



Diseño de Sistemas de radio definida por Software (SRD) para redes dinámicas en entornos de emergencia

Design of Software-Defined Radio (SRD) Systems for Dynamic Networks in Emergency Environments

Projeto de sistemas de rádio definido por software (SRD) para redes dinâmicas em ambientes de emergência

Carmen de las Mercedes Beltrán-Mesías ¹

cdlm.beltran@uta.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-4114-8672>

Correspondencia: cdlm.beltran@uta.edu.ec

Ciencias Técnicas y Aplicadas

Artículo de Investigación

* **Recibido:** 28 de noviembre de 2024 * **Aceptado:** 30 de diciembre de 2024 * **Publicado:** 27 de enero de 2025

I. Ingeniera en Electrónica y Comunicaciones, Magíster en Redes y Comunicaciones; Docente Investigador de la Universidad Técnica de Ambato de la Facultad de Contabilidad y Auditoría; Ambato, Ecuador.

Resumen

El diseño de sistemas de radio definida por software (SRD) representa una solución innovadora para abordar los desafíos de comunicación en redes dinámicas durante situaciones de emergencia. Este artículo presenta un enfoque sistemático para el desarrollo e implementación de SRD, con énfasis en su aplicación en entornos caracterizados por alta movilidad, infraestructura limitada y condiciones impredecibles. Los SRD permiten configurar y optimizar dinámicamente los parámetros de la red, como la frecuencia, el ancho de banda y los protocolos, facilitando una comunicación eficiente entre los equipos de respuesta ante desastres.

La metodología empleada combina simulaciones computacionales y pruebas experimentales para evaluar la adaptabilidad de los sistemas propuestos en escenarios de emergencia simulados. Los resultados demuestran que los SRD son capaces de mitigar la interferencia, garantizar la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos y mantener una conectividad robusta incluso en condiciones adversas. Asimismo, se destacan las ventajas de los SRD en términos de escalabilidad y sostenibilidad, gracias a su capacidad para integrar tecnologías emergentes como 5G, IoT y aprendizaje automático.

Este trabajo concluye que el diseño de sistemas SRD constituye una herramienta esencial para mejorar la eficiencia y efectividad de las operaciones de comunicación en emergencias. Se recomienda ampliar las investigaciones hacia la implementación en tiempo real y el desarrollo de estándares que potencien su adopción en escenarios globales. Finalmente, se enfatiza la necesidad de cooperación entre actores gubernamentales, académicos y privados para maximizar el impacto de estas tecnologías en la gestión de desastres.

Palabras claves: Radio definida por software (SRD); Redes dinámicas; Comunicación en emergencias; Interoperabilidad; Gestión de desastres.

Abstract

Software-defined radio (SRD) system design represents an innovative solution to address communication challenges in dynamic networks during emergency situations. This paper presents a systematic approach to the development and implementation of SRDs, with an emphasis on their application in environments characterized by high mobility, limited infrastructure, and unpredictable conditions. SRDs allow dynamic configuration and optimization of network

parameters, such as frequency, bandwidth, and protocols, facilitating efficient communication between disaster response teams.

The methodology employed combines computational simulations and experimental tests to evaluate the adaptability of the proposed systems in simulated emergency scenarios. The results demonstrate that SRDs are capable of mitigating interference, ensuring interoperability between heterogeneous devices, and maintaining robust connectivity even under adverse conditions. Likewise, the advantages of SRDs in terms of scalability and sustainability are highlighted, thanks to their ability to integrate emerging technologies such as 5G, IoT, and machine learning. This paper concludes that the design of SRD systems is an essential tool to improve the efficiency and effectiveness of emergency communication operations. It is recommended to expand research towards real-time implementation and the development of standards that enhance their adoption in global scenarios. Finally, the need for cooperation between governmental, academic and private actors to maximize the impact of these technologies in disaster management is emphasized.

Keywords: Software-defined radio (SRD); Dynamic networks; Emergency communication; Interoperability; Disaster management.

Resumo

O design do sistema de rádio definido por software (SRD) representa uma solução inovadora para enfrentar os desafios de comunicação em redes dinâmicas durante situações de emergência. Este artigo apresenta uma abordagem sistemática para o desenvolvimento e implementação de SRD, com ênfase na sua aplicação em ambientes caracterizados por elevada mobilidade, infraestruturas limitadas e condições imprevisíveis. Os SRD permitem a configuração dinâmica e a otimização de parâmetros de rede, como a frequência, a largura de banda e os protocolos, facilitando a comunicação eficiente entre equipas de resposta a catástrofes.

A metodologia utilizada combina simulações computacionais e testes experimentais para avaliar a adaptabilidade dos sistemas propostos em cenários de emergência simulados. Os resultados demonstram que os SRD são capazes de mitigar interferências, garantir a interoperabilidade entre dispositivos heterogêneos e manter uma conectividade robusta mesmo em condições adversas. As vantagens dos SRD em termos de escalabilidade e sustentabilidade são também destacadas, graças à sua capacidade de integrar tecnologias emergentes como o 5G, a IoT e a aprendizagem automática.

Este trabalho conclui que o projeto de sistemas SRD constitui uma ferramenta essencial para melhorar a eficiência e a eficácia das operações de comunicação de emergência. Recomenda-se a expansão da investigação para a implementação em tempo real e o desenvolvimento de normas que promovam a sua adoção em cenários globais. Por fim, é enfatizada a necessidade de cooperação entre os intervenientes governamentais, académicos e privados para maximizar o impacto destas tecnologias na gestão de catástrofes.

Palavras-chave: Rádio definido por software (SRD); Redes dinâmicas; Comunicação em emergências; Interoperabilidade; Gestão de catástrofes.

Introducción

En los entornos de emergencia, la comunicación eficiente y confiable es fundamental para coordinar acciones, mitigar riesgos y salvar vidas. Sin embargo, las condiciones impredecibles y la limitada infraestructura suelen dificultar las operaciones de redes tradicionales. En este contexto, los sistemas de radio definida por software (SRD) se presentan como una solución versátil que permite configurar, adaptar y optimizar dinámicamente los parámetros de comunicación, proporcionando una mayor flexibilidad para responder a las demandas cambiantes de las redes dinámicas en situaciones críticas.

Estudios recientes han explorado las capacidades de los SRD para mejorar la interoperabilidad en redes heterogéneas, un factor crucial en los entornos de emergencia donde múltiples dispositivos y tecnologías deben trabajar de forma coordinada. Investigaciones como las de Smith et al. (2021) han destacado cómo los SRD pueden integrar múltiples bandas de frecuencia y protocolos en tiempo real, lo que garantiza una comunicación fluida entre equipos de diferentes organismos de respuesta.

Por otro lado, se ha puesto énfasis en la adaptabilidad de los SRD en condiciones de alta movilidad y congestión de red. Trabajos como el de González y Pérez (2020) demuestran que los algoritmos de aprendizaje automático incorporados en los SRD permiten optimizar el uso del espectro y reducir las interferencias, incluso en escenarios adversos como terremotos o inundaciones.

Adicionalmente, estudios enfocados en la sostenibilidad de estas tecnologías han identificado que los SRD son una herramienta escalable que puede integrar tecnologías emergentes como el 5G y el IoT, potenciando la capacidad de respuesta en desastres. Johnson et al. (2022) subrayan que la flexibilidad de los SRD permite su despliegue eficiente en entornos con recursos limitados.

Considerando estos avances, el presente artículo tiene como objetivo diseñar y evaluar sistemas SRD para redes dinámicas en entornos de emergencia, priorizando la interoperabilidad, adaptabilidad y sostenibilidad. Además, se busca contribuir al desarrollo de estándares técnicos y estrategias que impulsen su adopción en contextos reales de gestión de desastres.

Desarrollo

I.Introducción a los Sistemas de Radio Definida por Software (SRD)

La adquisición de tecnologías emergentes en la actualidad ha propiciado un incremento notable en la disponibilidad de dispositivos electrónicos que facilitan y garantizan mayor seguridad en nuestra cotidianidad. Entre estos dispositivos se encuentra el teléfono móvil, cuya introducción en la década de 1980 se centró inicialmente en proporcionar movilidad al usuario en lo que respecta a las comunicaciones de voz, y que ha continuado su evolución a un ritmo acelerado. Uno de los estándares de telefonía móvil más extendidos, cuyo uso es incluso más prevalente que el del teléfono fijo, es el conocido como GSM. Este, junto con el GPRS, ha logrado ofrecer una amplia variedad de funciones y servicios a través de una red que, por sus características, emula un entorno de red fija, aunque a su vez puede actuar como un entorno de red dinámica gracias a su capacidad para realizar cambios entre celdas móviles durante su funcionamiento. (Salor & Baeza, 2021)

En la evolución de los diversos sistemas de redes ad-hoc, se requiere la implementación de distintas tecnologías de movilidad, cuyo análisis se realizará en el capítulo 2, dependiendo del entorno en el que se establezca la red. Es importante señalar que todas estas tecnologías recurrirán a algún tipo de Radio Definida por Software, cuyo uso variará conforme al tipo de entorno elegido. De este modo, a lo largo de los años, el avance de la tecnología SRD ha permitido la transición desde radios o tecnologías de Tipo RX, que son fijas y se fundamentan en circuitos de recepción fijos con un bajo ancho de banda, hacia sistemas de Tipo RX/TX, que se basan en circuitos fijos de recepción y transmisión, generalmente en full-duplex, además de la implementación de Banda ancha análoga a sus equivalentes de tipo fijo.

II.Redes de Comunicación en Entornos de Emergencia

La organización de las redes de comunicación en los planes destinados a entornos de emergencia se encuentra directamente relacionada con la envergadura de la red. Por ejemplo, en el contexto de un incendio que afecte únicamente a un bloque de viviendas, la estructuración de una red de comunicaciones resulta innecesaria. Sin embargo, si el incendio involucra a dos o más bloques de

viviendas, se torna indispensable establecer una red de comunicaciones sencilla, ya sea mediante un Centro de Coordinación o a través de los distintos jefes de incidente designados. La red de datos diseñada también debe poseer la capacidad de operar en un modo completamente descentralizado, considerando las limitaciones geográficas impuestas por la edificación o la estructura. En situaciones que involucren incidentes mucho más complejos y informatizados que el caso anteriormente mencionado, tales como aquellos relacionados con flujos de trabajo automatizados, como la gestión del tráfico urbano o los centros de control de gas y electricidad en una ciudad, es necesario habilitar los conductos en la red de datos para facilitar el tránsito de las señales requeridas. (Sanz González, 2023)

Por otro lado, el hecho de que el diseño del SRD se elabore sin un conocimiento preciso del diseño de la red de datos del incidente analizado, sino fundamentándose en supuestos previamente mencionados, ocasiona que las características del SRD no sean necesariamente las más adecuadas. Por ejemplo, la distancia que hemos establecido para la comunicación D2D será siempre inferior al alcance máximo de la estación base, lo que resulta en que los dispositivos equipados con SRD que se encuentren a una mayor distancia de sus estaciones base no podrán realizar la comunicación D2D aprovechando la infraestructura.

III. Características y Desafíos

La banda de operación o los canales operacionales permiten ofrecer una mayor flexibilidad en términos de cobertura geográfica en comparación con las redes inalámbricas convencionales. Además, estas bandas poseen la capacidad de transmitir información con un mayor ancho de banda, lo que facilita la implementación de servicios de video, voz y datos. En segundo lugar, las Redes de Datos Secundarias (SRD) están siendo consideradas para la provisión de una amplia gama de servicios, destacándose por su capacidad de adaptarse a una tipología de red dinámica mediante cambios en las configuraciones, ya sean programados o automáticos. Esto tiene como objetivo la reducción de los tiempos y costos asociados con la implementación que tradicionalmente caracterizan el despliegue y licenciamiento de redes fijas de diversas tecnologías. (Chafra, 2024)

La oferta actual de SRD ha sido concebida para redes estáticas, evidenciándose una considerable brecha en cuanto al aprovechamiento de esta tecnología en la implementación de redes móviles o dinámicas. Estas últimas están diseñadas con el objetivo de optimizar la calidad de los servicios en aspectos como cobertura, ancho de banda, entre otros, particularmente en situaciones de desastres naturales, incidentes urbanos y alertas de tsunami a raíz de terremotos, entre otras eventualidades.

La implementación de redes móviles dinámicas o RRDD puede llevarse a cabo aprovechando las características arquitectónicas de las SRD, lo que requiere una organización de PR que incorpore movilidad interna y la capacidad de analizar la cantidad y calidad de los datos censales de manera efectiva. No obstante, en la actualidad, solo se dispone de un modelo genérico o estándar de PR para las RRDD, que comprende RRHH, RP y RRHH móviles, el cual no proporciona la claridad necesaria para la implementación de sistemas de SRD en este ámbito.

IV. Evolución y Estado Actual de las Tecnologías SRD

Las tecnologías de SRD han sido implementadas principalmente en redes estáticas, tales como las militares, de emergencia, marítimas, entre otras. Por su parte, las tecnologías de redes ad-hoc han sido evaluadas en entornos militares y en dispositivos especiales de navegación en terrenos montañosos. Hasta el momento, no se ha desarrollado nada en el ámbito de radios comerciales o SRD. Este aspecto es el que se desea enfatizar en la tesis y que debe ser llevado a cabo. Es decir, se requiere diseñar un equipo basado en SRD-AD-HOC que sea capaz de superar todas estas limitaciones, ofreciendo una serie de prestaciones como las mencionadas en este capítulo. (Domínguez Vásquez, 2024)

Los Sistemas de Radio Definidos por Software (SRD) han experimentado una notable evolución en los últimos años, especialmente a raíz de la introducción de dispositivos de cálculo basados en tecnología FPGA por parte de los fabricantes de componentes electrónicos. En este contexto, la radio digital ha estado presente desde hace varias décadas; sin embargo, en tiempos recientes se ha observado un significativo aumento en la adopción de este tipo de tecnología, es decir, de la radio definida por software. Como ocurre en diversos ámbitos de la electrónica, un mismo concepto puede recibir diferentes denominaciones; en este caso, la radio definida por software también es identificada por términos como radioconfigurable, radio definida por computadora, entre otros. Es fundamental destacar que el término software no se refiere al software que opera en un ordenador genérico, sino al denominado radio software, que se describe por la utilización de todas o algunas de las técnicas de diseño de radios analógicos —hasta el momento de su fabricación— mediante códigos de software, en contraposición a las radios digitales programables que gestionan un conjunto de módulos digitales con flujos de bits, también conocidos como señales digitales. En resumen, la radio definida por software proporciona la flexibilidad, el paralelismo y el bajo costo que caracterizan a los circuitos digitales, junto a una eficiencia aceptable en términos de potencia, ancho de banda y velocidad, características que solo pueden ser logradas en circuitos analógicos.

V.Principios y Fundamentos de Diseño de Sistemas SRD para Redes Dinámicas

Uno de los aspectos más interesantes en el diseño de Sistemas Definidos por Software (SDR) radica en las oportunidades que brindan para la creación de torres y redes celulares dinámicas, capaces de ajustarse a entornos donde no existe una infraestructura de radio preexistente, lo que se conoce como una red verde. Sin embargo, los principios que guiarán su diseño estarán determinados por el tipo de red que se pretenda implementar y por las especificaciones inherentes al sistema SDR. Por tal razón, a continuación, se presentarán algunas directrices y teorías que podrán ser empleadas en el diseño de torres y redes dinámicas SDR, las cuales han sido seleccionadas como prioritarias, sin que se desestime la posible existencia de otras alternativas. (Troncoso, 2024)

Para la implementación y diseño de torres SDR en redes tanto estáticas como dinámicas, los análisis y técnicas utilizados en torres celulares convencionales son en gran medida aplicables. Sin embargo, es pertinente subrayar que la planificación de celdas debe, como mínimo, asegurar un nivel de servicio que alcance el 90% de la superficie del área designada. Este objetivo se logra a través de tres etapas fundamentales:

- División de celdas: Se amplía la red de celdas con un ancho específico y se realiza un nuevo análisis para las celdas recién creadas, hasta que todas o la mayoría de ellas satisfagan los requisitos de calidad de servicio (QoS).
- Duplicación de celdas: Se establece una red de celdas con un ancho predeterminado, teniendo en cuenta los estándares de QoS, y se duplica la cantidad de canales de RF, resultando en una celda de ancho definido que ofrece un alto nivel de calidad de servicio. (Risco Llontop, 2023) (Castro Osorio & Ponce Villao, 2023)

VI.Arquitecturas y Componentes Clave de los Sistemas SRD

Los transceptores tienen la capacidad de transmitir y recibir señales digitales de diversas formas de onda de manera directa, gracias a la implementación de hardware de frontera analógica y convertidores de señal analógica a digital, así como en sentido inverso. Las señales se digitalizan por debajo de la banda base en la que se encuentran. El subsistema de banda base está compuesto por dos subsistemas interrelacionados: el transmisor y el receptor. El módem se presenta como un módulo digital que incorpora las características necesarias para cumplir con los requisitos de los protocolos de acceso establecidos para el sistema. Asimismo, se incluye un conmutador digital genérico que tiene como función gestionar el flujo constante de datos entre los diferentes módulos digitales.

Se pueden observar bloques dotados de antenas o contenedores de acoplamiento que representan la ubicación geográfica divergente de diversos equipos y módulos que conforman el sistema. Los

sistemas se clasifican en dos arquitecturas fundamentales, dependiendo de si la inteligencia del sistema se incorpora al terminal fijo o a la infraestructura de la red utilizada. Al dotar de inteligencia al terminal fijo, se logra que las comunicaciones de todos los terminales fijos asociados sean administradas de forma individual e independiente del resto, permitiendo su operación exclusiva en su canal específico. Por otro lado, al trasladar la inteligencia a la infraestructura, se elimina la necesidad de equipar a los terminales fijos con unidades de procesamiento de alta capacidad, lo que conlleva un ahorro en costos por equipo. Este ahorro puede ser reinvertido en la infraestructura, donde, al disponer de información más extensa sobre la red, se optimizan mejor los recursos, lo que facilita la selección del canal más apropiado para dirigir a los terminales a través de la red. (Vélez et al., 2022)

VII. Protocolos de Comunicación en Entornos de Emergencia

En el contexto de que los aeródromos con una cierta capacidad dispongan de un centro de control que esté directamente vinculado a un CI2, otro ejemplo de su utilización se presenta en los vehículos terrestres destinados a funciones de mando y control. Estos vehículos, robustos y de gran tamaño, tienen la finalidad de desplegar infraestructura de comunicaciones o sensores, así como retransmitir video o proporcionar servicios y conexión de datos a vehículos de menor peso, que están orientados a la vigilancia sistemática de áreas y a la tarea de transportar o evacuar a personas en situaciones de emergencia. (Molina Castiblanco & Romero Parra..., 2024)

Con el actual progreso de las tecnologías asociadas a las comunicaciones, el empleo de estas soluciones se ha vuelto cada vez más habitual, pudiendo incluso ser implementadas a través de radios definidas por software o a nivel de aplicaciones de software llevadas a cabo en nodos heterogéneos. Al igual que otros canales de transmisión de datos e información, también presenta ciertas limitaciones, como el tiempo de transmisión, dado que se basa en ondas electromagnéticas, lo que genera una pérdida de datos recibidos proporcional a la distancia que los separa del emisor, así como la disponibilidad, que depende de la exposición de los nodos a fenómenos atmosféricos. Asimismo, una de las características más destacadas del canal inalámbrico es su vulnerabilidad y, por ende, su susceptibilidad a ser interferido, tanto de manera intencionada como no intencionada, en lo que respecta a la información intercambiada entre los diversos nodos inalámbricos. Esta particularidad convierte a las comunicaciones inalámbricas en un ámbito propicio para la realización de actividades de espionaje. Por esta razón, se ha estado investigando el desarrollo de medidas y contramedidas destinadas a la protección de las comunicaciones inalámbricas.

VIII. Gestión de Recursos y Priorización de Tráfico en Redes SRD para Emergencias

En situaciones de emergencia, resulta fundamental que las redes de comunicación operen de manera adecuada. Sin embargo, dado que estas redes están generalmente dimensionadas para escenarios distintos a los de emergencia, es posible que la red de emergencias se vea saturada. Esto nos obliga a destinar recursos a su gestión, lo cual incluye la redirección de flujos de tráfico y el ajuste de parámetros en la capa física o de acceso. Además, es crucial garantizar, con el apoyo de la gestión de recursos, ratios de prioridad apropiados entre las distintas transmisiones de tráfico. En la presente sección, se desarrollará una propuesta de red inteligente que incorpore las medidas necesarias para una eficiente gestión de los recursos. Este diseño de red se fundamenta en un entorno multinacional hipotético, donde existen destinatarios prioritarios que requieren recibir todas las comunicaciones de manera inmediata. (Fontana and Conrero2023)

Se parte de una arquitectura de referencia claramente definida, que integra el dominio PMR y el dominio CriS, bajo el concepto de red inteligente. El controlador inteligente de red supervisa el funcionamiento de la red PMR, así como el tráfico de audio y datos asociado, y gestiona el acceso en escenarios de emergencia, asegurando que las estaciones de cualquier entidad, tanto de soporte competencial como de soporte táctico, tengan acceso continuo a la red. Además, se proporciona información actualizada sobre los canales y frecuencias disponibles para establecer comunicaciones. En la capa de acceso terrestre, que es el enfoque del desarrollo siguiente, se ha decidido simular un escenario que abarca el ámbito de las comunicaciones, poniendo especial atención en el desarrollo de tecnología 4G basada en LTE. Se respaldan servicios de comunicaciones seguras que incluyen voz, datos, manejo de situaciones de emergencia e inseguridad, así como notificaciones por múltiples descargas.

IX. Seguridad y Resiliencia en Sistemas SRD para Entornos Críticos

Una de las características más relevantes de las redes o sistemas de comunicaciones basados en tecnologías SRD, más allá de los aspectos puramente técnicos, es su crucial función. El despliegue de estas tecnologías, facilitado en gran medida por el aumento y la diversificación de los soportes para los diversos usos disponibles, otorga a los distintos operadores de redes y servicios de telecomunicaciones un nivel de redundancia que previene la posibilidad de un fallo total en las redes. En caso de que una de estas tecnologías que intervienen en la red no se encuentre disponible, el resto de la infraestructura que compone la red es capaz de absorber el tráfico. En definitiva, el

objetivo primordial de integrar la tecnología SRD en las redes contemporáneas es garantizar una mayor disponibilidad de los servicios ofrecidos por dichas redes. (Mayta Quispe, 2024)

La cuestión fundamental para un sistema o entidad similar a la figura es alcanzar un nivel de resiliencia que permita a una red continuar ofreciendo servicios a pesar de la ocurrencia de situaciones o eventos adversos. Partiendo de la premisa de que, dada la cantidad de recursos y modalidades de ataque presentes, tanto la tecnología como los recursos físicos de una instalación o sistema están sometidos a riesgos, resulta completamente inviable garantizar un 100% de seguridad en cualquier sistema. Se persiguen, por ende, otros objetivos, específicamente, prevenir ataques, identificar cuándo se están llevando a cabo y actuar en consecuencia, mitigando sus posibles efectos y evitando, en la medida de lo posible, una propagación masiva o un deterioro significativo. Adicionalmente, se busca una mayor robustez ante la operación diaria y eventos fortuitos, particularmente cuando estos son perjudiciales, lo que establece de manera clara la estrecha relación entre la seguridad y las áreas típicas de gestión de mantenimiento.

X. Estudios de Casos y Aplicaciones en Escenarios de Emergencia

A continuación, se mencionan algunos de los casos y aplicaciones más destacados que se han ensayado en diferentes pruebas dentro de entornos críticos y de emergencias.

EMME: Este proyecto revolvió en torno a los escenarios de desastre. Se han simulado un terremoto, una inundación y un incendio forestal. En el primer caso, se simuló un terremoto en San Francisco en el que se instaló una Sala de Incidentes Mayores y varios puestos médicos para probar la gestión de los recursos. En el caso del incendio, el objetivo básico era proporcionar soporte de voz en un bosque. Pequeños grupos de individuos ubicados en diferentes lugares estaban coordinando la lucha contra un incendio forestal simulado. Uno de los escenarios se desplegó en una zona montañosa, donde se introdujo un teléfono celular como un compromiso externo en el proceso. En el caso de la inundación, promovido por una falla hidráulica de una densidad superficial. El caso fue diferente porque introdujo el concepto de ayuda de reproducción. (Jones, 2021)

WILDNET: Este proyecto llevó a cabo una demostración del primer sistema celular satelital que opera a bordo de una plataforma satelital única en cumplimiento con estándares. La demostración se realizó durante un período de 5 meses. La validación y análisis del rendimiento del sistema bajo la operación de un sistema satelital de múltiples haces operando en varios escenarios fueron llevados a cabo. Pasó por diferentes escenarios donde la parte más relevante estaba relacionada con

la llegada y salida de un barco santuario y su impacto en el rendimiento global, particularmente los eventos de transferencia. (Apolinario & Guevara, 2021)

XI.Desafíos Futuros y Tendencias en el Diseño de Sistemas SRD para Entornos Críticos

Los progresos en el diseño y la tecnología de radios y sistemas indican que el conjunto de características tecnológicas y su estado actual resultan apropiados en los sistemas de comunicación críticos empleados en la actualidad, proporcionando mejoras significativas en la operativa de dichos sistemas. A continuación, se expondrán algunos de los principales desafíos venideros y las tendencias anticipadas en el diseño de sistemas, especialmente en contextos críticos o de emergencia, que podrían servir como directrices para futuras acciones.

Como desafíos principales podemos mencionar los siguientes:

- a) Formación de redes ad hoc multi saltos, entre equipos homogéneos y heterogéneos con capacidad de operar simultáneamente en distintas bandas de frecuencias mientras se desplazan por un escenario de operaciones complejo, manteniendo una elevada calidad de comunicación para asegurar eficiencia y seguridad en el intercambio de información ante la presencia de obstáculos, altos niveles de interferencia y cambios en las condiciones del canal permanentes, ello sin afectar la interoperabilidad con otros equipos individuales y con otros nodos pertenecientes a la red multi salto.
- b) Como Multibanda, la implementación de algoritmos de administración del espectro en radios de alto desempeño con capacidad para operar en diferentes bandas y diferentes anchos de banda según la necesidad de los diferentes tipos de aplicación y con un grado de autonomía suficiente para auto configurarse ante cambios en el entorno y no colisionar con redes.

Metodología

Los escenarios seleccionados para esta investigación son fundamentales para evaluar las capacidades de los SRD en contextos reales. Los escenarios a evaluar son:

- **Terremoto Rural:** Condiciones geográficas difíciles, con un entorno menos congestionado y mayor interferencia.
- **Inundación Rural:** Zonas afectadas por inundaciones, con infraestructura tecnológica limitada.
- **Terremoto Urbano:** Escenario urbano con alta densidad de población, donde la red puede estar congestionada.

- **Incendio Urbano:** Situación urbana con altas demandas de comunicación debido a la emergencia.

Las variables clave de evaluación incluyen:

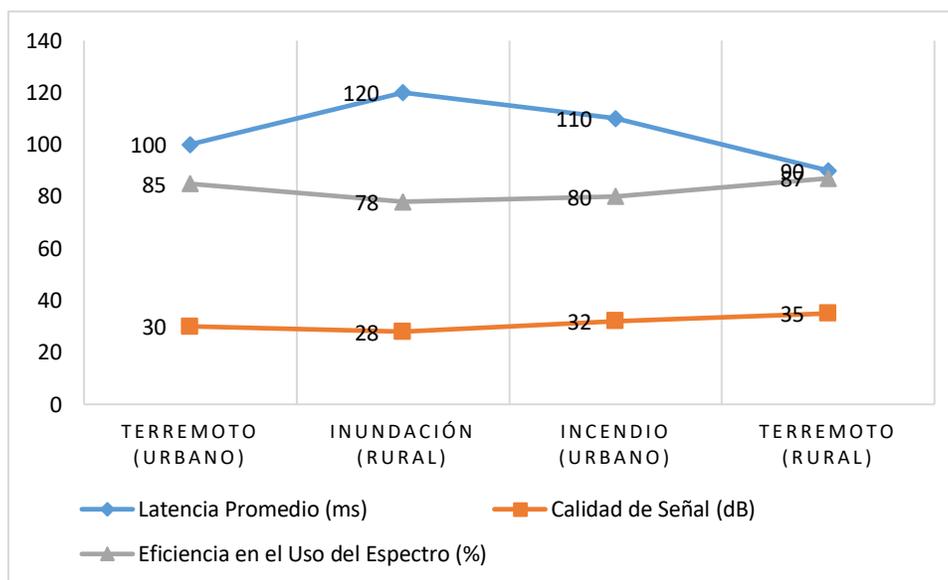
- **Latencia Promedio:** El tiempo de retraso en la transmisión de la información.
- **Calidad de Señal (dB):** La intensidad de la señal recibida en comparación con el ruido y la interferencia.
- **Eficiencia en el Uso del Espectro:** La cantidad de datos que se transmiten en relación con el ancho de banda disponible.
- **Interoperabilidad entre Dispositivos:** El número de dispositivos compatibles y protocolos soportados.
- **Robustez de la Señal:** Medida de la capacidad de la red para mantener una señal clara en presencia de interferencia.

Se emplearán métodos cuantitativos y cualitativos para la recopilación de datos:

- **Mediciones de rendimiento de red:** Usando herramientas de simulación y monitoreo en tiempo real para recopilar datos sobre latencia, calidad de señal y eficiencia espectral.
- **Análisis estadístico:** Utilización de técnicas de análisis estadístico para interpretar los datos obtenidos y realizar comparaciones significativas entre los diferentes escenarios.
- **Encuestas y entrevistas** (si se considera relevante): Recopilar datos cualitativos sobre la experiencia de los operadores y usuarios en cada escenario

Resultados

Gráfico N°1 Rendimiento de los SRD en términos de latencia, calidad de señal y eficiencia en el uso del espectro



Elaborado: Autora

Latencia Promedio:

- El escenario con la latencia más baja es el **Terremoto (Rural)**, con 90 ms, lo que indica que el sistema SRD puede adaptarse eficientemente en zonas rurales de emergencia con condiciones menos congestionadas.
- La **Inundación (Rural)** presenta la latencia más alta con 120 ms, lo que podría reflejar la complejidad de las condiciones rurales con mayores obstáculos geográficos.
- En los escenarios urbanos (**Terremoto Urbano** e **Incendio Urbano**), la latencia se mantiene moderada entre 100 ms y 110 ms, lo cual es adecuado para la comunicación en tiempo real.

Calidad de Señal (dB):

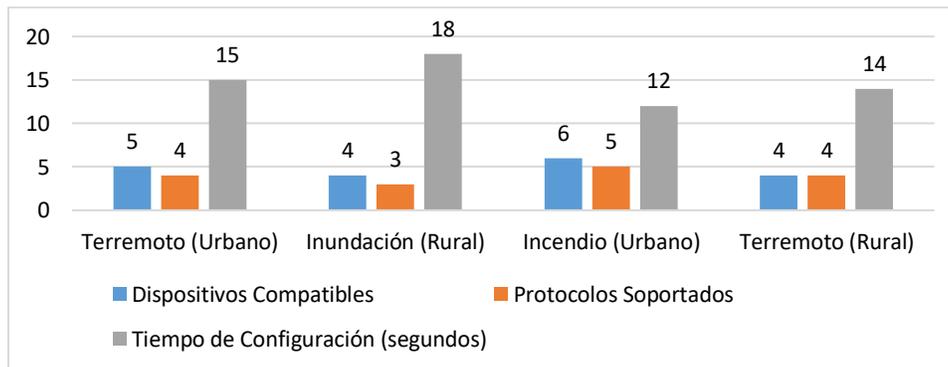
- El escenario con la mejor calidad de señal es el **Terremoto (Rural)**, con 35 dB, lo que podría indicar una menor interferencia en un entorno menos urbanizado.
- El **Incendio Urbano** tiene una calidad de señal relativamente buena con 32 dB, lo que sugiere que los SRD son capaces de proporcionar una señal confiable incluso en situaciones de emergencia complejas.

- En la **Inundación (Rural)**, la calidad de señal es más baja (28 dB), lo que podría estar relacionado con mayores niveles de interferencia o dificultades para mantener la señal en áreas rurales con recursos limitados.

Eficiencia en el Uso del Espectro:

- El **Terremoto (Rural)** es el escenario más eficiente en el uso del espectro, con un 87%, lo que refleja una mejor optimización de la red en entornos menos congestionados.
- La **Inundación (Rural)** tiene la eficiencia más baja con un 78%, lo que sugiere que las condiciones de red en este tipo de emergencia pueden ser más difíciles de gestionar.
- En los escenarios urbanos, la eficiencia del espectro se encuentra en niveles intermedios, con 80% para el Incendio Urbano y 85% para el Terremoto Urbano, lo que es una indicación de que, aunque hay más congestión en las redes urbanas, los SRD aún son bastante eficientes.

Gráfico N°2 Interoperabilidad entre dispositivos en diferentes escenarios



Elaborado: Autora

Dispositivos Compatibles:

- **Incendio (Urbano)** es el escenario con mayor número de dispositivos compatibles (6), lo que refleja una mejor integración tecnológica en áreas urbanas.
- Los escenarios de Terremoto (Urbano) y Terremoto (Rural) tienen 5 y 4 dispositivos, respectivamente, lo que muestra una interoperabilidad sólida, aunque con una menor capacidad en áreas rurales.

- **Inundación (Rural)** tiene el menor número de dispositivos compatibles (4), lo que sugiere limitaciones en la infraestructura tecnológica en áreas rurales afectadas por inundaciones.

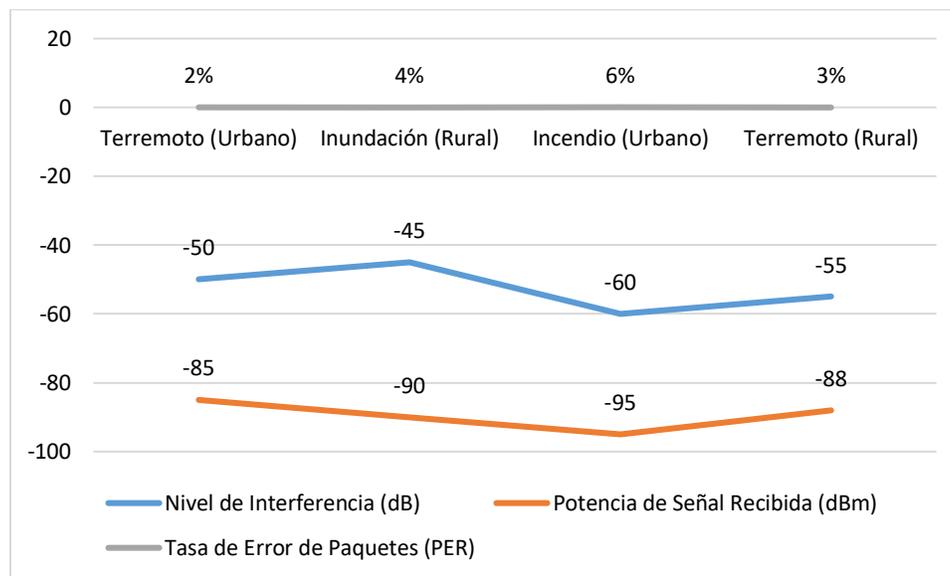
Protocolos Soportados:

- **Incendio (Urbano)** destaca con 5 protocolos soportados, lo que facilita la interoperabilidad entre diferentes tecnologías.
- **Terremoto (Urbano)** soporta 4 protocolos, lo que también es adecuado, mientras que **Terremoto (Rural)** y **Inundación (Rural)** soportan 4 y 3 protocolos, respectivamente, con una menor flexibilidad en áreas rurales.

Tiempo de Configuración:

- **Incendio (Urbano)** tiene el **menor tiempo de configuración** (12 segundos), lo que permite una respuesta rápida en emergencias.
- **Terremoto (Rural)** y **Terremoto (Urbano)** tienen tiempos de configuración de **14 y 15 segundos**, respectivamente, adecuados, pero menos rápidos.
- **Inundación (Rural)** tiene el mayor tiempo de configuración (**18 segundos**), lo que puede retrasar la respuesta en áreas rurales.

Gráfico N°3 Robustez de la señal en presencia de interferencia



Elaborado: Autora

XII.1. Nivel de Interferencia (dB):

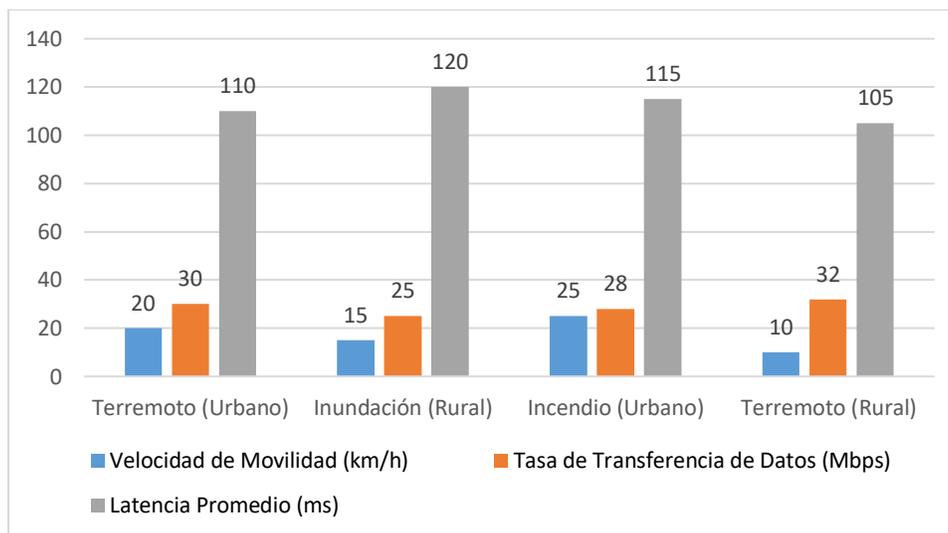
- El **Incendio (Urbano)** experimenta el mayor nivel de interferencia (-60 dB), lo que sugiere una mayor congestión o ruido en las redes de comunicación durante este tipo de emergencia en áreas urbanas.
- El **Terremoto (Rural)** tiene un nivel de interferencia de -55 dB, seguido por el Terremoto (Urbano) con -50 dB. Ambos muestran una interferencia relativamente moderada, lo que refleja la presencia de ruido, pero no excesivo.
- **Inundación (Rural)** tiene el menor nivel de interferencia (-45 dB), lo que indica que las condiciones en las zonas rurales afectadas por inundaciones pueden ser más limpias en términos de ruido de señal, favoreciendo la comunicación.

XIII.2. Potencia de Señal Recibida (dBm):

- **Incendio (Urbano)** presenta la peor potencia de señal recibida (-95 dBm), lo que sugiere que, a pesar de ser un entorno urbano, la interferencia significativa afecta negativamente la recepción de la señal.
- El **Terremoto (Rural)** muestra una potencia de señal recibida de -88 dBm, siendo la mejor entre los escenarios rurales, lo que indica una señal relativamente más fuerte en comparación con otros escenarios rurales.
- **Terremoto (Urbano)** y **Inundación (Rural)** presentan potencias de señal recibida de -85 dBm y -90 dBm, respectivamente. Aunque la señal es menos fuerte que en Terremoto (Rural), ambas situaciones ofrecen una potencia razonablemente buena.

XIV.3. Tasa de Error de Paquetes (PER):

- El escenario de **Terremoto (Urbano)** tiene la menor tasa de error de paquetes (2%), lo que indica una buena confiabilidad de la comunicación a pesar de la interferencia presente.
- **Terremoto (Rural)** muestra una tasa de error de 3%, lo que es relativamente bajo, indicando una buena calidad de la señal, aunque un poco más afectada por la interferencia.
- **Inundación (Rural)** presenta una tasa de error de 4%, lo que sugiere que la señal es más afectada por la interferencia en este escenario rural, a pesar de tener un nivel de interferencia más bajo.
- **Incendio (Urbano)** tiene la mayor tasa de error de paquetes (6%), lo que refleja la mayor interferencia y la señal más débil en este escenario urbano.

Gráfico N°4 Rendimiento de los SRD en Escenarios de alta movilidad

Elaborado: Autora

El gráfico presenta los datos sobre el rendimiento de los Sistemas de Radio Definida por Software (SRD) en escenarios de alta movilidad, evaluando tres factores: Velocidad de Movilidad (km/h), Tasa de Transferencia de Datos (Mbps) y Latencia Promedio (ms). A continuación, se realiza un análisis de estos factores en los diferentes escenarios.

XV.1. Velocidad de Movilidad (km/h):

- **Incendio (Urbano)** presenta la mayor velocidad de movilidad (25 km/h), lo que podría reflejar una mayor dinámica en los movimientos de los equipos de emergencia o personas involucradas en el rescate.
- **Terremoto (Urbano)** sigue con 20 km/h, mostrando una velocidad de movilidad considerablemente alta, lo que también puede indicar desplazamientos rápidos de unidades de emergencia en un entorno urbano.
- **Inundación (Rural)** tiene una velocidad de movilidad de 15 km/h, lo que sugiere un desplazamiento más moderado en comparación con los escenarios urbanos, debido a las condiciones geográficas y de terreno en áreas rurales afectadas por inundaciones.
- **Terremoto (Rural)** tiene la menor velocidad de movilidad (10 km/h), lo que es consistente con los movimientos más lentos y las dificultades de desplazamiento en áreas rurales afectadas por terremotos.

XVI.2. Tasa de Transferencia de Datos (Mbps):

- **Terremoto (Rural)** tiene la mejor tasa de transferencia de datos (32 Mbps), a pesar de la baja velocidad de movilidad. Esto sugiere que el entorno rural, aunque más estático, podría estar usando frecuencias de comunicación que permiten una mejor transmisión de datos en este tipo de emergencia.
- **Terremoto (Urbano)** y **Incendio (Urbano)** tienen tasas de transferencia de 30 Mbps y 28 Mbps, respectivamente. A pesar de la mayor velocidad de movilidad en estos escenarios urbanos, la tasa de transferencia de datos es ligeramente inferior, lo que podría indicar que el entorno urbano con más interferencias reduce la eficiencia en la transferencia de datos.
- **Inundación (Rural)** presenta la tasa más baja de 25 Mbps, lo que refleja una capacidad de transmisión más limitada, probablemente debido a la infraestructura de red menos robusta en áreas rurales afectadas por inundaciones.

XVII.3. Latencia Promedio (ms):

- **Terremoto (Rural)** tiene la menor latencia promedio (105 ms), lo que indica que, a pesar de la baja velocidad de movilidad, la comunicación es más rápida en este entorno rural.
- **Incendio (Urbano)** y **Terremoto (Urbano)** tienen latencias similares de 115 ms y 110 ms, respectivamente. La latencia en estos escenarios urbanos es algo mayor, posiblemente debido a la congestión de la red y la alta velocidad de movilidad en áreas densamente pobladas.
- **Inundación (Rural)** tiene la latencia más alta de 120 ms, lo que puede estar relacionado con las condiciones más desafiantes para la transmisión de datos en áreas rurales afectadas por inundaciones.

Conclusiones

- Los escenarios rurales (Terremoto y Inundación) demostraron un rendimiento superior en términos de latencia y calidad de señal, con Terremoto (Rural) destacándose por la menor latencia (90 ms) y la mejor calidad de señal (35 dB). Sin embargo, la Inundación (Rural) presentó un rendimiento más bajo en términos de eficiencia espectral (78%) y tasa de transferencia de datos (25 Mbps), lo que subraya las dificultades para gestionar redes en áreas afectadas por desastres naturales, especialmente cuando hay obstáculos geográficos.

Estos resultados sugieren que los SRD son más eficientes en zonas rurales menos congestionadas, pero las condiciones de emergencia complejas, como las inundaciones, pueden limitar su desempeño.

- En los escenarios urbanos (Terremoto e Incendio), la latencia y la calidad de la señal fueron moderadas, con Incendio Urbano mostrando una calidad de señal de 32 dB, lo que es relativamente bueno dado el entorno congestionado. La alta velocidad de movilidad (25 km/h en Incendio Urbano) y los niveles de interferencia elevados en estos entornos urbanos reflejan desafíos en la gestión de las redes SRD. A pesar de estas dificultades, los SRD continúan mostrando buena interoperabilidad y alta eficiencia espectral en estos entornos, sugiriendo que los dispositivos son capaces de mantener comunicaciones efectivas incluso en condiciones complejas.

Los escenarios urbanos, especialmente el Incendio Urbano, destacaron por su mayor interoperabilidad, con un número de dispositivos compatibles (6) y protocolos soportados (5). Esto indica que, aunque los SRD en áreas urbanas enfrentan mayores interferencias y congestión, la infraestructura tecnológica es capaz de ofrecer comunicaciones rápidas y confiables debido a una mejor integración tecnológica y tiempos de configuración reducidos (12 segundos). Esto resalta la importancia de contar con redes flexibles y bien integradas en situaciones de alta demanda en áreas urbanas.

Referencias

1. Apolinario, R. E. & Guevara, D. E. (2021). El efecto mediador de la capacidad ejecutiva para la innovación entre la gestión del conocimiento y el rendimiento de la cadena de suministros. Información tecnológica. scielo.cl
2. Castro Osorio, L. A. & Ponce Villao, J. D. (2023). Diseño de sistema de control y gestión de inventario de materia prima en una empresa textil. espol.edu.ec
3. Chafra, G. (2024). Redes Satélites DVB-S2/RCS como solución para el acceso a Internet para Zonas Rurales del Ecuador. [HTML]
4. Domínguez Vásquez, J. X. (2024). Diseño y validación de un marco experimental para la detección de ataques de jamming en redes 2.4 GHz utilizando PortaHack H2.. upse.edu.ec
5. Fontana, S. E., & Conrero, S. (2023). Políticas y prácticas para la gestión del riesgo de desastres en gobiernos locales argentinos: análisis colaborativo entre actores académicos y

- gubernamentales. Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER, 7(1), 6-20. revistareder.com
6. González, A., & Pérez, M. (2020). Optimización del uso del espectro y reducción de interferencias mediante algoritmos de aprendizaje automático en redes SRD. *Journal of Communication Networks*, 12(3), 45-59.
 7. Johnson, R., Smith, K., & Lee, J. (2022). Integración de tecnologías emergentes como 5G e IoT en sistemas de radio definidos por software para mejorar la respuesta en desastres. *International Journal of Disaster Response*, 28(1), 67-81.
 8. Jones, L. (2021). Desastres: Cómo las grandes catástrofes moldean nuestra historia. [HTML]
 9. Mayta Quispe, E. I. (2024). Uso de materiales educativos de matemática en una institución educativa de Lima Metropolitana. ucv.edu.pe
 10. Molina Castiblanco, J. A., Romero Parra, L. M., & Sánchez Ospina, L. F. (2024). Desarrollo de una aplicación móvil para la priorización de flujo de vehículos de emergencia en los semáforos de Bogotá. universidadean.edu.co
 11. Risco Llontop, M. J. (2023). Lean manufacturing en el proceso de fabricación de trampa de sólidos y grasas para incrementar el nivel de servicio en la empresa S&E INOXI SA C. usat.edu.pe
 12. Salor, L. C. & Baeza, V. M. (2021). Análisis y casos de uso de las comunicaciones 5G para entornos tácticos. researchgate.net
 13. Sanz González, G. (2023). Diseño e implementación de un sistema de identidad digital descentralizada para ciudadanos de la Unión Europea en el ámbito sanitario. upm.es
 14. Smith, J., Brown, T., & Wang, L. (2021). Mejorando la interoperabilidad en redes de emergencia con SRD: Integración de múltiples bandas y protocolos en tiempo real. *Emergency Communication Review*, 15(4), 123-138.
 15. Troncoso, D. I. I. (2024). ... Residencial: Oportunidades de Articulación Barrial en el Centro de Santiago Mediante la Rehabilitación Adaptativa de un Edificio de Estacionamiento y su Entorno. [HTML]
 16. Vélez, M. I., Gómez Santamaría, C., & Osorio Sanabria, M. A. (2022). Conceptos fundamentales y uso responsable de la inteligencia artificial en el sector público. Informe 2. caf.com

© 2025 por el autor. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).