

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 dB/m a 2.4 GHz), comunicación acústica de velocidad limitada (≈ 1500 m/s) y ancho de banda extremadamente restringido (< 10 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.

Siguiendo 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 (2×2 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:*

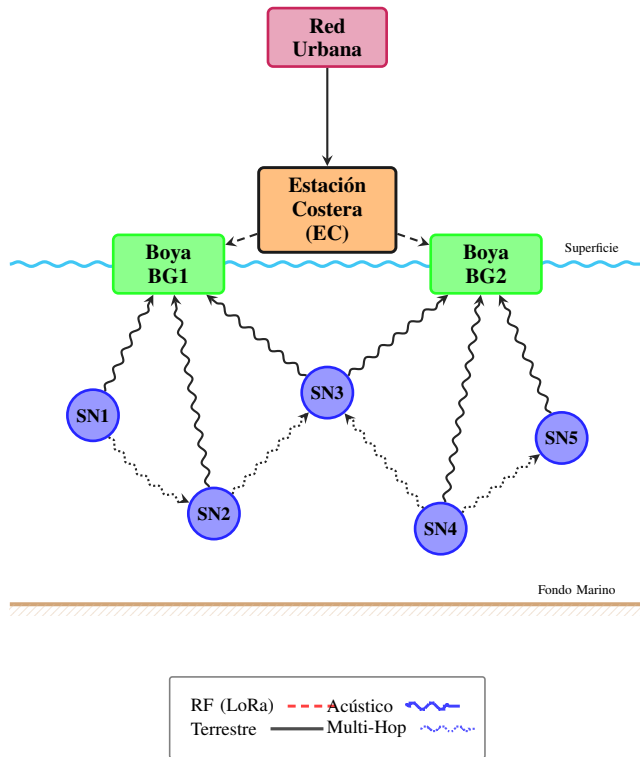


Fig. 1. Arquitectura Híbrida Jerárquica (SN-BG-EC)

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 $f = 20$ kHz, asumiendo $T = 15^\circ\text{C}$ y $S = 35$ 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., Sea-Bird, EvoLogics) para ponderar la función de costo.

V. MÉTODO DE PLANIFICACIÓN

Metodología de 3 etapas centrada en la optimización evolutiva:

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

Etap 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=activo). - **Funciones Objetivo:** Sea $N_{BG,act}$ y $N_{SN,act}$ el conteo de bits de activación: (1) Minimizar Costo = $5 \cdot N_{BG,act} + N_{SN,act}$ (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.

Etap 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 **Etap 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 **Etap 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 **Etap 1**.

Teoría de Comunicaciones Digitales (ELO-341): Comprensión de conceptos de SNR, presupuesto de enlace y tasa de error. Esencial para la **Etapla 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 **Etapla 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.