

# A Novel Theoretical Probabilistic Model for Opportunistic Routing with Applications in Energy Consumption for WSNs

## PROBLEMA

Las redes inalámbricas ad hoc tradicionales se basan en la transmisión entre nodos, ignorando la recepción simultánea que los canales de difusión inalámbricos permiten. Los esquemas oportunistas aprovechan esta característica para mejorar la tasa de éxito de transmisión, reducir el retardo y el consumo de energía.

Modelar redes es difícil debido a factores como errores de canal y congestión, colisión y error en la paquetización de datos. Aunque la simulación y emulación son abordajes comunes, estos son procesos largos y complejos.

## PROPUESTA

La propuesta incluye un nuevo modelo teórico estocástico para el enrutamiento oportunista en redes inalámbricas. A diferencia de los modelos basados en cadenas de Markov, este utiliza un modelo de percolación estocástica y puede manejar diferentes tipos de valores de probabilidad.

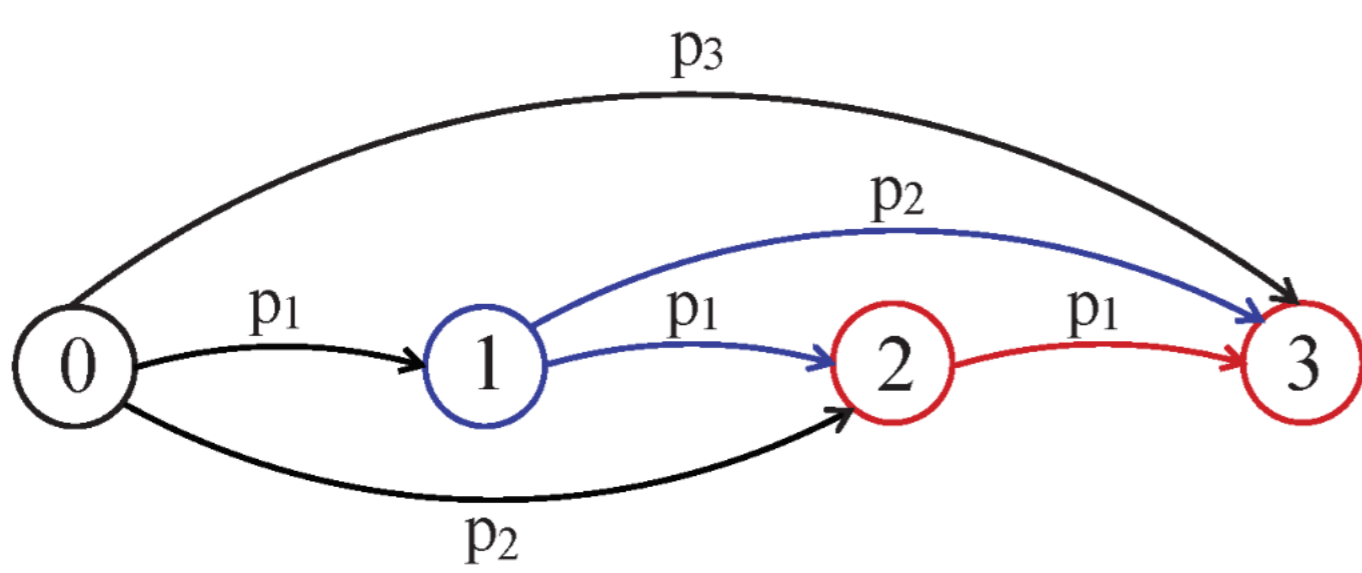


Figura 2. Red oportunista simple para  $N = 3$ . Los colores se utilizan para representar que un modelo oportunista de  $N$  saltos tiene  $N-1$  submodelos oportunistas anidados.

### Notación

- $P_S^{(N)}$ : probabilidad de transmisión exitosa en la red
- $p_i$ : probabilidad de transmisión exitosa a una distancia  $i$
- $N_R$ : número de rutas posibles en una red de  $N$  nodos
- $T_N$ : número de transmisiones de paquetes
- $R_N$ : número de recepciones de paquetes
- $T_N^B$ : número de transmisiones de difusión en la red

## RESULTADOS

Para validar el modelo propuesto, se investigan dos modelos oportunistas de 5 saltos diferentes:

1. Un modelo OR tradicional, considerando probabilidades precisamente conocidas.
2. Un modelo OR considerando probabilidades aleatorias  $p_i, i = 1, \dots, 5$  en un intervalo acotado.

Se realizaron simulaciones utilizando realizaciones de Monte Carlo (MC) usando nuestro paquete R Opportunistic para comparar las medidas de interés.

Tabla 1. Valores teóricos de  $P_S^{(N)}$ ,  $T_N$ ,  $R_N$  y  $T_N^B$  para todos los hops del modelo OR. La última columna representa el valor obtenido vía simulación MC.

	Hop					MC
	1	2	3	4	5	
$P_S^{(N)}$	0.85	0.9223	0.9581	0.9742	0.9792	0.9791
$E[T_N]$	1	2.85	6.1425	11.7731	21.135	21.129
$E[R_N]$	0.85	2.2925	4.6306	8.3616	14.226	14.22
$E[T_N^B]$	1	1.85	3.2925	5.6306	9.3616	9.3582

## CONCLUSIONES

- El modelo estocástico permite calcular preliminarmente el consumo de energía en redes inalámbricas, siendo útil en su planificación y diseño.
- Este modelo permite minimizar el tiempo y el esfuerzo en el diseño de la red de ingeniería, ya que no requiere implementación práctica.

Los modelos teóricos y probabilísticos facilitan el estudio de la entrega exitosa y la elección de rutas en redes de oferta y demanda (SDN) y redes de sensores inalámbricos (WSN), proporcionando resultados rápidos, precisos y menos costosos para experimentos reales.

## OBJETIVO GENERAL

Proponer un modelo probabilístico para redes oportunistas capaz de calcular la distribución de probabilidades de las rutas, la probabilidad de éxito de la transmisión (o recepción) por ruta y la probabilidad de éxito de la transmisión de la red.

El esquema anidado de la Figura 1, nos permitió establecer relaciones de recurrencia para obtener las medidas de interés. Por ejemplo, algunas de ellas son

$$N_R(N+1) = 1 + \sum_{i=1}^N N_R(i) = 2N_R(N),$$

y por tanto  $N_R(N) = 2^{N-1}$ . Por otro lado,

$$P_S^{(N)} = 1 - \prod_{i=1}^N [1 - p_i P_S^{N-i}], \quad P_S^{(0)} = 1,$$

$$E[T_N] = N + \sum_{i=1}^{N-1} p_i E[T_{N-i}], \quad E[T_1] = 1.$$

**Sistema OR con probabilidades aleatorias.** En ese caso, asumimos que  $\mathbf{p} \sim f_p(\boldsymbol{\theta})$ . Por la ley de la esperanza iterada se tiene para el número de transmisiones  $T_N$  que,

$$E[T_N] = \int_{[0,1]^N} E[T_N | \mathbf{p}] f_p(\boldsymbol{\theta}) d\mathbf{p}.$$

Así se obtiene que

$$E[T_N] = N + \sum_{i=1}^{N-1} E[p_i] \cdot E[T_{N-i}].$$

Ecuaciones similares a  $E[T_N]$  son obtenidas de forma análoga para  $R_N$  y  $T_N^B$ .

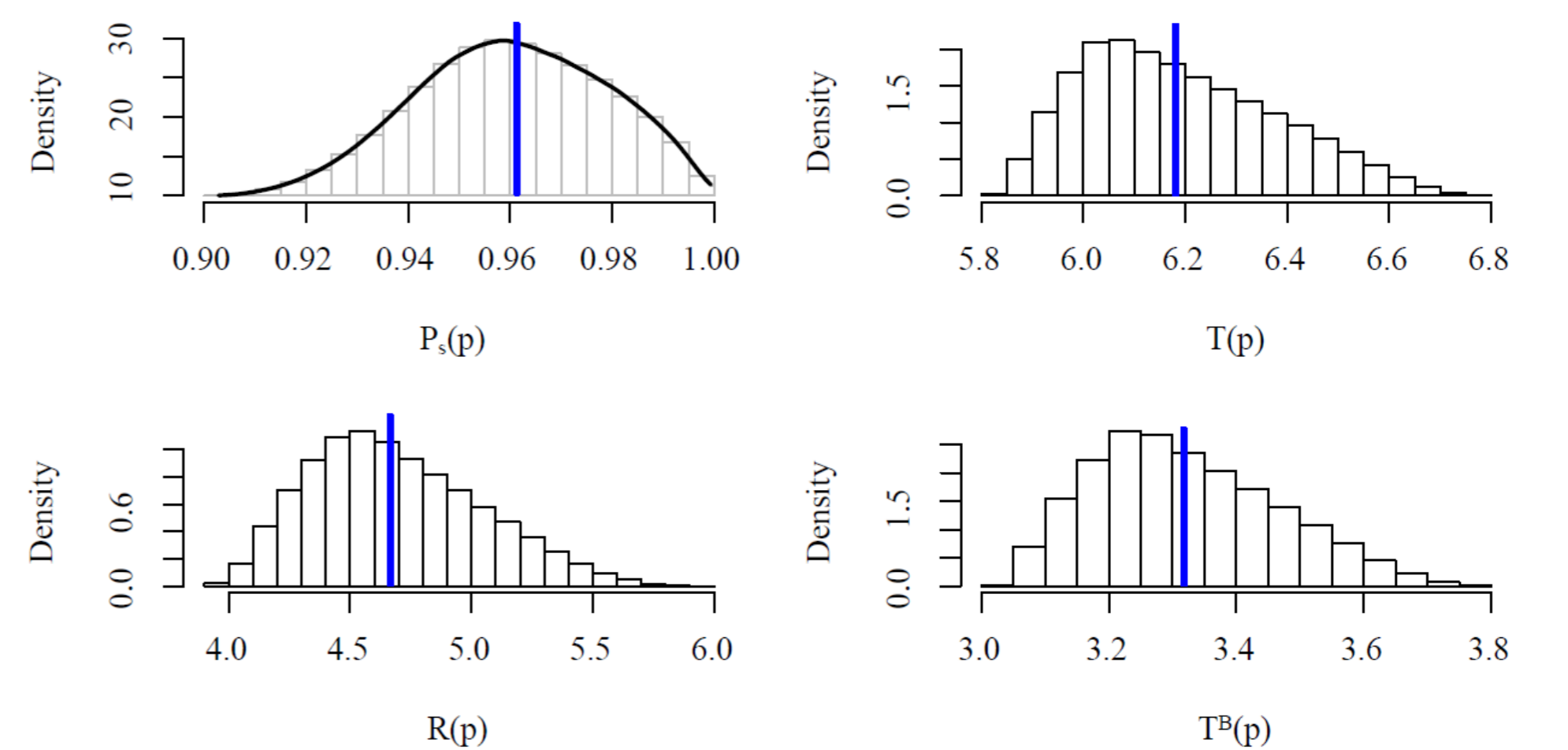


Figura 2. Densidad estimada de  $P_S^{(N)}$  e histogramas para  $T_N$ ,  $R_N$  y  $T_N^B$  para el segundo modelo OR. La media real se representa por una línea vertical azul.

**Estudio numérico.** Se usaron costos de energía obtenidos de experimentos con módulos IEEE 802.15.4 XBee Pro. El costo de energía en Joules fueron  $ETX=4.702$  [ $\mu$ J],  $ERX=4.29$  [ $\mu$ J] y  $ESW=0$  [ $\mu$ J], para la transmisión, recepción y el estado de espera, respectivamente.

Basados en el modelo, el consumo de energía esperado es 1.0503 [ $\mu$ J] cuando las probabilidades se conocen con precisión, y 0.3569 [ $\mu$ J] cuando son inciertas.

- Los resultados se pueden obtener fácilmente a través del paquete de R Opportunistic, evitando estudios de simulación ofreciendo valores referenciales teóricos para futuros diseños y comparaciones.

