# Enrutamiento Inteligente en Redes IoT/Mesh

Comparación de Protocolos Clásicos y Adaptativos Basados en Machine Learning mediante Simulación en NS-3

## Objetivo General

El presente informe describe un plan integral de investigación cuyo objetivo principal es desarrollar y comparar protocolos de enrutamiento clásicos con versiones adaptativas basadas en inteligencia artificial (IA) y aprendizaje automático (ML) en entornos realistas de redes IoT/mesh. La evaluación se centrará en el impacto de dichos protocolos sobre métricas clave de rendimiento y resiliencia, mediante simulaciones avanzadas en el simulador NS-3.

## Plan de Trabajo

## Revisión del Estado del Arte

Esta sección proporciona una revisión exhaustiva de los protocolos de enrutamiento existentes en redes IoT/mesh, así como de las aplicaciones emergentes de la IA y el ML en este ámbito. Se destacan las motivaciones para integrar el ML, las tendencias actuales de investigación y las brechas detectadas en la literatura.

#### Protocolos de Enrutamiento en Redes IoT/Mesh

Una comprensión profunda de los protocolos de enrutamiento clásicos es esencial para establecer una base comparativa válida y, en algunos casos, servir como cimientos para enfoques híbridos con ML. Se analizarán en detalle los protocolos AODV, OLSR, DSDV, DSR (ya implementados en NS-3), y se explorará la viabilidad de integrar otros como HWMP, Babel, BATMAN y RPL. La evaluación crítica de sus fortalezas y debilidades en distintos escenarios permitirá identificar áreas de mejora y oportunidades para la aplicación del ML.

Los protocolos tradicionales no deben considerarse puntos de referencia estáticos, sino sistemas cuyas limitaciones operativas evidencian la necesidad de soluciones adaptativas. En contextos de movilidad, interferencia o ataques, su naturaleza reactiva se revela insuficiente. La IA no pretende sustituir completamente a estos protocolos, sino potenciar su capacidad de adaptación, posibilitando diseños de red más resilientes e inteligentes.

#### Aplicaciones de IA/ML en Redes IoT/Mesh

La incorporación de técnicas de IA/ML está revolucionando el funcionamiento de las redes IoT/mesh, introduciendo mecanismos de adaptación y optimización dinámica.

* ***Protocolos de enrutamiento adaptativos****:* Los modelos de ML permiten decisiones de enrutamiento en tiempo real que se ajustan a cambios topológicos, condiciones de interferencia, congestión y ataques.
* ***Predicción de fallos y congestión****:* Algoritmos como redes neuronales, árboles de decisión, Q-learning y LSTM anticipan enlaces problemáticos, permitiendo reacciones proactivas.
* ***Balanceo de carga inteligente****:* Modelos entrenados distribuyen el tráfico de manera óptima, reduciendo cuellos de botella y mejorando la QoS.
* ***Detección de anomalías y nodos maliciosos****:* El ML permite identificar patrones de tráfico inusuales o maliciosos, fortaleciendo la seguridad frente a ataques sofisticados.
* ***Aprendizaje federado****:* Cada nodo entrena modelos localmente y comparte solo los parámetros, protegiendo la privacidad y mejorando la escalabilidad.

Investigaciones recientes han propuesto enfoques como:

* Q-routing y DQN: aprendizaje por refuerzo para decisiones de salto.
* Enrutamiento con LSTM: predicción de calidad de enlace.
* Protocolos híbridos clásico-ML.
* Optimización multiobjetivo con algoritmos genéticos y de refuerzo.

## Diseño y Validación de Escenarios de Simulación

Esta sección describe la metodología empleada para el diseño de entornos de simulación robustos, realistas y reproducibles en NS-3. Se propone una progresión desde condiciones controladas hasta escenarios híbridos complejos que reflejan implementaciones reales de redes IoT/mesh.

#### Definición de Escenarios

Se contemplarán dos tipos principales de escenarios:

###### **Escenarios Separados (análisis controlado):**

* ***Red estática:*** Nodos fijos sin movilidad ni interferencia, utilizada como línea base.
* ***Red móvil:*** Nodos con movilidad realista basada en modelos como Random Waypoint o trayectorias urbanas mediante SUMO.
* ***Red con interferencia:*** Presencia de nodos que generan ruido o tráfico disruptivo.
* ***Red con nodos maliciosos:*** Simulación de ataques como flooding, blackhole o manipulación de rutas.
* ***Escenarios VANET:*** Vehículos en movimiento en mapas reales, enfocados en movilidad extrema.

El análisis controlado permite evaluar el efecto aislado de variables clave sobre el rendimiento de los protocolos y genera conjuntos de datos limpios para el entrenamiento de modelos de ML.

###### **Escenarios Híbridos (análisis realista):**

* ***Smart City/Campus/Aeropuerto:*** Combinación de nodos fijos y móviles, interferencia, ataques y tráfico heterogéneo.
* ***Resiliencia Urbana:*** Simulación de eventos disruptivos como desastres naturales o cortes de red, evaluando la auto-organización de la red.
* ***Basados en mapas reales:*** Trayectorias generadas con OpenStreetMap y SUMO para replicar entornos urbanos.
* ***Dinámicos y adaptativos:*** Inclusión de eventos súbitos (interferencias, fallos, ataques).
* ***Multi-escala:*** Combinación de micro y macro-escenarios.
* ***Colaboración inter-red*:** Coexistencia de múltiples tecnologías (WiFi, LTE, LoRa, etc.) y análisis del handover inteligente.

El diseño de escenarios avanzados permite validar rigurosamente las capacidades adaptativas de los protocolos basados en ML frente a entornos complejos y dinámicos.

## Implementación de Protocolos Clásicos y Adaptativos

Esta sección detalla los procedimientos técnicos requeridos para integrar protocolos de enrutamiento tanto estándar como mejorados mediante ML en el entorno de simulación NS-3, identificando desafíos clave y estrategias de solución.

#### Integración de Protocolos Clásicos

La implementación de protocolos tradicionales depende de su disponibilidad en NS-3:

* ***Protocolos nativos:*** AODV, OLSR, DSDV y DSR están disponibles por defecto y se activan mediante sus respectivos helpers.
* ***HWMP (IEEE 802.11s Mesh):*** Integrado en el módulo mesh de NS-3, su configuración se realiza mediante MeshHelper.
* ***Babel (módulo externo):*** Requiere la integración del módulo desarrollado por TUM. La instalación involucra copiar el módulo a src/babel, modificar el archivo wscript y recompilar NS-3. Está diseñado principalmente para IPv6 y puede presentar limitaciones frente a las especificaciones del RFC.
* ***BATMAN (módulo externo):*** Puede integrarse mediante el proyecto comunitario BATSEN. Requiere pasos similares a Babel, incluyendo modificaciones al entorno de compilación.

Estos casos ilustran que, si bien NS-3 es una plataforma abierta, la integración de módulos externos implica desafíos técnicos considerables, afectando la reproducibilidad. Una documentación meticulosa de versiones, pasos de instalación y dependencias resulta esencial para facilitar la replicación y evolución del trabajo.

#### Desarrollo de Versiones Adaptativas Basadas en ML

La incorporación de inteligencia artificial en protocolos de enrutamiento se puede abordar mediante dos enfoques arquitectónicos principales:

* ***ML embebido en C++:*** Se implementa el modelo directamente en el código fuente de NS-3. Ofrece eficiencia computacional, pero requiere reimplementación manual de modelos.
* ***ML externo con bindings Python:*** Permite entrenar modelos fuera del simulador, empleando bibliotecas como PyTorch o TensorFlow, e integrarlos mediante PyBind o interfaces del módulo Python de NS-3. Esta aproximación promueve la reutilización de modelos avanzados y acelera el prototipado.

Esta decisión arquitectónica es estratégica. Mientras C++ ofrece mayor rendimiento, Python facilita el desarrollo de algoritmos complejos y el análisis de datos. La integración híbrida habilita una sinergia entre capacidades de simulación y modelos de ML sofisticados.

Componentes técnicos de la implementación adaptativa:

* ***Definición de entradas y salidas del modelo ML:*** Especificación del estado de la red y la acción esperada del modelo.
* ***Detección de anomalías en tiempo real:*** Modelos de ML identifican y reaccionan ante comportamientos sospechosos durante la simulación.
* ***Entrenamiento del modelo:***
  + Offline: El modelo se entrena previamente utilizando datos recolectados de simulaciones anteriores.
  + Online: El modelo aprende durante la ejecución, adaptándose en tiempo real a las condiciones cambiantes.

La eficacia de los modelos adaptativos depende en gran medida de la calidad de los datos de entrenamiento, lo cual refuerza la necesidad de escenarios de simulación bien diseñados. Además, se requiere un mecanismo eficiente de intercambio de datos entre NS-3 y el entorno ML para evitar cuellos de botella y preservar el rendimiento.

## Plan de Simulaciones y Métricas

Esta sección presenta un enfoque sistemático para la ejecución de simulaciones, la recolección de métricas de rendimiento y el análisis de resultados, con el fin de asegurar una evaluación rigurosa y estadísticamente válida de los protocolos de enrutamiento propuestos.

#### Métricas Principales

Las siguientes métricas serán empleadas para evaluar el comportamiento de los protocolos en distintos escenarios:

* ***Throughput:*** Cantidad total de datos entregados por unidad de tiempo.
* ***Latencia:*** Tiempo promedio que tarda un paquete en ir desde el origen hasta el destino.
* ***Jitter:*** Variación en la latencia entre paquetes sucesivos.
* ***Pérdida de paquetes:*** Porcentaje de paquetes transmitidos que no llegan a su destino.
* ***Overhead de control:*** Proporción del tráfico de control respecto al tráfico total.
* ***Tiempo de convergencia:*** Tiempo requerido para que la red estabilice las rutas tras un cambio topológico.
* ***Consumo energético:*** En caso de que los módulos lo permitan, se analizará el impacto energético de los protocolos.
* ***Tolerancia a fallos y ataques:*** Capacidad del protocolo para mantener la conectividad y el rendimiento en condiciones adversas.

Estas métricas permiten una evaluación multidimensional. La comparación entre protocolos tradicionales y adaptativos debe considerar compromisos entre indicadores, como latencia frente a consumo energético, o throughput frente a overhead.

#### Plan Experimental

Las simulaciones serán diseñadas para cubrir de forma exhaustiva la combinación de escenarios y protocolos definidos. Cada configuración será ejecutada múltiples veces con diferentes semillas aleatorias para garantizar la validez estadística.

* ***Número de repeticiones:*** Se realizarán al menos cinco ejecuciones por configuración para calcular medidas como media, desviación estándar e intervalos de confianza.
* ***Herramientas de análisis:*** Los datos recolectados mediante tracing y logging en NS-3 serán procesados y visualizados usando Python, R o Excel.
* ***Presentación de resultados:*** Se utilizarán tablas, diagramas de caja (boxplots), líneas de tiempo y mapas de calor para ilustrar las tendencias observadas.

## Enfoque Innovador y Diferenciador

Esta sección destaca las contribuciones distintivas de la propuesta de investigación, centrándose en escenarios avanzados y el empleo de técnicas de ML que amplían los límites actuales del enrutamiento en redes IoT/mesh.

###### **Escenarios de Resiliencia Urbana**

Una de las principales innovaciones consiste en la simulación de escenarios de resiliencia urbana. Estos implican la incorporación de eventos disruptivos como desastres naturales, fallos de infraestructura o interrupciones intencionadas, y permiten evaluar la capacidad de la red para reorganizarse, recuperar rutas y mantener servicios críticos (salud, transporte, seguridad).

Este enfoque contrasta con los análisis tradicionales centrados únicamente en el rendimiento bajo condiciones ideales. Al introducir condiciones extremas, se somete a prueba la robustez y adaptabilidad de los protocolos, especialmente aquellos potenciados con ML, los cuales pueden activar mecanismos de auto-curación y aprendizaje dinámico.

###### **Aprendizaje Transferido y Federado**

El proyecto contempla la aplicación de paradigmas de ML avanzados que mejoran la escalabilidad y privacidad de las soluciones:

* ***Aprendizaje Transferido:*** Consiste en entrenar modelos en un entorno específico y aplicar ese conocimiento en otros contextos, evaluando su capacidad de generalización ante condiciones no vistas.
* ***Aprendizaje Federado:*** Cada nodo realiza el entrenamiento local de modelos y comparte únicamente los parámetros, no los datos brutos, lo que preserva la privacidad y permite una adaptación distribuida.

Estas estrategias permiten extender las capacidades del enrutamiento inteligente a redes reales heterogéneas y distribuidas, sin necesidad de centralizar los datos, una exigencia crucial en muchos entornos IoT.

###### **Comparativa ML vs. Heurísticas Clásicas**

Se desarrollará un análisis sistemático para identificar condiciones bajo las cuales los protocolos basados en ML superan a los enfoques heurísticos tradicionales. Este análisis se centrará en escenarios dinámicos y de alta complejidad donde las reglas fijas suelen fallar.

###### **Colaboración Multi-red**

La investigación también abordará el funcionamiento de los protocolos de enrutamiento en contextos heterogéneos, donde coexisten múltiples tecnologías (WiFi, 6LoWPAN, LTE, LoRa, etc.). Se analizará cómo los mecanismos de ML permiten un handover inteligente entre redes y mejoran la interoperabilidad.

Cada experimento innovador será documentado con detalle, incluyendo su objetivo específico, protocolo evaluado, modificaciones sobre el escenario base, métricas especiales (como adaptabilidad, tiempo de recuperación o resistencia a fallos) y principales hallazgos.

## **Plan de Publicaciones**

Se prevé la redacción y presentación de entre tres y cinco artículos científicos en revistas y congresos internacionales de alto impacto. Estas publicaciones estarán alineadas con las distintas fases del proyecto:

* Revisión sistemática del estado del arte.
* Diseño metodológico de escenarios de simulación.
* Integración y validación de protocolos adaptativos.
* Comparación de resultados entre protocolos clásicos y basados en ML.
* Evaluación de enfoques innovadores como resiliencia urbana y aprendizaje federado.