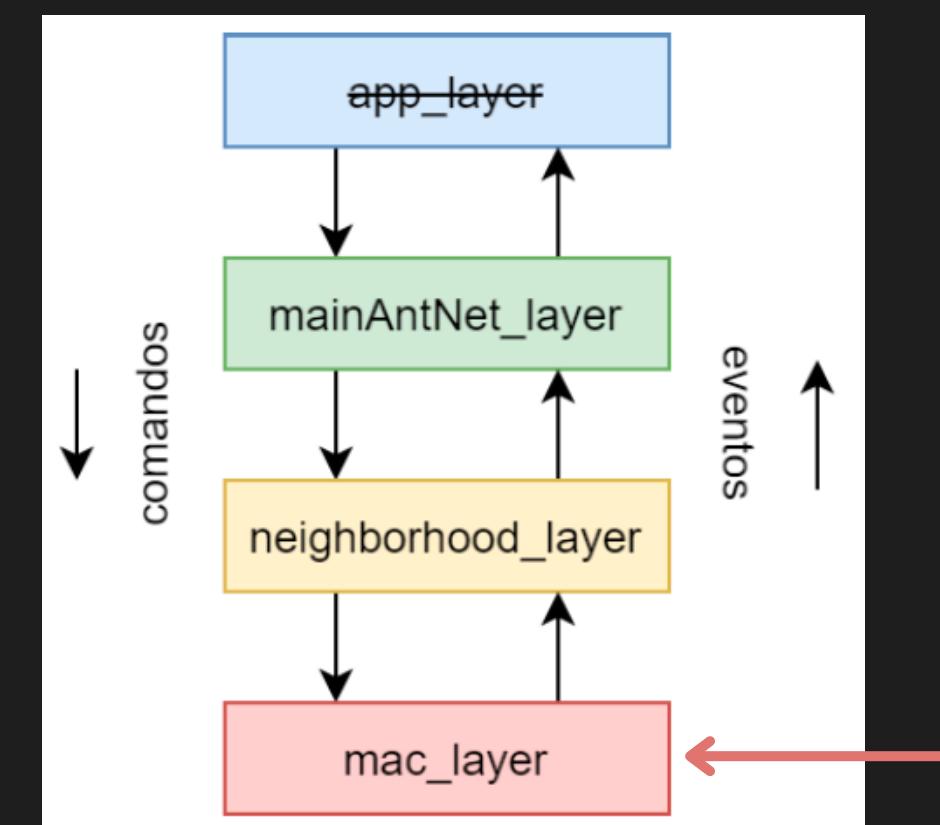




Librería y placa

Placa como shield (Chan, 2021)

- Librería "mrf24j40ma.h" (Chan, 2021) y (Palson, 2011).



Consideraciones adicionales

- Descubrimiento de vecinos: no alineados cada 1.5 s
- Un mismo canal y PAN para los nodos
- Se definieron direcciones de 16 bits para cada nodo : 0x1A31
- Se definió una estructura para el paquete de ruteo:



Índice	0	1	2	4	6	8
Tamaño	1 byte	1 byte	2 bytes	2 bytes	2 byte	4 bytes
Nombre	data_type	payload_size	source_address	destination_address	hop_address_1	time_address_1

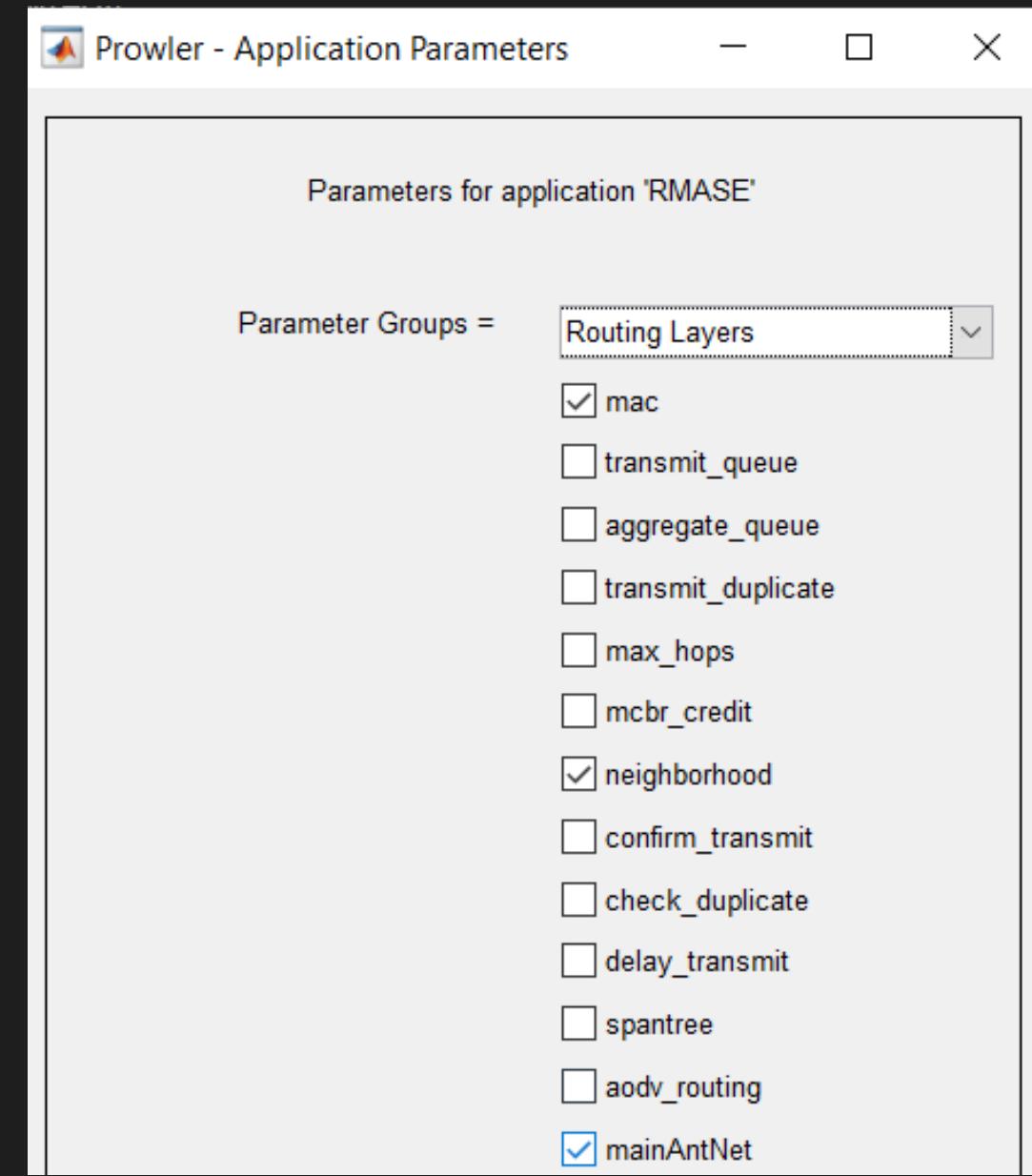
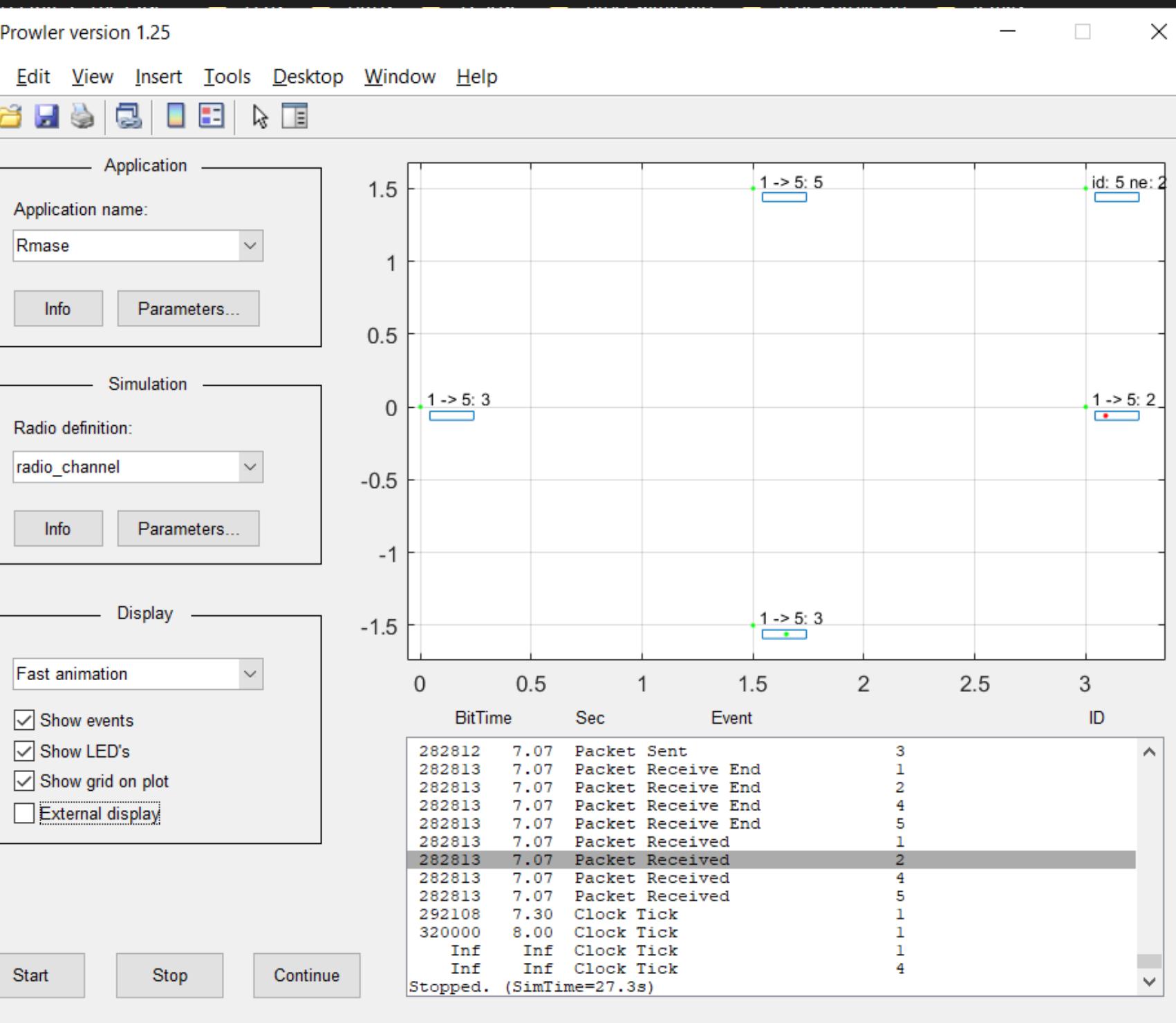
Esto genera un tamaño máximo de paquete de $6 + 6 * \text{max_hops}$ bytes

Objetivo específico

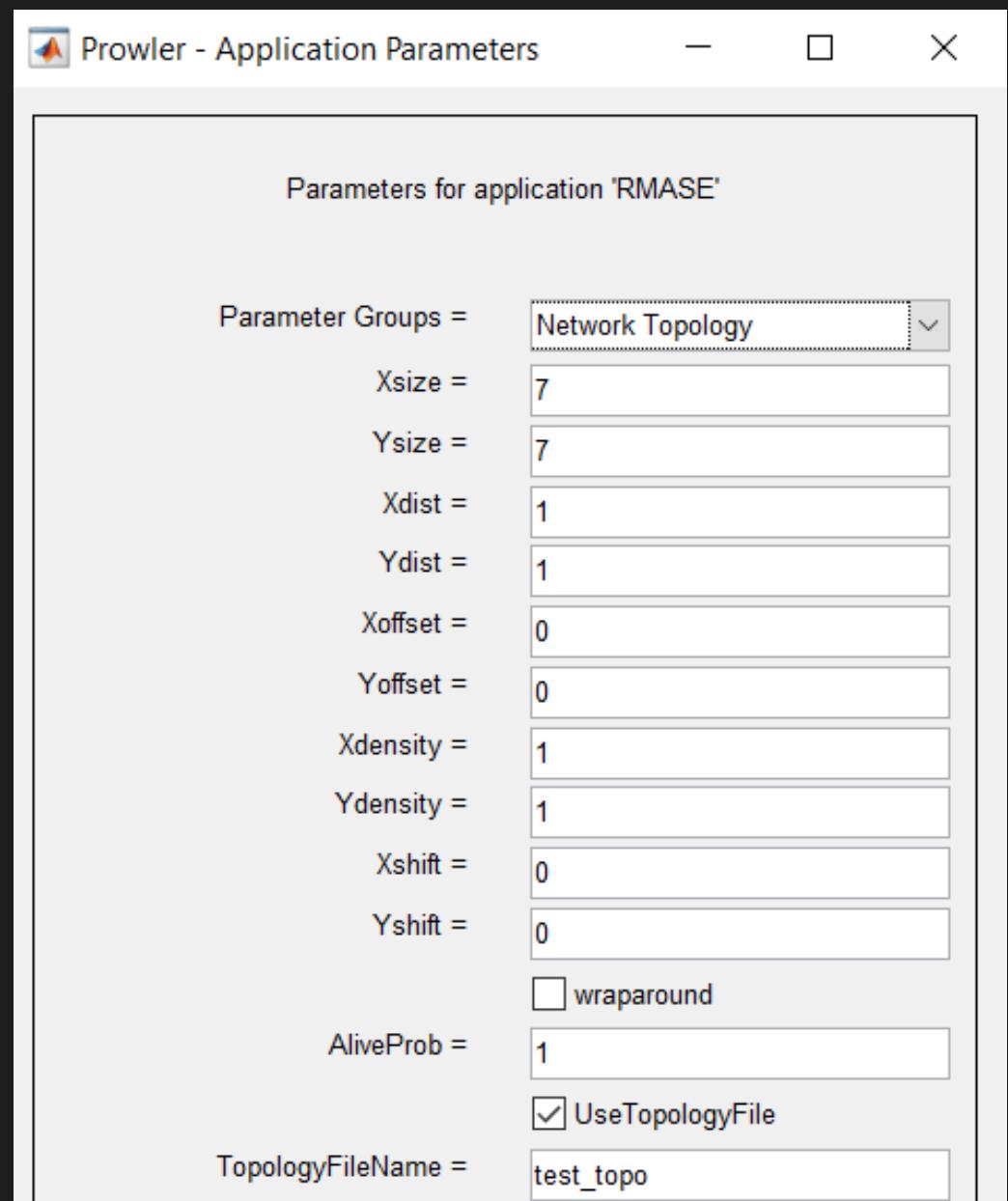
3. Generar metodologías de implementación de estos protocolos.



RESULTADOS



RESULTADOS



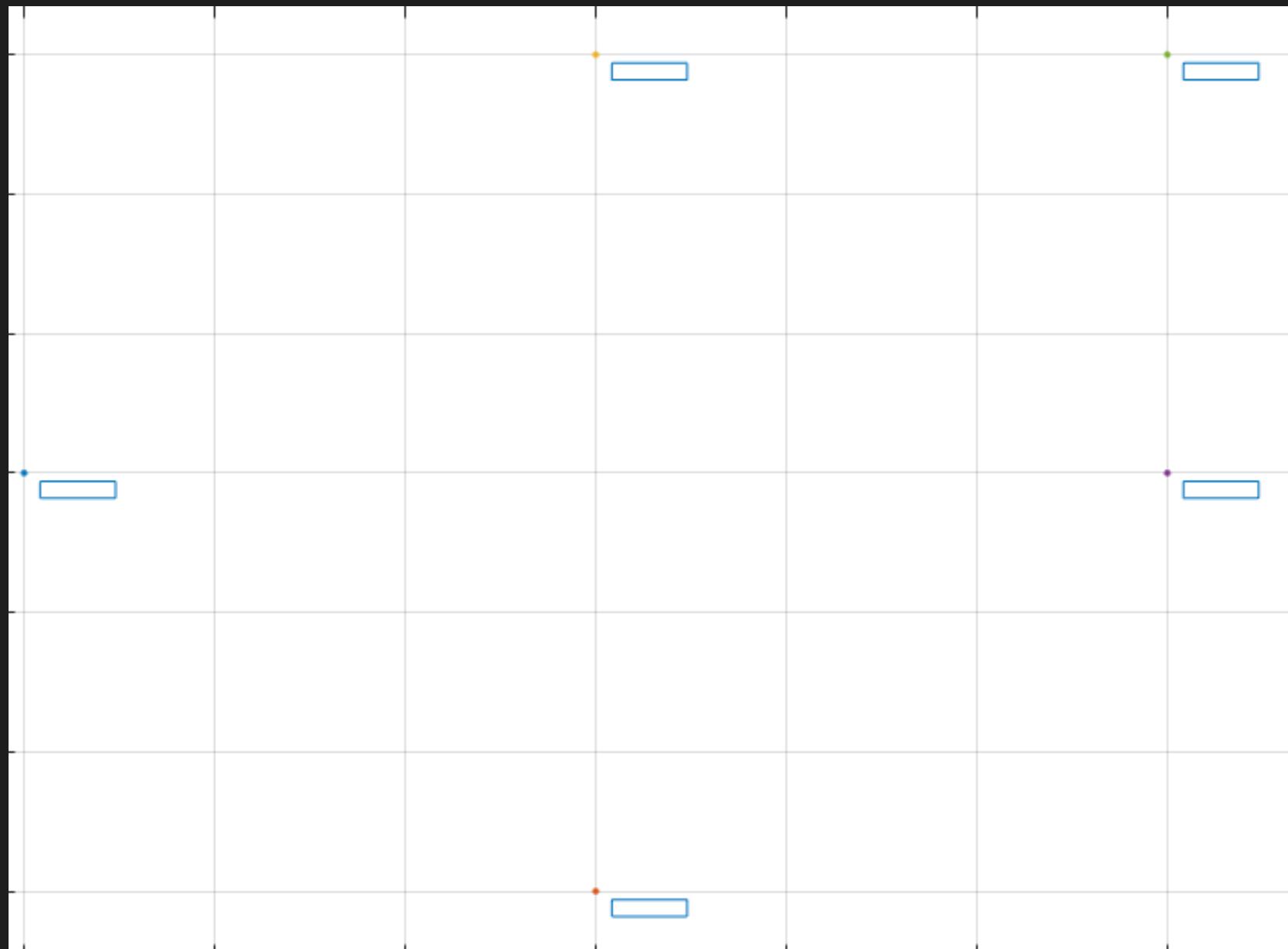
```
p_zeta = 0.2;
p_c = 1;
max_window_size = 5*p_c/p_zeta;
window_size = max_window_size;
p_v = 0.9;
p_c1 = 0.5;
p_c2 = 0.5;

force_endpoints = 1;
forced_source = 1;
forced_destination = 5;
CUSTOM_COLOR_FORWARD = [0 0 0];
CUSTOM_COLOR_BACKWARD = [1 0 0];
```



RESULTADOS

Simulación



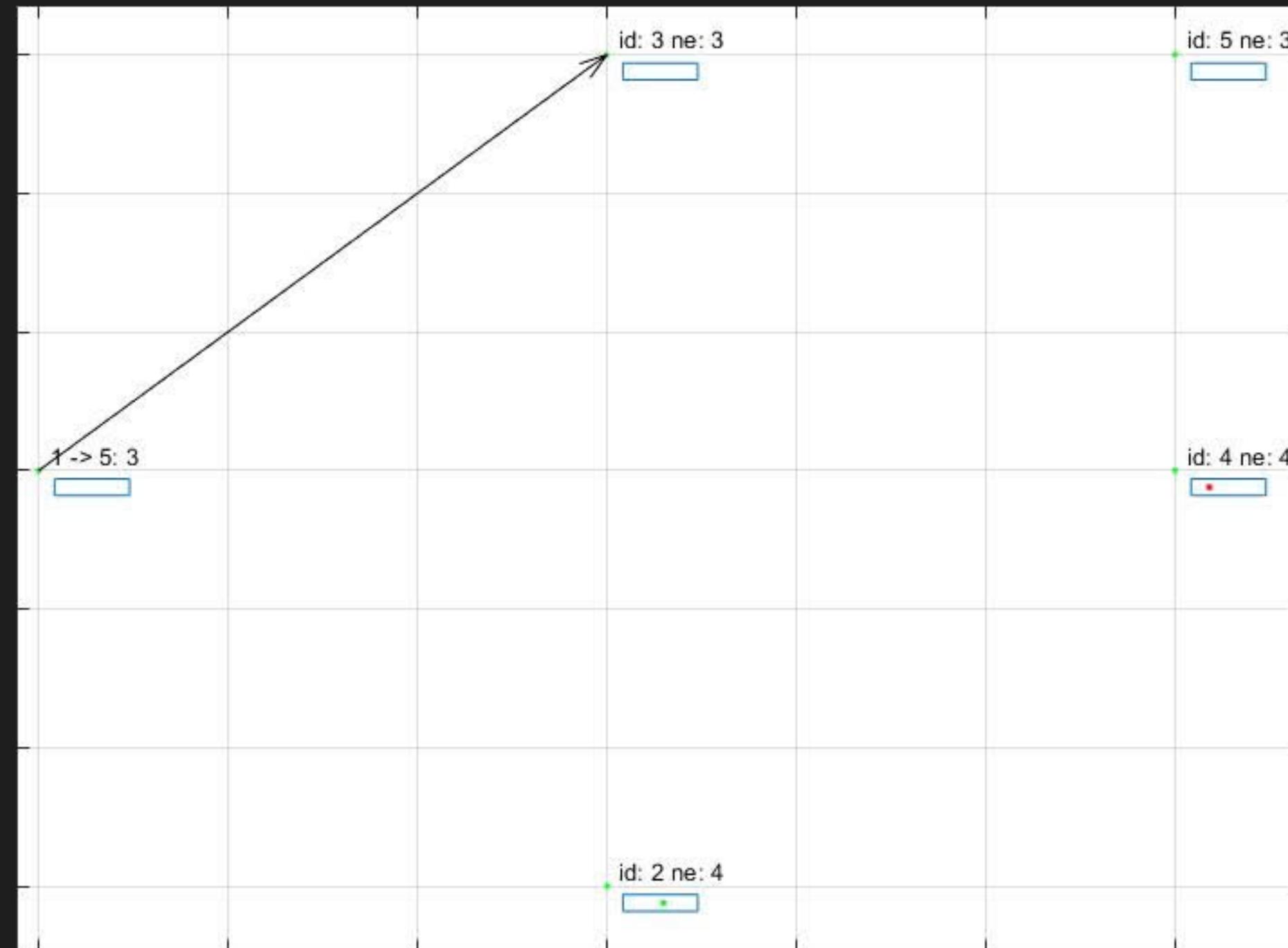
RESULTADOS

Simulación



RESULTADOS

Simulación



$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

RESULTADOS

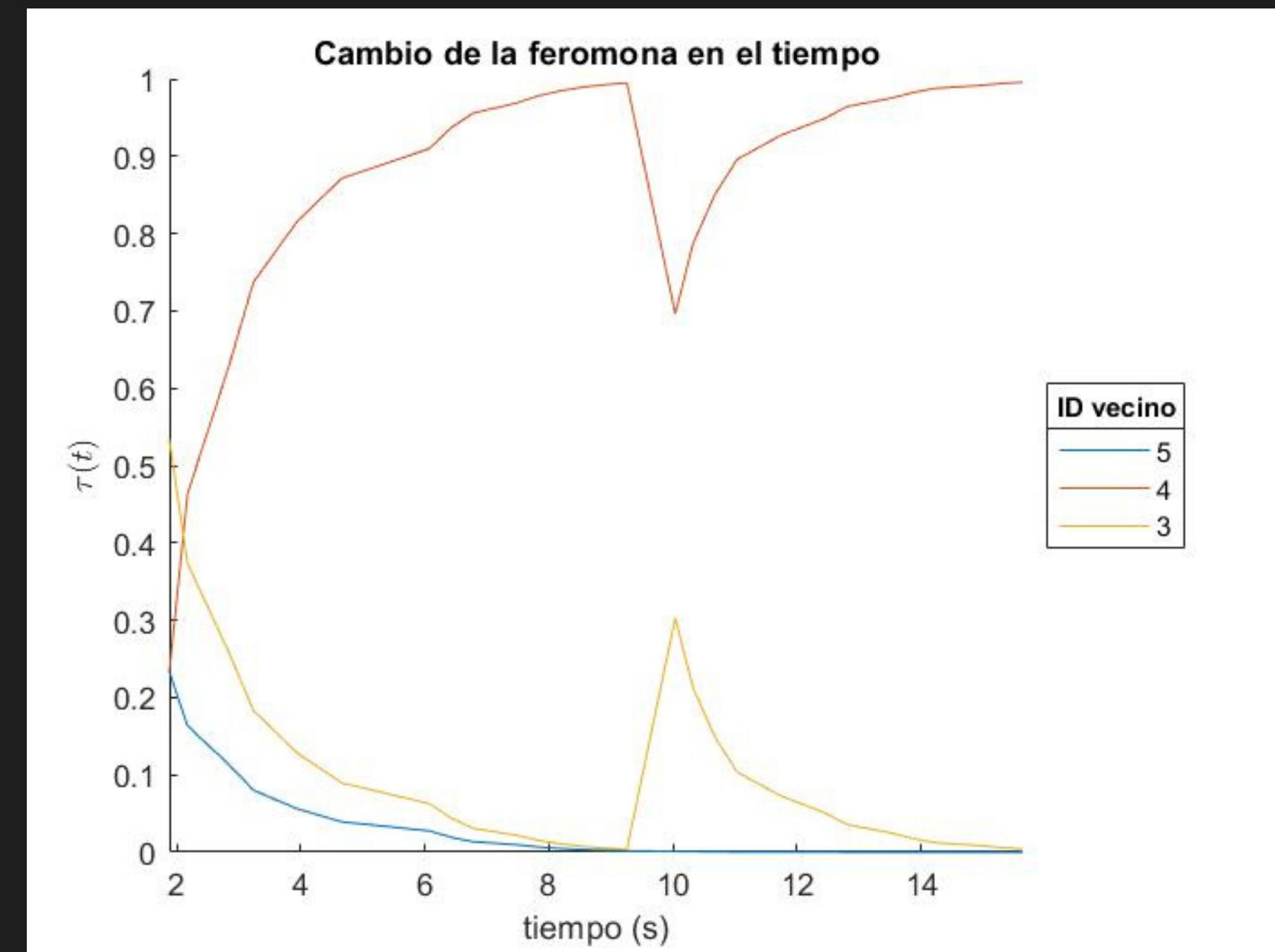
Simulación



$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

RESULTADOS

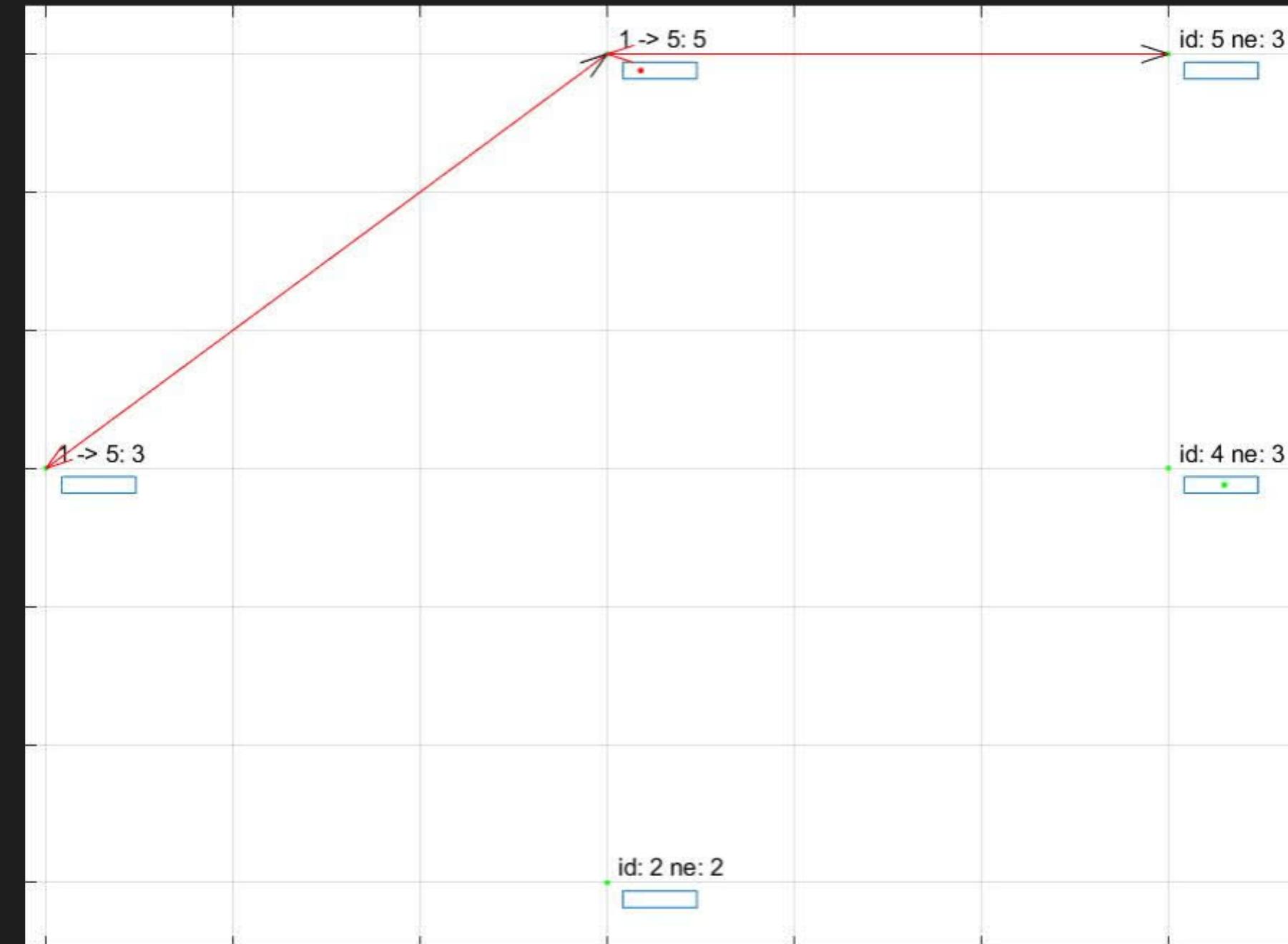
Simulación



$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

RESULTADOS

$i = 6$

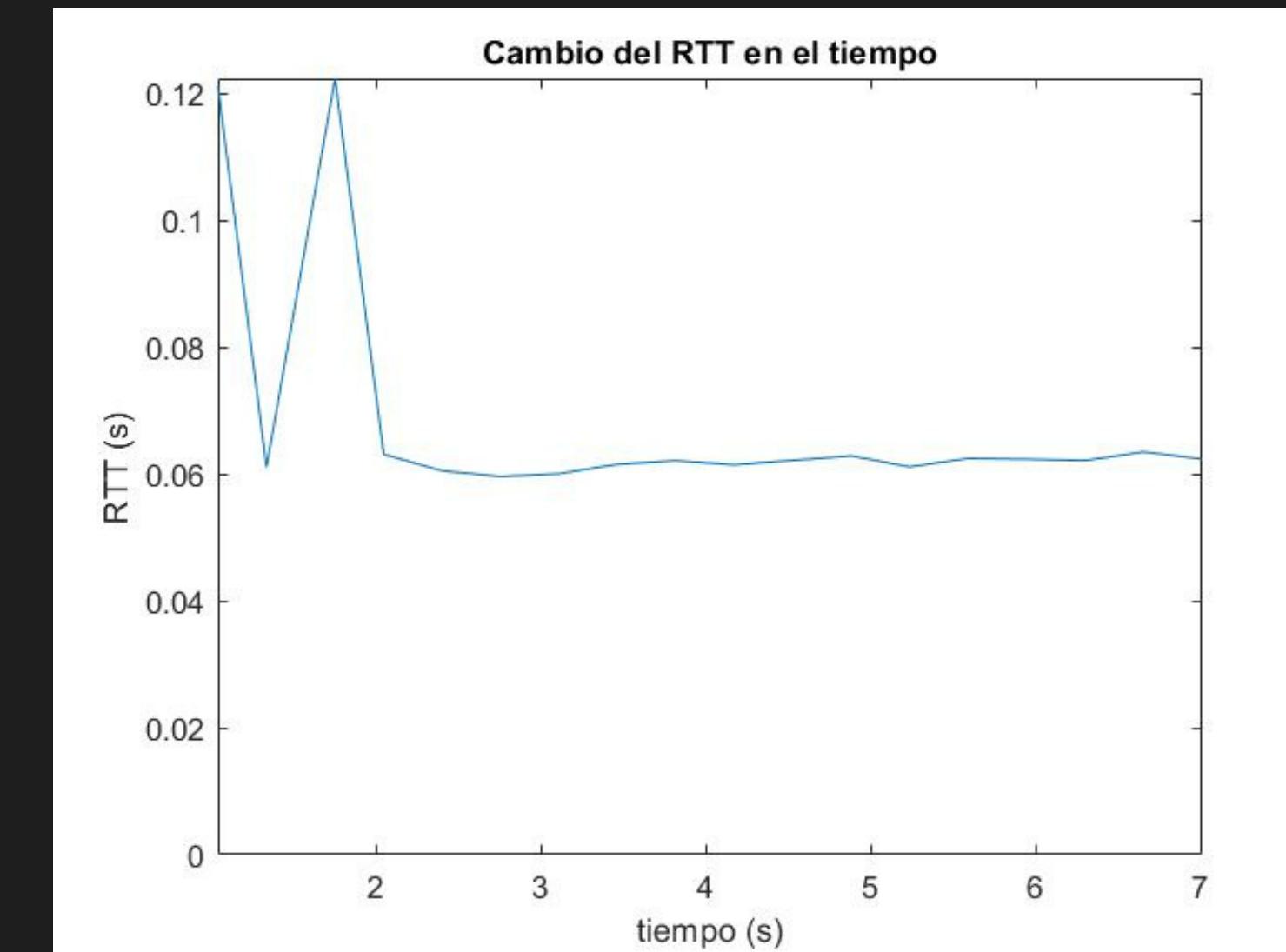
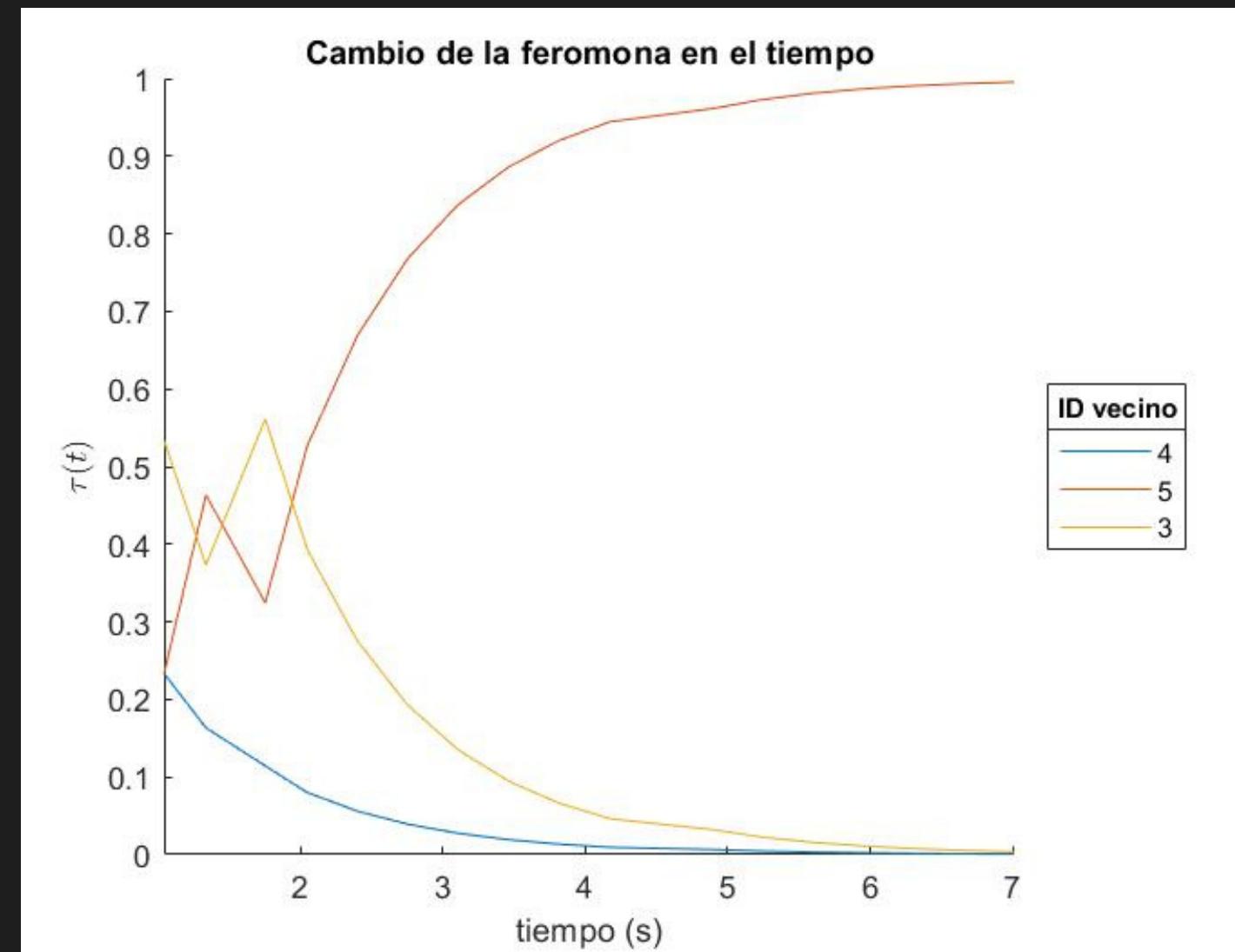


$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

Simulación

$i = 6$

RESULTADOS

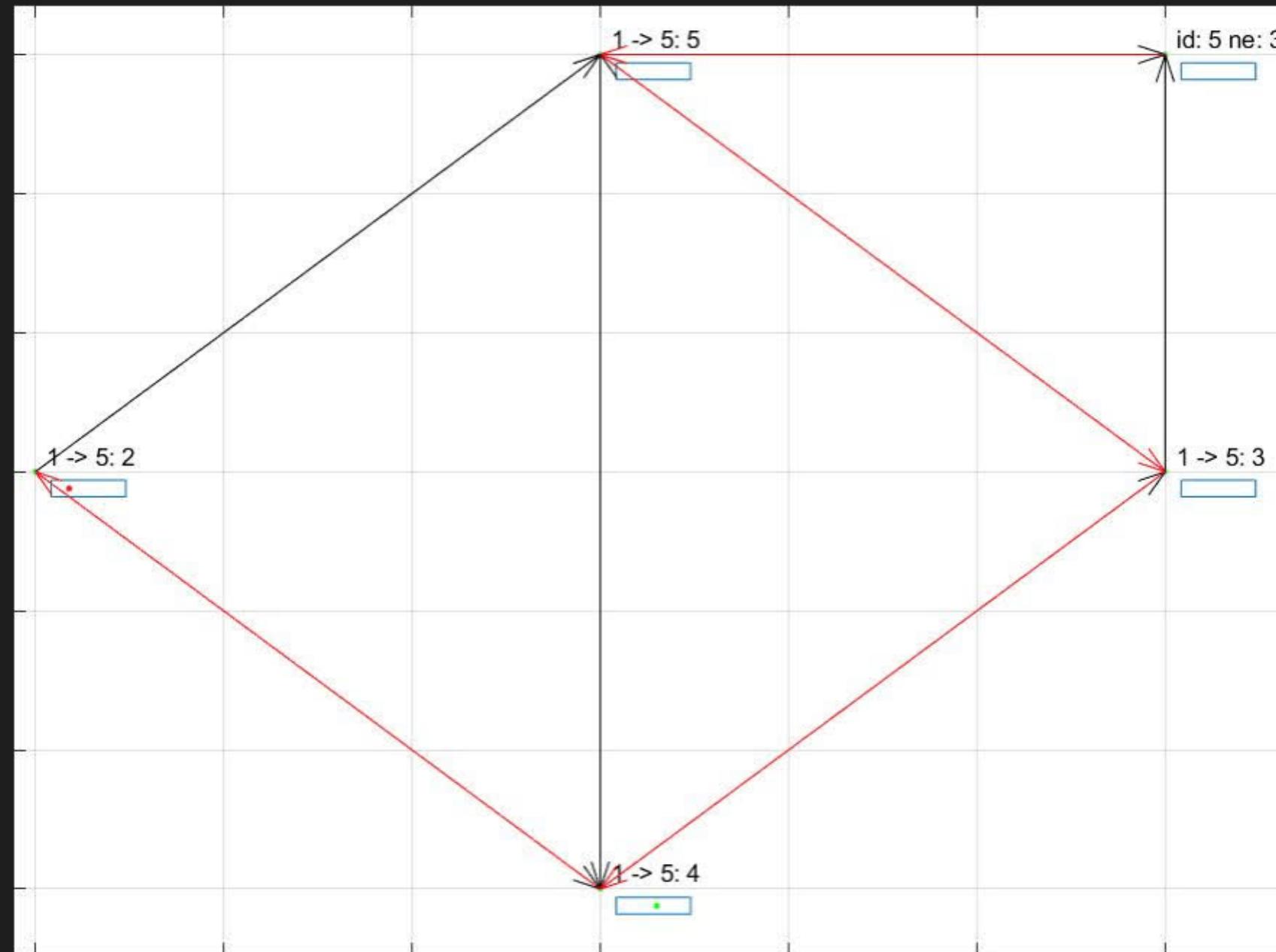


$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

Simulación

RESULTADOS

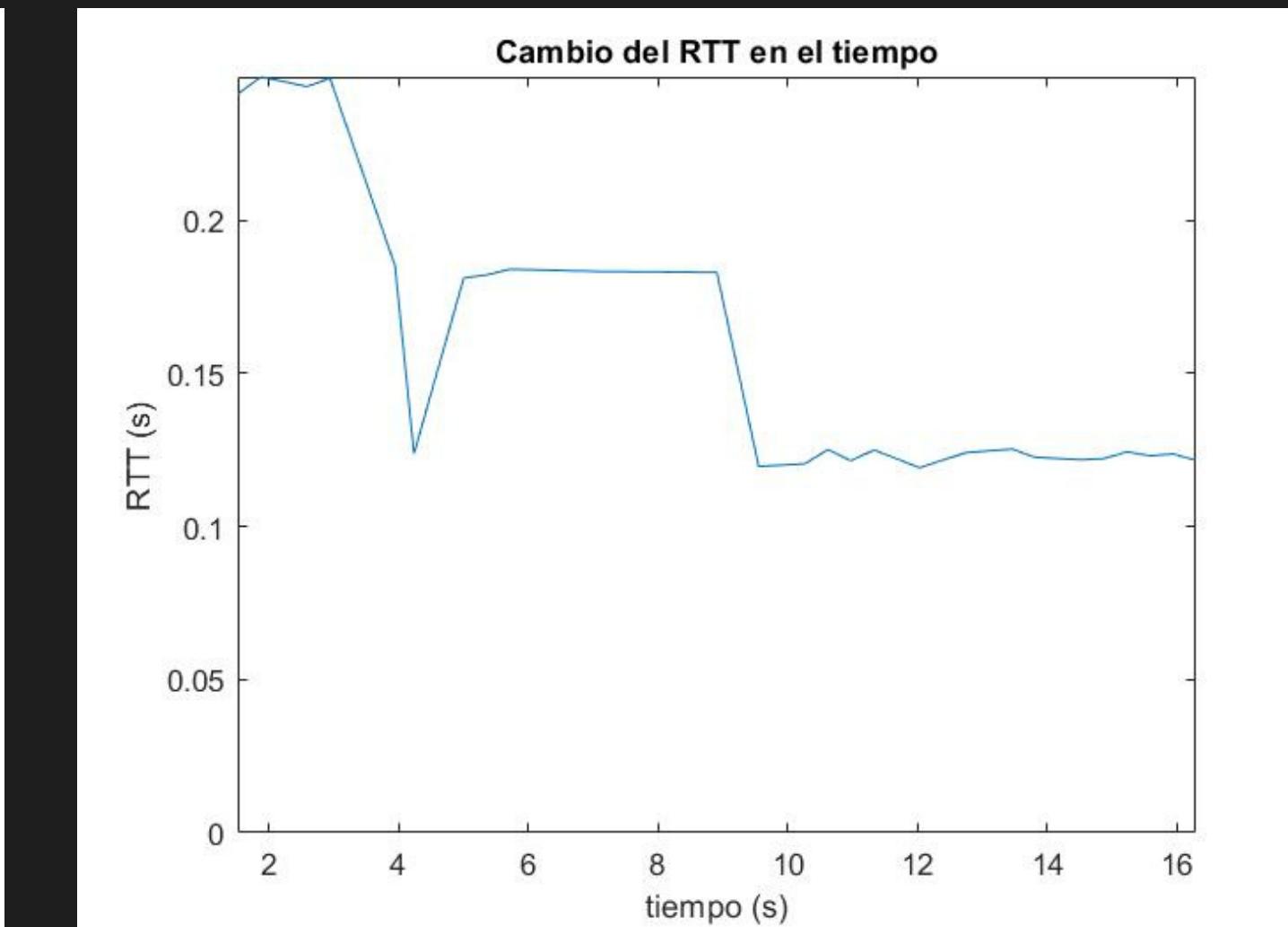
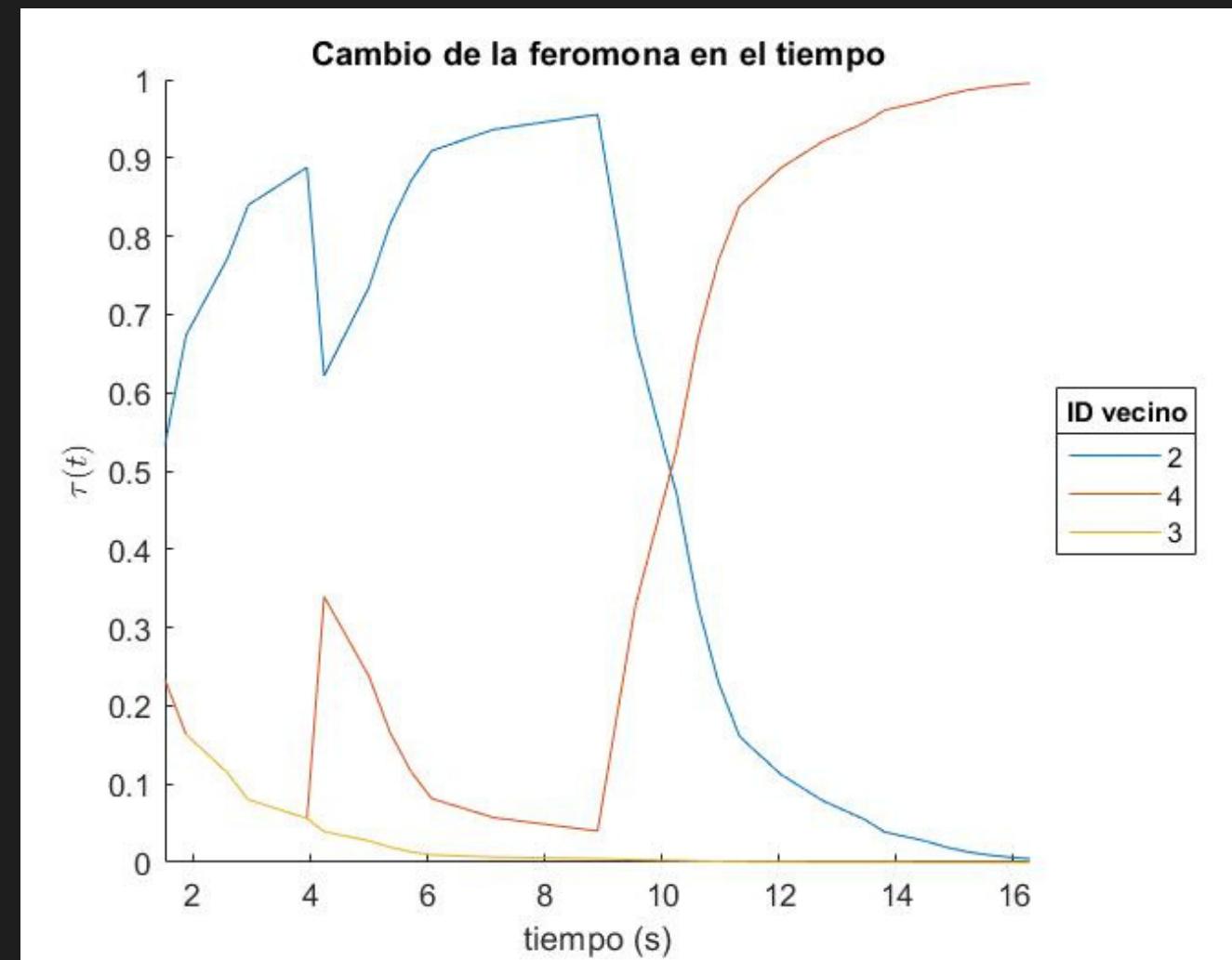
$i = 13$



$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

RESULTADOS

$i = 13$

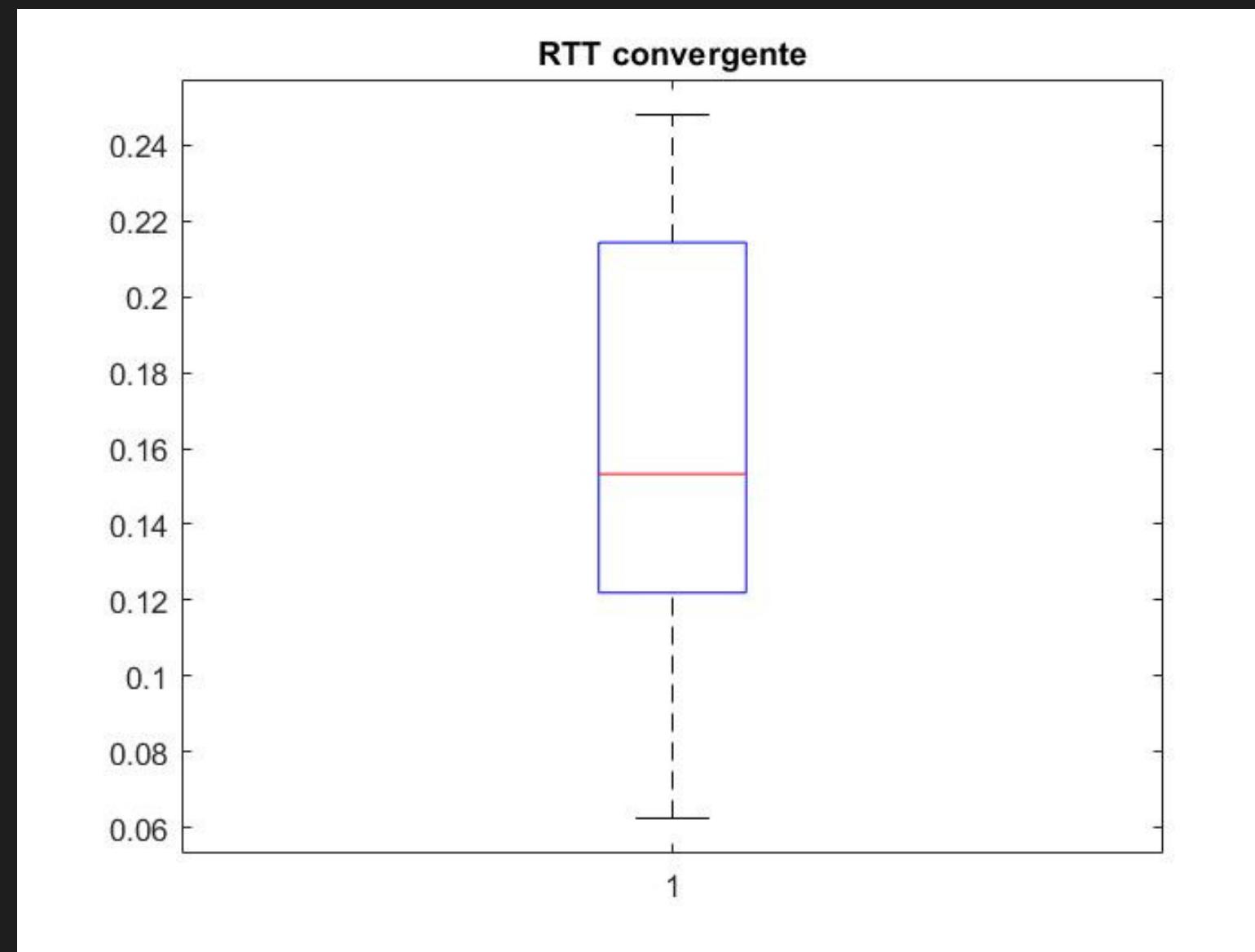


$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

RESULTADOS

Simulación

Resumen N = 20



Media de 0.165 s

RTT 'razonable' es
aproximadamente 0.13 s



Bajo esa umbral:
50%

$$\varsigma = 0.2, v = 0.9, c_1 = c_2 = 0.5$$

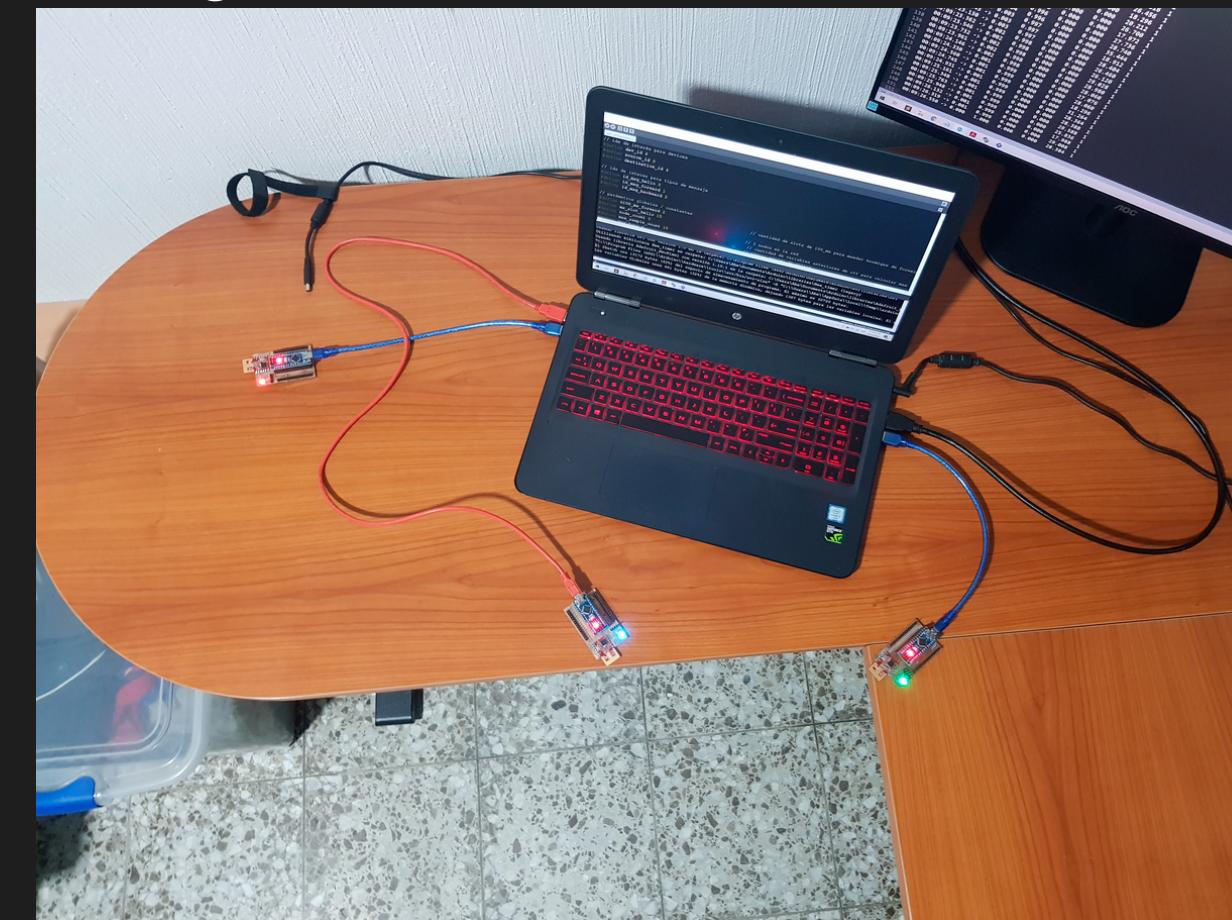
Red física

Simplificación del refuerzo

$$r(RTT) = \min(RTT_best / RTT, 0.3)$$

Con el parámetro K = número de muestras para calcular RTT_best

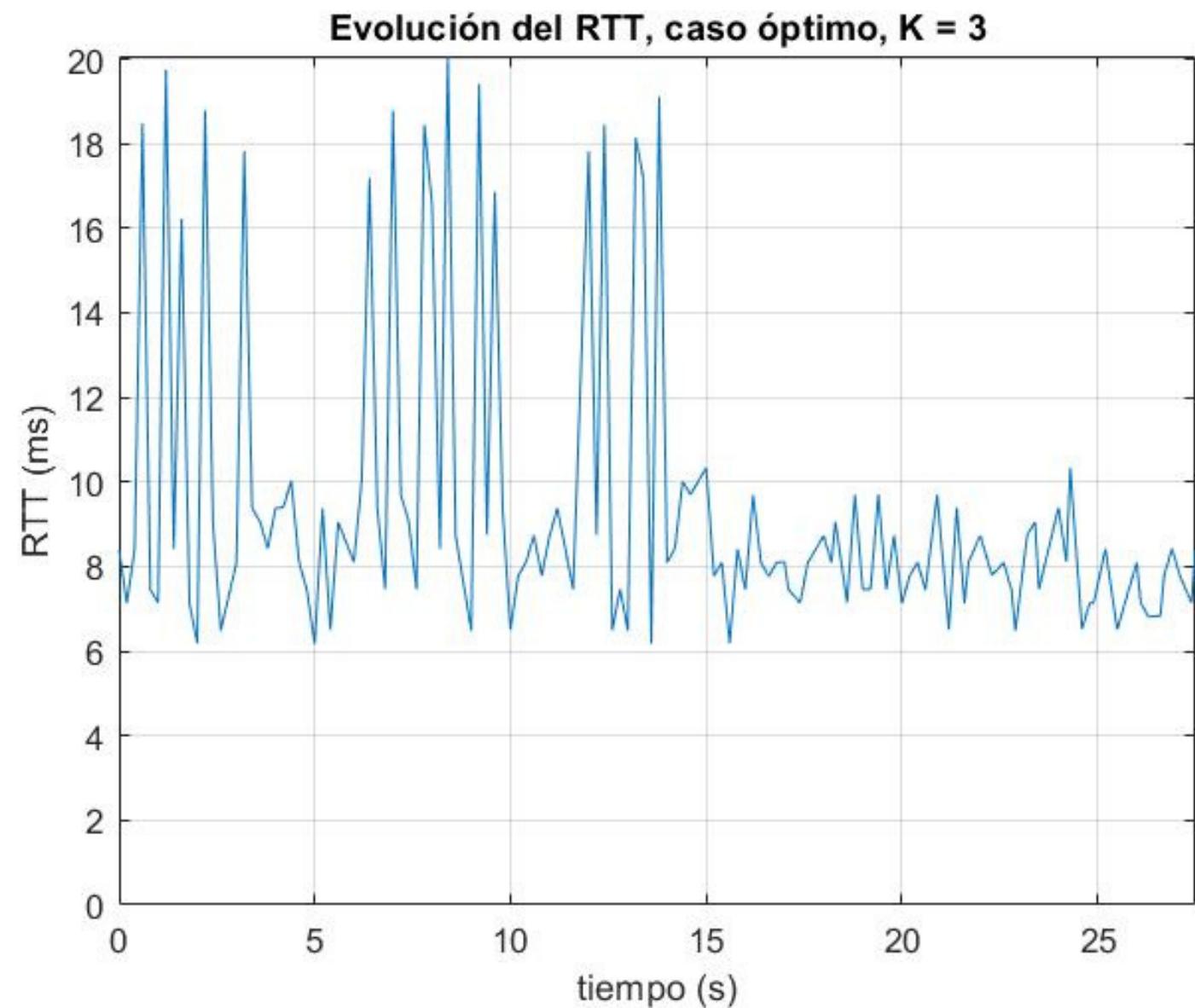
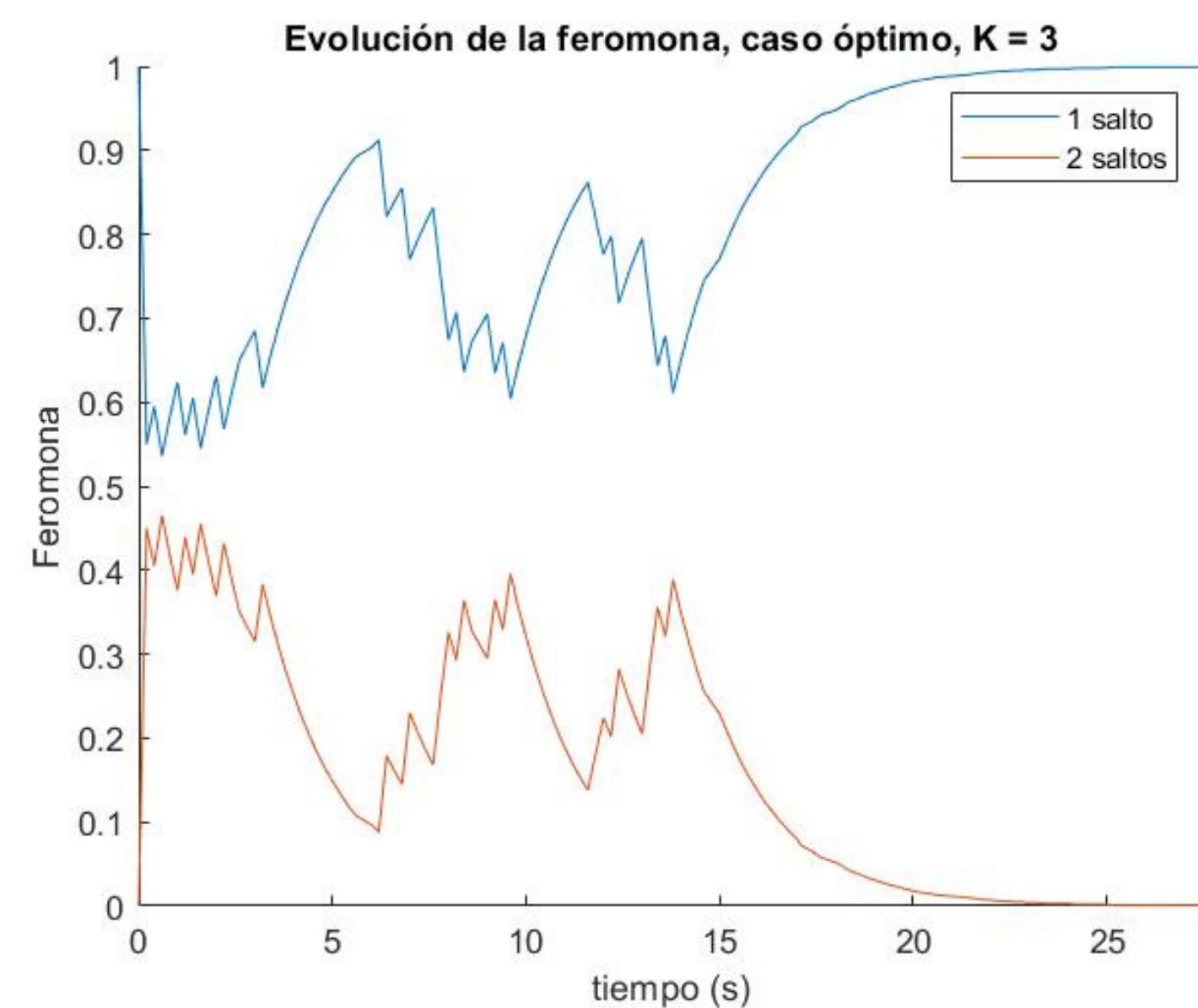
Intervalo de envío de hormigas de forward = 300 ms



Red física

$K = 3$: 3 óptimos, 7 subóptimos

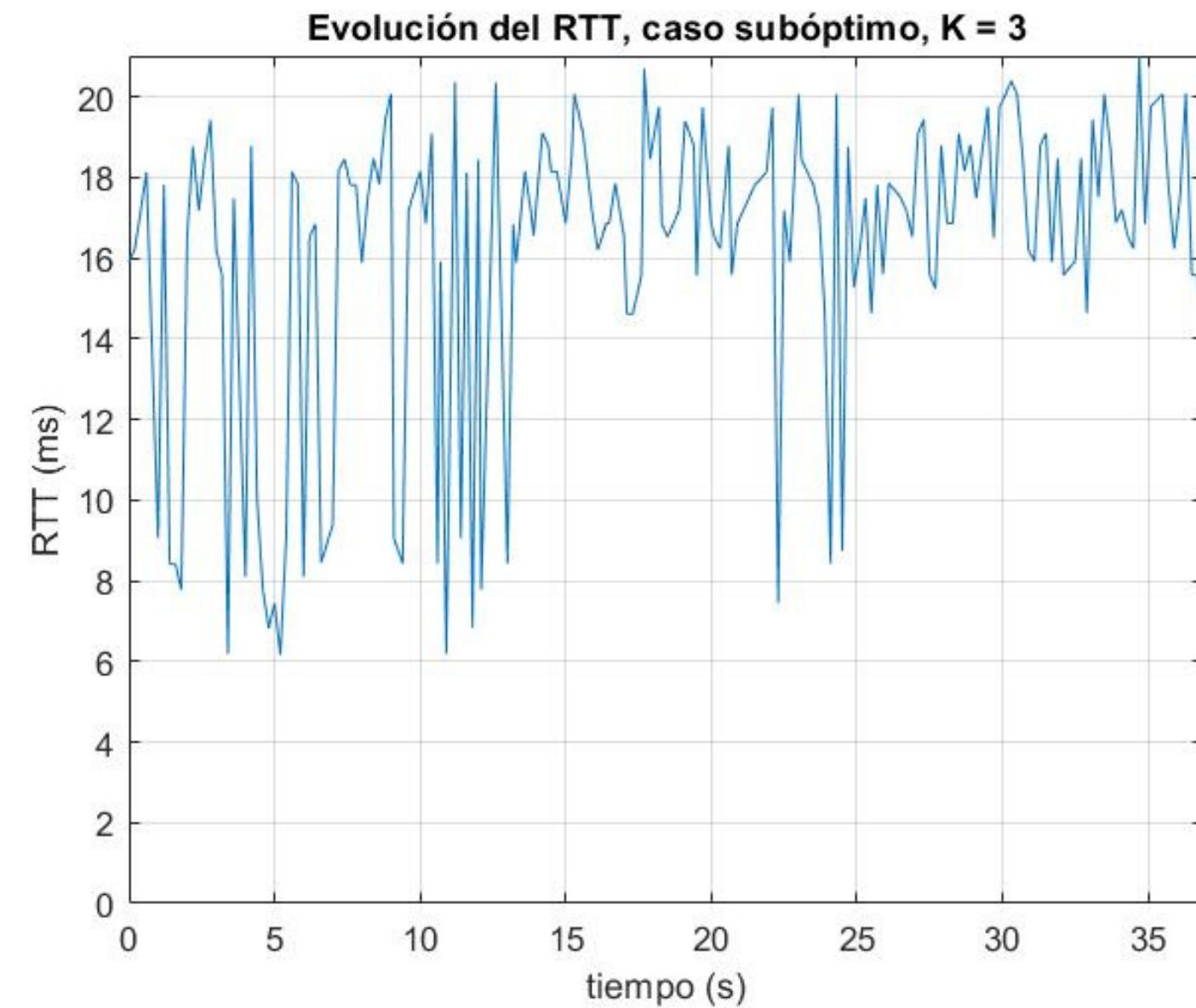
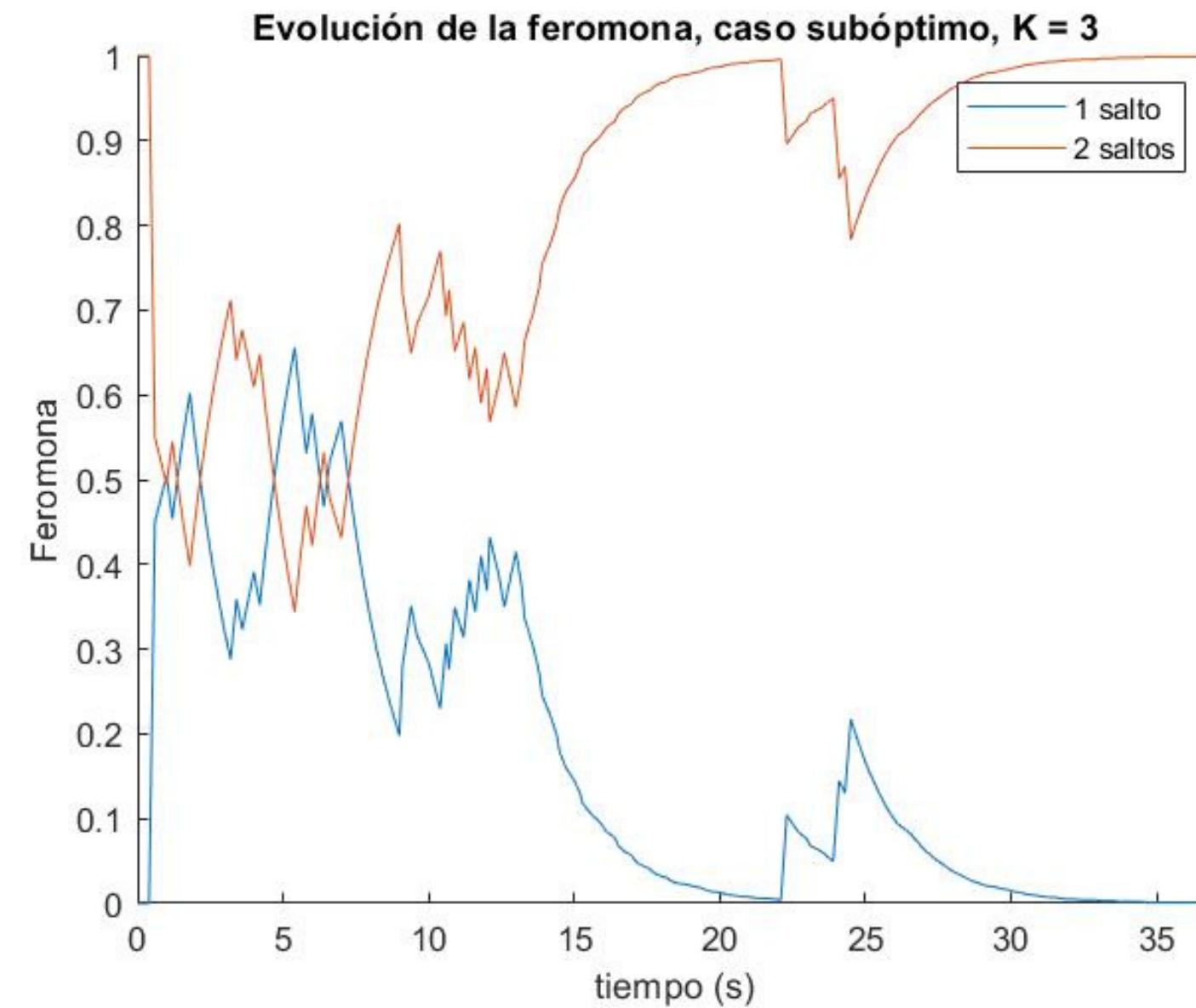
RESULTADOS



Red física

$K = 3$: 3 óptimos, 7 subóptimos

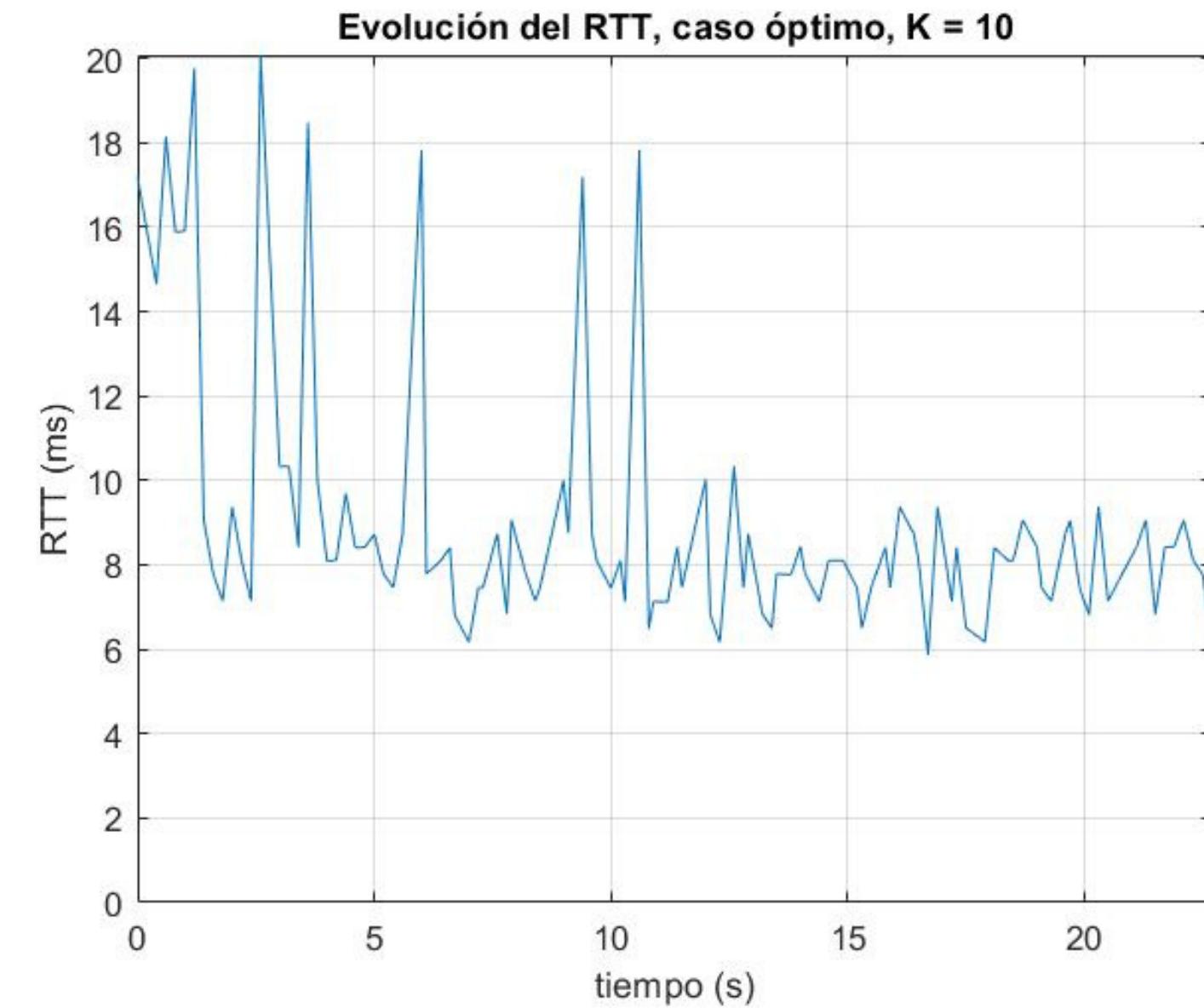
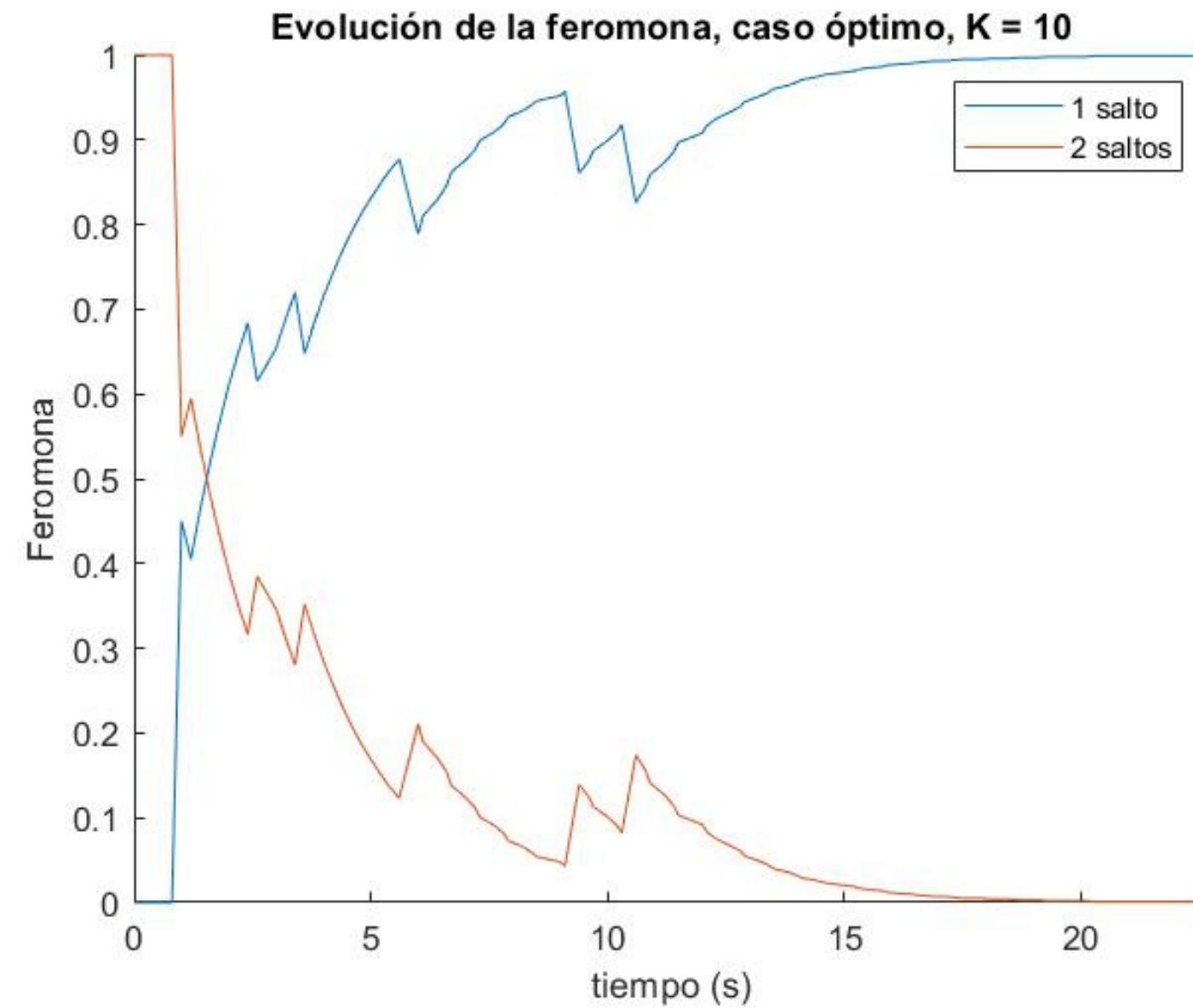
RESULTADOS



Red física

$K = 10$: 7 óptimos, 3 subóptimos

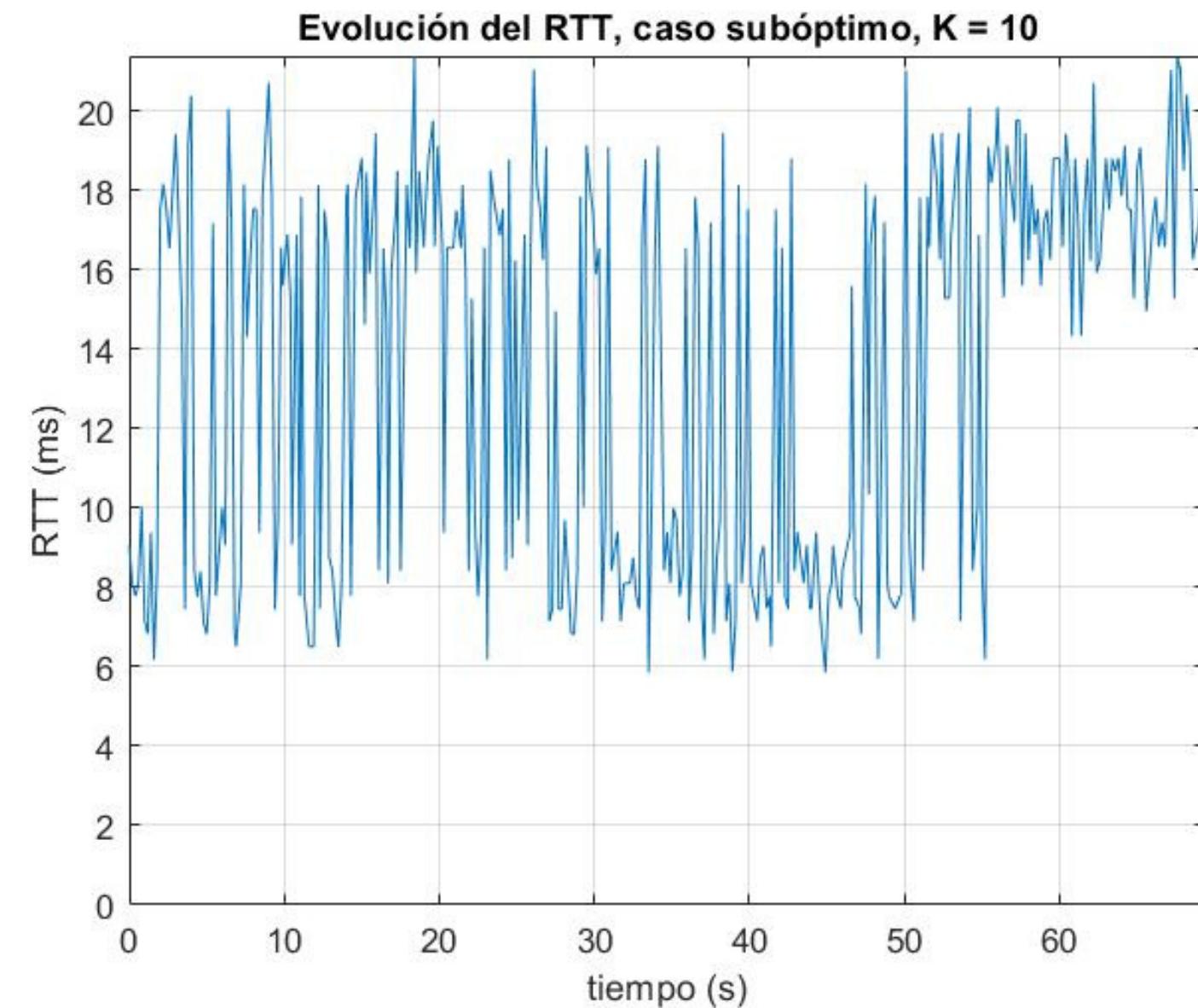
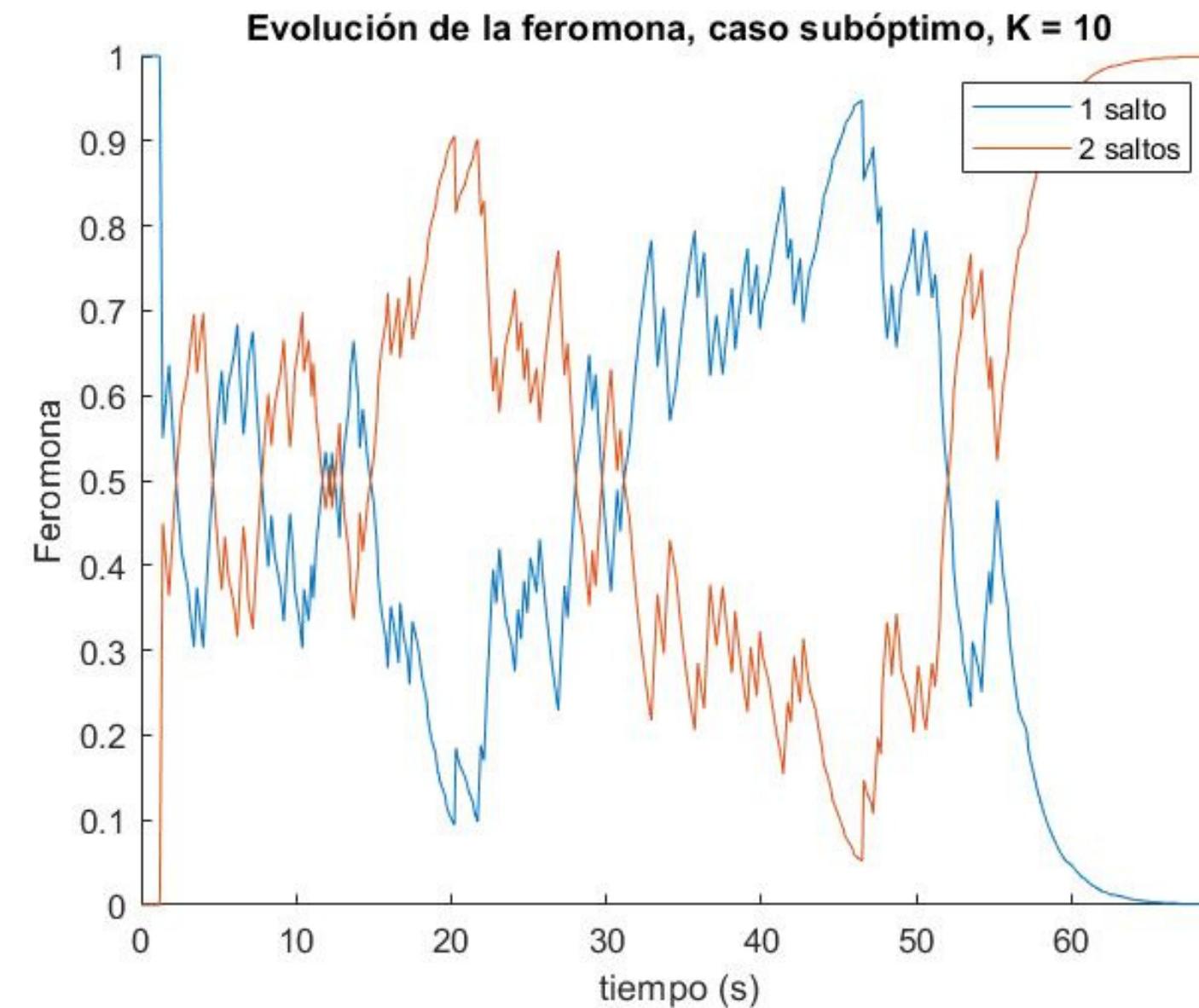
RESULTADOS



Red física

$K = 10$: 7 óptimos, 3 subóptimos

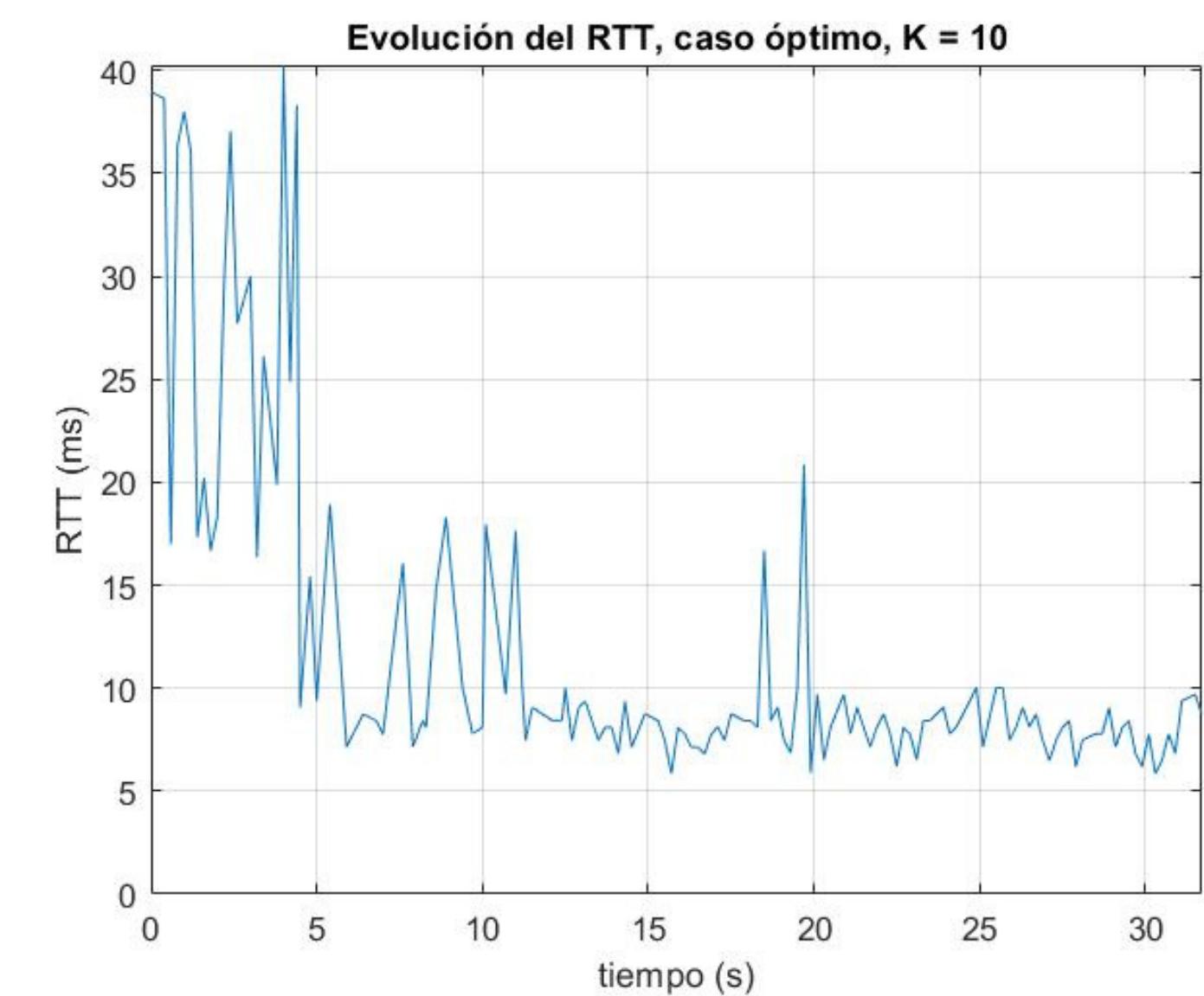
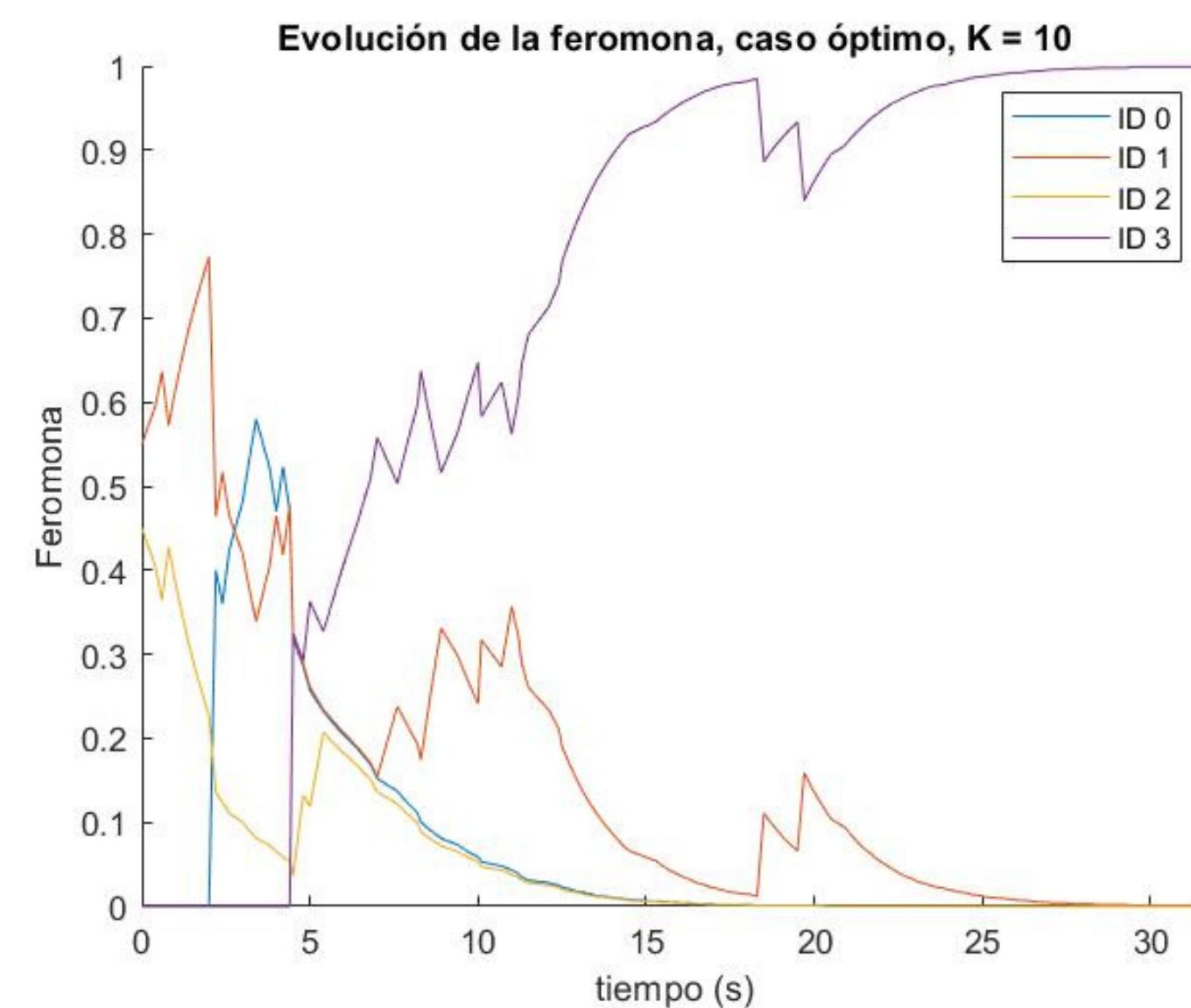
RESULTADOS



RESULTADOS

Red física

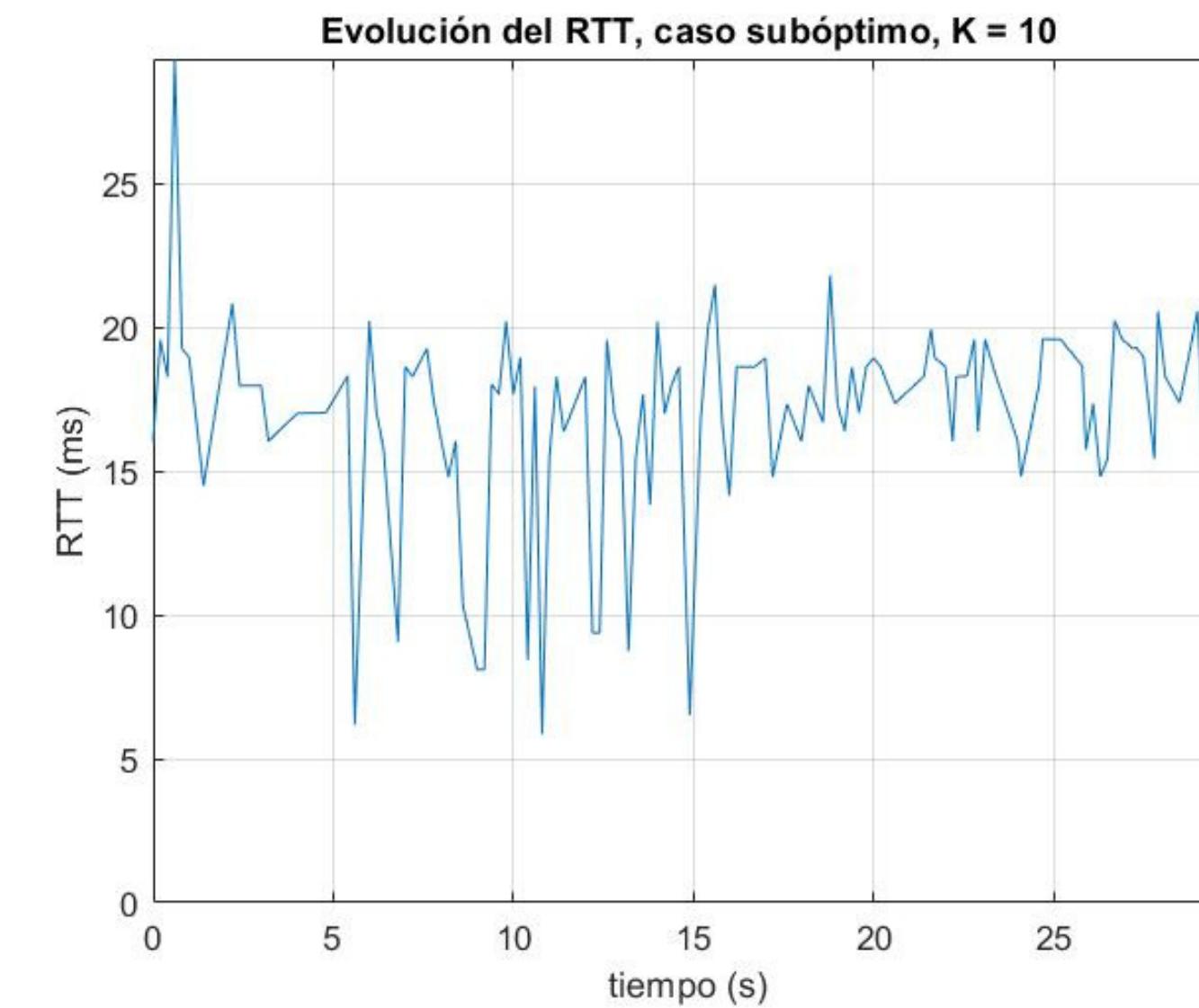
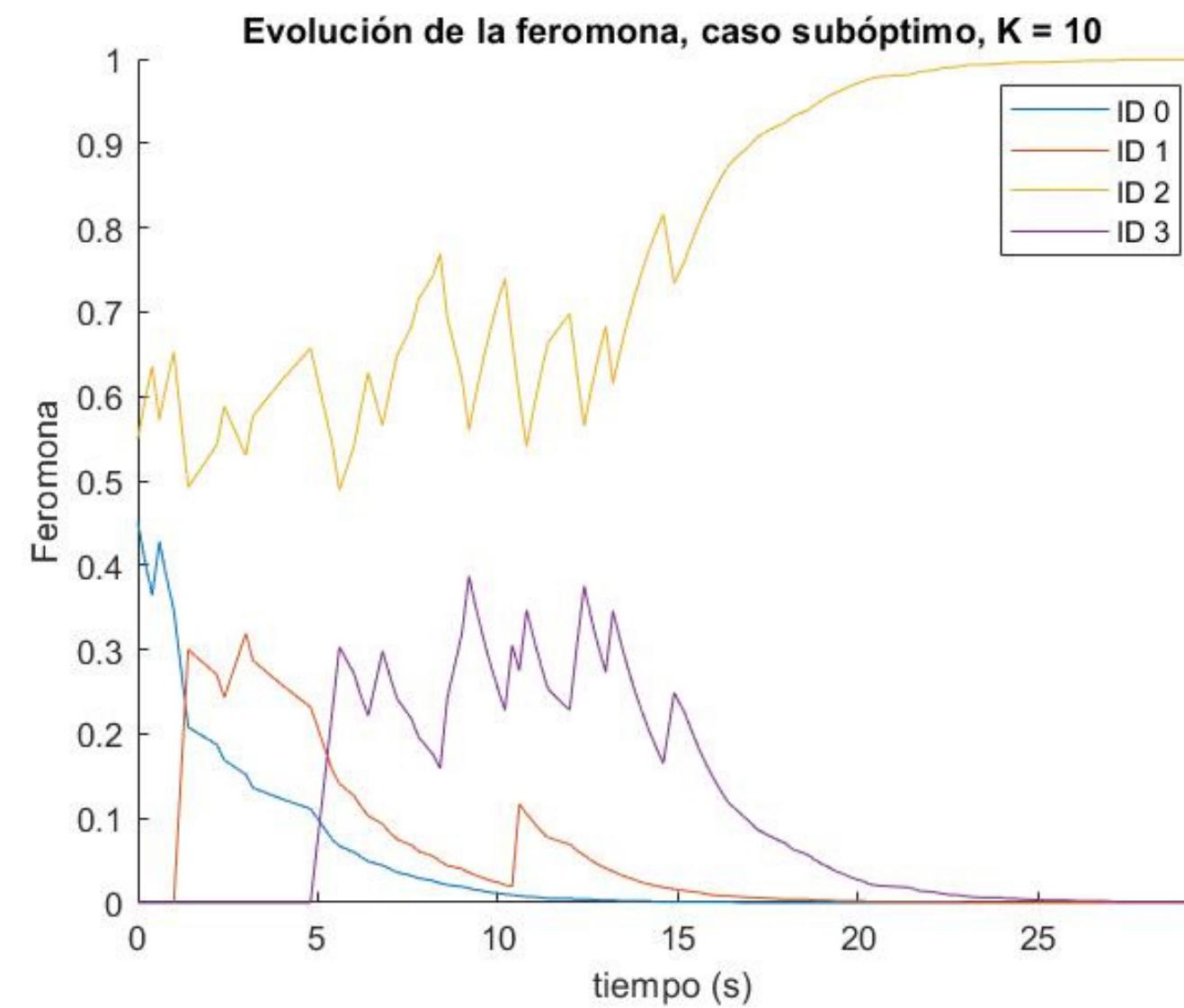
$K = 10$: 7 óptimos, 3 subóptimos, $N = 4$



Red física

$K = 10$: 7 óptimos, 3 subóptimos, $N = 4$

RESULTADOS



RESULTADOS

Objetivos específicos

2. Desarrollar una plataforma de simulación para los protocolos de enrutamiento más importantes.
4. Implementar un caso de uso de estos protocolos en una red inalámbrica física.



Conclusiones

1. Se caracterizó AntNet como un algoritmo de enrutamiento basado en inteligencia de enjambre, explicando sus ideas principales, características como algoritmo de optimización y también como algoritmo útil para redes computacionales
2. Se desarrolló una plataforma de simulación que permite visualizar el comportamiento de AntNet salto por salto y en cada iteración (formación de una solución), y la feromona a través del tiempo. Esto para parámetros que puede definir el usuario conforme se necesite, así como los estándar de AntNet. Esta plataforma permite también obtener parámetros de rendimiento como el tiempo de convergencia de las soluciones, entre otros.



CONCLUSIONES

3. El módulo transceptor de radio MRF24J40MA, junto con las funcionalidades de programación de Arduino permitieron la implementación de AntNet en una red física inalámbrica, tal como se demuestra en el comportamiento en las curvas de RTT y feromona obtenidas.
4. El modelaje de la media y varianza del tiempo de ida de los paquetes en AntNet por medio de la ecuación de diferencias permite un fácil cálculo a nivel de microcontroladores. Sin embargo, introduce la elección del parámetro varsigma para el cual no existen criterios de rendimiento asociados que permitan elegirlo analíticamente, solo estimados de la ventana de observaciones a considerar en la actualización de las variables.



Recomendaciones

1. Implementar nuevos métodos para descubrir vecinos (como gossip based), y el paradigma asíncrono de estos. Esto es relevante ya que sirve como base para la funcionalidad apropiada de AntNet (y cualquier otro algoritmo de enrutamiento para redes inalámbricas).
2. Idear en RMASE cómo generar pruebas en masa, para poder automatizar las comparaciones entre diferentes modelos de red o formas de refuerzo. Se puede consultar las pruebas en batch como comentan los autores de RMASE en la documentación oficial.
3. Utilizar la plataforma desarrollada sobre RMASE para evaluar diferentes casos de uso, otros modelos de red y otras formas de calcular el refuerzo.



Referencias

- Fox, P. Internet routing protocol. Extraído de <https://www.khanacademy.org/computing/computer-science/internet/xcae6f4a7ff015e7d:the-internet/xcae6f4a7ff015e7d:routing-with-redundancy/a/internet-routing>. 2020.
- S. K. Kushwaha, A. Kumar y N. Kumar, "Routing Protocols and Challenges Faced in Ad hoc Wireless Networks," *Adv. Electron. Electric Eng.*, vol. 4, n.o 2, págs. 207-212, 2014.
- J. Kennedy, "Swarm intelligence," en *Handbook of nature-inspired and innovative computing*, Springer, 2006, págs. 187-219.
- Tatomir, B., Kroon, R., & Rothkrantz, L. Dynamic routing in traffic networks using AntNet. In *International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence* (pp. 424-425). Springer, Berlin, Heidelberg. 2004.
- D. Merkle y M. Middendorf, *Ant Colony Optimization*, Marco Dorigo, Thomas Stützle MIT Press, ISBN: 0-262-04219-3, 2006.
- A. M. Zungeru, L.-M. Ang y K. P. Seng, "Classical and swarm intelligence based routing protocols for wireless sensor networks: A survey and comparison," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 35, no. 5, págs. 1508-1536, 2012.
- S. Vasudevan, J. Kurose y D. Towsley, "On neighbor discovery in wireless networks with directional antennas," en *Proceedings IEEE 24th Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies.*, IEEE, vol. 4, 2005, págs. 2502-2512.