



# UNIVERSIDAD DE COLIMA

## Facultad de Telemática

### PROPUESTA DE UN MECANISMO DE HANDOFF CROSSLAYER PARA PROVEER MOVILIDAD EN REDES DE SENSORES INALÁMBRICAS

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN COMPUTACIÓN

PRESENTA:

ING. MIGUEL ALEJANDRO CHAVARÍN HERNÁNDEZ

ASESORES:

D. EN C. RAYMUNDO BUENROSTRO MARISCAL

D. EN C. JUAN ANTONIO GUERRERO IBÁÑEZ

COLIMA, COL. MÉXICO, 18 DE ABRIL DE 2016



# Resumen

Este documento presenta una investigación acerca de los avances tecnológicos desarrollados hacia mecanismos de *handoff* que permitan comunicación continua de datos entre dispositivos móviles de la red; esto es, algoritmos que admitan continuidad de servicio de transferencia de información cuando un nodo cambia de ubicación.

**Palabras Clave:** *Handoff, Crosslayer, WSN.*



# Abstract

This document presents an investigation about the developed technological progresses on handoff mechanisms which allow continuous data communication between mobile devices within the network; this is, algorithms that allow the continuity of services of information transferring when a node changes its location.

**Key words:** *Handoff, Crosslayer, WSN.*



*Dedicado  
a mi pequeña familia...*





*Agradecimientos.*



# Acrónimos

<b>3G</b>	Tercera Generación (del inglés <i>Third Generation</i> )
<b>4G</b>	Cuarta Generación (del inglés <i>Fourth Generation</i> )
<b>AP</b>	Punto de Acceso (del inglés <i>Access Point</i> )
<b>BAN</b>	Red de Área Corporal (del inglés <i>Body Area Network</i> )
<b>BER</b>	Tasa de Error Binario (del inglés <i>Bit Error Rate</i> )
<b>BS</b>	Estación Base (del inglés <i>Base Station</i> )
<b>CH</b>	Jefe de Grupo (del inglés <i>Cluster Head</i> )
<b>CSI</b>	Información del Estado del Canal (del inglés <i>Channel State Information</i> )
<b>DSN</b>	Número de Secuencia de Datos (del inglés <i>Data Sequence Number</i> )
<b>FTP</b>	Protocolo de Transferencia de Archivos (del inglés <i>File Transfer Protocol</i> )
<b>GPRS</b>	Servicio General de Paquetes vía Radio (del inglés <i>General Packet Radio Service</i> )
<b>GPS</b>	Sistema de Posicionamiento Global (del inglés <i>Global Positioning System</i> )
<b>GUI</b>	Interfaz General de Usuario (del inglés <i>General User Interface</i> )

<b>HEP</b>	Proceso de Ejecución de Traspaso (del inglés <i>Handoff Execution Process</i> )
<b>HWM</b>	Mensaje de Advertencia de Traspaso (del inglés <i>Handoff Warning Message</i> )
<b>IPv6</b>	Protocolo de <i>Internet</i> versión 6 (del inglés <i>Internet Protocol version 6</i> )
<b>LQI</b>	Indicador de Calidad de Enlace (del inglés <i>Link Quality Indicator</i> )
<b>MAC</b>	Control de Acceso al Medio (del inglés <i>Medium Access Control</i> )
<b>MED</b>	Mecanismo de Envío de Datos
<b>MHT</b>	Monitorizador Detonador de Traspaso (del inglés <i>Monitoring Handoff Trigger</i> )
<b>MIPv6</b>	Protocolo de <i>Internet</i> Móvil versión 6 (del inglés <i>Mobile Internet Protocol version 6</i> )
<b>MN</b>	Nodo Móvil (del inglés <i>Mobile Node</i> )
<b>OSI</b>	Interconexión de Sistemas Abiertos (del inglés <i>Open System Interconnection</i> )
<b>PAN</b>	Red de Área Personal (del inglés <i>Personal Area Network</i> )
<b>QoS</b>	Calidad de Servicio (del inglés <i>Quality of Service</i> )
<b>RSSI</b>	Indicador de Fuerza de Señal Recibida (del inglés <i>Received Signal Strength Indicator</i> )
<b>SIR</b>	Relación Señal a Interferencia (del inglés <i>Signal-to-Interference Ratio</i> )
<b>SN</b>	Nodo Final o Nodo Sumidero (del inglés <i>Sink Node</i> )
<b>SUIDS</b>	Síndrome de Repentina Muerte Inesperada de Infante (del inglés <i>Sudden Unexpected Infant Death Syndrome</i> )
<b>TCP</b>	Protocolo de Control de Transmisión (del inglés <i>Transmission Control Protocol</i> )

<b>UDP</b>	Protocolo de Datagramas de Usuario (del inglés <i>User Datagram Protocol</i> )
<b>VoIP</b>	Voz sobre Protocolo de Internet (del inglés <i>Voice over Internet Protocol</i> )
<b>WAN</b>	Red de Área Amplia (del inglés <i>Wide Area Network</i> )
<b>WBAN</b>	Red Inalámbrica de Área Corporal (del inglés <i>Wireless Body Area Network</i> )
<b>WiMax</b>	Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (del inglés <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> )
<b>WLAN</b>	Red Inalámbrica de Área Local (del inglés <i>Wireless Local Area Network</i> )
<b>WPAN</b>	Red Inalámbrica de Área Personal (del inglés <i>Wireless Personal Area Network</i> )
<b>WSN</b>	Red Inalámbrica de Sensores (del inglés <i>Wireless Sensor Network</i> )
<b>WSN-HaDaS</b>	Traspaso consciente del Envío de Datos en Redes Inalámbricas de Sensores (del inglés <i>Handoff aware of Data Sending in Wireless Sensor Networks</i> )



# Índice

Resumen	i
Abstract	iii
Acrónimos	ix
Lista de tablas	xv
Lista de figuras	xvii
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Problemática . . . . .	3
1.2. Objetivos . . . . .	8
1.2.1. Objetivo general . . . . .	8
1.2.2. Objetivos específicos . . . . .	8
1.3. Justificación . . . . .	8
1.4. Preguntas de investigación . . . . .	10
1.5. Limitaciones y suposiciones . . . . .	10
1.6. Metodología . . . . .	11
1.7. Organización del documento . . . . .	12
<b>2. Esquema de fundamentos</b>	<b>15</b>
2.1. Transferencia de red ( <i>handoff</i> ) . . . . .	16
2.2. Clasificación del <i>handoff</i> . . . . .	17
2.2.1. Redes involucradas . . . . .	17
2.2.2. Número de conexiones . . . . .	19
2.2.3. Control del <i>handoff</i> . . . . .	21

2.3. Problemáticas que conlleva el <i>handoff</i> . . . . .	22
2.4. Importancia del <i>handoff</i> . . . . .	26
2.5. Estrategia de diseño <i>crosslayer</i> . . . . .	27
<b>3. Trabajos relacionados</b>	<b>35</b>
3.1. Redes Celulares . . . . .	36
3.2. <i>Redes Inalámbricas de Área Local (WLANs)</i> . . . . .	37
3.3. <i>Redes Inalámbricas de Sensores (WSNs)</i> . . . . .	40
3.4. Resumen e Inferencias . . . . .	49
<b>4. Desarrollo de protocolo de <i>handoff</i></b>	<b>51</b>
4.1. Protocolo <i>WSN-HaDaS</i> . . . . .	52
4.1.1. Descripción general . . . . .	52
4.1.2. <i>MHT</i> . . . . .	55
4.1.3. <i>HEP</i> . . . . .	57
4.2. Diseño de Protocolo de <i>Handoff</i> . . . . .	61
4.3. Implementación en Simulador . . . . .	62
<b>5. Evaluación y análisis de resultados</b>	<b>65</b>
<b>6. Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>67</b>
<b>A. Anexos</b>	<b>69</b>
<b>Bibliografía</b>	<b>71</b>
Referencias . . . . .	71



# Tablas

1.	Algunas aplicaciones con motes, sensores de polvo inteligentes y <i>WSNs</i> .	42
2.	Requerimientos de mediciones biomédicas. . . . .	45



# Figuras

1.	Conjunto de computadoras conectadas formando una red. . . . .	3
2.	Clasificación de las redes inalámbricas en función de su alcance. . . . .	4
3.	Metodología de investigación propuesta . . . . .	11
4.	Clasificación del <i>handoff</i> . . . . .	17
5.	Horizontal <i>handoff</i> . . . . .	18
6.	Vertical <i>handoff</i> . . . . .	18
7.	Clasificación del <i>handoff</i> según las redes involucradas. . . . .	19
8.	Mecanismo tipo <i>hard handoff</i> . . . . .	20
9.	Mecanismo tipo <i>soft handoff</i> . . . . .	20
10.	Mecanismo tipo <i>softer handoff</i> . . . . .	21
11.	Temas importantes involucrados en un mecanismo de <i>handoff</i> . . . . .	23
12.	Ejemplo del efecto <i>ping-pong</i> en la ejecución de un mecanismo de <i>handoff</i> . . . . .	25
13.	Distribución de capas del Modelo <i>Interconexión de Sistemas Abiertos</i> (del inglés <i>Open System Interconnection, OSI</i> ). . . . .	27
14.	Diferencia de operación y filosofía entre el modelo <i>OSI</i> tradicional y <i>crosslayer</i> . . . . .	29
15.	Distintos tipo de propuestas de diseño <i>crosslayer</i> . . . . .	30
16.	Características deseables de <i>handoff</i> . . . . .	37
17.	Ejemplo de red doméstica <i>WLAN</i> ( <i>WiFi</i> , en este caso). . . . .	38
18.	Fases generales de un mecanismo de <i>handoff</i> . . . . .	39
19.	Ejemplo de un escenario simple de <i>WSN</i> en aplicaciones de cuidado de la salud. . . . .	43
20.	Ejemplo de interacciones <i>crosslayer</i> y sus objetivos. . . . .	47

21.	Arquitectura <i>crosslayer</i> del protocolo <i>Traspaso consciente del Envío de Datos en Redes Inalámbricas de Sensores</i> (del inglés <i>Handoff aware of Data Sending in Wireless Sensor Networks, WSN-HaDaS</i> ). . . . .	53
22.	Ejemplos de uso del <i>Control de Acceso al Medio</i> (del inglés <i>Medium Access Control, MAC</i> ) <i>frame</i> por <i>WSN-HaDaS</i> . . . . .	54
23.	Umbrales y regiones del protocolo <i>WSN-HaDaS</i> . . . . .	57
24.	a) Algoritmo <i>Proceso de Ejecución de Traspaso</i> (del inglés <i>Handoff Execution Process, HEP</i> ) b) Algoritmo utilizado cuando el <i>Nodo Móvil</i> (del inglés <i>Mobile Node, MN</i> ) pierde conexión. . . . .	58
25.	Metodología de simulación. . . . .	62

# Capítulo 1

## Introducción

El presente proyecto de tesis plantea el uso de una WSN dentro de la cual se integran dispositivos fijos y al menos un MN, actuando como Punto de Acceso (del inglés *Access Point*, AP) a la red y nodo para la recolección de datos, respectivamente. Dentro de las características con las que cuenta una WSN destacan su diseño no intrusivo, sus reducidos consumo de energía y costo de implementación, además de permitir la movilidad de sus dispositivos de red; siendo ésta una de las características más importantes al implementarse este tipo de redes en aplicaciones que incluyen a personas.

Esto infiere que los miembros, dispositivos o nodos de una WSN son, en general, de tamaño reducido y portables, pudiendo acoplarse fácilmente a usuarios móviles (Silva, Sa Silva, y Boavida, 2014). Por ello, es necesario ofrecer a las WSNs mecanismos que apoyen y mejoren eficientemente la movilidad en sus dispositivos; ello sin afectar las aplicaciones ni el desempeño general de la red.

Debido a dicha movilidad y los beneficios que ello conlleva, las WSNs han logrado posicionarse en el desarrollo de aplicaciones orientadas al cuidado de la salud (Leon, Hipolito, y Garcia, 2009), al desarrollar múltiples aplicaciones para el monitoreo de variables que permitan una constante vigilancia del estado de salud de pacientes, siendo en la mayoría adultos mayores. En el trabajo realizado por Virone et al. (2006), se describe y propone una red, en la cual se plantea como objetivo la adquisición de parámetros físicos, siendo algunos de ellos la temperatura y ubicación de los pacientes.

Dada la importancia que la movilidad representa para los usuarios, se exige que puedan desplazarse sin restricciones (por parte de la aplicación, red o sistema) dentro de un espacio o área controlada, tal y como puede ser un hospital o casa de cuidados. Sin embargo, en este tipo de escenarios las WSNs sufren restricciones y limitaciones,

sobretudo en aspectos de cobertura debido a que este tipo de redes fueron diseñadas para su aplicaciones en entornos de corto alcance; por ello se utilizan tecnologías de redes inalámbricas de área personal como la *IEEE 802.15.4* (10 mts a la redonda, (Man y Committee, 2006)), por lo que a su vez requiere la instalación (en la mayoría de los casos) de múltiples puntos de acceso en la *WSN* para satisfacer las necesidades de cobertura de los usuarios. Otro aspecto a considerar es que los dispositivos móviles tienen la necesidad de poder cambiar su conexión de un punto de acceso a otro cuando se requiera, i.e., al desplazarse por todo el área de cobertura de la *WSN* saliendo del alcance de su punto de acceso a la red; resultando esto en la desconexión del dispositivo móvil de la red debido a que el estándar *IEEE 802.15.4* no cuenta con mecanismos diseñados para iniciar estos procesos de trasposos de red o *handoff* al nuevo punto de acceso por si mismo; no obstante, sí cuenta con herramientas y funciones que pueden utilizarse para permitir el diseño de un mecanismo de *handoff*.

Este proceso es un punto crítico en la continuidad y el éxito de las aplicaciones de monitorización, ya que un *handoff* deficiente puede resultar en la pérdida de información recolectada o el retraso en su entrega al destino. Por ejemplo, si el proceso del mecanismo de *handoff* es lento, puede generar altos tiempo de desconexión y si la aplicación no es consciente de la desconexión puede seguir enviando datos que no podrán ser entregados.

En la literatura existen varios trabajos que proponen mecanismos para realizar este proceso de *handoff* (los cuales se abordan en el Capítulo 3); éstos difieren en algunos aspectos de operación y en sus objetivos de aplicación, aportando diferentes soluciones que pueden servir de base para nuestro trabajo. Sin embargo, lo que se puede decir con certeza es que la mayoría de éstos se enfocan a redes celulares o redes inalámbricas tradicionales como las *WiFi*, las cuales difieren de las características técnicas y posibilidades de las *WSNs* que utilizan *IEEE 802.15.4*. Además, las propuestas de mecanismos de *handoff* para *WSNs* son en su mayoría para redes que no son conscientes de la aplicación y son desarrollados bajo un diseño aislado o por capas; i.e., mecanismos que no pueden utilizar información de otras capas del modelo de OSI dentro del mecanismo de *handoff*, esto provoca una calidad de comunicación limitada y baja optimización de los recursos de la red al utilizar su proceso de *handoff*.

Por ello, en este trabajo se propone un mecanismo para ofrecer un proceso de *handoff* en *WSN* que sea consciente de las condiciones de la red y de las aplicaciones de capas superiores del modelo de red para permitir la movilidad de los nodos sin

afectar de sobremanera a la comunicación continua de la red y sus aplicaciones de capa superior. La propuesta misma y el diseño de la red, se simulan con ayuda del *software NS2* (Simulator, 1989), por lo que todas las características y métricas a considerar son adecuadamente definidas con el propósito de permitir que su simulación sea lo más cercana a la realidad.

## 1.1. Problemática

El presente proyecto de tesis plantea el uso de una *WSN* dentro de la cual se integran dispositivos fijos y móviles, actuando como puntos de acceso a la red y nodos para la recolección de datos, respectivamente. Sin embargo, para entender de mejor manera el proyecto y entrar en contexto con el mismo, es necesario saber y conocer algunos conceptos en la temática de las redes inalámbricas.

De acuerdo a la Real Academia Española (2014) una red se define como «Conjunto de ordenadores o de equipos informáticos conectados entre sí que pueden intercambiar información». Dicha definición se puede entender de mejor manera al referirse a la Figura 1, donde se muestran múltiples dispositivos conectados entre sí, y aunque en dicha imagen no se especifica el objetivo de su conexión, puede inferirse que se trata de transferencia de información.



Figura 1: Conjunto de computadoras conectadas formando una red.

Existe una característica en las redes que permite clasificarlas en dos grupos diferentes: el modo de conexión en una red. En las redes alámbricas, la conexión entre los dispositivos de la red es generalmente mediante cables de cobre. Por otro lado, las redes inalámbricas no utilizan medios físicos para su conexión y transfieren su información a través del aire utilizando ondas de radiofrecuencia.

A su vez, las redes inalámbricas poseen distintos tipos de clasificaciones en función de sus múltiples características: alcance de conexión, velocidad de transferencia, topología de conexión, aplicaciones de la red, entre otras. Para el presente proyecto es importante clasificar a las redes inalámbricas en función a su alcance.

Cuando se habla del alcance de una red se hace referencia a la cobertura máxima de la misma, pudiendo tratarse de una distancia desde metros hasta kilómetros. En la Figura 2 se muestra una clasificación de las redes inalámbricas y se observa claramente que la Red Inalámbrica de Área Personal (del inglés *Wireless Personal Area Network*, WPAN) es la red de menor alcance (alcance menor a 10 metros), aunque algunos autores mencionan que existe un grupo de menor alcance: la Red Inalámbrica de Área Corporal (del inglés *Wireless Body Area Network*, WBAN), cuyo alcance y aplicación se limita al cuerpo de una persona (Khan y Yuce, 2012).

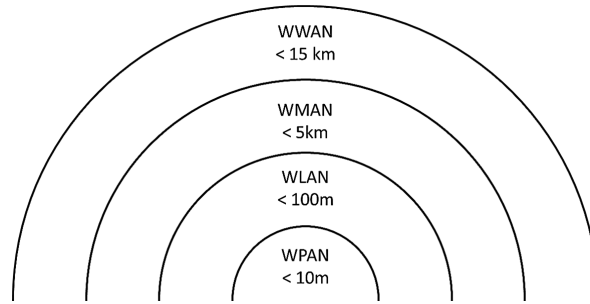


Figura 2: Clasificación de las redes inalámbricas en función de su alcance.

De acuerdo a Saranya y Pugazendi (2014), el estándar para las *WPANs* es el *IEEE 802.15*, cuya frecuencia de operación es  $2.4\text{ GHz}$  y su objetivo en particular es el permitir una conexión sin fallas entre los dispositivos de la red y asegurar una transferencia de información continua.

Dentro del grupo de las *WPANs* se encuentran las *WSNs*, las cuales generalmente consisten en múltiples nodos que integran sensores, procesadores, fuentes de energía y dispositivos que permiten su comunicación con los demás nodos. Las *WSNs* se distinguen por sus múltiples bondades: diseño no intrusivo, bajo consumo de energía, bajo costo, además de la movilidad de sus dispositivos; siendo esta última una de las que más destaca cuando se usan en el entorno de las personas.

Dado que los dispositivos o nodos de una *WSNs* son frecuentemente portables y pequeños en tamaño, pueden ser fácilmente integrados a entidades móviles, como vehículos, robots o personas (Silva et al., 2014). Por ello, las *WSNs* son ahora poderosas



herramientas en aplicaciones militares; por ejemplo en la detección de intrusos o vigilancia de perímetros (García-Hernández, Ibargüengoytia-González, García-Hernández, y Pérez-Díaz, 2007).

Aprovechando su movilidad, las *WSNs* también ganaron su lugar en el desarrollo de aplicaciones para el cuidado de la salud (Leon et al., 2009) desarrollando múltiples de ellas (por ejemplo el monitoreo o detección de la ubicación de pacientes) con el objetivo de mantener en constante vigilancia el estado de salud de pacientes, enfocándose en su mayoría hacia el cuidado de los adultos mayores.

En este contexto, Virone et al. (2006) proponen una red con el propósito de adquirir variables físicas de los pacientes como temperatura y posición. Del mismo modo, Yan, Xu, y Gidlund (2009) implementan un análisis experimental de una aplicación de *WSNs* para *e-Health* (Eysenbach, 2001), distribuyendo múltiples nodos en un hogar con el objetivo de proveer la información necesaria a los enfermeros, doctores o encargados para el cuidado de los pacientes.

Es importante destacar que en estas aplicaciones, muchas veces se busca monitorizar a pacientes móviles (ya sean adultos mayores en casas de cuidado o enfermos mentales que vagan por un hospital psiquiátrico), y quienes se trasladan continuamente dentro de un espacio o área de monitorización. En este escenario las *WSNs* tienen una cobertura limitada debido a que ésta se creó para entornos de corto alcance, por ello utiliza tecnologías inalámbricas de área personal como la *IEEE 802.15.4*, lo cual exige la necesidad de instalar múltiples puntos de acceso en la *WSNs* para satisfacer las necesidades de cobertura de los usuarios (Buenrostro-Mariscal et al., 2015).

Por lo tanto, resulta crucial el proveer a las *WSNs* de mecanismos que beneficien y mejoren de manera eficiente la movilidad de sus nodos, sin comprometer la operación de las aplicaciones, ni el desempeño general de la red.

Igualmente los dispositivos móviles necesitan cambiarse de un punto de acceso a otro cuando se desplazan por todo el área de la *WSNs*, esto resulta en la desconexión forzada del dispositivo de la red ya que el estándar *IEEE 802.15.4* no cuenta con un mecanismo diseñado para iniciar un proceso de *handover* o *handoff* (ambos del inglés, traspaso) al nuevo punto de acceso por sí mismo. Aunque por otro lado, el estándar sí cuenta con funciones y procesos que pueden utilizarse para crear un mecanismo de *handoff*.

Este proceso de *handoff* o cambio de red es un punto crítico en la continuidad y el éxito de las aplicaciones de monitorización, y no asegura que el *MN* se libre de

problemas de comunicación.

Un *handoff* deficiente puede resultar en la pérdida de información recolectada o el retraso en su entrega al destino; por ejemplo, la existencia de lentitud en el proceso genera altos tiempo de desconexión; si la aplicación no es consciente de la desconexión puede que continúe enviando datos sin considerar que probablemente no podrán entregarse. Otro caso se da cuando el *MN* decide cambiarse a un punto de acceso a la red que tiene problemas de congestión o saturación de usuarios conectados; entonces el nodo seguirá con problemas para transmitir su información al destino. Otro posible problema es un cambio anticipado a otro punto de acceso, por una lectura temporal de una mala calidad de enlace con su actual punto de acceso (posiblemente ocasionada por problemas de desvanecimiento de la potencia de transmisión debido a obstáculos), que lo obligaría a cambiarse sin necesitarlo; incluso, si la nueva conexión resulta débil (por estar muy alejado del nuevo punto de acceso) el *MN* tendrá que cambiarse nuevamente al punto de acceso más cercano (que por lo general será el punto donde estaba originalmente conectado), provocando un problema de cambios innecesarios y rebotes llamado efecto *ping-pong*. Por esta razón, un *MN* necesita saber cuándo cambiarse de red, cómo ejecutar el *handoff*, y a cuál punto de acceso dentro de la red es conveniente cambiarse.

En la literatura existen varios trabajos que proponen mecanismos para realizar este proceso de *handoff* (las cuales se abordan detalladamente en el capítulo *Trabajos Relacionados*); éstos difieren en algunos aspectos de operación y en sus objetivos de aplicación, aportando diferentes soluciones que pueden servir de base para este trabajo de tesis. Sin embargo, la mayoría de estos trabajos y soluciones están enfocados hacia redes celulares o redes inalámbricas tradicionales, las cuales difieren de las características técnicas y posibilidades de las redes *WSNs* las cuales, como se menciona anteriormente, generalmente utilizan *IEEE 802.15.4*.

Por ejemplo, en el trabajo realizado por Gu, Bae, Chung, Cheon, y Park (2010) se desarrolla un mecanismo para la predicción del movimiento de un *MN*, para que con ello el sistema pueda inferir hacia dónde se está dirigiendo un nodo. Además de esta predicción, el nodo realiza comparaciones entre la calidad de la señal recibida de la Estación Base (del inglés *Base Station*, *BS*) a la que pertenece actualmente y contra la de otras candidatas a ser su nueva *BS*. Sin embargo, este mecanismo se desarrollo para redes con tecnología celulares, por lo que es posible incluso que el *MN* pertenezca a dos celdas simultáneamente. Esto no es posible en redes que trabajan bajo el estándar

*IEEE 802.15.4.*

Además, las propuestas de mecanismos de *handoff* para redes *WSNs* son en su mayoría para redes que no son conscientes de la aplicación y son desarrollados bajo un diseño tradicional aislado o por capas (mecanismos que no pueden utilizar información de otras capas del modelo de red *OSI* (Yemini, 1993) dentro del mecanismo de *handoff*), lo cual provoca una calidad de comunicación limitada y baja optimización de los recursos de la red al utilizar su proceso de *handoff*.

Por ejemplo, de acuerdo a Liu, Li, Guo, y Dutkiewicz (2008), los algoritmos tradicionales de *handoff* generalmente basan su mecanismo en una comparación de umbrales entre una o más métricas específicas para tomar la decisión de ejecutar el traspaso de red. Donde algunas de las métricas más comunes son el Indicador de Fuerza de Señal Recibida (del inglés *Received Signal Strength Indicator*, RSSI), la Relación Señal a Interferencia (del inglés *Signal-to-Interference Ratio*, SIR) y la Tasa de Error Binario (del inglés *Bit Error Rate*, BER).

Este tipo de criterios son limitados y no consideran aspectos e información relevante localizada en otras capas que pueden resultar de utilidad para la toma de decisiones de *handoff*.

Lo anterior refleja la problemática a abordar en este trabajo de tesis: instrumentar un mecanismo que permita la movilidad de los nodos en una *WSN*, que cuente con un grado de conciencia o inteligencia en su diseño para ejecutar el *handoff* de forma eficiente (evitando desconexiones y traspasos abruptos e innecesarios entre dispositivos móviles en *WSNs*) y que además considere el tipo de aplicación presente en la red, violando el esquema de diseño de protocolos por capas mediante un diseño *crosslayer* en el que interactúan múltiples capas del modelo de red (Srivastava y Motani, 2005).

## 1.2. Objetivos

En este trabajo se propone el diseño y simulación de un mecanismo de *handoff* en *WSN* que sea consciente de las condiciones de la red y de las aplicaciones de capas superiores para permitir la movilidad de los nodos sin afectar de sobremanera la comunicación continua de la red y sus aplicaciones de capas superiores. Ello mediante la adaptación del protocolo de *handoff WSN-HaDaS* (Buenrostro-Mariscal et al., 2015), expandiendo las consideraciones establecidas en él con el objetivo de obtener un mejor resultado al brindarle una mayor conciencia de su entorno de red.

### 1.2.1. Objetivo general

Diseñar y simular un mecanismo de *handoff* bajo optimización *crosslayer* que permita la comunicación continua entre los dispositivos móviles en una *WSN*.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Investigar sobre las diferentes clasificaciones y técnicas del *handoff* tradicional y sobre el diseño de mecanismos bajo optimización *crosslayer*.
- Definir las funciones y parámetros a utilizar dentro del mecanismo de *handoff* para solucionar el problema del traspaso.
- Diseñar un mecanismo de *handoff crosslayer* según lo establecido en los requerimientos del objetivo anterior.
- Diseñar el marco de evaluación para simular el comportamiento del mecanismo de *handoff crosslayer* propuesto en una *WSN* con dispositivos móviles.

## 1.3. Justificación

El desarrollo del presente trabajo abona al actual avance tecnológico en el área de las redes inalámbricas con una nueva opción para la problemática del traspaso de red mediante un mecanismo de *handoff* diseñado bajo optimización *crosslayer* aplicado a *WSNs*, beneficiando de esta manera al desarrollo de los avances tecnológicos orientados hacia *WSNs* y su movilidad.

Como se menciona anteriormente, la movilidad en *WSNs* brinda una amplia gama de posibles aplicaciones. Entre ellas actualmente se destaca el creciente uso hacia el cuidado de la salud, equipando a los pacientes con nodos sensores que monitorizan sus signos vitales y transmiten los datos recolectados hacia un nodo final para el monitoreo remoto de la salud de las personas.

De acuerdo a Arnon, Bhastekar, Kedar, y Tauber (2003), la implementación de *WSNs* en ambientes hospitalarios resulta beneficiosa tanto para los pacientes como para el cuerpo médico puesto que puede reducir tiempos de instalación del paciente y sumando tiempos de monitorización de su salud. También menciona que, desde el punto de vista de redes inalámbricas, existen múltiples problemáticas debido a la naturaleza de las señales y el ambiente en que se encuentran, como *multipath*, interferencias y disturbios en la señal. Asimismo, plantea los requerimientos de red con respecto a las señales o parámetros que se monitorizan del paciente.

Por ello, el mecanismo que se propone tiene el potencial de impactar benéficamente en este sector, ya que el proyecto se enfoca hacia el área de cuidados a la salud en pacientes de edad avanzada (geriatría), tema de gran atención en México, puesto que en los próximos años la cantidad de personas de edad avanzada tendrá un crecimiento radical y en consecuencia existirá una mayor necesidad de atención hacia este grupo social (Wong, Espinoza, y Palloni, 2007).

Con este mecanismo de *handoff* se pueden habilitar nuevas aplicaciones de salud, para equipar hospitales, centros de cuidados y hogares con dispositivos fijos ubicados estratégicamente, y *MNs* colocados en los pacientes para realizar la monitorización de signos vitales sin limitar su movilidad dentro de dichos espacios y evitar la desconexión de los usuarios de la red.

Este tipo de aplicaciones demanda una comunicación inteligente, pues se utiliza para transportar datos críticos (parámetros de salud de pacientes), por ello este mecanismo está pensado para que ofrezca un cierto grado de conciencia del entorno y de la aplicación o el tipo de tráfico que transporta, con el propósito final de ejecutar dicho mecanismo de una manera eficiente y oportuna a las necesidades de las aplicaciones; posicionando con ello, en un buen nivel la utilidad esperada del mecanismo de *handoff* propuesto con respecto a las que actualmente se ofrecen.

Por lo tanto, crear este tipo de mecanismos con las expectativas propuestas, representa un reto académico para el proponente, puesto que requiere analizar y definir las capas del modelo de redes que se deben utilizar, qué procesos debe ejecutar dicho

mecanismo, qué parámetros considerar y cómo debe integrarse todo lo anterior en un diseño *crosslayer*, con el fin de crear un mecanismo propio de *handoff*. Además, se debe diseñar el escenario de operación de forma adecuada para simularlo con parámetro reales que puedan generar resultados válidos para su implementación en la vida real.

De acuerdo a lo anterior, se toma como base o punto de partida la investigación y trabajo desarrollado en el protocolo de *handoff WSN-HaDaS* (mencionado en la sección 1.2). Este protocolo ya ofrece características de diseño *crosslayer*, con ello se infiere que posee una mayor conciencia del entorno de aplicación dado que no limita sus decisiones a parámetros de una sola capa del modelo de red *OSI*. Bajo este esquema, el protocolo ***WSN-HadaS!*** (***WSN-HadaS!***) demostró presentar tiempos de retardo reducidos dado que se implementa dentro de un mecanismo de comunicación estándar. Por ello, al mejorar este protocolo, la nueva propuesta ofrece un grado aún mayor de conciencia del entorno y la aplicación.

## 1.4. Preguntas de investigación

De acuerdo a la problemática anteriormente planteada, así como a los objetivos enlistados, se proponen las siguientes preguntas de investigación:

- ¿Qué capas del modelo de red deben incluirse en el mecanismo de *handoff cross-layer*?
- ¿Qué parámetros y/o funciones deben considerarse en mayor medida para la elaboración de un mecanismo de *handoff* que provea movilidad en *WSNs*?
- ¿Qué módulos deben formar el protocolo de *handoff* para que cumpla con las funciones de transferencia entre *MNs* y permita la continuidad de la comunicación?

## 1.5. Limitaciones y suposiciones

El proyecto limita sus alcances a la simulación del mecanismo de *handoff crosslayer* en el *software Network Simulator 2 (NS2)*, pues no se cuenta con los recursos necesarios para la implementación en físico del sistema planteado.

Asimismo, puesto que se trata de un proyecto que da continuidad a la investigación realizada y publicada del trabajo de Buenrostro-Mariscal et al. (2015), se dan por aceptados los resultados obtenidos en él. Además, estos resultados son la base para la presente investigación, dado que dicho trabajo ya ha sido evaluado en distintas etapas para su publicación.

## 1.6. Metodología

Con el propósito de cumplir con cada uno de los objetivos descritos anteriormente, se propuso la metodología mostrada en la Figura 3, como camino a seguir para el desarrollo de esta investigación:

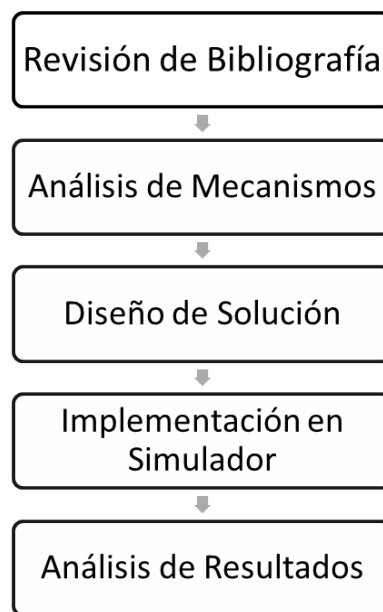


Figura 3: Metodología de investigación propuesta

De acuerdo a dicha metodología, la estrategia a seguir se describe de la siguiente manera:

- **Revisión de Bibliografía:** En esta etapa se realizó la documentación sobre el tema, así como la comprensión y familiarización de conceptos. Esta etapa se documenta en el Capítulo 2.
- **Análisis de Mecanismos:** En esta fase se analizaron trabajos relacionados al tema,

con enfoque especial hacia el protocolo base, *WSN-HaDaS*. Estos trabajos se muestran en el Capítulo 3.

- **Diseño de Solución:** Esta etapa corresponde a las actividades realizadas para el diseño del mecanismo propuesto de *handoff*. Esto con base a las conclusiones obtenidas de la etapa anterior. Dicho proceso se describe en la sección 4.2 del Capítulo 4.
- **Implementación en Simulador:** Una vez diseñada la propuesta de este trabajo de tesis, se prosiguió a su implementación en el simulador. Dicho proceso se describe en la sección 4.3 del Capítulo 4.
- **Análisis de Resultados:** Finalmente, durante esta etapa se analizaron los resultados obtenidos en la fase anterior, de acuerdo a métricas y casos de estudio definidos. Dicho proceso es descrito en el Capítulo 5.

## 1.7. Organización del documento

En esta sección se hace mención y breve descripción acerca de la estructura de este documento de tesis en general. Dicha estructura se describe a continuación.

El Capítulo 1 da introducción al trabajo de tesis, mencionando la problemática, objetivos, justificación, preguntas de investigación, limitaciones y suposiciones, y finalmente la metodología del proyecto.

El Capítulo 2 comprende una introducción a conceptos como el *handoff*, las *WSN* y el diseño *crosslayer*; temas e información relacionada a la problemática a resolver y objetivos propuestos. Esto con el propósito de desarrollar un marco teórico concreto y claro que sustente este proyecto de tesis.

En el Capítulo 3 se detallan distintos trabajos e investigaciones relacionadas al área de enfoque de este trabajo de Tesis, así como descripciones sobre sus similitudes y diferencias. Este estudio del estado del arte permite analizar soluciones actuales, así como encontrar y proponer mejoras.

El Capítulo 4 presenta el protocolo propuesto de *handoff* para resolver la problemática planteada. Igualmente se presentan el proceso de diseño, desarrollo e implementación en el simulador.

En el Capítulo 5 se evalúa y analiza el desempeño del protocolo propuesto de acuerdo



a su ejecución en el simulador. Para lo cual, se describen la ejecución de la simulación, el escenario, métricas, casos de estudio y resultados obtenidos.

Finalmente, en el Capítulo 6 se concluye la tesis haciendo mención a conclusiones y recomendaciones generales asociadas al trabajo desarrollado en este proyecto. Además, se hace énfasis en los beneficios obtenidos con la aportación de este trabajo de tesis, y propone trabajo a futuro dentro del contexto de este proyecto.



## Capítulo 2

# Esquema de fundamentos

En este capítulo se describen los avances y logros realizados en el área de redes, enfocados hacia mecanismos de *handoff*.

Para ello se muestra, en sus diferentes secciones, aspectos relacionados al tema: definiciones, clasificaciones, problemáticas e importancia; así como la estrategia de diseño *crosslayer* como concepto. Con esto se pretende colocar en contexto al lector, presentando el estado del arte actual, validando a su vez la innovación del proyecto propuesto.

## 2.1. Transferencia de red (*handoff*)

El término *handoff*, según el contexto, tiene un uso distinto; sin embargo, tiende hacia una misma acción y significado. El *Macmillan Dictionary* (2015) define al *handoff* como la acción de dar la responsabilidad sobre algo a alguien más. Esto es, la responsabilidad de una entidad pasa a ser ahora de otra entidad. Ejemplo de ello es el *handoff* en medicina, en donde se refiere a la transferencia de responsabilidad de un doctor, equipo o clínica sobre un paciente hacia otro doctor, equipo o clínica (Dunn y Murphy, 2008).

Ahora, en el caso de las redes inalámbricas, el «*handoff*», «*handover*», «traspaso» o «transferencia de red» se refieren al movimiento de un *MN* entre dos puntos de acceso, esto es, el proceso de terminar una conexión existente y obtener una nueva conexión (Makaya y Pierre, 2008). Dicho de otra manera: el *handoff* es la transición o traspaso de la señal de transmisión entre diferentes celdas. En un principio, cada terminal móvil (nodo) está, en todo momento, dentro del rango de al menos un *AP* de la red o *BS*. Entonces, *handoff* es el mecanismo mediante el cual una conexión activa entre un *MN* y una terminal o *host* (del inglés, anfitrión) correspondiente es transferida desde un *AP* a la red fija u otro *AP* (Pahlavan et al., 2000).

Estos mecanismos de *handoff* deben cumplir con características de acuerdo a la aplicación o tarea en ejecución, pues existen diferentes requerimientos en aplicaciones de salud de pacientes críticos que en aquellas de vigilancia de territorios; sin embargo, algunas de las características o requerimientos comúnmente establecidos son una baja latencia en la red y una baja pérdida de paquetes, por mencionar algunos.

Como se menciona anteriormente, los mecanismos de *handoff* existen en aquellas redes inalámbricas en las cuales sus miembros poseen capacidades para cambiar de posición y se les permite ejecutar dicho movimiento, llegando incluso a salir del rango de cobertura de sus celdas o *APs*. Dada esta descripción, se cubren diferentes tecnologías de comunicación inalámbricas en las que existen los mecanismos de *handoff*, como aquellas tecnologías de comunicación celular, de área local o de área personal (por mencionar algunas).

## 2.2. Clasificación del *handoff*

Así como diferentes tecnologías de comunicación poseen mecanismos de *handoff*, así también existen diferentes clasificaciones para estos tipos de mecanismos. Esta clasificación se realiza en función de varios factores; algunos de ellos pueden apreciarse en la Figura 4, basada en el trabajo de Nasser, Hasswa, y Hassanein (2006).

Para los propósitos del presente documento basta con explicar solo algunas de las clasificaciones, de acuerdo a: la tecnología de redes involucrada, número de conexiones involucradas y al control del *handoff*.

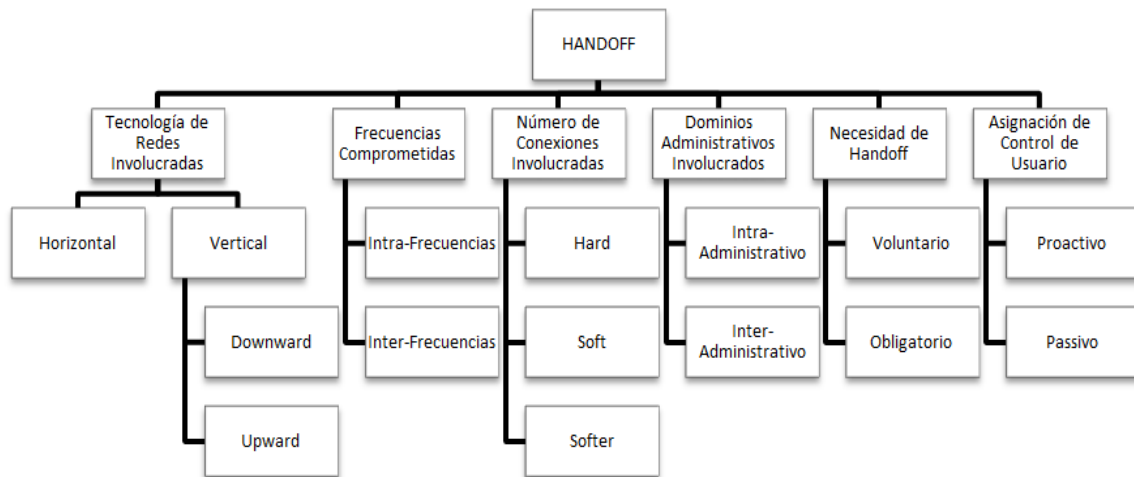
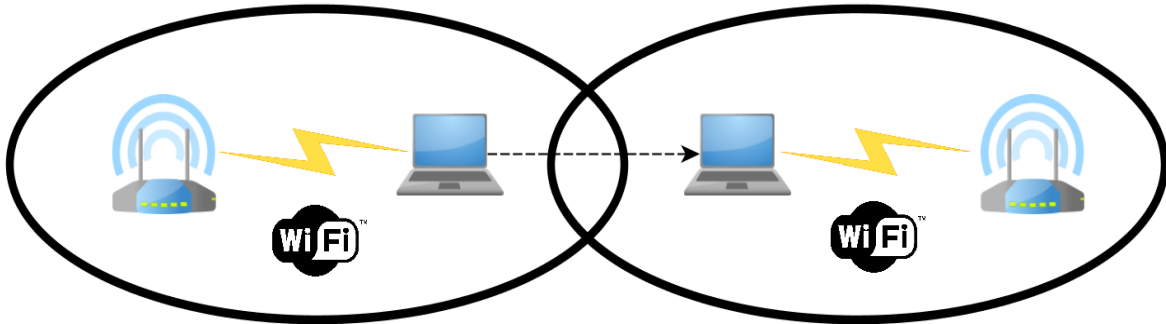


Figura 4: Clasificación del *handoff*.

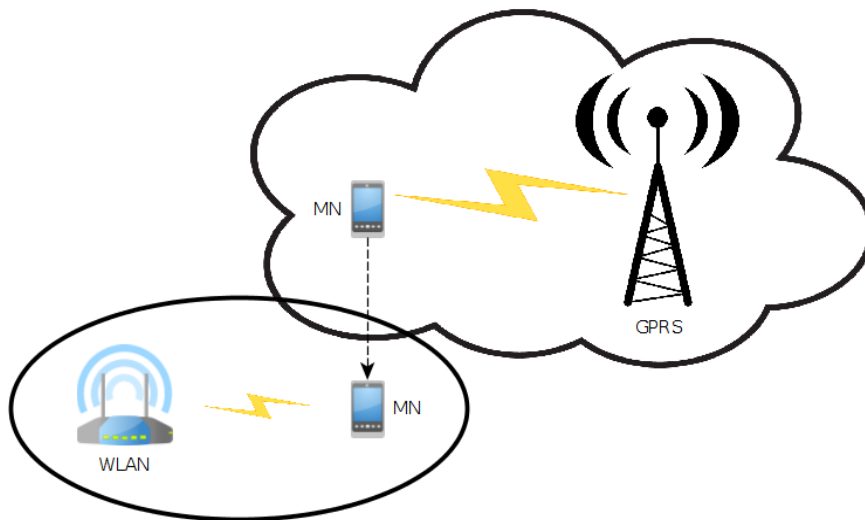
### 2.2.1. Redes involucradas

De acuerdo a Van Quang, Prasad, y Niemegeers (2012), existen dos tipos de mecanismos de *handoff* si se clasifican en función a los tipos de tecnologías de comunicación que se encuentran involucradas en la red: *handoff* horizontal y *handoff* vertical.

- Horizontal: El *handoff* horizontal existe cuando un *MN* se encuentra saliendo de los límites de cobertura de un *BS*, pero a su vez entra al área de cobertura de otra *BS* del mismo sistema trabajando con la misma tecnología de comunicación, por ejemplo celular *4G* (Van Quang et al., 2012). Este proceso se muestra en la Figura 5, basada en el trabajo de Siddiqui y Zeadally (2008).

Figura 5: Horizontal *handoff*.

- Vertical: A diferencia del horizontal, un *handoff* vertical ocurre cuando un nodo cambia su conexión de una *BS* a otra *BS* que trabaja con diferente tecnología de comunicación inalámbrica (Nasser et al., 2006). Por ejemplo, el cambio de una señal de transmisión de una *BS IEEE 802.11b* a una *BS* celular; como se muestra en la Figura 6, basada en el trabajo de Siddiqui y Zeadally (2008).

Figura 6: Vertical *handoff*.

Sin embargo, otros autores describen una tercera clasificación: el *handoff* diagonal. Aunque en trabajos como el de Stuedi y Alonso (2005) se da una visión diferente al

*handoff* (donde se visualiza desde el aspecto de cambios de ruta y/o capa MAC), el concepto final es el mismo.

- Diagonal: Un mecanismo de este tipo existe cuando se ejecutan en simultaneidad, mecanismos verticales y horizontales. Esto puede ocurrir al cambiar de una tecnología a otra incluida dentro del mismo estándar, por ejemplo cambiar de *IEEE 802.11p* a *IEEE 802.11b* (A. Ahmed, Boulahia, y Gaiti, 2014).

Un resumen representativo de las clasificaciones antes mencionadas se muestra en la Figura 7, basada en el trabajo de A. Ahmed et al. (2014).

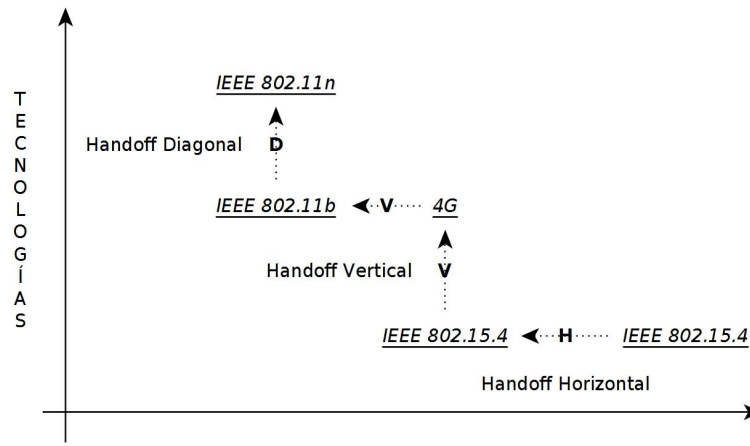
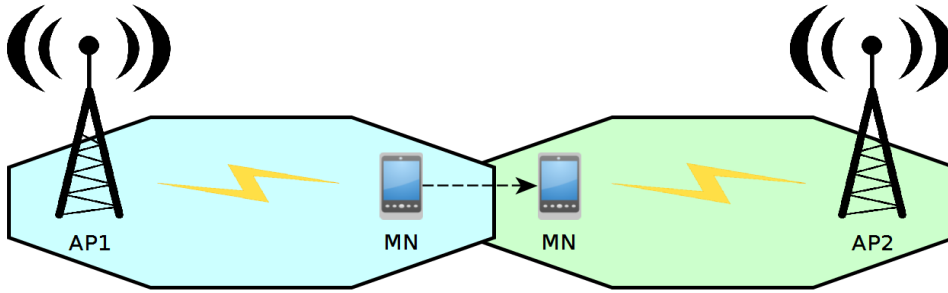


Figura 7: Clasificación del *handoff* según las redes involucradas.

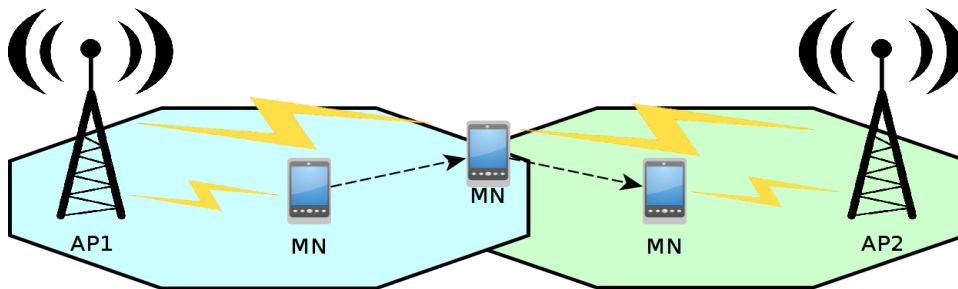
### 2.2.2. Número de conexiones

Otro tipo de clasificaciones del *handoff* es en función al número de conexiones que un nodo puede mantener o establecer. De acuerdo a Nasser et al. (2006), existen tres tipos.

- *Hard*: Se dice que en un *hard handoff*, un nodo libera el enlace que tiene con una *BS*, para establecer una nueva conexión hacia una nueva *BS*. Este mecanismo puede observarse en la Figura 8, basada del trabajo de Chowdhury y Gregory (2012). Esto define que a un *MN* le es imposible establecer más de una sola conexión a una *BS* en todo momento. A este tipo de *handoffs*, también se les llama conexiones *break-before-make*, que en inglés describe que es necesario romper la conexión actual antes de establecer una nueva (Nasser et al., 2006).

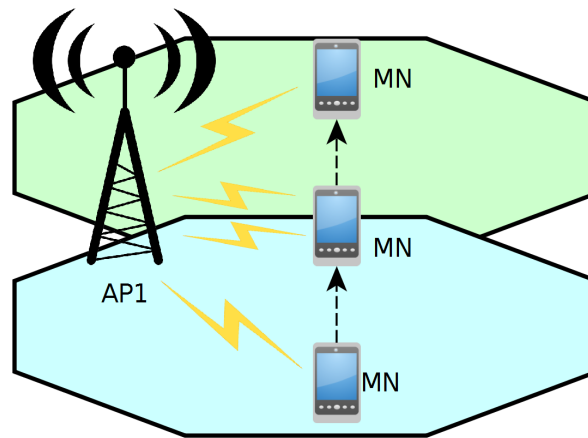
Figura 8: Mecanismo tipo *hard handoff*.

- *Soft*: Contrario a un mecanismo *hard handoff*, un tipo *soft* describe que los enlaces o conexiones son agregados o liberados de tal manera que siempre existe al menos un enlace del nodo hacia la *BS* (Nasser et al., 2006). Este tipo de *handoff*, puede observarse en la Figura 9, basada en el trabajo de Chowdhury y Gregory (2012). Para ello, debe tenerse en cuenta que el *MN* debe moverse entre el área de cobertura de dos celdas. A este tipo de conexiones se les llama también *make-before-break*, puesto que describen la capacidad de establecer una conexión antes de liberar otra, dando a entender que se pueden disponer de al menos dos conexiones simultáneas del nodo a la *BS* (Ramachandran, Rangarajan, y Lin, 2006).

Figura 9: Mecanismo tipo *soft handoff*.

- *Softer*: Un mecanismo de *handoff softer* es muy similar al *soft*, con la diferencia de que el *MN* cambia conexiones entre enlaces de radio que pertenecen al mismo *AP*. Dicho de otra manera, la principal diferencia entre un mecanismo tipo *soft* y uno tipo *softer* reside en que el *MN* se ubica dentro del área de cobertura de dos sectores de un mismo *AP* o *BS* (Chowdhury y Gregory, 2012), tal y como se muestra en la Figura 10, basada en el trabajo del mismo autor.



Figura 10: Mecanismo tipo *softer handoff*.

### 2.2.3. Control del *handoff*

Un aspecto muy importante sobre los mecanismos de *handoff* es la toma de decisiones sobre cómo y cuándo ejecutar dichos mecanismos. Ya que, sin importar el tipo de *handoff* del que se trate, la decisión de ejecución del mecanismo de *handoff* (Zdarsky y Schmitt, 2004) reside en una entidad de red o en el *MN* mismo.

De acuerdo a Pahlavan et al. (2000), es posible clasificar al *handoff* con base en dónde se origina el mecanismo de decisión o control de *handoff*.

Entonces, una tercera clasificación de los mecanismos de *handoff* define que éstos pueden ser:

- Controlado-por-Móvil,
- Controlado-por-Red, o
- Asistido-por-Móvil.

Entonces, el mecanismo de decisión puede ubicarse en una entidad de la red (como en voz celular) cuando se es *controlado-por-red*; o en el mismo *MN* cuando es *controlado-por-móvil*, como en el caso de las *WLANs*. Para ejemplificar un caso *asistido-por-móvil* puede tomarse como referencia el caso de tecnologías celulares como el Servicio General de Paquetes vía Radio (del inglés *General Packet Radio Service*, GPRS), donde la información enviada por un *MN* puede utilizarse por una entidad de red para tomar la decisión de *handoff* (Pahlavan et al., 2000).

Sin embargo, existen otros trabajos que agregan un cuarto miembro a esta clasificación.

- Asistido-por-Red

En este nuevo caso, la red reúne información que le puede ser de utilidad al *MN* para ejecutar un mecanismo de *handoff* (Kassar, Kervella, y Pujolle, 2008).

En resumen, en un tipo *controlado-por-red* la entidad de red es quien lleva el control principal sobre el *handoff*. En un tipo *controlado-por-móvil*, el *MN* se ve obligado a tomar sus propias decisiones con base en mediciones o análisis propios. En un *handoff asistido-por-móvil*, información o mediciones tomadas por el *MN* sirven de apoyo y son usadas por la red. Finalmente, cuando la red es quien brinda información al *MN* para que éste las utilice en su decisión de *handoff*, se trata de un mecanismo tipo *asistido-por-red*.

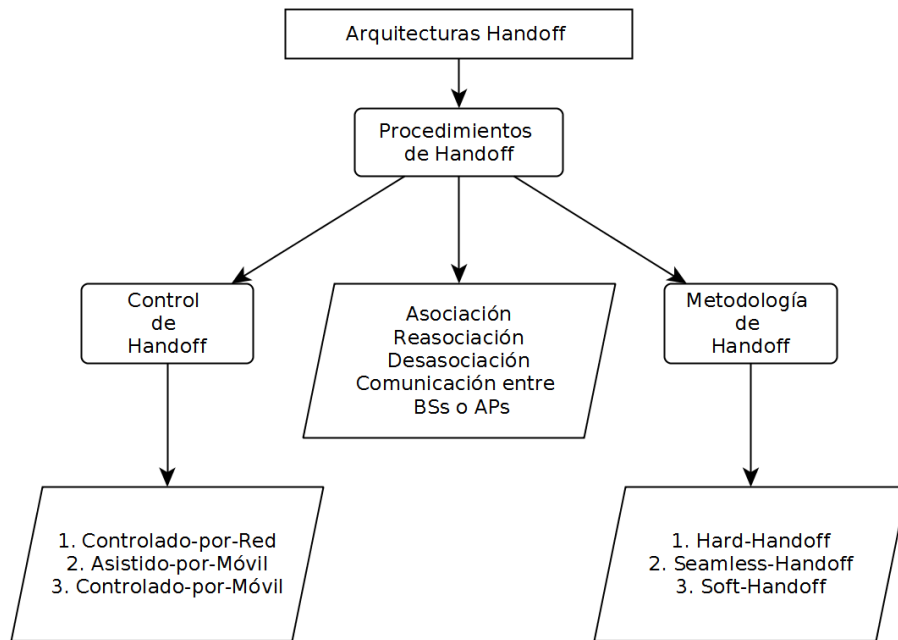
Entonces, tal y como se indica en cada caso, en la decisión del proceso pueden intervenir el *MN*, entidades de la red en la que se da el cambio de conexión, y/o tanto la entidad de red como el *MN*.

### 2.3. Problemáticas que conlleva el *handoff*

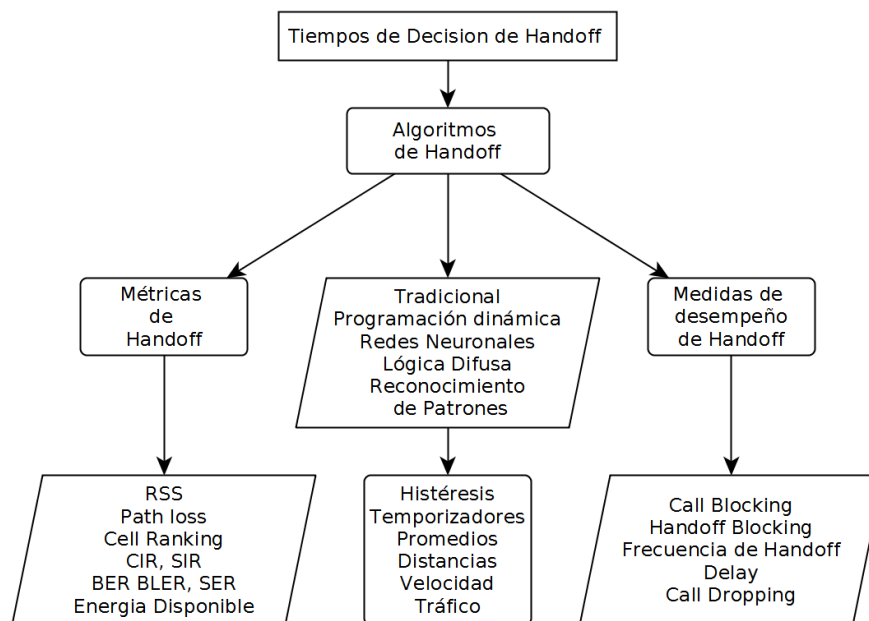
De acuerdo a Pahlavan et al. (2000), existe una gran cantidad de temas relacionados a los mecanismos de *handoff*, como se muestra en la Figura 11 basada en el mismo artículo, estos temas pueden clasificarse en dos categorías:

- Arquitectura: Son aquellas cuestiones en las que se consideran temas relacionados con la metodología, control y elementos de *software* o *hardware* involucrados en el nuevo ruteo de la conexión.
- Tiempo de decisión: Estos temas se refieren a los algoritmos, métricas usadas por los mismos, y las metodologías de evaluación del desempeño.

Sin embargo, otros autores consideran que las problemáticas que conlleva el *handoff* generalmente repercuten en dos cuestiones: el cómo y el cuándo se deben ejecutar estos mecanismos.



(a) Arquitecturas de Handoff



(b) Tiempos de Decisión de Handoff

Figura 11: Temas importantes involucrados en un mecanismo de *handoff*.

Por ejemplo, McNair y Zhu (2004) dicen que durante un proceso de *handoff* la decisión sobre éste es el paso más importante, pues afecta la comunicación del *MN*.

Una decisión de *handoff* incorrecta puede degradar la calidad de servicio del tráfico de información e incluso romper con la comunicación actual, pues idealmente un *MN* debe considerar tantos aspectos del entorno como le sea posible; por ejemplo, cuál red ofrece una mayor cobertura, cuál red ofrece un menor congestionamiento y cuál red otorga, en general, mayores beneficios. De igual modo debe considerar cuál es el momento adecuado para ejecutar el mecanismo de *handoff*, pues realizar un traspaso de red en un momento inoportuno puede ocasionar que se sufra de problemas como el llamado efecto *ping-pong*, así como el consumo innecesario de energía y/o pérdida de paquetes.

El efecto *ping-pong* es un fenómeno muy común en las redes móviles, éste puede causar ineficiencia y degrado del desempeño de la red. Parámetros tales como cobertura, área de ubicación del usuario y su movimiento y velocidad son algunas de las principales consideraciones que pueden ocasionar la existencia del efecto *ping-pong* (Ghanem, Alradwan, Motermawy, y Ahmad, 2012). Esta situación es común, dado que algunos algoritmos utilizan el *RSSI* como criterio de decisión para la ejecución de los mecanismos de *handoff*, y el utilizar estas mediciones instantáneas provoca el fenómeno de ejecución frecuente de *handoffs* (Yang, Song, Owens, Cosmas, y Itagaki, 2004). En otras palabras, se trata de traspasos de red innecesarios durante un corto intervalo de tiempo (Gu et al., 2010).

Con el fin de otorgar una idea más clara del efecto *ping-pong*, suponga el caso de un *MN* perteneciente a una red *A* y ubicado justamente dentro del área de cobertura de dos redes *A* y *B* como se muestra en la Figura 12, en ese momento a causa de una pobre decisión de *handoff*, el nodo decide cambiarse a la red *B*. A partir de este momento el nodo entra en conflicto de decisión, pues ahora intenta regresar a formar parte de la red *A* debido al mismo criterio tomado anteriormente. Este proceso puede llegar a ejecutarse múltiples veces si no se cuenta con una conciencia del entorno para el *MN* que le permita llevar a cabo mejores decisiones de *handoff*. Esto deja claro que los mecanismos de decisión para ejecutar un *handoff* requieren un criterio más amplio para tomar dichas decisiones, y no basta con una simple medición continua del *RSSI*.

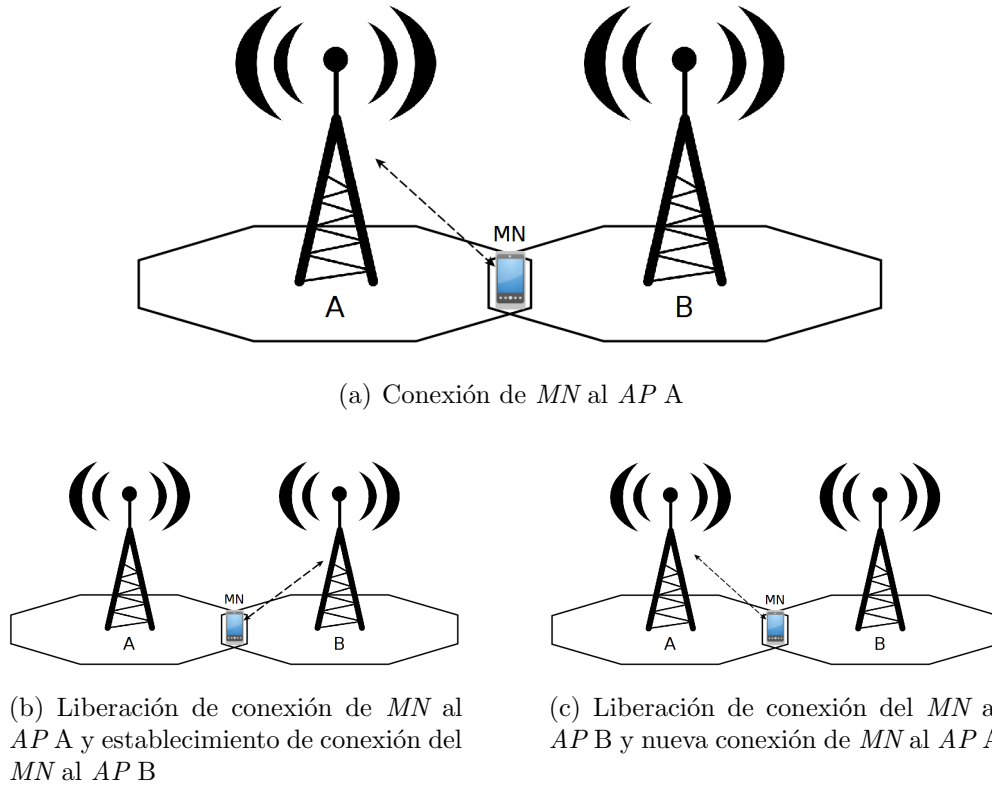


Figura 12: Ejemplo del efecto *ping-pong* en la ejecución de un mecanismo de *handoff*.

En resumen, dado que la ejecución frecuente de los mecanismos de *handoff* ocasiona grandes consumos innecesarios de energía (críticos sobre todo para nodos cuyas fuentes de poder son limitadas, como baterías), el efecto *ping-pong* debe reducirse al mínimo posible durante la etapa de decisión de *handoff* (Yang et al., 2004).

Por esta razón los nuevos algoritmos como los presentados por Fotouhi, Zuniga, Alves, Koubaa, y Marron (2012), Lee, Kim, Jeong, y Kang (2011) y Lin y Lee (2010) cuyo criterio de decisión se basa en la lectura del *RSSI*, utilizan diferentes métodos y algoritmos sobre estas lecturas para permitir una posterior ejecución del mecanismo de *handoff*. Incluso algunos parámetros adicionales como margen de histéresis, temporizadores de asentamiento, y promedios, deben considerarse con el objetivo de evitar este efecto (Pahlavan et al., 2000; Pollini, 1996).

## 2.4. Importancia del *handoff*

Buscando dar solución a las necesidades de movilidad que presentan los usuarios de redes inalámbricas, se desarrollaron técnicas como el *handoff*, que permiten a los usuarios de los sistemas de comunicaciones inalámbricas desplazarse libremente entre puntos de acceso de la red basadas en distintas tecnologías inalámbricas (Villar, 2009).

El uso de la telefonía celular, los dispositivos *wearables* (del inglés, vestibles) y los dispositivos móviles (*laptops*, *gadgets*) son cada día más comunes y generales, puesto que muchos avances y desarrollos tecnológicos se enfocan hacia aplicaciones con estos dispositivos (Gruebler y Suzuki, 2014; Hoflinger et al., 2012; Berghaus y Back, 2015). En todas estas aplicaciones, siempre se busca cumplir con las expectativas del cliente, y satisfacer sus necesidades; por ejemplo en la telefonía celular, una buena administración de los mecanismos de *handoff* conllevan a una mejor experiencia en llamadas (menor cantidad de interrupciones, cortes imperceptibles o nulos para el usuario).

A continuación, se enlistan algunas de las razones por las cuales es necesario y resulta provechoso integrar mecanismos de *handoff* al sistema:

- Evitar el término de aplicaciones cuando el *MN* se retira del área de cobertura de una celda y se adentra al área de cobertura de otra.
- Cuando se tienen celdas saturadas, otorga la capacidad de conectarse a otra celda.
- Cuando el comportamiento de desplazamiento del nodo es variable.
- Cuando existe interferencia en la red actual.

El integrar mecanismos de *handoff* dentro del sistema de red, permite un amplio uso de la infraestructura desplegada, y en algunos casos, optimizar el acceso de los distintos usuarios de acuerdo con los tipos de servicios que estos requieren. El objetivo principal de la integración de estos mecanismos es que el usuario no detecte mayores cambios al ejecutarse el *handoff*. Así como buscar que las redes permanezcan funcionando con la misma eficiencia antes, después y durante el proceso de *handoff*.

Conforme se desarrollan nuevos avances en el tema, los mecanismos de *handoff* se vuelven cada vez más rápidos e imperceptibles para el usuario (Wu, 2011), lo que resulta en un problema menos para el usuario móvil al no tener que preocuparse por acceder a una nueva red en situaciones de movilidad entre celdas o *APs*. Con lo anterior, se ha

dejado muestra que el incluir mecanismos de *handoff* en la red proporciona ventajosas características.

## 2.5. Estrategia de diseño *crosslayer*

En la actualidad, existe una gran variedad de investigaciones y desarrollos de protocolos y aplicaciones orientadas a las *WSN* (Melodia, Vuran, y Pompili, 2006); sin embargo, la mayoría de ellas han sido desarrolladas bajo el concepto tradicional de protocolos por capas del modelo *OSI* (Zimmermann, 1980).

Dicho concepto define siete capas que describen cómo interaccionan las aplicaciones que se ejecutan en dispositivos de red, las cuales pueden apreciarse mejor en la Figura 13; además es posible observar que las primeras cuatro capas del modelo se agrupan dentro del llamado *stack* (del inglés, pila) de Protocolos de Comunicaciones, puesto que dichas capas son las encargadas de la comunicación por el medio físico, así como de la interacción entre los mecanismos de transmisión extremo a extremo (Buchli, Sutton, y Beutel, 2012).

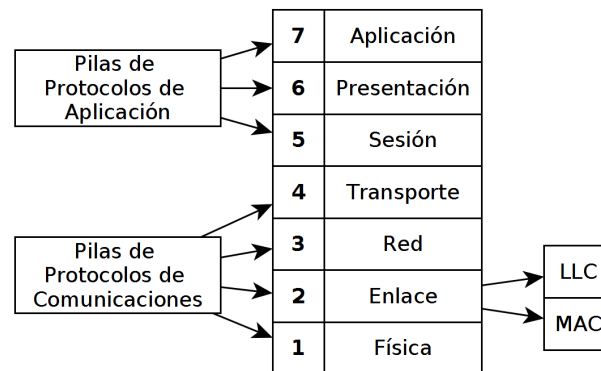


Figura 13: Distribución de capas del Modelo *OSI*.

De acuerdo a Buenrostro-Mariscal (2014), el trabajar bajo este esquema tradicional de un diseño modular por capas, brinda principalmente las siguientes ventajas:

- Cada módulo define claramente sus funciones y procedimientos propios para habilitar la independencia de capa.
- Facilita la implementación y mantenimiento.

- La estandarización asegura que exista una *inter-operabilidad* entre los variados sistemas que se encuentran integrados o incorporados a la red; i.e, todos los elementos de la red respetan el mismo diseño modular y pueden operar entre ellos.

Por otro lado, este esquema padece de deficiencias, limitaciones o restricciones (Buenrostro-Mariscal, 2014), algunas de las cuales se muestran a continuación:

- El modelo de capas *OSI* se diseñó para redes cableadas y estáticas, por lo que el dinamismo (movilidad y desconexiones/conexiones de los nodos) de las redes inalámbricas es una característica no prevista.
- Los dispositivos de una red inalámbrica tienen generalmente recursos limitados (energía, procesamiento, almacenamiento), por lo que sus protocolos de comunicaciones deben adaptarse continuamente a su entorno. Un diseño tradicional de capas no permite esta adaptación periódica.
- El trabajar por capas independientes y cerradas entre sí, limita la conciencia del entorno de la red por parte de los nodos.
- El mantener este esquema estrictamente por capas, limita mejoras e innovación a los protocolos de comunicación para las condiciones y requerimientos actuales de una red inalámbrica.

Aún cuando estos desarrollos alcanzan un gran desempeño en términos de métricas relacionadas a cada una de las capas individuales, no se optimizaron en conjunto para maximizar el desempeño general de la red (Melodia et al., 2006). Incluso se menciona que el diseño de protocolos bajo este tipo de modelos no son apropiados para obtener funcionalidad eficiente en redes inalámbricas (Edirisinghe y Zaslavsky, 2014; Wang y Abu-Rgheff, 2003; Stine, 2007). Por ello han surgido nuevas propuestas que permiten la relación y el trabajo en conjunto de las distintas capas y proponen el desempeño adaptativo y eficiente de las mismas al compartirse información relevante entre ellas. Éstas son llamadas *estrategias de diseño crosslayer* y su comportamiento puede apreciarse en la Figura 14, basada en el trabajo de Bisnik (2005).



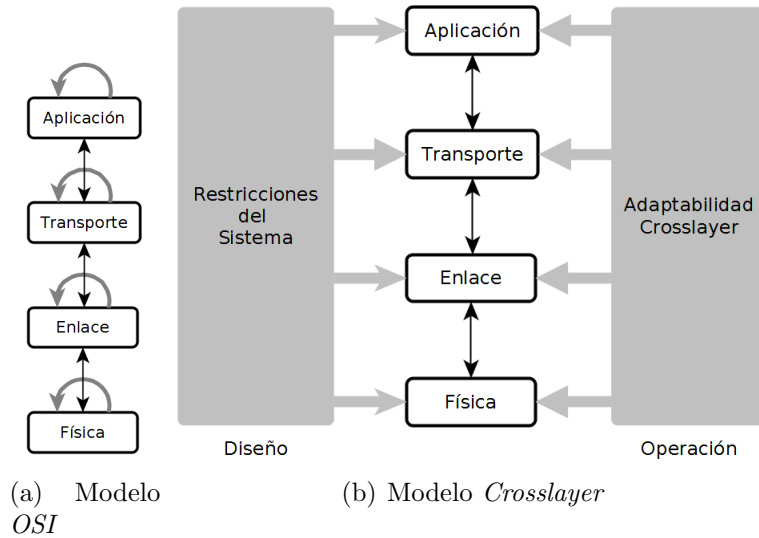


Figura 14: Diferencia de operación y filosofía entre el modelo *OSI* tradicional y *cross-layer*.

Investigadores como Fu, Xiao, Deng, y Zeng (2014) determinan que el establecer una estrategia de trabajo *crosslayer* asegura un mejor desempeño puesto que:

- No rompe con la estructura estandarizada por capas del modelo de red, sino que permite la interacción entre capas no adyacentes.
- Permite que las capas compartan información (e.g., parámetros, estado actual, etc.) propia a las demás capas, para que ellas puedan ajustar su comportamiento.
- Al controlar el envío de información de una capa a otra, es posible compensar el desempeño y confiabilidad de la red (incremento de *throughput*, reducción de latencia y del *BER*).

Es necesario entender y dejar en claro que el diseño *crosslayer* no es equivalente a sustituir el modelo por capas. Dado es el caso del trabajo realizado por Braden, Faber, y Handley (2003), quienes desarrollaron un esquema que sustituye al modelo por capas, y en su lugar proponen uno basado en roles. En el cual, se tuvieron que rediseñar las cabeceras de los paquetes de datos que se envían de una capa a otra, o en este caso de un rol a otro rol, entre demás acciones. Este tipo de desarrollos representan una mayor dificultad de diseño e implementación en comparación del diseño *crosslayer*, y conceptualmente hablando no representan un diseño bajo el esquema *crosslayer*.

En su investigación, Srivastava y Motani (2005) plantean un ejemplo básico para dejar en claro el esquema *crosslayer*. Ellos describen un modelo hipotético compuesto por tres capas llamadas  $L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$ , donde  $L_1$  es la capa más baja, y  $L_3$  es la capa en la cima. En esta arquitectura, es apreciable que no existe interfaz alguna entre  $L_3$  y  $L_1$ ; sin embargo, existe la posibilidad que un protocolo se diseñe de tal manera que requiera que  $L_1$  transfiera un parámetro a  $L_3$  durante el tiempo de ejecución de dicho protocolo. Ello hace necesaria una nueva interfaz entre ellos, y por ende viola el concepto del modelo por capas. Alternativamente, puede considerarse a  $L_2$  y  $L_1$  como una sola capa, y de esta manera diseñar un protocolo conjunto para esta «súper capa». Otra opción es diseñar el protocolo en  $L_3$ , considerando al proceso siendo ejecutado en  $L_1$ , renunciando al hecho de diseñar protocolos para cada capa independiente. Todos estos casos son ejemplos de un diseño *crosslayer* con respecto al modelo de tres capas en cuestión.

Existen muchas propuestas de diseño *crosslayer* en la literatura; Raisinghani y Iyer (2004) presenta un estudio donde describe varias de las propuestas desarrolladas para redes inalámbricas bajo este tipo de diseño.

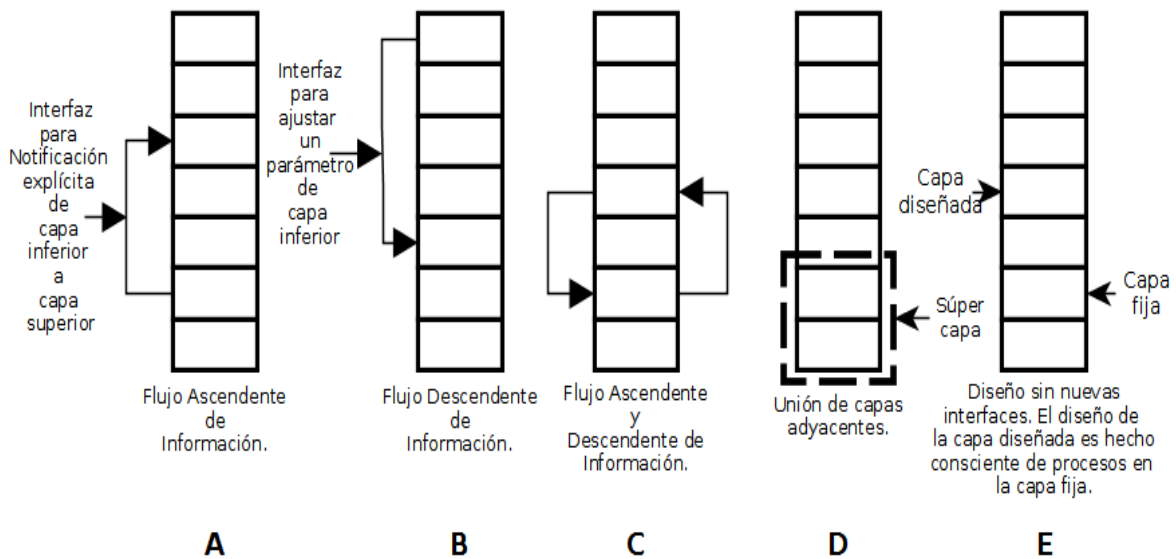


Figura 15: Distintos tipo de propuestas de diseño *crosslayer*.

Así también, en la investigación realizada por Srivastava y Motani (2005) se propone una clasificación del *crosslayer*, en las que se muestran las posibles interacciones entre

capas: ya sea el diseño de una interfaz nueva entre capas separadas (Figura 15 A-C), una unión de capas adyacentes (Figura 15 D), o el diseño de protocolos en donde exista consideración entre capas no adyacentes sin la creación de interfaces entre ellas (Figura 15 E). Del mismo modo, se hace una diferencia en función a la orientación o sentido del *crosslayer*; esto es, si la interfaz va de capas inferiores a superiores, de superiores a inferiores, o si se trata de un flujo iterativo.

Los mecanismos de *handoff* implementan diferentes criterios para determinar el momento o situación oportuna para ejecutar el traspaso de una red a otra. Sin embargo, la manera común y general de realizar estos mecanismos se basa en trabajar siempre exclusivamente en una de las capas del modelo *OSI* (Bertsekas y Gallager, 1987). La estrategia de diseño colaborativo entre capas (*crosslayer*) rompe con esos esquemas de trabajo y propone la implementación de un trabajo colectivo entre múltiples capas; dígase capa de Transporte y subcapa *MAC*, por ejemplo. En donde se permite una comunicación directa entre protocolos de diferentes capas, o compartiendo variables de las mismas. Ejemplo de ellos se describe en la investigación realizada por Thaalbi y Tabbane (2014), quienes proponen un mecanismo de *handoff* vertical bajo el esquema *crosslayer* en donde se involucran interacciones entre las capas de Aplicación, Transporte, Red y la subcapa *MAC*; siendo éstas explotadas para obtener información precisa sobre el desempeño de la red actual, el desempeño de redes alternativas y los requerimientos de la Aplicación.

En su propuesta, Ahmad, Akbar, y Qadir (2007) aplican el diseño *crosslayer* para el desarrollo de un *handoff* vertical en donde consideran aspectos provenientes de la capa de Aplicación y de Enlace. Con ello, se crean perfiles de acuerdo a la aplicación permitiendo su consideración en función a lo crítico de las mismas y ofreciendo prioridades, lo cual arrojó resultados favorables comparando su propuesta contra un mismo procedimiento sin su algoritmo.

En el trabajo desarrollado por Shi y Fapojuwo (2009), se aplica el diseño *crosslayer* en *WSN* con el propósito de eficientar y reducir el consumo de energía (puesto que éste es una limitante crítica en este tipo de redes). Esto mediante la combinación de información originaria de las capas Física, Red y la subcapa *MAC*.

Del mismo modo, Tang, Sun, Wen, y Liang (2010) extienden los alcances de su trabajo anterior (Qiuling Tang, Liuqing Yang, Giannakis, y Tuanfa Qin, 2005) integrando un diseño *crosslayer* con el objetivo de analizar el consumo de energía generado por un modelo de eficiencia energética, pero ahora considerando aspectos de las capas de

Transporte, Red, Enlace (subcapa *MAC*) y Física.

De la misma manera Sinky y Hamdaoui (2013), presentan un *handoff* bajo esquema *crosslayer* asistido por el «Protocolo de Control de Transmisión (del inglés *Transmission Control Protocol*, TCP)», con el cual buscan aliviar problemas de desempeño durante el proceso de *handoff* entre redes que trabajan con desempeños y tasas de información variantes, mediante el ajuste de parámetros de *TCP* para mejorar la calidad de servicio durante el traspaso de red.

Finalmente, en el trabajo realizado por Buenrostro-Mariscal et al. (2015) se generó un mecanismo de *handoff crosslayer*: el protocolo «*Traspaso consciente del Envío de Datos en Redes Inalámbricas de Sensores* (WSN-HaDaS)». Este protocolo opera en las capa de Transporte y la subcapa *MAC*, interactuando con un mecanismo de envío de información llamado «Protocolo de Datagramas de Usuario (del inglés *User Datagram Protocol*, UDP)», con ello posee la ventaja de ser capaz de detener o reactivar el envío de datos pues le es posible notificar al momento sobre el inicio o fin de un proceso de *handoff*.

Al igual que las anteriores, diversas investigaciones se han desarrollado en los últimos años, buscando evidenciar que el desarrollo de protocolos de comunicación trabajando en cooperación entre las capas del modelo de red, presenta grandes ventajas a comparación del modelo tradicional.

De acuerdo a esta tendencia y a la investigación realizada, es posible aproximarse a la idea de que en un futuro la mayoría (sino todos) de los mecanismos de *handoff* tenderán hacia un diseño *crosslayer* dadas las bondades que éste ofrece. Entre las que destaca el tener una mayor o más amplia visión del entorno, y no solo enfocarse en una capa. Sin embargo, es necesario tener en mente algunas preguntas sobre este futuro desarrollo:

- ¿Cuáles serán los diseños *crosslayer* con mayor impacto en el desempeño de la red?
- ¿En cuáles de ellos habrá que enfocar el desarrollo?
- ¿Cómo se permitirá la coexistencia de diferentes diseños *crosslayer*?
- ¿Cuáles capas y qué parámetros ofrecen una mejor conciencia del entorno y permiten un eficiente mecanismo de *handoff*?

Esta última cuestión define el área de oportunidad que este proyecto busca aprovechar, por lo que es necesario ahondar la investigación en el tema y propulsar el desarrollo de propuestas, con el fin de definir estas variables y un mejor diseño *crosslayer*.



## Capítulo 3

# Trabajos relacionados

A continuación, se presenta un breve capítulo sobre algunos trabajos relacionados. Clasificados de acuerdo a la tecnología de red en la cual se ha implementado o enfocado el caso de uso del mecanismo de *handoff*, mencionando las principales características de dichos trabajos de investigación y resaltando la implementación de diseños *crosslayer* en sus trabajos.

### 3.1. Redes Celulares

El término *handoff* se utilizó primeramente en redes de comunicación celulares y satelitales, con el propósito de permitir movilidad entre los usuarios (Pollini, 1996). En las comunicaciones por tecnología celular o satelital, el *handoff* permite al usuario recibir un servicio de comunicación continuo incluso al moverse entre diferentes celdas o área de cobertura de distintos *APs*, sin que éste lo note.

Esta característica y el hecho que el servicio de telefonía móvil es en la actualidad más una necesidad que un lujo, ha alentado el desarrollo de muchos avances tecnológicos hacia el beneficio de estas tecnologías. En la investigación de Carneiro, Ruela, y Ricardo (2004), se menciona que con el objetivo de hacer frente a los problemas de bajo rendimiento en los enlaces inalámbricas y terminales móviles, se necesita una arquitectura de protocolo que considere interacciones entre capas (*crosslayer*).

Siguiendo este contexto, Jo y Cho (2008) implementan una estrategia *crosslayer* para un *handoff* vertical entre las tecnologías «Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (del inglés *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, WiMax)» y de «Tercera Generación (del inglés *Third Generation*, 3G)». Esta estrategia plantea una unión de la segunda y tercer capa, reordenando y combinando los mensajes de señalización.

Además, en la investigación realizada por Chen, Cai, Sofia, y Huang (2007) se propone una combinación de estas dos mismas capas y mediante una transmisión de mensajes de control *MAC* entre las *BSs* y los dispositivos móviles, han simulado y obtenido una reducción en tiempos de ejecución de los procesos de *handoff* en la red.

En los trabajos desarrollados por McNair y Zhu (2004); y Nasser et al. (2006), se aborda la temática de las redes de comunicación celular de «Cuarta Generación (del inglés *Fourth Generation*, 4G)». Para las cuales se pretenden desarrollar nuevas estrategias de decisión para el mecanismo de *handoff* para los dispositivos móviles en la red. Muestra de ello, son las propuestas presentadas por dichos autores, en las que se han desarrollado diferentes funciones con distintos criterios de decisión para la ejecución de un *handoff vertical*.

En el caso de McNair y Zhu (2004), dicha decisión se basa en criterios ponderados en relación a los tipos de servicio, costo, condiciones de la red, desempeño del sistema, estado de los *MNs* y preferencias del usuario. Con ello se asenta que entre los objetivos de su trabajo fue el beneficiar la «Calidad de Servicio (del inglés *Quality of Service*,



QoS)» en aplicaciones de telefonía celular.

Por otro lado, Nasser et al. (2006) dan importancia mayor a parámetros de red como: costo de servicio, seguridad, consumo de energía, condiciones de la red y desempeño de la red; todo ello con el fin de ofrecer un criterio con mayor alcance y capaz de brindar un *handoff* de mayor eficiencia. En su investigación, también plantea una serie de características que considera deseables en cualquier mecanismo de *handoff*, dichas se muestran en la Figura 16 basada en su trabajo. Esto refleja la necesidad de aumentar

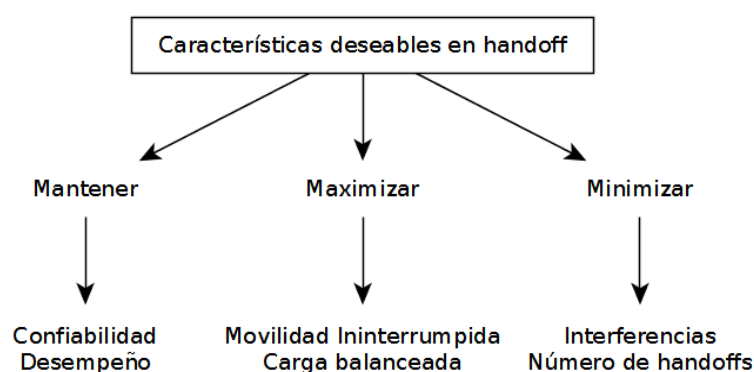


Figura 16: Características deseables de *handoff*.

el panorama de visión de los mecanismos de *handoff* al considerar aspectos no solo de red como tal, sino también de aspectos referentes a las aplicaciones de la red en tecnologías de comunicación celular mediante una estrategia de diseño *crosslayer*.

## 3.2. *WLANs*

En la actualidad, el acceso a *Internet* es más una necesidad que un lujo dada la gran cantidad de información accesible. Las redes tipo *WLAN* han tenido una gran aceptación y avances en su desarrollo a causa de dicha necesidad. Cada día, una mayor cantidad de usuarios instalan redes *WiFi* (*IEEE 802.11 b/g/n*) en sus hogares, e integran a la red sus dispositivos, entre los cuales existen dispositivos móviles; e.g., celulares, *tablets* y *laptops* (Figura 17).

Aunado a ello, el gobierno instala este mismo tipo de redes en lugares públicos como parques, bibliotecas, centros comerciales o gubernamentales, con el objetivo de satisfacer y atender las necesidades de la población. De esta manera, los usuarios pueden acceder a cualquiera de estas redes con tan solo estar dentro de su área de cobertura.

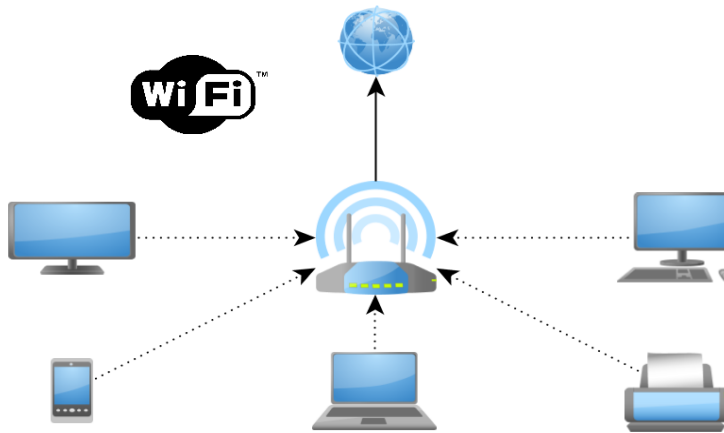


Figura 17: Ejemplo de red doméstica *WLAN* (*WiFi*, en este caso).

Sin embargo, estos mismos usuarios exigen cada día una mayor calidad en el desempeño de las redes; aún mientras cambian de ubicación y se trasladan a lo largo del día. Sin considerar que a diferencia de las redes satelitales y celulares, las *WLANs* poseen un menor rango de cobertura. Por dicha razón, las *WLANs* no se encuentran exentas de la necesidad de mecanismos de *handoff*. Es decir, en cualquier *WLAN* también existe el problema de *handoff*, puesto que puede existir movilidad entre los dispositivos de la red. Según Pack, Choi, Kwon, y Choi (2007), el soporte a estos mecanismos y su desarrollo se ha tornado en uno de los principales y más importantes aspectos en la tecnología *WLAN*. Al respecto, Mishra, Shin, y Arbaugh (2003) definen que, a diferencia de la tecnología celular, el proceso de *handoff* en redes tipo *WLAN* (específicamente menciona las redes *IEEE 802.11*) puede dividirse en dos pasos: el descubrimiento y la reautenticación.

Con respecto al trabajo anterior, A. Ahmed et al. (2014) definen que en general, los procesos de *handoff* consisten de tres etapas principales: Medición e iniciación de *handoff*, Decisión de *handoff* y Ejecución de *handoff*, ellos se explican en la Figura 18.

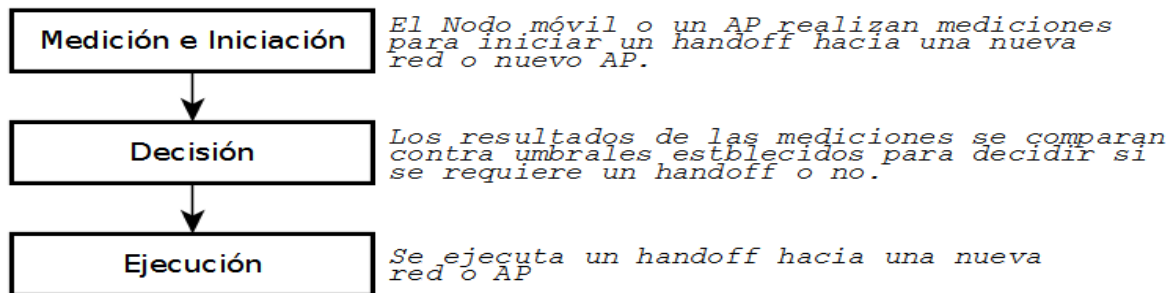


Figura 18: Fases generales de un mecanismo de *handoff*.

Además de dicha aclaración, en sus trabajos de investigación, A. Ahmed et al. (2014), así como Yang, Väre, y Owens (2006) proveen al lector sobre conceptos relacionados en la temática del *handoff* en WLANs en sus respectivas investigaciones; tales como conceptos, clasificaciones, propuestas y estrategias de decisión para mecanismos de *handoff*. Ello busca establecer un esquema que defina qué parámetros deberían considerarse al diseñar mecanismo de *handoff* para redes WLAN.

Agregando a este tema, Tsukamoto, Yamaguchi, Kashihara, y Oie (2007) presentan en su investigación los resultados obtenidos de la realización de múltiples experimentos utilizando el «Protocolo de Transferencia de Archivos (del inglés *File Transfer Protocol*, FTP)» y aplicaciones de «Voz sobre Protocolo de Internet (del inglés *Voice over Internet Protocol*, VoIP)» con fines comparativos entre criterios considerando potencia de señal y retransmisión de tramas.

Los trabajos anteriores permiten entender que existe la necesidad de mejorar los mecanismos de *handoff* en este tipo de redes, y dejan en claro que los investigadores están tomando medidas en el asunto, buscando y proponiendo alternativas para mejorar o sustituir los mecanismos actuales.

Sin embargo, los trabajos antes mencionados atacan la problemática del proceso de *handoff*, buscando reducir el tiempo del mismo y no se preocupan por cómo afecta ello a la aplicación de la red durante dicho proceso.

Por ello, en las investigaciones realizadas por Taehoon, Sang-wook, y Youngnam (2010); Liu et al. (2008) y Ramachandran et al. (2006), se describen soluciones haciendo un enfoque hacia el *QoS*. En dichos trabajos se hace mención que uno de sus propósitos es el que la estrategia del diseño de su algoritmo sea aplicable a cualquier tipo de red que busque mejorar aspectos de *QoS*, considerando que el incluir una mayor cantidad de

parámetros relativos a este aspecto podrán mejorar significativamente el rendimiento del algoritmo, por ejemplo: ancho de banda disponible, retrasos de tiempo, tasa de datos, costo, entre otros.

Una mayor cantidad de parámetros puede resultar en decisiones más inteligentes. Cheng Wei Lee, Li Ming Chen, Meng Chang Chen, y Yeali Sunny Sun (2005) proponen una técnica de *handoff* pendiente del ancho de banda disponible en las *WLANs* (utilizando herramientas definidas en el estándar *IEEE 802.11e*), ello se aúna al criterio de *RSSI* tradicional en decisiones de *handoff*.

Particularmente en el trabajo de Taehoon et al. (2010), se propone la consideración del historial de servicio del tráfico del usuario, resultando en un mejor desempeño (menores ejecuciones de *handoff*) de acuerdo a sus pruebas.

Dadas las investigaciones y trabajos mencionados, se deja en claro que en redes *WLAN* también existe la necesidad de mejorar el desempeño y conciencia del entorno de los mecanismos de *handoff*, buscando además afectar de manera mínima aspectos de *QoS* de la red.

### 3.3. *WSNs*

De acuerdo a Saranya y Pugazendi (2014), el estándar para las *WPANs* es el *IEEE 802.15*, cuya frecuencia de operación es 2.4 *GHz*. Aunque los avances en investigación y desarrollo se han enfocado hacia el uso del estándar *IEEE 802.15.4*, por su bajo consumo energético, bajo costo y su baja tasa de datos necesaria para conectar por primera vez aquellos dispositivos sin conexión a la red (García-Hernández et al., 2007).

Las *WSNs* están dentro de las *WPANs*, y como tal comparten un mismo objetivo: el proveer una conexión a prueba de fallas entre los dispositivos conectados en la red.

A diferencia de otro tipos de redes, las *WSNs* generalmente se constituyen de dispositivos con limitantes en recursos (energía y procesamiento, por ejemplo); sin embargo, cuentan con la característica de ser comúnmente pequeños en tamaño y la capacidad de ser móviles, por lo que es posible integrarlos o incorporarlos a entidades móviles como robots o pacientes que requieren atención constante. Dicha característica representa una de sus mayores ventajas (Silva et al., 2014).

En su trabajo de investigación, Raja y Su (2009) proponen que la movilidad de los nodos se clasifique en dos tipos:

- Débil: Se refiere a aquella que presentan los nodos que se integran a la red, salen

de ella, o mueren y deben ser reemplazados.

- Fuerte: Se refiere a un desplazamiento físico de los nodos, quienes se mueven a través de la red (por ejemplo, al integrarse a una entidad móvil).

Además, en su trabajo de investigación, Silva et al. (2014) clasifican al movimiento presentado por un dispositivo de acuerdo a las siguientes tres categorías:

- Aleatorio: El *MN* cambia su ubicación de manera aleatoria dentro de un área bajo consideración.
- Pre-definido: El *MN* se mueve a lo largo de una trayectoria definida a velocidad conocida, alcanzando puntos establecidos en tiempos establecidos.
- Controlado: El movimiento del *MN* se controla por una entidad externa en tiempo real.

Debe dejarse en claro la importancia que las *WSNs* han adquirido dada su versatilidad en múltiples aplicaciones, algunas de ellas pueden observarse en la Tabla 1, basada en el trabajo de investigación de García-Hernández et al. (2007).

El problema es que los estándares actuales no dan un soporte eficiente a la movilidad, y esto plantea obstáculos considerables para su uso en *WSNs*, especialmente si se trata de aplicaciones críticas que requieren un alto nivel de confiabilidad y desempeño, según detallan Silva, Silva, y Boavida (2012) en su trabajo de investigación.

También Bruce, Gi-Hyun Hwang, y Hoon Jae Lee (2013) apoyan esta idea argumentando que el soporte hacia la confiabilidad de comunicaciones en tiempo real para *WSNs* en aplicaciones de salud (*e-Health*) no es práctico con el uso de los protocolos contemporáneos en *WSNs* con movilidad en sus nodos, ya que ellos no permiten lograr los requerimientos en confiabilidad bajo esta movilidad. Sin embargo, ello no ha detenido el uso de *WSNs* en aplicaciones enfocadas hacia el cuidado de la salud.

Las aplicaciones médicas de las *WSNs* buscan mejorar los servicios actuales de monitoreo y cuidado de la salud, especialmente aquellos para adultos mayores, niños y enfermos crónicos. Estos sistemas ofrecen varias ventajas en su implementación, siendo una de las más importantes la capacidad de un monitoreo remoto. Con la monitorización remota es posible identificar condiciones de emergencia y con ello permitir una vida más sencilla e independiente a pacientes que de otra manera necesitarían una persona a su cuidado constante (Alemdar y Ersoy, 2010).

Tabla 1: Algunas aplicaciones con motes, sensores de polvo inteligentes y *WSNs*.

Aplicaciones	Motes, Sensores de Polvo Inteligentes y Redes de Sensores Inalámbricas
En general	Monitoreo de entornos interiores/exteriores, seguridad y seguimiento, salud y monitoreo del bienestar, monitoreo de energía, localización de inventario, automatización de industrias y procesos, y monitoreo estructural y sísmico.
Para monitoreo industrial y de vibraciones	Telemetría de planta, mediciones de cumplimiento y calidad, supervisión de superposición, diagnóstico de máquinas, monitoreo de desempeño de aguas residuales y tanques, monitoreo de línea eléctrica y monitoreo de desempeño automotriz.
Para pruebas y mediciones	Medición de vibraciones y vida de máquinas, prueba/calificación de productos, e investigación científica. Hay varias categorías de productos con sensores: Acelerómetros, sensores de vibración, sensores de inercia, sensores de inclinación/ángulo, sensores magnéticos, accesorios de adquisición de datos y adquisición de datos inalámbricos y distribuidos.
Para inalámbricas avanzadas	Tamaño pequeño, bajo costo, no-intrusivos, inatendidos, inalámbricos, procesamiento y comunicaciones a bordo, reprogramado dinámico, desarrollo de densas <i>WSNs</i> y salto de mensajes.
Tarjetas de sensores disponibles	Luminosidad y Temperatura, Aceleración/Vibración, Acústica, Megnetómetro, Monitoreo Climático y Sistema de Posicionamiento Global (del inglés <i>Global Positioning System</i> , GPS).

En la Figura 19 puede verse un escenario típico de una *WSN* en aplicaciones enfocadas hacia el monitoreo o cuidado de la salud. Dicha figura, muestra que el escenario generalmente se compone de cinco subsistemas:

- Red de Área Corporal (del inglés *Body Area Network*, BAN): Este subsistema se compone de la red de sensores que los pacientes llevan consigo.
- Red de Área Personal (del inglés *Personal Area Network*, PAN): Este subsistema se compone de la red de sensores ubicados en el escenario para el control del escenario y monitoreo o localización de los pacientes (cámaras, termómetros, barómetros, entre otros).
- *Gateway* (del inglés, Vía de Acceso): Este subsistema es responsable de permitir la conexión entre la *BAN* y/o *PAN* hacia la *Red de Área Amplia* (del inglés *Wide Area Network*, *WAN*). Generalmente son *smartphones*, computadoras, o nodos específicos para la tarea.

- WAN: Este subsistema permite que la WSN pueda realizar un monitoreo remoto. Muchas veces, la WAN incluye tecnologías de comunicación satelitales.
- Aplicación de usuario final: Este último subsistema es el encargado de procesar (Aplicación) y mostrar la información al usuario final (cuidadores o personal médico) mediante una Interfaz General de Usuario (del inglés *General User Interface*, GUI).

El poder visualizar el escenario de una WSN, aplicada a cuestiones de cuidado o monitoreo de salud, como una composición de subsistemas permite a los diseñadores definir requisitos específicos para cada uno de ellos, así como visualizar posibles debilidades en el sistema (Alemdar y Ersoy, 2010).

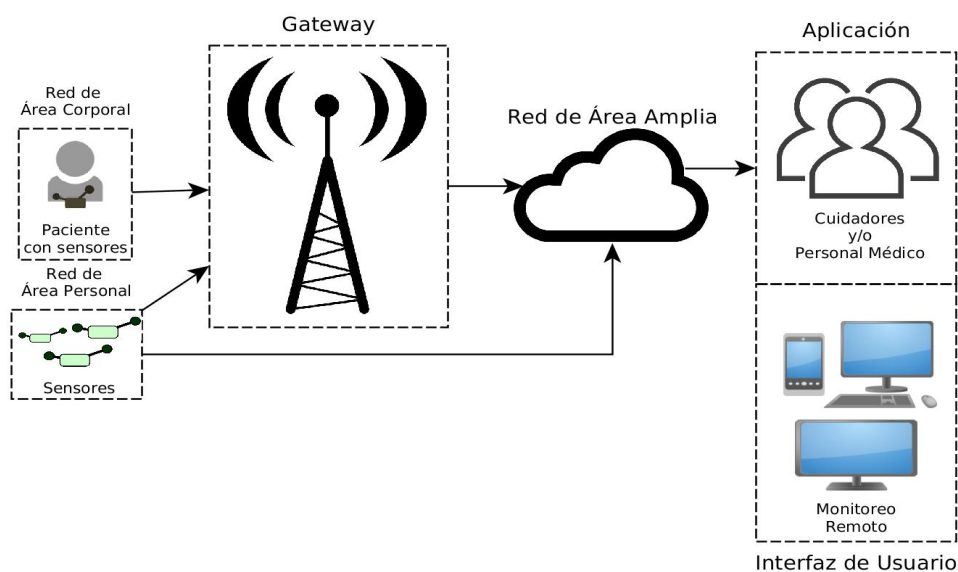


Figura 19: Ejemplo de un escenario simple de WSN en aplicaciones de cuidado de la salud.

De acuerdo con M. Ahmed (2012), existen tres funciones básicas de una WSN: «monitorización de datos», «comunicación» y «procesamiento del problema» mediante un procesador central. Aunque también especifica que la función de «procesamiento del problema» en aplicaciones de salud es generalmente realizada por personal médico. Además, enlista una serie de aplicaciones de las WSNs en salud, entre las que destacan:

- Monitoreo de víctimas en catástrofes masivas: Permite mantener informadas a las diferentes agrupaciones de atención a desastres, como la Cruz Roja, sobre nuevos incidentes o zonas que requieren mayor atención.
- Monitoreo del sueño: Se refiere en sí al cuidado de la posición en que se duerme y la frecuencia respiratoria. Este tipo de aplicaciones se enfocan más hacia los infantes, pues son susceptibles al Síndrome de Repentina Muerte Inesperada de Infante (del inglés *Sudden Unexpected Infant Death Syndrome*, SUIDS) que provoca más de 3,500 muertes de infantes en Estados Unidos al año (CDC, 2016; Shapiro-Mendoza, Tomashek, Anderson, y Wingo, 2006).
- Monitoreo de personal de rescate: Son aplicaciones que permiten monitorizar parámetros vitales del personal de rescate, como bomberos, durante acciones de rescate.

De acuerdo a la investigación desarrollada por Arnon et al. (2003), las aplicaciones médicas (monitorización de adultos mayores, o pacientes enfermos que requieren una vigilancia constante) generalmente se ocupan del monitoreo de siete parámetros vitales: Electrocardiograma (*ECG*), ritmo cardíaco, sonido cardíaco, electroencefalograma (*EEG*), electromiograma (*EMG*), ritmo respiratorio y temperatura corporal. Es importante tener siempre en cuenta que el monitoreo de múltiples variables, y siendo éstas tan críticas, conlleva preparar al sistema o red para ofrecer eficiencia y rendimiento, pero sobre todo confiabilidad de datos. En la Tabla 2, Arnon et al. (2003) muestran un análisis detallado de los requerimientos de red para la transmisión de estas siete variables, reflejando lo crítico de este tipo de aplicaciones. En dicho análisis, a cada paciente se le implementó uno o varios sensores de las siete variables antes mencionadas.



Tabla 2: Requerimientos de mediciones biomédicas.

Mediciones Biomédicas	Rango de Voltaje (V)	Número de Sensores	Ancho de Banda (Hz)	Muestras por segundo (Hz)	Resolución (bits/muestra)	Tasa de datos (bits/s)
ECG	0.5m - 4m	5 - 9	0.01 - 250	1.25 k	12	15 k
Sonido cardíaco	Extremadamente pequeño	2 - 4	5 - 2k	10 k	12	120 k
Ritmo cardíaco	0.5m - 4m	2	0.4 - 5	25	24	600
EEG	2μ - 200μ	20	0.5 - 70	350	12	4.2k
EMG	0.1m - 5m	2+	0 - 10k	50 k	12	600k
Ritmo respiratorio	Pequeño	1	0.1 - 10	50	16	800
Temperatura Corporal	0 - 100m	1+	0 - 1	5	16	80

De cualquier modo, en todas estas aplicaciones (y otras no mencionadas), se requiere libertad de movimiento del objeto a monitorizar (pacientes, infantes, personal). Por ello, el diseño de mecanismos de *handoff* que permitan a los dispositivos involucrados en la red desplazarse sin afectar el desempeño de la red es necesario en WSNs.

Según menciona Fotouhi et al. (2012), al diseñar un mecanismo de *handoff* para WSNs, existen consideraciones diferentes que deben atenderse: el *hard handoff* por ejemplo; puesto que en WSNs los radios sólo poseen una antena, y por ello sólo pueden establecer como máximo una conexión en todo momento. También debe considerarse el efecto de enlaces de baja potencia y/o desconfiables, dado que son críticos para evitar la problemática del efecto *ping-pong*.

Con esto en mente, diversas investigaciones se han desarrollado con el propósito de ofrecer una alternativa para solucionar el problema de falta de mecanismos de *handoff* en WSNs, tanto con diseños tradicionales por capas como con diseños *crosslayer*.

Muestra de ello es la propuesta de Bruce et al. (2013), quienes bajo un esquema de diseño tradicional por capas, proponen un mecanismo de *handoff* basado en dos conceptos, la medición del *RSSI* y la criptografía de claves públicas.

Por su parte, Yun, Khan, y Han (2015) proponen una nueva estrategia de *handoff* utilizando el Indicador de Calidad de Enlace (del inglés *Link Quality Indicator*, LQI) como parámetro de evaluación. Dicha estrategia plantea el escaneo continuo del LQI de los paquetes tipo *beacon* (paquetes de datos con información sobre los APs o nodos coordinadores) enviados por los nodos coordinadores de la WSN, de esta manera

el *MN* no requiere realizar un escaneo completo al ejecutar un *handoff*, reduciendo significativamente el tiempo de traspaso.

Una propuesta para el soporte a la movilidad de los dispositivos es el uso del «Protocolo de *Internet* Móvil versión 6 (del inglés *Mobile Internet Protocol version 6*, *MIPv6*)», que es una integración del «Protocolo de *Internet* versión 6 (del inglés *Internet Protocol version 6*, *IPv6*)» sobre *IEEE 802.15.4*. Se toma a *IPv6* como base dado que demuestra ser una opción viable al tener soporte nativo hacia movilidad; sin embargo, necesita ser adecuado a las características de las *WSNs* y comprimir sus cabeceras y direccionamientos de 128 *bits*. Para ello se implementa también *6LowPAN*, una capa de *middleware* para la integración de *IPv6* en *WSNs* (Mendo, Silva, y Boavi, 2010).

En este contexto, Silva et al. (2012) proponen un mecanismo de *handoff* basado en *proxy*. Ello con el objetivo de soportar la movilidad de los dispositivos de la *WSN* que durante el proceso de *handoff* consumen demasiado tiempo de traspaso así como de energía, dada la complejidad de utilizar *MIPv6*.

Según Mendes y Rodrigues (2011), la implementación de estrategias de diseño *cross-layer* para optimización de *WSNs* generalmente tiene propósitos comunes:

- La reducción de consumo energético (Kulkarni, Iyer, y Rosenberg, 2006)
- Una mayor eficiencia en ruteo (Choi, Kim, Baek, y Kwon, 2005)
- El proveimiento de *QoS* (Yuan, Yang, He, y He, 2006)
- La programación óptima (Shu y Krunz, 2009)

Además, ejemplifica dos interacciones *crosslayer* comunes en *WSNs*, una para cuestiones de *QoS* y otra para conocer la Información del Estado del Canal (del inglés *Channel State Information*, *CSI*), las cuales se muestran en la Figura 20. En el primer caso, menciona que la interacción común es entre las capas de Aplicación y la subcapa *MAC* ubicada en la capa de Enlace. De esta manera, la subcapa *MAC* puede ejecutar una programación más eficiente de la aplicación en ejecución. En el segundo caso, la capa Física otorga información a la capa de Red para que el protocolo de ruteo evite el uso de rutas con canales en mal estado.

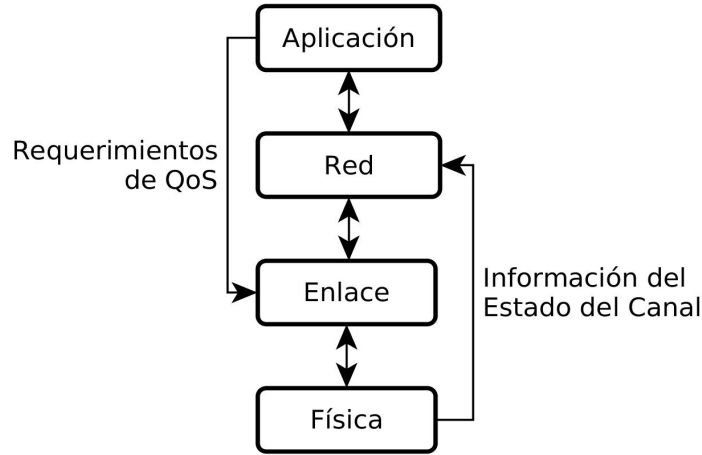


Figura 20: Ejemplo de interacciones *crosslayer* y sus objetivos.

Melodia et al. (2006) ofrecen en su investigación una clasificación similar, donde separan las interacciones de entre capas más comunes en WSNs. Muestran, por ejemplo, que la unión entre las capas Física y Enlace (*MAC*) se realiza para investigaciones relacionadas a cuestiones de energía.

Por otro lado, los mecanismos de *handoff* también se han propuesto bajo estrategias de diseño *crosslayer*.

Una de estas propuestas fue sugerida por Sinky y Hamdaoui (2013), quienes presentan un *handoff* bajo esquema *crosslayer* asistido por *TCP*, con ello proponen aliviar problemas de desempeño durante el proceso de *handoff* entre redes que trabajan con desempeños y tasas de información variantes; mediante el ajuste de parámetros de *TCP* para mejorar la calidad de servicio durante el traspaso de red.

Silva, Zinonos, Silva, y Vassiliou (2011) a su vez proponen el intercambio de información de las capas de Transporte y la subcapa *MAC* para mejorar aspectos de movilidad en WSNs. Con esta unión de capas y el intercambio de mensajes entre los nodos de la red, permiten la creación y uso de mecanismos controlados de *soft handoff* y de *hard handoff*.

Finalmente, en el trabajo realizado por Buenrostro-Mariscal et al. (2015) se generó un mecanismo de *handoff crosslayer*: el protocolo *WSN-HaDaS*. Este protocolo opera en las capa de Transporte y la subcapa *MAC*, interactuando con el mecanismo de envío de información *UDP*, con ello posee la ventaja de ser capaz de detener o reac-

tivar el envío de datos pues le es posible notificar al momento sobre el inicio o fin de un proceso de *handoff*.

Entonces, de acuerdo a lo anterior, se resalta la vasta aplicación de las *WSNs* y su importancia en múltiples áreas: milicia, vigilancia, cuidado de la salud, localización de personal, entre otras. Ello a su vez comprueba que, debido a la movilidad de los nodos o motes en la *WSN*, es necesario el desarrollo e implementación de nuevas estrategias que den soporte a dicha movilidad; puesto que a diferencia de otros estándares, el *IEEE 802.15.4* no da soporte a esta característica aún siendo el estándar por defecto en la *WSNs*.

### 3.4. Resumen e Inferencias

Durante la investigación y estudio de las secciones de Esquema de Fundamentos (Capítulo 2) y Trabajos Relacionados (Capítulo 3), se realizó una lectura y análisis de múltiples trabajos de investigación encontrados: artículos, tesis de doctorado, libros, publicaciones en congresos, entre otras; y con ello fue posible producir las siguientes conclusiones:

- En general, los avances realizados en mecanismos de *handoff* buscan mejorar aspectos relacionados al *QoS* y reducir el tiempo necesario para la ejecución del *handoff*.
- La latencia, *throughput end-to-end* y la tasa de entrega de paquetes son, en general, las principales métricas a beneficiar con los mecanismos propuestos.
- Modificar un mecanismo base de un diseño tradicional a uno *crosslayer*, en general otorga mayores ventajas que desventajas en términos de eficiencia.
- En su mayoría, los mecanismos de *handoff crosslayer* propuestos para *WSNs* consideran a la subcapa *MAC* como integrante esencial del criterio puesto que permite analizar la situación actual del medio de comunicación, así como a las capas de Aplicación, dado que permiten conocer los requerimientos establecidos.
- Dadas las características del protocolo de *handoff crosslayer WSN-HaDaS*, así como su implementación dentro de un mecanismo estándar de comunicación (*UDP*), resulta un buen candidato como protocolo base.
- De acuerdo a las clasificaciones y tipos de mecanismos *handoff* analizados, la propuesta de este trabajo de investigación se encuentra dentro de los mecanismos de *handoff* horizontal y tipo *hard (break-before-make)*. Esto debido a que en la tecnología de red a trabajar solo existirán miembros trabajando bajo el estándar *IEEE 802.15.4*, el cual no posee la capacidad de múltiples conexiones, por lo que sólo se podrá establecer a lo mucho una sola conexión en todo momento. Además, puesto que utiliza información de los paquetes transmitidos entre la red para la toma de decisiones del mecanismo de *handoff*, se clasifica como un tipo *asistido-por-móvil*. Finalmente, al considerar el uso de parámetros de la subcapa *MAC*, la capa de Transporte y la capa de Aplicación, se clasifica a la propuesta como un mecanismo de *handoff* diseñado bajo estrategia *crosslayer*.



## Capítulo 4

# Desarrollo de protocolo de *handoff*

En este capítulo, se presentan los cimientos, descripción y desarrollo del protocolo propuesto.

Tal y como se menciona en capítulos anteriores, este protocolo se basa en la investigación y mecanismo propuesto por Buenrostro-Mariscal et al. (2015) (*WSN-HaDaS*), por lo que se ha destinado una sección a su descripción.

Se ha destinado también una sección en la que se describen las propuestas de mejora y las adecuaciones a dicho mecanismo base, las cuales resultan en el nuevo protocolo propuesto por este trabajo de Tesis.

Finalmente, se destina una sección para la descripción del proceso y la estrategia de implementación de la propuesta en el simulador *NS2*.

## 4.1. Protocolo *WSN-HaDaS*

Esta sección está dedicada a la descripción funcional y estructural del protocolo *WSN-HaDaS*. Este protocolo de *handoff* está diseñado bajo estrategia de capas *cross-layer* y es resultado del trabajo de investigación desarrollado por Buenrostro-Mariscal et al. (2015). En este contexto, se presentan a continuación la descripción general del protocolo y dos de sus componentes más relevantes.

### 4.1.1. Descripción general

Las *WSNs* han sido propuestas para la monitorización de signos vitales de pacientes en sus hogares, hospitales o casas de cuidado. Este escenario requiere movilidad de nodos entre celdas; no obstante, las *WSNs* no están diseñadas para soportar esta característica. (Buenrostro-Mariscal et al., 2015), proponen un protocolo *crosslayer* para administrar el *handoff* llamado «*WSN-HaDaS*», el cual opera en la capa de Transporte y la subcapa *MAC* basado en la interacción entre ambas capas. Éste, recopila información relacionada a la calidad del enlace (*LQI*) desde la subcapa *MAC* y la reporta a la capa de Transporte. La colaboración de la capa de Transporte permite mejorar la entrega de datos cuando ocurre un *handoff*, y dado que este protocolo interactúa con un Mecanismo de Envío de Datos (MED) como *UDP* para notificar el inicio o fin del proceso de *handoff*, el *MED* se vuelve consiente de dicho proceso. De esta manera, se controla el proceso de ejecución de *handoff*, como se muestra en la Figura 21.

*WSN-HaDaS* se compone de dos procesos principales: El Monitorizador Detonador de Traspaso (del inglés *Monitoring Handoff Trigger*, MHT) y el HEP; los cuales son responsables de la generación del Mensaje de Advertencia de Traspaso (del inglés *Handoff Warning Message*, HWM) y la ejecución del proceso de *handoff*, respectivamente.

Como método de evaluación de este mecanismo, los autores utilizaron un campo de pruebas físico en un entorno real en interiores, buscando obtener resultados prácticos. Durante sus pruebas demostraron menores tiempos de ejecución de *handoff* con respecto al protocolo *MIPv6 Soft-Handoff*, resultado del trabajo de Mendo et al. (2010).

### Consideraciones de Diseño

Como se mencionó anteriormente, *WSN-HaDaS* se compone de dos procesos: el *MHT* y el *HEP*.



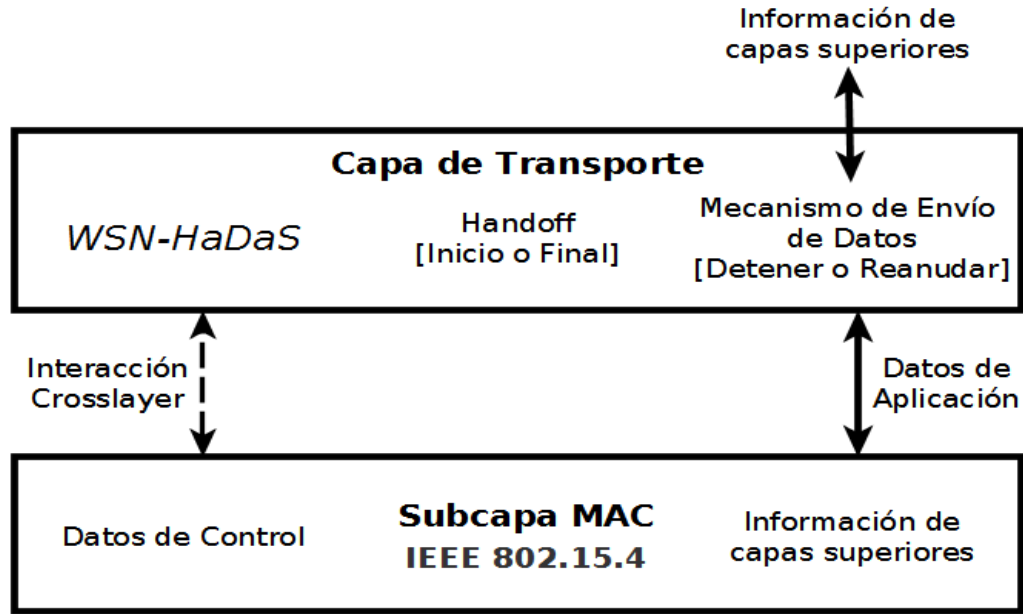


Figura 21: Arquitectura *crosslayer* del protocolo WSN-HaDaS.

El *MHT* mide la fuerza de la señal de paquetes de datos transmitidos por los *MNs* con el objetivo de monitorizar la calidad del enlace (*LQI*), cuando el *LQI* de un *MN* es percibido por el Jefe de Grupo (del inglés *Cluster Head*, *CH*) como inferior a un umbral establecido, éste envía un *HWM* al *MN* (este proceso se explica en la subsección 4.1.2); una vez que el *MN* recibe el *HWM*, inicia el *HEP*.

El *HEP* incluye un mecanismo de *soft handoff* (explicado en la subsección 4.1.3). Un *soft handoff* puro demanda el establecimiento de una nueva conexión de radio sin deshacerse de la conexión previa (*make-before-break*), como se explica en la subsección 2.2.2.

Para lograr esto, es necesario contar con múltiples antenas activas de manera simultánea; sin embargo, el estándar *IEEE 802.15.4* no define esta característica. Por dicha razón, el *HEP* ejecuta el *soft handoff* utilizando dos reglas: la primera es notificar el *handoff* al mecanismo que envía los datos antes de desconectarse del *CH* actual; la segunda regla es reducir al mínimo el tiempo de desconexión cuando el *MN* cambia de *cluster* (del inglés, grupo).

Esta última regla se logra utilizando una estrategia llamada «*Early Discovery* (del inglés, Descubrimiento Temprano)»; la cual permite al *MN* descubrir nuevos *CHs* antes de romper con la conexión actual. Además, para mejorar el desempeño del *HEP*,

*WSN-HaDaS* incorpora un mecanismo de *hard handoff* para cubrir aquellas operaciones de traspaso en las que el mecanismo *soft handoff* no puede ejecutarse.

Por otro lado, para el manejo del proceso de *handoff* y las sesiones de transmisión de datos se utilizan mensajes de control y datos. *WSN-HaDaS* utiliza el *frame* (del inglés, estructura) definido por el estándar *IEEE 802.15.4* para la construcción de ambos tipos de mensajes, como se aprecia en la Figura 22.

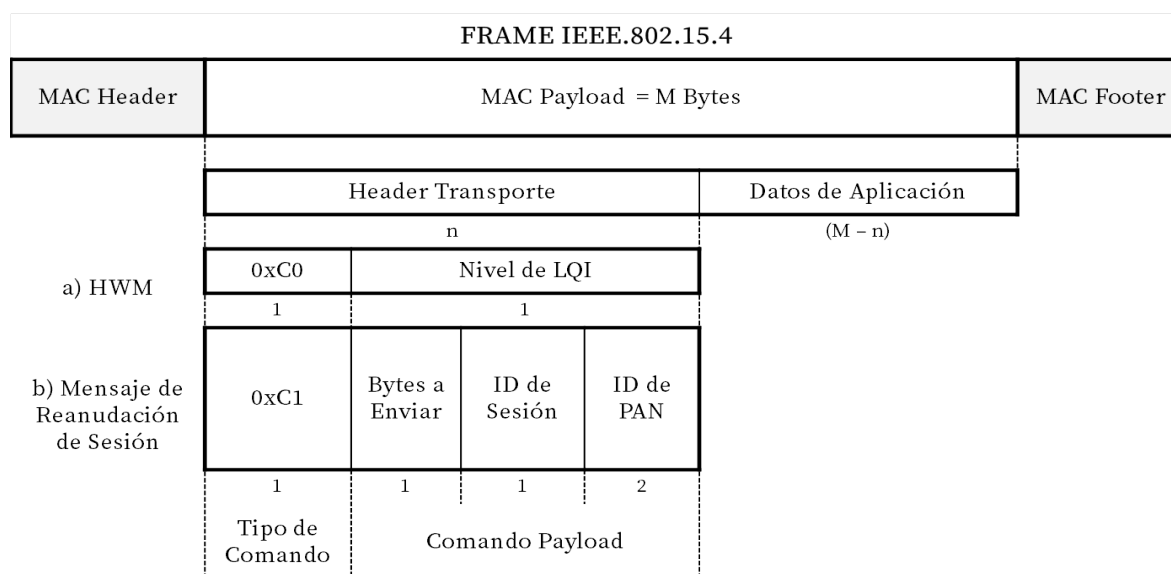


Figura 22: Ejemplos de uso del *MAC frame* por *WSN-HaDaS*.

El *MAC header* (del inglés, cabecera de MAC) contiene los siguientes campos:

- *Frame Control* (del inglés, Control de Estructura): Este campo contiene información relativa al tipo de estructura, modos de direccionamiento, Habilitación de seguridad, entre otros.
- Número de Secuencia de Datos (del inglés *Data Sequence Number*, DSN): Campo que permite evitar el duplicado de paquetes.
- Direccionamiento: Contiene información sobre el origen y destino de los datos en la red.
- *Header* de Seguridad Auxiliar: Este es un campo opcional que sólo se habilita si el subcampo «Habilitación de Seguridad» del *Frame Control* está habilitado.

Contiene tres subcampos especiales: Control de Seguridad, Contador de *frame* e Identificador de Llave.

El *MAC Payload* (del inglés, carga útil de *MAC*) es un campo e longitud igual a  $M$  bytes con un valor máximo de 116 bytes. *WSN-HaDaS* define para él dos campos:

- *Header* de Transporte: Este campo de longitud igual a  $n$  bytes contiene el Tipo de Comando (longitud de 1 byte) y la carga útil del comando de tamaño variable de bytes.
- Datos de Aplicación: Este campo de longitud igual a  $M - n$  bytes es utilizado para los datos de la aplicación.

Entre los diferentes tipos de comandos que *WSN-HaDaS* utiliza están los siguientes:

- Mensaje de Datos: Su tipo de comando es *0xB0*, y es usado en todas las transferencias de mensajes de datos entre los *MNs* y el Nodo Final o Nodo Sumidero (del inglés *Sink Node*, *SN*). Los *CHs* utilizan este mensaje para evaluar el *LQI* y poder disparar la notificación de *soft-handoff*.
- *HWM*: Con tipo de comando *0xC0*, es un mensaje enviado por el *CH* para disparar un *soft-handoff* en el *MN*.
- Mensaje de Reanudación de Sesión: Con tipo de comando *0xC1*, este mensaje es enviado por un *MN* para solicitar al *SN* la reanudación de una sesión.

Por último, el *MAC Footer* (del inglés, pie de *MAC*) contiene una secuencia de verificación de *frame* de 16 bits.

#### 4.1.2. *MHT*

Los objetivos del proceso *MHT* son definir cuándo y cómo disparar la notificación de *handoff* a los *MN*. Este proceso utiliza la función *LQI*, definida en el estándar *IEEE 802.15.4* para medir la fuerza de la señal de los paquetes recibidos y con ello evaluar la calidad del enlace a un *MN*. El resultado de esta medición es reportado por la capa física del *CH* (iniciales en inglés de *Cluster Head*, Cabeza de Grupo) a la subcapa *MAC* del mismo nodo como un valor de *LQI*, el cual es usado por el proceso *MHT* para evaluar el disparador de *handoff* a través de un *HWM*.

Considerando este contexto, y el hecho de que la mayor cantidad de paquetes son transmitidos desde el *MN* hacia el *CH*, el proceso *MHT* es embebido en el *CH* para la monitorización de la calidad de la conexión de los *MNs* dentro de su *cluster* (del inglés, grupo). Esto también con el propósito de reducir el impacto negativo en complejidad, consumo energético y la implementación de los *NMs* (los cuales poseen recursos y capacidad de procesamiento limitados a comparación de los *CHs*).

El proceso *MHT* recibe el valor crudo de *LQI* en la capa de Transporte desde la subcapa *MAC*, si las condiciones del *MHT* se cumplen (Ecuación 1), se construye un *HWM* para notificar al *NM* involucrado sobre la medición correspondiente, el cual debe ser enviado de acuerdo a la Ecuación 2.

$$\text{if } (LQI \leq thrQLQI) : \text{ entonces enviar } HWM \quad (1)$$

$$(Delay_{HWM} + Delay_{Delivery}) < Time_{Limit} \quad (2)$$

Para ejecutar el proceso *MHT*, primero deben ajustarse los valores de las regiones de umbral e histéresis para evaluar el valor de *LQI*, evitando así desconexiones repentinas del *NM* y problemas del efecto *ping-pong*. Para este ajuste, se definieron tres umbrales para el *LQI*: *soft-threshold LQI* (*thrLQIsoft*), *hard-threshold LQI* (*thrLQIhard*) y *threshold Quantity of LQI* (*thrQLQI*). La región existente entre *thrLQIsoft* y *thrLQIhard* se conoce como «Región de *handoff*» y comprende dos zonas: la «zona de Histéresis» (desde *thrLQIsoft* hasta *thrQLQI*), y la «zona de Protección» (entre *thrQLQI* y *thrLQIhard*). Lo anterior se muestra en la Figura 23.

El umbral *thrLQIsoft* indica que las transmisiones del *MN* han entrado a la región de histéresis, por lo que el proceso *MHT* inicia la evaluación del *LQI*. Este umbral evita la ejecución de evaluaciones innecesarias mientras el *LQI* del *MN* no alcanza el umbral establecido.

Por su parte, el umbral *thrQLQI* dispara un *HWM*. Ello indica que la zona de protección ha sido alcanzada y que el proceso de *handoff* debe ejecutarse si se satisface la Ecuación 1. Lo anterior permite al *MN* permanecer conectado al *CH* actual y continuar recibiendo *HWMs*.

Finalmente, el umbral *thrLQIhard* se ajusta con el objetivo de cumplir con el estándar; el cual establece que debe cumplirse con un *PER* (siglas en inglés de *Packet Error Rate*, Tasa de Error de Paquetes) máximo a 1%. El protocolo *WSN-HaDaS* llama a este punto como *Break-point*.

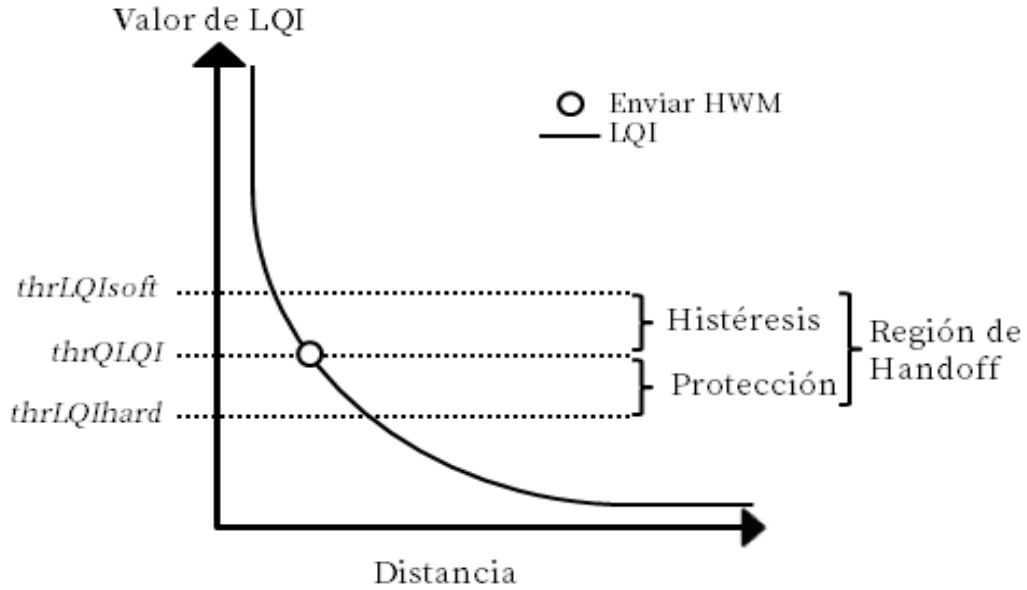


Figura 23: Umbrales y regiones del protocolo *WSN-HaDaS*.

#### 4.1.3. **HEP**

El algoritmo *HEP* (Figura 24a) tiene tres sub-procesos para la transferencia de un *MN* de un *CH* a otro:

- Descubrimiento: En este sub-proceso, el *MN* busca nuevos *CHs* dentro de su área de cobertura.
- Decisión: El *MN* elige al *CH* con la mejor señal de recepción.
- Asociación: El *MN* envía un paquete de solicitud de asociación al *CH* para unirse al *cluster* del nuevo *CH*.

Una vez que el *MN* recibe un *HWM*, el proceso *HEP* inicia. Su primer tarea es notificar al *MED* que un proceso de *handoff* ha iniciado. Con ello, el *MED* debe detener su envío de paquetes a la subcapa *MAC* y cambiar el estatus de la bandera de *handoff* a «encendido».

Su segunda tarea es seleccionar uno de los mecanismos de *handoff* permitidos y ejecutarlo: *soft handoff* (descrito en 4.1.3) o *hard handoff* (descrito en 4.1.3). Esto da a *WSN-HaDaS* la capacidad de reaccionar de manera acorde según el evento de conexión/desconexión presentado.

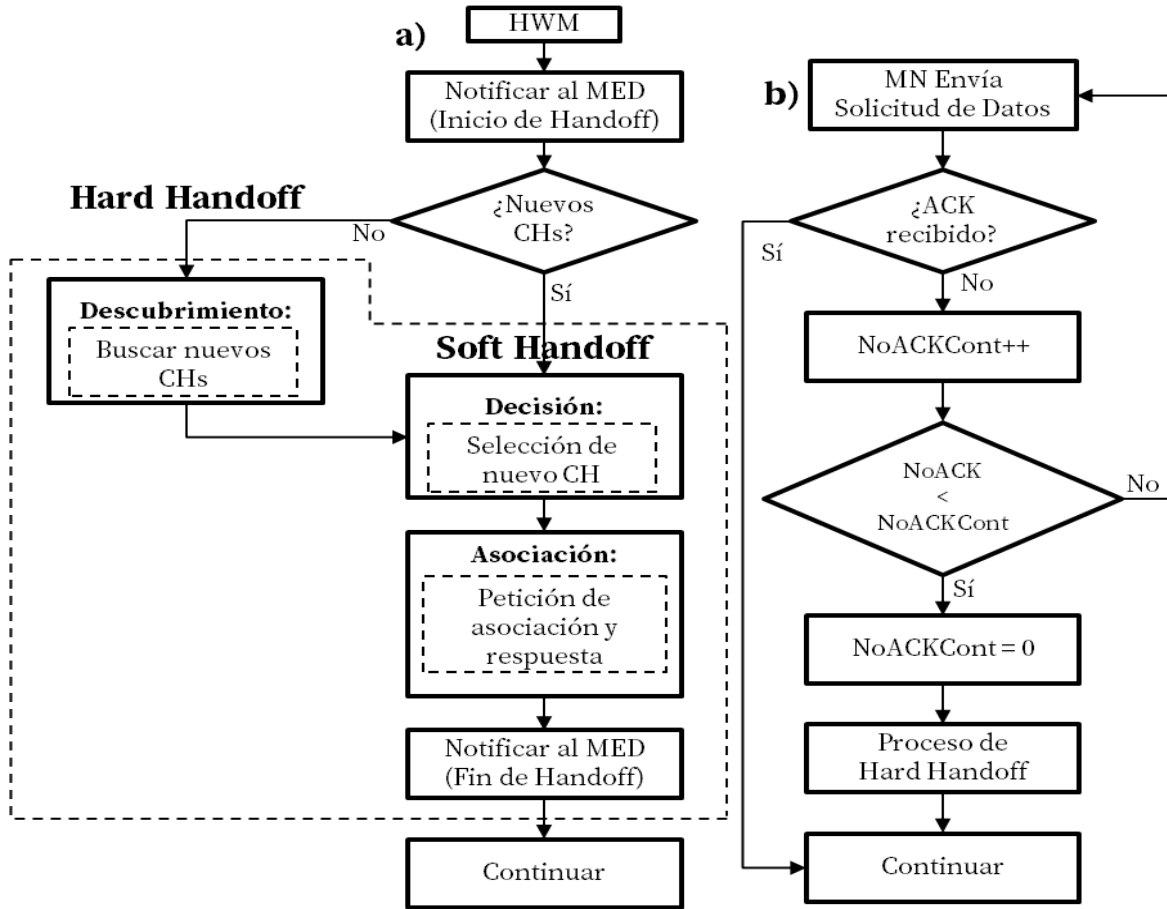


Figura 24: a) Algoritmo *HEP* b) Algoritmo utilizado cuando el *MN* pierde conexión.

Finalmente, la última tarea del *HEP* inicia cuando el *MN* se ha asociado a un nuevo *CH*: notificar al *MED* que el mecanismo de *handoff* ha concluido y debe reanudar la transmisión de datos al *SN*, así como actualizar el valor de la bandera de *handoff* a «apagado».

### Mecanismo *Hard Handoff*

El *HEP* considera dos opciones que pueden originar la ejecución de un *hard handoff* (Figura 24):

- El *MN* recibe un *HWM*, y éste no posee información sobre nuevos *CHs*.
- El *MN* pierde conexión con el *CH*, y no se alcanza el umbral de *NoACK*. El *MN*

verifica la entrega exitosa de sus mensajes de *Data Request* (del inglés, Solicitud de Datos) por medio de los mensajes *ACK* (Abreviación en inglés de *Acknowledgement*, Reconocimiento) recibidos del *CH* actual. Si *NoAckCont* es mayor que el valor preestablecido de *NoACK*, el *MN* inicia inmediatamente un mecanismo de *hard handoff*.

Como se menciona anteriormente, el *HEP* se divide en tres subprocesos, y para la ejecución del mecanismo *hard handoff* éstos se describen a continuación:

- Descubrimiento: El *MN* usa el mecanismo *Active Channel Scan* (del inglés, Escaneo de Canal Activo) provisto por el estándar *IEEE 802.15.4* para localizar cualquier coordinador (*CH*) transmitiendo dentro de su área de cobertura y en su mismo canal.
- Decisión: El *MN* elige al *CH* con el mejor *LQI*.
- Asociación: El *MN* utiliza el proceso de «Asociación» definido por el estándar *IEEE 802.15.4* para unirse al *cluster* del nuevo *CH*.

### Mecanismo *Soft Handoff*

El mecanismo de *soft handoff* es ejecutado cuando el *MN* posee información suficiente para elegir un nuevo *CH* y la ejecución del *handoff* es sugerida por el *CH* actual mediante un *HWM*. A continuación, se describen los subprocesos del *HEP* para un *soft handoff*.

- Descubrimiento: Para este subproceso el *MN* utiliza la estrategia *Early Discovery* (descrita en la sección 4.1.3) en lugar de realizar un escaneo completo del canal. Reduciendo con ello los tiempos de ejecución del mecanismo de *handoff*.
- Decisión: El *MN* elige al mejor *CH* de la lista dentro de su área de cobertura.
- Asociación: El *MN* utiliza el proceso de «Asociación» definido por el estándar *IEEE 802.15.4* para unirse al *cluster* del nuevo *CH*.

### *Early Discovery*

*WSN-HaDaS* propone una estrategia de descubrimiento llamada *Early Discovery* (del inglés, Descubrimiento Temprano). Dicha estrategia se basa en la capacidad de

los *MN* de escuchar todos los mensajes transmitidos por el medio físico, debido a la naturaleza misma de las radiocomunicaciones.

Cualquier dispositivo con un receptor habilitado, trabajando bajo el mismo estándar (*IEEE 802.15.4*), en el mismo canal y dentro del área de cobertura, es capaz de recibir y decodificar las transmisiones de todos los dispositivos que cumplan estas mismas características.

Sin embargo, los mensajes que no son relevantes para las capas superiores del dispositivo son filtrados en la subcapa *MAC* mediante el uso de tres distintos filtros, siendo uno de ellos la comparación de direcciones *MAC* tanto «origen» como «destino» y de identificador de *PAN* (siglas en inglés de *Personal Area Network*, Red de Área Personal) o *PANID*.

De esta modo, un dispositivo es capaz de recibir transmisiones de otros dispositivos aún sin ser el dispositivo destino. La estrategia *Early Discovery* aprovecha esta capacidad de escuchar todas las transmisiones y, antes de descartar los paquetes que no superan los filtros, recopila información de los *CHs* dentro del área de cobertura.

La subcapa *MAC* de los *CHs* también aplica los mismo filtros y responde con un paquete *ACK* cuando las direcciones destino coinciden. De lo contrario, el *CH* asume que el *MN* es un dispositivo nuevo y por ello le envía un mensaje *FCN* (iniciales en inglés de *Foreign Cluster Node*, Nodo Cluster Foráneo) que contiene información sobre sí mismo (dirección *MAC* y *PANID*). Esta acción permite al *MN* construir una lista de nuevos coordinadores con sus respectivas direcciones *MAC*, *PANIDs* y *LQIs*. Esta lista se actualiza cada que un mensaje *FCN* llega al *MN* y se organiza con respecto a los valores de *LQI*.



## 4.2. Diseño de Protocolo de *Handoff*

Aquí se describe el proceso del diseño del algoritmo o protocolo de *handoff*.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

### 4.3. Implementación en Simulador

Uno de los puntos clave de este proyecto es el uso de un simulador de redes para la implementación del mecanismo diseñado y análisis de comportamiento y resultados.

Esta etapa a su vez, requirió de una planeación o metodología a seguir. Ésta se ha tomado de OpnetWork (2013), y funge como base para el desarrollo de la simulación, dicha metodología se presenta en la Figura 25.

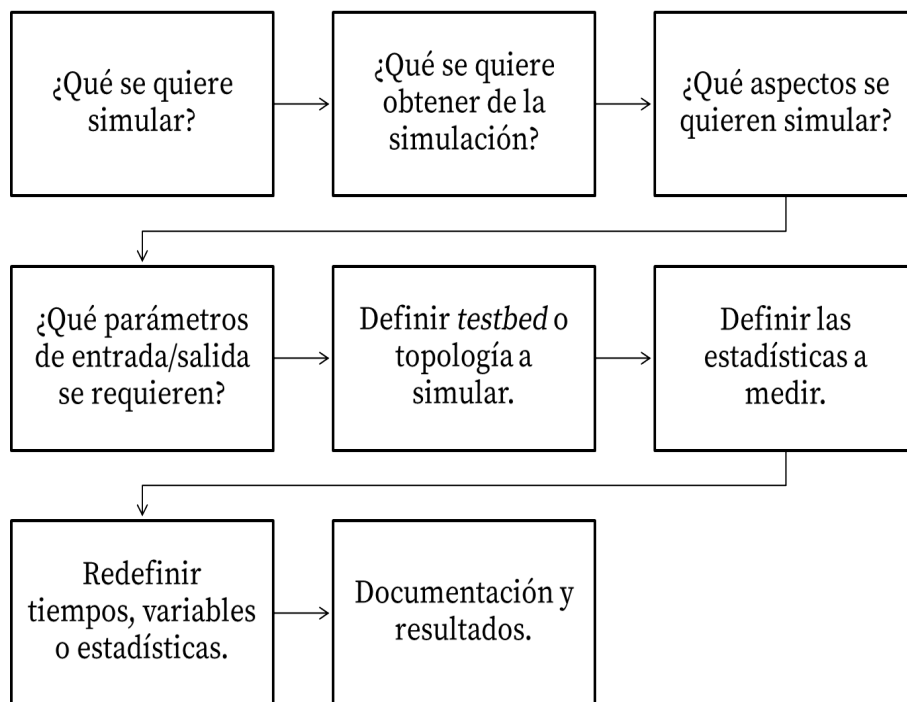


Figura 25: Metodología de simulación.

A continuación, se detallan cada una de las etapas mostradas en la anterior metodología:

1. **¿Qué se quiere simular?:** En esta etapa se plantea un panorama general de lo que se pretende simular, con el objetivo de partir de lo general hacia lo específico. En este caso, la simulación plantea una *WSN* con *MNs* y fijos trabajando bajo el estándar IEEE 802.15.4, con propósitos de observación y análisis de efecto de *handoff*, utilizando el protocolo *WSN-HaDaS* y la propuesta de este trabajo.

2. **¿Qué se quiere obtener de la simulación?:** De ella, se busca el permitir analizar el efecto del *handoff* en el rendimiento de la red.
3. **¿Qué aspectos se quieren simular?:** Se consideraron a los tiempos de conexión y reconexión como aspectos de simulación relevantes; así como la cantidad de paquetes perdidos y entregados y el retardo promedio de paquetes entregados. Además, se plantea el movimiento de nodos dentro de una misma celda, y a través de múltiples celdas.

4. **¿Qué parámetros de entrada y salida se requieren?:**

Los parámetros de *entrada* se muestran en seguida:

- Nodos móviles
- Nodos fijos
- Roles de nodos
- Tasa de transmisión
- Tamaño de paquete
- Velocidad de movimiento de nodos
- Potencia de transmisión
- Sensibilidad de recepción
- Ubicación de nodos fijos

Del mismo modo, los parámetros de *salida* requeridos se muestran a continuación:

- Consumo de energía/batería
- Paquetes entregados/perdidos
- Tiempos de conexión/reconexión

5. **Definir *testbed* o topología a simular:** La topología definida para la simulación de la *WSN* describe un árbol jerárquico. Esto es, dentro de la red existen diferentes roles que puede tomar un nodo.

El primer rol es el *SN*, bajo este rol el nodo no presenta movimiento sino que se mantiene estático en su posición inicial, siendo su principal tarea el recibir la información proveniente de los demás nodos.

El rol de *CH* se encarga de la recepción de información de los nodos miembros de su *cluster* o grupo. y su posterior envío hacia en *SN*. Los nodos bajo este rol no presentan movimiento.

Un tercer rol es el de *MN*, el cual posee como característica principal la facultad de desplazarse dentro de la red (incluso tal vez, fuera de ella). Otra de las funciones del *MN* es el enviar información hacia el *SN*, ello a través de los *CH*.

De este rol puede desprenderse un subrol, dado que no todos los *MN* se mueven a través de las celdas. Un *MN* normal solo presenta movimiento dentro del alcance de un mismo *CH*; sin embargo un *WN* (iniciales en inglés de *Wild Node*, Nodo Salvaje) es capaz de moverse de un *cluster* a otro.

Además, se determinó un tráfico continuo generado con un tamaño constante. Ello bajo una *WSN* utilizando ya sea *TCP* o *UDP*, con *CBR* (iniciales en inglés de *Constant Bit Rate*, Tasa Constante de Bits) como aplicación.

6. **Definir las estadísticas a medir:** Algunas de las estadísticas planteadas para su medición, observación y análisis son las siguientes:

- Latencia extremo-a-extremo.
- Paquetes perdidos/entregados.
- Retardo promedio de paquetes entregados.

Una descripción completa y justificación de las mismas se explica en el Capítulo 5.

7. **Redefinir tiempos, variables o estadísticas:** Esta etapa es un caso opcional, y se aborda en situaciones tales que el análisis de los resultados obtenidos en la simulación propongan oportunidades de mejora. Sin embargo, el tiempo propuesto de simulación es de dos minutos.
8. **Documentación y resultados:** Una vez obtenidos resultados, se continuó hacia el análisis de ellos y la documentación de los mismos.

## Capítulo 5

# Evaluación y análisis de resultados

En este capítulo, se describe claramente el escenario de pruebas, métricas, ejecución de simulación y los resultados obtenidos. Así como un análisis de los resultados obtenidos.

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.



## Capítulo 6

# Conclusiones y recomendaciones

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.





**Apéndice A**

**Anexos**



## Referencias

- Ahmad, S. Z., Akbar, M. S., y Qadir, M. A. (2007). A Cross-Layer Vertical Handover Decision Model for Heterogeneous Wireless Networks. *2007 Innovations in Information Technologies (IIT)*, 441–445. doi: 10.1109/IIT.2007.4430456
- Ahmed, A., Boulahia, L. M., y Gaiti, D. (2014, jan). Enabling Vertical Handover Decisions in Heterogeneous Wireless Networks: A State-of-the-Art and A Classification. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(2), 776–811. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6587998> doi: 10.1109/SURV.2013.082713.00141
- Ahmed, M. (2012). Wireless Sensor Network: An Emerging Technology. *IOSR Journal of Electronics and Communication Engineering*, 2(4), 01–04. Descargado de <http://www.iosrjournals.org/iosr-jece/papers/vol2-issue4/A0240104.pdf> doi: 10.9790/2834-0240104
- Alemdar, H., y Ersoy, C. (2010). Wireless sensor networks for healthcare: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2688–2710. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.003> doi: 10.1016/j.comnet.2010.05.003
- Arnon, S., Bhastekar, D., Kedar, D., y Tauber, A. (2003, feb). A comparative study of wireless communication network configurations for medical applications. *IEEE Wireless Communications*, 10(1), 56–61. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1182112> doi: 10.1109/MWC.2003.1182112
- Berghaus, S., y Back, A. (2015, jan). Requirements elicitation and utilization scenarios for in-car use of wearable devices. En *Proceedings of the annual hawaii international conference on system sciences* (Vol. 2015-March, pp. 1028–1037). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7069932> doi: 10.1109/HICSS.2015.127
- Bertsekas, D. P., y Gallager, R. G. (1987). *Data networks* (2.<sup>a</sup> ed.). Prentice-Hall International New Jersey. Descargado de <http://www.pearsonhighered.com/educator/product/Data-Networks/9780132009164.page>
- Bisnik, N. (2005). Protocol Design for Wireless Ad hoc Networks : The Cross-Layer Paradigm. *Teknik Rapor, Rensselaer Polytechnic Institute*, 1–10.
- Braden, R., Faber, T., y Handley, M. (2003, jan). From protocol stack to protocol heap: role-based architecture. *SIGCOMM Comput. Com-*

- mun. Rev.*, 33(1), 17–22. Descargado de [http://portal.acm.org/citation.cfm?id=774763.774765%5Cdelimiter%26E30F%5Chttp://portal.acm.org/ft\\_gateway.cfm?id=774765%7B%7Dtype=pdf%7B%7Dcoll=GUIDE%7B%7Ddl=GUIDE%7B%7DCFID=51810956%7B%7DCFTOKEN=36743601](http://portal.acm.org/citation.cfm?id=774763.774765%5Cdelimiter%26E30F%5Chttp://portal.acm.org/ft_gateway.cfm?id=774765%7B%7Dtype=pdf%7B%7Dcoll=GUIDE%7B%7Ddl=GUIDE%7B%7DCFID=51810956%7B%7DCFTOKEN=36743601) doi: 10.1145/774763.774765
- Bruce, N., Gi-Hyun Hwang, y Hoon Jae Lee. (2013, oct). A hybrid and fast authentication protocol for handoff support in e-healthcare systems among WSNs. En *2013 international conference on ict convergence (ictc)* (pp. 72–77). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6675309> doi: 10.1109/ICTC.2013.6675309
- Buchli, B., Sutton, F., y Beutel, J. (2012). *Wireless Sensor Networks* (1.<sup>a</sup> ed., Vol. 7158; G. P. Picco y W. Heinzelman, Eds.) (n.º 2). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. Descargado de <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2187181.2187197http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-28169-3> doi: 10.1007/978-3-642-28169-3
- Buenrostro-Mariscal, R. (2014). *Protocolo de Transporte para el Control de Congestión bajo Diseño Cross-layer, consiente del QoS de las Aplicaciones en Redes Inalámbricas IEEE 802.15.4* (Doctorado). Universidad Autónoma de Baja California.
- Buenrostro-Mariscal, R., Cosio-Leon, M., Nieto-Hipolito, J.-I., Guerrero-Ibanez, J.-A., Vazquez-Briseno, M., y Sanchez-Lopez, J.-d.-D. (2015). WSN-HaDaS: A Cross-Layer Handoff Management Protocol for Wireless Sensor Networks, a Practical Approach to Mobility. *IEICE Transactions on Communications*, E98.B(7), 1333–1344. Descargado de <https://www.jstage.jst.go.jp/article/transcom/E98.B/7/E98.B%7B%7D1333/%7B%7Darticle> doi: 10.1587/transcom.E98.B.1333
- Carneiro, G., Ruela, J., y Ricardo, M. (2004, apr). Cross-layer design in 4G wireless terminals. *IEEE Wireless Communications*, 11(2), 7–13. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1295732> doi: 10.1109/MWC.2004.1295732
- CDC. (2016). *Sudden Infant Death Syndrome (SIDS) and Sudden, Unexpected Infant Death (SUID)*. Descargado 2016-03-15, de <http://www.cdc.gov/SIDS/index.htm>
- Chen, L. C. L., Cai, X. C. X., Sofia, R., y Huang, Z. H. Z. (2007, sep). A Cross-layer Fast Handover Scheme For Mobile WiMAX. En *66th ieee vehicular technology conference (vtc-07)* (pp. 1578–1582). IEEE. Descargado de <http://>

- ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4349984 doi: 10.1109/VETECF.2007.335
- Cheng Wei Lee, Li Ming Chen, Meng Chang Chen, y Yeali Sunny Sun. (2005, nov). A framework of handoffs in wireless overlay networks based on mobile IPv6. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 23(11), 2118–2128. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1525162> doi: 10.1109/JSAC.2005.856833
- Choi, J. Y., Kim, H. S., Baek, I., y Kwon, W. H. (2005). Cell based energy density aware routing: A new protocol for improving the lifetime of wireless sensor networks. *Computer Communications*, 28(11), 1293–1302. doi: 10.1016/j.comcom.2004.11.005
- Chowdhury, A. S., y Gregory, M. A. (2012, dec). UMTS and WiMAX handover performance comparison. En *Proceeding of the 15th international conference on computer and information technology, iccit 2012* (pp. 332–337). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6509794> doi: 10.1109/ICCITech.2012.6509794
- Dictionary, M. (2015). *Handover definition and synonyms — Macmillan Dictionary*. Descargado 2015-10-28, de <http://www.macmillandictionary.com/dictionary/british/handover>
- Dunn, W., y Murphy, J. G. (2008, jul). The patient handoff: Medicine’s formula one moment. *Chest*, 134(1), 9–12. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0012369208601397> doi: 10.1378/chest.08-0998
- Edirisinghe, R., y Zaslavsky, A. (2014, jan). Cross-layer contextual interactions in wireless networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(2), 1114–1134. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6657500> doi: 10.1109/SURV.2013.101813.00023
- Española, R. A. (2014). Diccionario de la lengua española. *Barcelona: España Libros*.
- Eysenbach, G. (2001). What is e-health? *Journal of Medical Internet Research*, 3(2), 1–5. Descargado de <http://www.jmir.org/2001/2/e20/> doi: 10.2196/jmir.3.2.e20
- Fotouhi, H., Zuniga, M., Alves, M., Koubaa, A., y Marron, P. J. (2012). Smart-HOP: A Reliable Handoff Mechanism For Mobile Wireless Sensor Networks. *Ewsn’12*, 2–16. doi: 10.1007/978-3-642-28169-3\_9
- Fu, B., Xiao, Y., Deng, H. J., y Zeng, H. (2014, jan). A survey of cross-layer designs

- in wireless networks. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 16(1), 110–126. Descargado de [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=6587995](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=6587995) <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6587995> doi: 10.1109/SURV.2013.081313.00231
- García-Hernández, C., Ibargüengoytia-González, P., García-Hernández, J., y Pérez-Díaz, J. (2007). Wireless Sensor Networks and Applications: a Survey. *IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security*, 7(3), 264–273. Descargado de <http://campus.cva.itesm.mx/jdperez/documentos/IJCSNS-WSN-publicado-03-2007.pdf>
- Ghanem, K., Alradwan, H., Motermawy, A., y Ahmad, A. (2012, jul). Reducing ping-pong handover effects in intra EUTRA networks. En *Proceedings of the 2012 8th international symposium on communication systems, networks and digital signal processing, csndsp 2012* (pp. 1–5). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6292642> doi: 10.1109/CSNDSP.2012.6292642
- Gruebler, A., y Suzuki, K. (2014). Design of a wearable device for reading positive expressions from facial EMG signals. *IEEE Transactions on Affective Computing*, 5(3), 227–237. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6778017> doi: 10.1109/TAFFC.2014.2313557
- Gu, J., Bae, S. J., Chung, M. Y., Cheon, K. Y., y Park, A. S. (2010). Mobility-based handover decision mechanism to relieve ping-pong effect in cellular networks. *2010 16th Asia-Pacific Conference on Communications, APCC 2010*, 487–491. Descargado de [http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/\\_all.jsp?arnumber=5680000](http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs/_all.jsp?arnumber=5680000) doi: 10.1109/APCC.2010.5680000
- Hoflinger, F., Zhang, R., Hoppe, J., Bannoura, A., Reindl, L. M., Wendeberg, J., ... Schindelhauer, C. (2012). Acoustic Self-calibrating System for Indoor Smartphone Tracking (ASSIST). *2012 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation, IPIN 2012 - Conference Proceedings*(November), 1–9. doi: 10.1109/IPIN.2012.6418877
- Jo, J., y Cho, J. (2008, aug). Cross-layer optimized vertical handover schemes between mobile WiMAX and 3G networks. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 2(4), 171–183. Descargado de [http://ksii.cafe24.com/download.jsp?filename=TIIS\\_{\\_}Vol2No4P1Aug08.pdf](http://ksii.cafe24.com/download.jsp?filename=TIIS_{_}Vol2No4P1Aug08.pdf) doi: 10.3837/tiis.2008.04.001

- Kassar, M., Kervella, B., y Pujolle, G. (2008). An overview of vertical handover decision strategies in heterogeneous wireless networks. *Computer Communications*, 31(10), 2607–2620. doi: 10.1016/j.comcom.2008.01.044
- Khan, J. Y., y Yuce, M. R. (2012). Wireless Body Area Network(WBAN) for Medical Applications. *Journal of Medical Systems*, 36(3), 1441–1457.
- Kulkarni, S., Iyer, a., y Rosenberg, C. (2006). An address-light, integrated MAC and routing protocol for wireless sensor networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 14(4), 1–29. doi: 10.1109/TNET.2006.880163
- Lee, D. K., Kim, T. H., Jeong, S. Y., y Kang, S. J. (2011, sep). A three-tier middleware architecture supporting bidirectional location tracking of numerous mobile nodes under legacy WSN environment. *Journal of Systems Architecture*, 57(8), 735–748. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383762111000804> doi: 10.1016/j.sysarc.2011.05.004
- Leon, M. d. l. A. C., Hipolito, J. I. N., y Garcia, J. L. (2009, sep). A Security and Privacy Survey for WSN in e-Health Applications. En *2009 electronics, robotics and automotive mechanics conference (cerma)* (pp. 125–130). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5342002> doi: 10.1109/CERMA.2009.47
- Lin, C. S., y Lee, I. T. (2010). Applying multiple description coding to enhance the streaming scalability on CDN-P2P network. *International Journal of Communication Systems*, 23(5), 553–568. Descargado de <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.2760/epdf> doi: 10.1002/dac
- Liu, M., Li, Z., Guo, X., y Dutkiewicz, E. (2008, jul). Performance analysis and optimization of handoff algorithms in heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 7(7), 846–857. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4359007> doi: 10.1109/TMC.2007.70768
- Makaya, C., y Pierre, S. (2008, mar). An analytical framework for performance evaluation of IPv6-based mobility management protocols. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, 7(3), 972–983. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=4472015> doi: 10.1109/TWC.2008.060725
- Man, L. a. N., y Committee, S. (2006). *IEEE Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems-*

- Local and metropolitan area networks- Specific requirements-Part 15.4: Wireless MAC and PHY Specifications for Low-Rate WPANs* (Vol. 2006) (n.º September). Descargado de <http://www.mendeley.com/research/ieee-standard-for-information-technology-telecommunications-and-information-exchange-between-systems-local-and-metropolitan-area-networks-specific-requirements-part-154-wireless-medium-access-control-mac-and-physical-layer> doi: 10.1109/IEEESTD.2006.232110
- McNair, J., y Zhu, F. (2004, jun). Vertical handoffs in fourth-generation multinetwork environments. *IEEE Wireless Communications*, 11(3), 8–15. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1308935> doi: 10.1109/MWC.2004.1308935
- Melodia, T., Vuran, M., y Pompili, D. (2006). The state of the art in cross-layer design for wireless sensor networks. *Wireless Systems and Network ...*, 78–92. Descargado de <http://link.springer.com/chapter/10.1007/11750673{ }7>
- Mendes, L. D. P., y Rodrigues, J. J. P. C. (2011). A survey on cross-layer solutions for wireless sensor networks. *Journal of Network and Computer Applications*, 34(2), 523–534. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnca.2010.11.009> doi: 10.1016/j.jnca.2010.11.009
- Mendo, R., Silva, J., y Boavi, F. (2010, dec). MIPv6 Soft Hand-off for Multi-Sink Wireless Sensor Networks. En *Smart wireless sensor networks* (Vol. 6, pp. 147–156). InTech. Descargado de <http://www.intechopen.com/books/smart-wireless-sensor-networks/mipv6-soft-hand-off-for-multi-sink-wireless-sensor-networks> doi: 10.5772/13654
- Mishra, A., Shin, M., y Arbaugh, W. (2003, apr). An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, 33(2), 93. Descargado de <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=956981.956990> doi: 10.1145/956981.956990
- Nasser, N., Hasswa, A., y Hassanein, H. (2006, oct). Handoffs in fourth generation heterogeneous networks. *IEEE Communications Magazine*, 44(10), 96–103. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1710420> doi: 10.1109/MCOM.2006.1710420
- OpnetWork. (2013). Principios Básicos de Simulación. En *Opnetwork 2013*.
- Pack, S., Choi, J., Kwon, T., y Choi, Y. (2007). Fast-handoff support in IEEE 802.11 wireless networks. ... *Surveys & Tutorials, IEEE*, 9(1), 1–25. Descargado de



- <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=4198183> doi: 10.1109/COMST.2007.358968
- Pahlavan, K., Krishnamurthy, P., Hatami, A., Ylianttila, M., Makela, J., Pichna, R., y Vallstron, J. (2000, apr). Handoff in hybrid mobile data networks. *IEEE Personal Communications*, 7(2), 34–47. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1080/01422419908228843><http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=839330> doi: 10.1109/98.839330
- Pollini, G. P. (1996). Trends in Handover design. *IEEE Communications Magazine*, 34(3), 82–90. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{ }all.jsp?arnumber=486807> doi: 10.1109/35.486807
- Qiuling Tang, Liuqing Yang, Giannakis, G., y Tuanfa Qin. (2005). Battery Power Efficiency of PPM and FSK in Wireless Sensor Networks. En *Milcom 2005 - 2005 ieee military communications conference* (Vol. 6, pp. 1–7). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1606004> doi: 10.1109/MILCOM.2005.1606004
- Raisinghani, V. T., y Iyer, S. (2004). Cross-layer design optimizations in wireless protocol stacks. *Computer Communications*, 27(8), 720–724. Descargado de <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140366403002913> doi: 10.1016/j.comcom.2003.10.011
- Raja, A., y Su, X. (2009, mar). Mobility handling in MAC for wireless ad hoc networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9(3), 303–311. Descargado de <http://eprints.soton.ac.uk/266684/http://doi.wiley.com/10.1002/wcm.613> doi: 10.1002/wcm.613
- Ramachandran, K., Rangarajan, S., y Lin, J. C. (2006). Make-before-break MAC layer handoff in 802.11 wireless networks. En *Ieee international conference on communications* (Vol. 10, pp. 4818–4823). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4024800> doi: 10.1109/ICC.2006.255402
- Saranya, R., y Pugazendi, R. (2014). A Survey on Co-existence Mechanisms in WLAN and WPAN Devices. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)*, 3(9), 2967–2972.
- Shapiro-Mendoza, C. K., Tomashek, K. M., Anderson, R. N., y Wingo, J. (2006, feb). Recent national trends in sudden, unexpected infant deaths: More evidence

- supporting a change in classification or reporting. *American Journal of Epidemiology*, 163(8), 762–769. Descargado de <http://aje.oxfordjournals.org/cgi/doi/10.1093/aje/kwj117> doi: 10.1093/aje/kwj117
- Shi, L., y Fapojuwo, A. O. (2009, apr). Energy efficient and delay optimized TDMA scheduling for clustered wireless sensor networks. En *Ieee wireless communications and networking conference, wncn* (pp. 1–6). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4917709> doi: 10.1109/WCNC.2009.4917709
- Shu, T., y Krunz, M. (2009). Energy-efficient power/rate control and scheduling in hybrid TDMA/CDMA wireless sensor networks. *Computer Networks*, 53(9), 1395–1408. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1016/j.comnet.2009.01.006> doi: 10.1016/j.comnet.2009.01.006
- Siddiqui, F., y Zeadally, S. (2008, apr). An efficient wireless network discovery scheme for heterogeneous access environments. *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, 4(1), 50–60. Descargado de <http://www.emeraldinsight.com/doi/abs/10.1108/17427370810873101> doi: 10.1108/17427370810873101
- Silva, R., Sa Silva, J., y Boavida, F. (2014, oct). Mobility in wireless sensor networks - Survey and proposal. *Computer Communications*, 52, 1–20. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140366414001911> doi: 10.1016/j.comcom.2014.05.008
- Silva, R., Silva, J. S., y Boavida, F. (2012, jun). A proposal for proxy-based mobility in WSNs. *Computer Communications*, 35(10), 1200–1216. Descargado de <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140366412000825> doi: 10.1016/j.comcom.2012.03.005
- Silva, R., Zinonos, Z., Silva, J. S., y Vassiliou, V. (2011). Mobility in WSNs for critical applications. *Proceedings - IEEE Symposium on Computers and Communications*, 451–456. doi: 10.1109/ISCC.2011.5983878
- Simulator, N. (1989). *ns-2*.
- Sinky, H., y Hamdaoui, B. (2013, dec). Cross-Layer Assisted TCP for Seamless Handoff in Heterogeneous Mobile Wireless Systems. En *2013 ieee global communications conference (globecom)* (pp. 4947–4952). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6855740> doi: 10.1109/GLOCOMW.2013.6855740

- Srivastava, V., y Motani, M. (2005). Cross-layer design: a survey and the road ahead. *Communications Magazine, IEEE*, 43(12), 112–119. doi: 10.1109/MCOM.2005.1561928
- Stine, J. A. (2007, oct). Cross-layer design of MANETs: The only Option. En *Proceedings - ieee military communications conference milcom* (pp. 1–7). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4086836> doi: 10.1109/MILCOM.2006.302250
- Stuedi, P., y Alonso, G. (2005). Transparent heterogeneous mobile ad hoc networks. *The Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*(5005), 237–246. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1541004> doi: 10.1109/MOBIQUITOUS.2005.63
- Taehoon, K., Sang-wook, H., y Youngnam, H. (2010). A QoS-aware vertical handoff algorithm based on service history information. *Communications Letters, IEEE*, 14(6), 527–529. doi: 10.1109/LCOMM.2010.06.100176
- Tang, Q., Sun, C., Wen, H., y Liang, Y. (2010, apr). Cross-layer energy efficiency analysis and optimization in WSN. En *2010 international conference on networking, sensing and control (icnsc)* (pp. 138–142). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/login.jsp?tp={&}arnumber=5461522{&}url=http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs{&}all.jsp?arnumber=5461522http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5461522> doi: 10.1109/ICNSC.2010.5461522
- Thaalbi, M., y Tabbane, N. (2014, aug). Improving vertical handover over heterogeneous technologies using a cross layer framework. En *Proceedings - 16th ieee international conference on high performance computing and communications, hpcc 2014, 11th ieee international conference on embedded software and systems, icesse 2014 and 6th international symposium on cyberspace safety and security* (pp. 1170–1176). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7056890> doi: 10.1109/HPCC.2014.191
- Tsukamoto, K., Yamaguchi, T., Kashiara, S., y Oie, Y. (2007). Experimental evaluation of decision criteria for WLAN handover: Signal strength and frame retransmission. *IEICE Transactions on Communications, E90-B*(12), 3579–3590. doi: 10.1093/ietcom/e90-b.12.3579
- Van Quang, B., Prasad, R. V., y Niemegeers, I. (2012). A survey on handoffs - Lessons

- for 60 GHz based wireless systems. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 14(1), 64–86. doi: 10.1109/SURV.2011.101310.00005
- Villar, H. F. (2009). Handoff Vertical : Aproximaciones Cross-Layer. *Revista en Telecomunicaciones e Informática*, 1(Noviembre), 1–9. Descargado de <https://revistas.upb.edu.co/index.php/telecomunicaciones/article/view/1251>
- Virone, G., Wood, a., Selavo, L., Cao, Q., Fang, L., Doan, T., ... Stankovic, J. a. (2006). An Advanced Wireless Sensor Network for Health Monitoring. En *Transdisciplinary conference on distributed diagnosis and home healthcare (d2h2)* (pp. 2–5). Descargado de <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.64.7346{&}rep=rep1{&}type=pdf> doi: 10.1.1.64.7346
- Wang, Q., y Abu-Rgheff, M. A. (2003). Cross-layer signalling for next-generation wireless systems. En *Ieee wireless communications and networking conference, wncn* (Vol. 2, pp. 1084–1089). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1200522> doi: 10.1109/WCNC.2003.1200522
- Wong, R., Espinoza, M., y Palloni, A. (2007). Adultos mayores mexicanos en contexto socioeconómico amplio. *Salud Pública de México*, 49(Instituto Nacional de Salud Pública), 436–447. Descargado de <http://europa.sim.ucm.es/compludoc/AA?articuloId=750850>
- Wu, B. (2011, aug). An efficient fast handoff scheme with network mobility in heterogeneous networks. En *Proceedings of the 2011 6th international icst conference on communications and networking in china, chinacom 2011* (pp. 887–892). IEEE. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6158280> doi: 10.1109/ChinaCom.2011.6158280
- Yan, H. Y. H., Xu, Y. X. Y., y Gidlund, M. (2009). Experimental e-Health Applications in Wireless Sensor Networks. En *2009 wri international conference on communications and mobile computing* (Vol. 1, pp. 563–567). doi: 10.1109/CMC.2009.206
- Yang, X., Song, Y., Owens, T. J., Cosmas, J., y Itagaki, T. (2004). Seamless Soft Handover In DVB-H Networks. En *International conference on software, telecommunications and computer networks 2004*. Split, Croatia, 2004.: Softcom committees. Descargado de <http://bura.brunel.ac.uk/handle/2438/2490>
- Yang, X., Väre, J., y Owens, T. J. (2006, jan). A survey of handover algorithms in DVB-H. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, 8(4),

- 16–29. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/abstractKeywords.jsp?arnumber=4062837+http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4062837> doi: 10.1109/COMST.2006.283819
- Yemini, Y. (1993). The OSI network management model. *Communications Magazine, IEEE*, 31(5), 20–29.
- Yuan, Y., Yang, Z., He, Z., y He, J. (2006). An integrated energy aware wireless transmission system for QoS provisioning in wireless sensor network. *Computer Communications*, 29(2), 162–172. doi: 10.1016/j.comcom.2005.05.015
- Yun, J., Khan, M., y Han, K. (2015). A Fast Handoff Scheme for Streaming Service in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015, 1–10. Descargado de <http://www.hindawi.com/journals/ijdsn/2015/183802/http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2810827.2810828> doi: 10.1155/2015/183802
- Zdarsky, F., y Schmitt, J. (2004). Handover in mobile communication networks: who is in control anyway? *Proceedings. 30th Euromicro Conference, 2004.*, 205–212. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs{ }all.jsp?arnumber=1333373> doi: 10.1109/EURMIC.2004.1333373
- Zimmermann, H. (1980, apr). OSI Reference Model-The ISO Model of Architecture for Open Systems Interconnection. *IEEE Transactions on Communications*, 28(4), 425–432. Descargado de <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=1094702> doi: 10.1109/TCOM.1980.1094702