

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

Clemente Mujica, Cristóbal Moraga, Iván Weber

Equipo PlaniGüinos

Universidad Técnica Federico Santa María

Valparaíso, Chile

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

**Resumen**—Este trabajo presenta el proceso de planificación y dimensionamiento de una red de sensores submarinos (UWSN) para monitoreo ambiental en la Bahía de Valparaíso. Se describe el método de estimación de la demanda de tráfico, la determinación de la ubicación de nodos sensores y boyas gateway, la definición de costos de enlaces y la obtención de una topología final óptima mediante un algoritmo NSGA-II multiobjetivo. La topología resultante cubre el 100 % de los puntos de interés definidos, manteniendo un costo relativo acotado y respetando estrictas restricciones batimétricas y de seguridad costera.

**Index Terms**—UWSN, NSGA-II, Bahía de Valparaíso, planificación de redes, batimetría, IoT marítimo

## I. INTRODUCCIÓN

La planificación de redes de sensores submarinos (Underwater Wireless Sensor Networks, UWSN) en entornos portuarios exige integrar restricciones físicas, batimétricas y operacionales con objetivos de cobertura de puntos de interés (POI) y costos de despliegue. En este trabajo se aborda el diseño de una red UWSN para la Bahía de Valparaíso, considerando como contexto el proyecto previo de *Planificación de topología para redes de sensores submarinas en puertos de barrios costeros inteligentes*, donde se establecieron los modelos de propagación acústica, el catálogo de equipos y la metodología general de diseño.

El objetivo de esta etapa es refinar la topología propuesta, integrando información cartográfica detallada (cartas SHOA, OpenStreetMap y overlays náuticos) y una generación realista de POI ambientales y operacionales. Se adopta un enfoque de optimización multiobjetivo, donde se minimiza el costo relativo de la red y se maximiza el porcentaje de cobertura de POI, sujeto a restricciones de conectividad y seguridad (todos los nodos y POI deben ubicarse en agua, con márgenes respecto de la línea de costa). El resultado es una topología final con siete nodos sensores submarinos y una boya gateway de superficie, interconectados por enlaces acústicos y radio LoRaWAN hacia un centro de monitoreo costero.

## II. MÉTODO DE ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE TRÁFICO

La demanda de tráfico de la red se estimó a partir de los escenarios de monitoreo definidos en el trabajo previo y adap-

tados a la realidad de la Bahía de Valparaíso. Se consideraron cuatro tipos principales de POI: descargas industriales, zonas de fondeo, *Sensitive Areas* y *Critical Monitoring*. Cada tipo se asocia a una prioridad y a un perfil de generación de datos.

Para cada tipo de POI se definió una tasa de generación de datos por sensor (en kbps) y un intervalo de muestreo, de acuerdo con los requerimientos de la literatura para variables físico-químicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto) y de seguridad (detección de vertimientos). Siguiendo el informe base, se distinguió entre:

- Escenarios de monitoreo continuo (POI críticos), con tasas de tráfico más altas y requisitos de baja latencia.
- Escenarios periódicos (POI sensibles y de fondeo), con tráficos promedios menores pero con picos en eventos anómalos.

La demanda de tráfico total se calculó agregando el tráfico esperado de todos los POI cubiertos por cada nodo sensor, considerando la capacidad de cada enlace acústico y el dimensionamiento de la boya gateway y el enlace radio hacia la estación costera. Los parámetros y resultados se implementaron en el notebook *UWSN\_Planning\_Valparaiso.ipynb*, donde se almacenan en estructuras de datos como TRAFFIC y LORAWAN\_CONFIG. El dimensionamiento final verifica que el tráfico total cursado por el gateway se encuentra por debajo de la capacidad efectiva del enlace LoRaWAN definido en el proyecto base.

## III. DETERMINACIÓN DE LA UBICACIÓN DE LOS NODOS

La ubicación de los nodos sensores submarinos (SN) y de las boyas gateway (BG) se determinó combinando información batimétrica y cartográfica con un proceso de optimización estocástica.

### III-A. Datos empleados

Se utilizó una malla batimétrica local derivada de la carta SHOA 4201 para la Bahía de Valparaíso, complementada con la grilla global GEBCO 2025 para validar profundidades fuera del dominio principal. La malla se almacenó en formato .npy (archivo *bathymetry.npy*) y se cargó en el notebook para construir un campo de profundidad  $h(\varphi, \lambda)$ .

Para representar el dominio marino se definió un polígono *base* de agua (WATER\_POLYGON\_BASE) ajustado a la carta SHOA y desplazado ligeramente hacia el oeste en longitud para compensar discrepancias entre la cartografía raster y el fondo de OpenStreetMap. Sobre este polígono se aplicaron dos tipos de márgenes de seguridad:

- Un margen general de 250 m respecto de la línea de costa (COASTAL\_SAFETY\_MARGIN\_M), que se traduce a grados de longitud y latitud mediante factores LAT\_KM\_PER\_DEGREE y LON\_KM\_PER\_DEGREE.
- Un margen específico hacia el oeste de 400 m para cualquier punto cuya longitud exceda un umbral (EASTERN\_LON\_THRESHOLD), con el fin de evitar ubicaciones próximas al borde costero en ventanas donde el fondo cartográfico es más impreciso.

Los POI se generaron mediante un procedimiento de muestreo aleatorio controlado (función generate\_pois\_in\_water), que asegura que todos los centros de los discos de cobertura queden al interior del polígono de agua, respetando los mismos márgenes de seguridad que los nodos sensores. Los parámetros de número de POI por tipo, radios de influencia y prioridades se definieron en la estructura POI\_CONFIG.

### III-B. Optimización de ubicaciones

Sobre este dominio se aplicó un algoritmo de optimización multiobjetivo NSGA-II, implementado en Python, que explora configuraciones de nodos sensores y boyas gateway. Cada individuo de la población codifica un subconjunto de nodos activos (SN y BG) y su posición en coordenadas geográficas discretizadas sobre el dominio de agua.

El algoritmo evalúa para cada individuo dos funciones objetivo: (i) el costo relativo de la red, definido a partir de un catálogo de costos CAPEX y OPEX por tipo de equipo, y (ii) el porcentaje de cobertura de POI, calculado a partir de la distancia entre cada POI y el nodo sensor más cercano dentro de su radio de influencia. Se ejecutaron simulaciones con una población de 160 individuos y 320 generaciones, con probabilidad de cruce de 0,88 y de mutación de 0,22.

El resultado es un frente de Pareto con 160 soluciones no dominadas, en el cual la cobertura varía entre 25 % y 100 %, mientras que el costo relativo oscila entre 6 y 12 unidades normalizadas. A partir de dicho frente se seleccionó una solución balanceada que logra el 100 % de cobertura con un costo relativo de 12 y una topología de 7 sensores submarinos y 1 boyas gateway.

## IV. DETERMINACIÓN DE ENLACES E INDEXACIÓN DE COSTOS

Una vez fijadas las posiciones de los nodos activos, se determinaron los enlaces a instalar y sus costos asociados.

### IV-A. Enlaces acústicos submarinos

Entre cada par de nodos sensores y la boyas gateway se evaluó la factibilidad de un enlace acústico punto a punto, utilizando el modelo de pérdidas de propagación y absorción

definido en el informe base (modelo de Thorp y pérdidas geométricas con exponente de propagación ajustable). Para cada posible enlace se calcula la relación señal a ruido (SNR) a partir de la distancia, la profundidad y los parámetros del transmisor y receptor.

Se construyó una matriz de adyacencia donde se marca un enlace *activo* cuando la SNR cumple el umbral mínimo requerido y la distancia se mantiene dentro del rango acústico máximo admisible (aproximadamente 5,9 km en la solución final). La topología seleccionada presenta conectividad completa: cada sensor posee siete vecinos y el número máximo de saltos hacia la boyas gateway es igual a uno.

### IV-B. Enlace de superficie y backhaul

La boyas gateway se conecta con una estación costera mediante un enlace radio LoRaWAN o equivalente, según el diseño del proyecto base. Se verificó que la distancia horizontal entre la boyas seleccionada y la costa está dentro del rango de cobertura radio definido en LORAWAN\_CONFIG, tomando en cuenta la curvatura de la costa y los márgenes de seguridad.

### IV-C. Modelo de costos

El costo de la red se modeló como la suma de un componente CAPEX (inversión inicial) y un componente OPEX (costos anuales), parametrizados en el catálogo de equipos y servicios del informe previo. En la solución seleccionada se obtiene:

- CAPEX total aproximado de \$ 339,900 USD, distribuido en sensores, boyas gateway, computador de borde, despliegue, infraestructura, ingeniería y contingencia.
- OPEX anual de aproximadamente \$ 73,698 USD, considerando mantenimiento, energía, comunicaciones, personal, reposición, seguros y licencias de software.

Con una proyección a 10 años y una tasa de descuento del 8 %, el costo total de propiedad (TCO) se estima en torno a \$ 834,423 USD. Se derivan también métricas de eficiencia, como costo por POI cubierto (\$ 41,721) y costo por kilómetro cuadrado monitoreado (\$ 265,605), que permiten comparar alternativas de topología.

## V. TOPOLOGÍA FINAL

La Figura 1 muestra la topología final seleccionada, superpuesta sobre un mapa de la Bahía de Valparaíso. El diagrama fue generado en el notebook a partir de la función de visualización geoespacial, utilizando como fondo cartográfico OpenStreetMap con un polígono de agua ajustado a la carta SHOA 4201 y un overlay batimétrico. La capa de honduras y fondos se obtuvo a partir de la malla batimétrica bathymetry.npy, mientras que los discos de influencia de los POI se calcularon según la configuración POI\_CONFIG. En la figura se distinguen:

- Siete nodos sensores submarinos (SN-1 a SN-7), ubicados en profundidades entre 9 m y 24 m, todos validados como ubicaciones en agua.

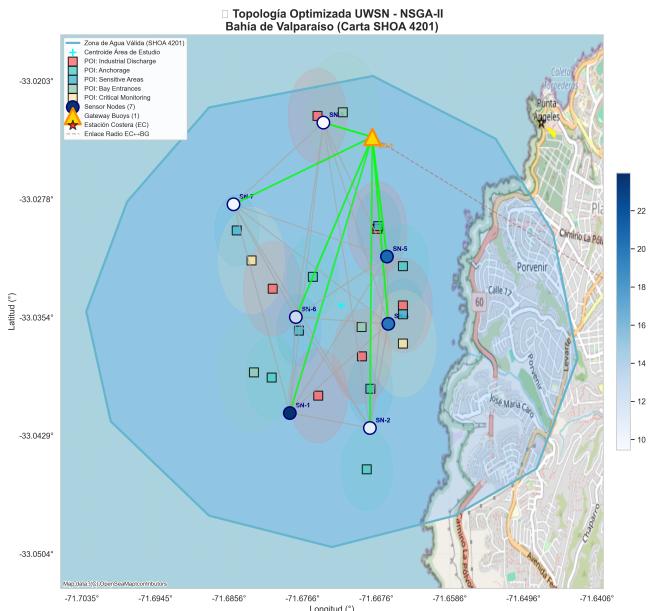


Figura 1. Topología optimizada de la red UWSN en la Bahía de Valparaíso, con nodos sensores, boyá gateway, POI y enlaces activos superpuestos sobre la carta base.

- Una boyá gateway (BG-1) de superficie, que actúa como punto de agregación de tráfico hacia la estación costera.
- Discos de cobertura alrededor de cada POI, que ilustran la influencia de los sensores sobre descargas industriales, zonas de fondeo y *Sensitive/Critical Areas*.
- Enlaces acústicos activos entre sensores y gateway (en verde), y el enlace radio entre BG-1 y el centro costero.

La topología cumple las siguientes propiedades clave: (i) cobertura del 100 % de los POI generados, (ii) conectividad completa con un solo salto hacia el gateway y (iii) cumplimiento estricto de las restricciones batimétricas y de seguridad costera, al aplicar simultáneamente el desplazamiento del polígono de agua, el margen general de 250 m y el margen específico de 400 m hacia el oeste para longitudes superiores al umbral definido.

## VI. TRABAJO FUTURO

A pesar de que la topología obtenida satisface los objetivos de cobertura y costo planteados, el proceso de planificación puede ampliarse en varias direcciones:

- **Modelos de tráfico más detallados:** incorporar perfiles de generación de datos dependientes de la estación del año, eventos extremos y políticas adaptativas de compresión y agregación en los nodos.
- **Fiabilidad y tolerancia a fallos:** analizar escenarios de falla de nodos o enlaces e introducir objetivos adicionales relacionados con k-conectividad y robustez frente a la pérdida de dispositivos.
- **Optimización energética:** incluir en la función objetivo el consumo energético estimado de los nodos y del enlace backhaul, así como estrategias de *sleep scheduling*.

■ **Integración de condiciones oceanográficas:** extender el modelo de propagación acústica para considerar variaciones espacio-temporales en temperatura, salinidad y corrientes, lo que podría afectar el rango efectivo de los enlaces.

■ **Validación empírica:** contrastar la topología propuesta con mediciones reales en terreno (batimetría de mayor resolución, pruebas de enlace acústico) y ajustar los parámetros del modelo.

## VII. APRECIACIÓN PERSONAL DEL TRABAJO

Desde el punto de vista del grupo, este trabajo resultó especialmente útil para consolidar conceptos de planificación de redes en un contexto marítimo realista. La integración entre datos cartográficos (cartas SHOA, OpenSeaMap, GEBCO), modelos físicos de propagación acústica y técnicas de optimización multiobjetivo permitió visualizar de manera concreta cómo las decisiones de ubicación de nodos impactan en el costo y la cobertura.

Entre los aspectos más desafiantes se encuentran la depuración de la geometría costera (evitar que sensores o POI queden sobre tierra a pesar de estar dentro del polígono nominal de agua), la configuración y ejecución del algoritmo NSGA-II con tiempos de cómputo razonables y la interpretación simultánea de múltiples figuras (frentes de Pareto, mapas, histogramas de cobertura, gráficos económicos).

Por otra parte, resultó relativamente sencillo reutilizar la infraestructura de código y metodología del proyecto previo, así como automatizar la generación de gráficos y reportes económicos a partir del Jupyter Notebook. La posibilidad de explorar interactivamente distintas configuraciones y visualizar en tiempo real su impacto sobre la topología y los costos fue un elemento motivador y formativo.

En conjunto, el trabajo reafirma la utilidad de las herramientas de simulación y optimización computacional para apoyar la toma de decisiones en el diseño de redes UWSN, y sienta una base sólida para futuras extensiones hacia escenarios más complejos y despliegues reales.

## REFERENCIAS

- [1] Cristóbal Moraga, Iván Weber, Clemente Mujica, “Planificación de topología para redes de sensores submarinos en puertos de barrios costeros inteligentes,” Informe técnico, 2025.
- [2] GEBCO Compilation Group, “GEBCO 2025 Grid,” disponible en: <https://www.gebco.net/>.
- [3] Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), “Carta 4201 – Bahía de Valparaíso,” 2025.
- [4] OpenStreetMap contributors, “OpenStreetMap,” <https://www.openstreetmap.org>.
- [5] OpenSeaMap contributors, “OpenSeaMap – The Free Nautical Chart,” <https://www.openseamap.org>.