

Planificación de Topología para Redes de Sensores Submarinas en Puertos de Barrios Costeros Inteligentes

Equipo PlaniGüinos

Clemente Mujica, Cristóbal Moraga, Iván Weber

Universidad Técnica Federico Santa María

Valparaíso, Chile

Email: {clemente.mujica, cristobal.moragag, ivan.weber}@usm.cl

Abstract—Este proyecto desarrolla una metodología de planificación para redes de sensores submarinas híbridas en puertos de barrios costeros inteligentes. Se propone un enfoque de optimización multi-objetivo basado en NSGA-II para determinar la topología de despliegue 3D de nodos sensores submarinos y boyas gateway. El objetivo es encontrar el frente de Pareto óptimo que balancea la maximización de la cobertura de monitoreo ambiental y la minimización del costo total de implementación, proporcionando una solución de planificación académicamente rigurosa y técnicamente factible.

Index Terms—redes submarinas, planificación topológica, NSGA-II, optimización multi-objetivo, sensores acuáticos portuarios

I. INTRODUCCIÓN

Los barrios costeros inteligentes requieren sistemas avanzados de monitoreo ambiental para gestionar sosteniblemente sus recursos marítimos y portuarios. Basándose en el *caso de estudio de redes de sensores urbanos analizado en la primera semana de clase*, se identificaron desafíos críticos en entornos acuáticos: atenuación RF severa bajo agua ($> 60 \text{ dB/m}$ a 2.4 GHz), comunicación acústica de velocidad limitada ($\approx 1500 \text{ m/s}$) y ancho de banda extremadamente restringido ($< 10 \text{ kHz}$ útil).

Estos factores, combinados con la alta latencia de propagación (factor $200,000\times$ mayor que RF) y la dificultad de mantenimiento, exigen arquitecturas especializadas y metodologías de planificación rigurosas.

Siguendo las metodologías estudiadas en *presentaciones de casos reales* de WSN analizadas en la asignatura, este proyecto propone una arquitectura híbrida (nodos submarinos + boyas gateway) como puente hacia sistemas terrestres. La importancia radica en desarrollar una metodología de optimización que resuelva rigurosamente el balance fundamental *costo vs. cobertura* mediante técnicas evolutivas multi-objetivo.

II. DESCRIPCIÓN DE LA RED

A. Arquitectura Híbrida Jerárquica

La red implementa una topología jerárquica de tres niveles diseñada para el monitoreo portuario:

Nivel 1 (Submarino): Nodos Sensores (SN). Dispositivos anclados al fondo (5-20m) con sensores multi-parámetro (pH, turbidez, temp.). Usan comunicación acústica (15-25 kHz) y poseen capacidad de ruteo multi-hop (SN-a-SN) para alcanzar el siguiente nivel.

Nivel 2 (Superficie): Boyas Gateway (BG). Plataformas flotantes que actúan como nodos de concentración y conversión de protocolo (Acústico-a-RF). Se comunican con los SNs y retransmiten datos vía RF (LoRaWAN/4G) al nivel terrestre.

Nivel 3 (Terrestre): Estación Costera (EC). Centro de control en tierra que actúa como *sink* único de la red, recibiendo datos de todas las BGs y conectándose a la red urbana del barrio inteligente.

B. Modelo Operacional para Planificación

Para efectos de la planificación, se asume una operación jerárquica. El objetivo es determinar la *topología estática óptima* (ubicaciones 3D). Se asume que un protocolo de ruteo multi-salto subyacente garantiza la conectividad al *sink* (EC) si existe un camino válido en el grafo de la red.

III. OBJETIVO DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y DIMENSIONADO

Desarrollar una metodología de optimización multi-objetivo (NSGA-II) para determinar la topología 3D de Nodos Sensores y Boyas Gateway en un área portuaria definida ($2 \times 2 \text{ km}$). El objetivo es generar el *frente de Pareto* que ilustra el trade-off fundamental entre: (1) Maximizar la Cobertura de Puntos de Interés (POIs) y (2) Minimizar el Costo Total de despliegue, garantizando siempre la conectividad total de la red.

IV. ENTRADAS DEL PROCESO DE PLANIFICACIÓN

Basado en la metodología estudiada en el *caso real de WSN urbanas* y las *presentaciones de casos similares*, las entradas técnicas son:

Escenario de Despliegue Geométrico: Modelo batimétrico 3D (DEM) de un área de 4 km^2 , discretizado en una grilla de $100 \times 100 \text{ m}$, con profundidades (rango: 8-25m) y zonas de exclusión (polígonos de navegación). *Método de obtención:*

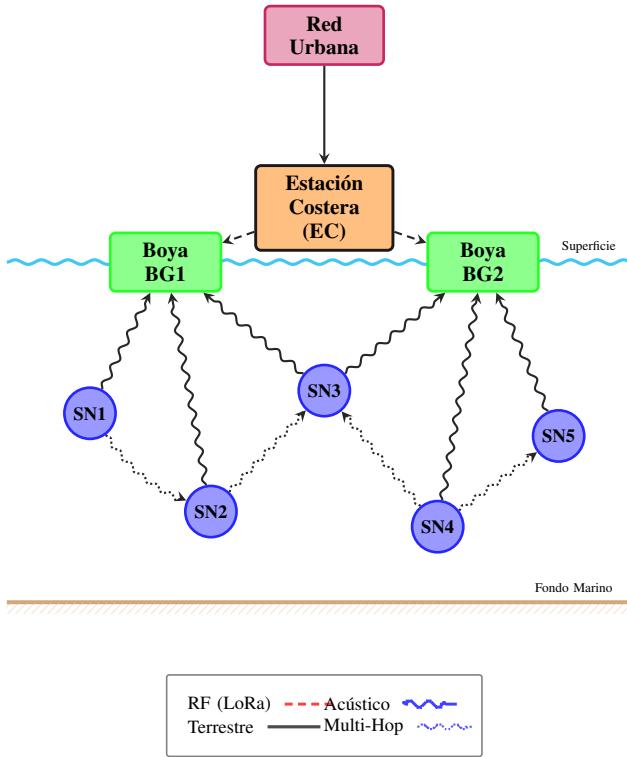


Fig. 1. Arquitectura Híbrida Jerárquica (SN-BG-EC)

Procesamiento de cartas SHOA para generar un DEM sintético realista.

Demanda de Cobertura Espacial (POIs): Conjunto de 20 Puntos de Interés (POIs) con coordenadas 2D/3D específicas (e.g., zonas de descarga, áreas de anclaje) y un radio de sensado requerido (100m). **Método de obtención:** Escenario sintético basado en el puerto de Valparaíso.

Modelo de Canal Acústico Simplificado: Función de atenuación basada en el modelo de Thorp para $f = 20 \text{ kHz}$, asumiendo $T = 15^\circ\text{C}$ y $S = 35 \text{ ppt}$. El modelo define un umbral de conectividad de 10 dB de SNR. **Método de obtención:** Implementación de la ecuación de Thorp en Python para calcular pérdidas y determinar conectividad binaria basada en el umbral de SNR.

Especificaciones y Costos de Equipos: Costo relativo: 1 unidad por SN, 5 unidades por BG. **Método de obtención:** Ratios basados en análisis de catálogos comerciales (e.g., SeaBird, EvoLogics) para ponderar la función de costo.

V. MÉTODO DE PLANIFICACIÓN

Metodología de 3 etapas centrada en la optimización evolutiva:

Etapa 1 - Implementación del Modelo de Escenario: Desarrollo en Python del entorno. Implementación de una función de conectividad $\text{conectado}(A, B)$ (basada en Thorp y umbral SNR) y una función de cobertura $\text{cubre_POI}(\text{sensor}, \text{poi})$ (basada en proximidad).

Etapa 2 - Optimización Multi-Objetivo (NSGA-II): Implementación del algoritmo (usando librería DEAP). -

Genoma: Se utilizará una representación cromosómica de longitud fija (e.g., N_{\max} boyas + M_{\max} sensores). El genoma contendrá las coordenadas (x, y, z) para cada nodo potencial y un bit de activación (0=inactive, 1=active). - **Funciones Objetivo:** Sea $N_{BG,\text{act}}$ y $N_{SN,\text{act}}$ el conteo de bits de activación: (1) Minimizar Costo = $5 \cdot N_{BG,\text{act}} + N_{SN,\text{act}}$ (2) Maximizar Cobertura = % POIs cubiertos. - **Restricción (Penalizada):** La conectividad total (verificada por DFS/BFS en el grafo de nodos activos) se manejará con una función de penalización severa, asignando fitness nulo a soluciones no conectadas.

Etapa 3 - Análisis y Selección de Soluciones: Generación del frente de Pareto completo. Análisis del trade-off costo-beneficio y selección de 3 soluciones representativas (e.g., Mínimo Costo, Máxima Cobertura, Punto de Equilibrio) para análisis detallado.

VI. SALIDAS

El proceso generará entregables de planificación concretos y cuantificables:

Plan de Despliegue (Topologías Óptimas): Conjunto de coordenadas (x, y, z) para cada SN y BG activos, para al menos 3 configuraciones óptimas extraídas del frente de Pareto (e.g., "Bajo Costo", "Balanceada", "Alta Cobertura").

Análisis de Trade-off (Frente de Pareto): Gráfico que cuantifica la relación costo-beneficio, mostrando el costo (en unidades relativas) requerido para alcanzar cada nivel de cobertura (en % de POIs).

Mapas de Cobertura y Conectividad: Visualización de las topologías seleccionadas sobre el mapa batimétrico, mostrando: (a) los POIs cubiertos, (b) las áreas de sensado, y (c) el grafo de conectividad (rutas acústicas y RF) que valida la conexión de todos los nodos al sink (EC).

VII. CONOCIMIENTOS/HERRAMIENTAS ADQUIRIDOS

Redes Ópticas WDM (TEL-317): La formulación de problemas de optimización multi-objetivo (e.g., minimizar bloqueo, maximizar utilización) y el uso de metaheurísticas (como algoritmos genéticos) para resolver problemas de asignación de recursos (RWA) es directamente aplicable a la **Etapa 2** para la optimización de topología.

Estructura de Datos y Algoritmos (ELO-320): Conocimiento fundamental de teoría de grafos, matrices de adyacencia y algoritmos de recorrido (DFS/BFS). Es crítico para la **Etapa 2**, específicamente para implementar la función de penalización que verifica la conectividad total de la red.

Simulación de Redes (TEL-341): Experiencia en el modelado de sistemas de comunicación y la creación de entornos de simulación (como en Python) para evaluar la performance de redes bajo ciertos supuestos. Habilidad central para la **Etapa 1** (Implementación del Modelo de Escenario).

Probabilidades y Procesos Aleatorios (ELO-204): Capacidad para entender y modelar fenómenos aleatorios. Es la base para comprender la naturaleza estocástica de los canales de comunicación (como el acústico) y justificar el uso de modelos de atenuación como Thorp en la **Etapa 1**.

Teoría de Comunicaciones Digitales (ELO-341): Comprensión de conceptos de SNR, presupuesto de enlace y tasa de error. Esencial para la **Etapa 1** para definir y justificar el *umbral de conectividad (10 dB)* como un criterio de diseño binario (conectado/no conectado).

Laboratorio de Redes (TEL-241) y Redes de Computadores (ELO-322): Experiencia práctica en la configuración y análisis de protocolos de ruteo y conectividad, fundamental para modelar la conectividad multi-salto en la **Etapa 2**.

VIII. CONOCIMIENTOS/HERRAMIENTAS NECESARIOS

Acústica Submarina Avanzada: Comprensión profunda de modelos de alta fidelidad (Bellhop, KRAKEN) que consideran efectos de refracción (termoclinas, salinidad) y reflexiones múltiples. *Limitación Aceptada:* El proyecto utiliza un modelo simplificado (Thorp) con parámetros constantes, suficiente para la planificación topológica pero no para un diseño de ingeniería detallado.

Protocolos MAC para Redes Acústicas: Dominio de técnicas de acceso (TDMA, Aloha adaptativo) optimizadas para alta latencia y bajo ancho de banda. *Exclusión Justificada:* El proyecto se enfoca en la topología estática. El análisis de performance (latencia, throughput), que depende de estos protocolos, queda fuera del alcance.

Simuladores de Redes Submarinas (NS-3/UAN): Experiencia con simuladores especializados (UAN, AquaSim) para validar la performance de protocolos en topologías dadas. *Alcance Limitado:* Su aprendizaje es extenso y está fuera del alcance de este proyecto, pero representa el paso siguiente lógico para la validación.

Técnicas de Representación Cromosómica Variable: El método de genoma de longitud variable es complejo. La *simplificación adoptada* (genoma de longitud fija con bits de activación), como se describe en la Etapa 2 del método, es una técnica robusta y factible para el semestre, alineando el método con las limitaciones.

REFERENCES

- [1] K. Deb, A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Trans. Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, pp. 182–197, Apr. 2002.
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater Acoustic Sensor Networks: Research Challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257–279, Mar. 2005.
- [3] W. H. Thorp, "Analytic Description of the Low-Frequency Attenuation Coefficient," *J. Acoustical Society of America*, vol. 42, p. 270, 1967.