

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA INTEGRACIÓN *PROXY MOBILE* IPv6 (PMIPv6) Y  
*MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING* (MPLS).**



**Juan Pablo Pantoja Bastidas  
Danny Alejandro Solano Concha**

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de**  
**Comunicaciones**  
Popayán, Septiembre de 2012

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA INTEGRACIÓN PROXY MOBILE IPv6 (PMIPv6) Y  
MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING (MPLS).**



Trabajo de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones.

**Juan Pablo Pantoja Bastidas  
Danny Alejandro Solano Concha**

Director: Ing. Oscar Josué Calderón C.

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de**  
**Comunicaciones**  
Popayán, Septiembre de 2012

*A Dios por que iluminó nuestro camino en las horas más difíciles de nuestra carrera y nos dio el valor, constancia y entendimiento para terminarla.*

*A nuestros padres que con fe y con paciencia nos brindaron su apoyo incondicional para que pudiéramos concluir con éxito esta meta.*

*Especialmente al Ing. Oscar Josué Calderón y al Dr. Jesús Hamilton Ortiz por guiarnos a través de este proceso de aprendizaje e investigación.*

*A nuestros profesores quienes sabiamente nos transmitieron sus conocimientos.*

*A todos nuestros amigos porque de cierta forma aportaron a la consecución de esta meta.*

*Juan Pablo Pantoja B.  
Danny Alejandro Solano C.*

## TABLA DE CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1. INTEGRACIÓN.....</b>	<b>3</b>
1.1. TIPOS DE INTEGRACIÓN.....	5
1.1.1. Esquema suave (Interoperabilidad).....	6
1.1.2. Esquema semi-suave (Superposición).....	7
1.1.3. Esquema duro (Integrado).....	8
1.2. ASPECTOS QUE IMPACTAN LA INTEGRACIÓN.....	9
<b>2. CARACTERÍSTICAS, ELEMENTOS Y FUNCIONES DE PMIPv6 Y MPLS QUE INCIDEN EN LA INTEGRACIÓN.....</b>	<b>11</b>
2.1. ESCENARIOS DE MOVILIDAD.....	12
2.1.1. Macromovilidad.....	14
2.1.2. Micromovilidad.....	14
2.2. <i>PROXY MOBILE</i> IPv6 (PMIPv6).....	15
2.2.1. Entidades de PMIPv6.....	16
2.2.1.1. LMA.....	16
2.2.1.2. MAG.....	16
2.2.1.3. Proxy-CoA.....	16
2.2.1.4. LMAA.....	16
2.2.1.5. PBU.....	17
2.2.1.6. PBA.....	17
2.2.2. Operación de PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad.....	18
2.2.3. <i>Handover</i> en PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad.....	19
2.2.4. Síntesis de PMIPv6.....	22
2.3. <i>MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING</i> (MPLS).....	23
2.3.1. Elementos MPLS.....	23

2.3.1.1.	Etiqueta.....	23
2.3.1.2.	FEC.....	23
2.3.1.3.	LSP.....	23
2.3.1.4.	LSR.....	24
2.3.1.5.	LER.....	24
2.3.2.	Establecimiento de un LSP.....	25
2.3.2.1.	Asignación y distribución de etiquetas.....	25
2.3.3.	Funcionamiento MPLS.....	31
2.3.4.	Síntesis MPLS.....	32
2.4.	CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR PARA INTEGRAR PMIPv6 Y MPLS.....	33
<b>3.</b>	<b>INTEGRACIÓN PMIPv6 y MPLS.....</b>	<b>35</b>
3.1.	ANTECEDENTES.....	35
3.2.	RESTRICCIONES PARA LA INTEGRACIÓN.....	36
3.3.	CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN.....	36
3.4.	INTEGRACIÓN DE PMIPv6 Y MPLS.....	37
3.4.1.	Integración desde la perspectiva semántica.....	37
3.4.2.	Integración desde la perspectiva de sincronización.....	41
3.5.	FUNCIONAMIENTO DE LA INTEGRACIÓN.....	43
3.5.1.	Operación del MAG/LER.....	43
3.5.2.	Operación del LMA/LER.....	43
3.6.	MÉTODO DE ESTABLECIMIENTO DEL LSP BI-DIRECCIONAL.....	45
3.6.1.	<i>LSP-Data-Driven</i> .....	46
3.6.2.	<i>LSP-Control-Driven</i> .....	48
<b>4.</b>	<b>SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN ENTRE PMIPv6 Y MPLS.....</b>	<b>50</b>
4.1.	METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN.....	50
4.1.1.	Análisis de las herramientas de simulación.....	51
4.1.1.1.	OPNET ( <i>OPTimized Network Enginnering Tools</i> ).....	51
4.1.1.2.	OMNET++ ( <i>Objetive Modular Network Testbed in C++</i> ).....	52

4.1.1.3.	<i>Network Simulator 2 (NS-2)</i> .....	53
4.1.1.4.	<i>Network Simulator 3 (NS-3)</i> .....	53
4.1.1.5.	Elección de la herramienta de simulación.....	55
4.1.2.	Definición de los escenarios y casos de simulación.....	55
4.1.3.	Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación.....	60
4.1.4.	Ejecución de las pruebas de simulación.....	62
4.1.5.	Análisis de resultados.....	62
4.1.5.1.	Escenario No. 1: PMIPv6.....	62
4.1.5.2.	Escenario No. 2: PMIPv6/MPLS.....	70
4.1.5.2.1.	Caso 1: Establecimiento del <i>LSP-Data-Driven</i> .....	70
4.1.5.2.1.1.	Caso 1-a: Movimiento controlado del MN.....	71
4.1.5.2.1.2.	Caso 1-b: Movimiento aleatorio del MN.....	80
4.1.5.2.2.	Caso 2: Establecimiento del <i>LSP-Control-Driven</i> .....	81
4.1.5.2.2.1.	Caso 2-a: Movimiento controlado del MN.....	81
4.1.5.2.2.2.	Caso 2-b: Movimiento aleatorio del MN.....	90
<b>5.</b>	<b>CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS....</b>	<b>92</b>
5.1.	CONCLUSIONES.....	92
5.1.1.	Respecto al proceso de integración protocolar.....	92
5.1.2.	Respecto a la simulación.....	93
5.1.3.	Respecto a los resultados de simulación.....	93
5.2.	RECOMENDACIONES.....	94
5.3.	TRABAJOS FUTUROS.....	95

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 2.1.</b>	Clasificación de movilidad de acuerdo a la categoría de usuarios..	<b>13</b>
<b>Figura 2.2.</b>	Ambientes de movilidad IP: micromovilidad y macromovilidad.....	<b>15</b>
<b>Figura 2.3.</b>	Descripción general del dominio PMIPv6.....	<b>17</b>
<b>Figura 2.4.</b>	Flujo de señalización - Conexión del MN.....	<b>18</b>
<b>Figura 2.5.</b>	Flujo de señalización - <i>Handover</i> en PMIPv6.....	<b>20</b>
<b>Figura 2.6.</b>	Dominio MPLS.....	<b>24</b>
<b>Figura 2.7.</b>	Formato de etiquetas de MPLS .....	<b>25</b>
<b>Figura 2.8.</b>	Mecanismo de asignación de etiquetas.....	<b>26</b>
<b>Figura 2.9.</b>	Asignación de etiquetas - <i>Unsolicited Downstream</i> .....	<b>26</b>
<b>Figura 2.10.</b>	Asignación de etiquetas - <i>Downstream on Demand</i> ... ..	<b>27</b>
<b>Figura 2.11.</b>	Enrutamiento Salto a Salto.....	<b>28</b>
<b>Figura 2.12.</b>	Enrutamiento Explícito.....	<b>28</b>
<b>Figura 2.13.</b>	Manejo de etiquetas de MPLS.....	<b>32</b>
<b>Figura 3.1.</b>	Diagrama general para integración por superposición.....	<b>37</b>
<b>Figura 3.2.</b>	Integración desde la perspectiva semántica.....	<b>38</b>
<b>Figura 3.3.</b>	Construcción de ruta, dominio PMIPv6 vs dominio PMIPv6/MPLS..	<b>39</b>
<b>Figura 3.4.</b>	Asociación de las bases de datos en PMIPv6, MPLS y PMIPv6/MPLS.....	<b>40</b>
<b>Figura 3.5.</b>	Componentes de la pila de protocolos de PMIPv6/MPLS.....	<b>40</b>
<b>Figura 3.6.</b>	Integración desde la perspectiva de la sincronización.....	<b>42</b>
<b>Figura 3.7.</b>	Dominio PMIPv6/MPLS.....	<b>44</b>
<b>Figura 3.8.</b>	Flujo de eventos en PMIPv6/MPLS, con establecimiento de <i>LSP- Data-Driven</i> .....	<b>47</b>
<b>Figura 3.9.</b>	Flujo de eventos en PMIPv6/MPLS, con establecimiento de <i>LSP- Control-Driven</i> .....	<b>49</b>
<b>Figura 4.1.</b>	Definición de los casos de simulación.....	<b>56</b>
<b>Figura 4.2.</b>	Escenario de simulación No. 1.....	<b>57</b>

<b>Figura 4.3.</b>	Escenario de simulación No. 2.....	<b>57</b>
<b>Figura 4.4.</b>	Desplazamiento del nodo móvil para el escenario base.....	<b>62</b>
<b>Figura 4.5.</b>	Señalización en PMIPv6.....	<b>63</b>
<b>Figura 4.6.</b>	Señalización en los eventos de Handover en PMIPv6 ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente).....	<b>63</b>
<b>Figura 4.7.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6.....	<b>65</b>
<b>Figura 4.8.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6 ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente).....	<b>65</b>
<b>Figura 4.9.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6.....	<b>66</b>
<b>Figura 4.10.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6 ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente).....	<b>67</b>
<b>Figura 4.11.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6.....	<b>68</b>
<b>Figura 4.12.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6 ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente).....	<b>68</b>
<b>Figura 4.13.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6.....	<b>69</b>
<b>Figura 4.14.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6 ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente).....	<b>70</b>
<b>Figura 4.15.</b>	Desplazamiento del nodo móvil para el escenario 2 - caso 1-a.....	<b>71</b>
<b>Figura 4.16.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>72</b>
<b>Figura 4.17.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>72</b>
<b>Figura 4.18.</b>	Señalización en los eventos de <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>73</b>
<b>Figura 4.19.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>75</b>
<b>Figura 4.20.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>75</b>
<b>Figura 4.21.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>76</b>



<b>Figura 4.22.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>77</b>
<b>Figura 4.23.</b>	Comportamiento del Jitter en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>78</b>
<b>Figura 4.24.</b>	Comportamiento del Jitter en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>78</b>
<b>Figura 4.25.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> – Movimiento controlado).....	<b>79</b>
<b>Figura 4.26.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado)	<b>80</b>
<b>Figura 4.27.</b>	Desplazamiento del nodo móvil para el escenario 2 – caso 2-a.....	<b>82</b>
<b>Figura 4.28.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>82</b>
<b>Figura 4.29.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>83</b>
<b>Figura 4.30.</b>	Señalización en los eventos de <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>83</b>
<b>Figura 4.31.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>85</b>
<b>Figura 4.32.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado)....	<b>86</b>
<b>Figura 4.33.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>86</b>
<b>Figura 4.34.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado)....	<b>87</b>
<b>Figura 4.35.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>88</b>
<b>Figura 4.36.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado)....	<b>88</b>
<b>Figura 4.37.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>89</b>

**Figura 4.38.** Comportamiento *del Throughput* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado)..... **90**

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.1.</b>	Síntesis de los esquemas de integración.....	<b>10</b>
<b>Tabla 2.1.</b>	Mensajes LDP para asignación de etiquetas.....	<b>29</b>
<b>Tabla 2.2.</b>	Mensajes RSVP-TE para asignación de etiquetas.....	<b>30</b>
<b>Tabla 2.3.</b>	Consideraciones de Integración.....	<b>33</b>
<b>Tabla 3.1.</b>	Componentes de PMIPv6/MPLS.....	<b>44</b>
<b>Tabla 4.1.</b>	Síntesis de las características de las herramientas de simulación.....	<b>54</b>
<b>Tabla 4.2.</b>	Características generales de simulación.....	<b>60</b>
<b>Tabla 4.3.</b>	Características de los enlaces de la simulación.....	<b>61</b>
<b>Tabla 4.4.</b>	Flujo de paquetes en PMIPv6.....	<b>64</b>
<b>Tabla 4.5.</b>	Paquetes perdidos durante el <i>Handover</i> en PMIPv6.....	<b>64</b>
<b>Tabla 4.6.</b>	Duración de cada <i>Handover</i> en PMIPv6.....	<b>64</b>
<b>Tabla 4.7.</b>	Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>74</b>
<b>Tabla 4.8.</b>	Paquetes perdidos durante el <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>74</b>
<b>Tabla 4.9.</b>	Duración de cada <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>74</b>
<b>Tabla 4.10.</b>	Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>84</b>
<b>Tabla 4.11.</b>	Paquetes perdidos durante el <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>84</b>
<b>Tabla 4.12.</b>	Duración de cada <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento controlado).....	<b>85</b>
<b>Tabla 4.13.</b>	Resumen de datos del comportamiento de la integración.....	<b>91</b>

## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>AAA:</b>	Autenticación, Autorización y Contabilización ( <i>Authentication, Authorization and Accounting</i> ).
<b>AP:</b>	Punto de Acceso ( <i>Access Point</i> ).
<b>BCE:</b>	Entrada del Cache de Asociación ( <i>Binding Cache Entry</i> ).
<b>BU:</b>	Actualización de Asociación ( <i>Binding Update</i> ).
<b>BUL:</b>	Lista de Actualización de Asociación ( <i>Binding Update List</i> ).
<b>CoA:</b>	Dirección del Nodo Móvil en una Red Visitada ( <i>Care of Address</i> ).
<b>CN:</b>	Nodo Corresponsal ( <i>Correspondent Node</i> ).
<b>ECN:</b>	Notificación de Congestión Explícita ( <i>Explicit Congestion Notification</i> ).
<b>FEC:</b>	Clase Equivalente de Envío ( <i>Forwarding Equivalence Class</i> ).
<b>FMIPv6:</b>	Handover Rápido para IPv6 Móvil ( <i>Fast Handover For Mobile IPv6</i> ).
<b>GRE:</b>	Enrutador de Encapsulado Genérico ( <i>Generic Router Encapsulation</i> ).
<b>HMIPv6:</b>	IPv6 Móvil Jerárquico ( <i>Hierarchical Mobile IPv6</i> ).
<b>HA:</b>	Agente Local ( <i>Home Agent</i> ).
<b>IETF:</b>	Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet ( <i>Internet Engineering Task Force</i> ).
<b>LDP:</b>	Protocolo de Distribución de Etiquetas ( <i>Label Distribution Protocol</i> ).
<b>LER:</b>	Enrutador de Borde de Etiquetas ( <i>Label Edge Router</i> ).
<b>LFIB:</b>	Base de Información de Envío de Etiquetas ( <i>Label Forwarding Information Base</i> ).
<b>LMA:</b>	Anclaje de Movilidad Local ( <i>Local Mobility Anchor</i> ).
<b>LMAA:</b>	Dirección del LMA ( <i>LMA Address</i> ).

<b>LSP:</b>	Trayecto Conmutado de Etiquetas ( <i>Label Switched Path</i> ).
<b>LSR:</b>	Enrutador de Conmutación de Etiquetas ( <i>Label Switched Router</i> ).
<b>MAC:</b>	Control de Acceso al Medio ( <i>Media Access Control</i> ).
<b>MAG:</b>	Pasarela de Acceso Móvil ( <i>Mobile Access Gateway</i> ).
<b>MD:</b>	Detección de Movimiento ( <i>Movement Detection</i> ).
<b>MIPv6:</b>	IP Móvil Versión 6 ( <i>Mobile IPv6</i> ).
<b>MM:</b>	Gestión de Movilidad ( <i>Mobility Management</i> ).
<b>MN:</b>	Nodo Móvil ( <i>Mobile Node</i> ).
<b>MN-HNP:</b>	Prefijo de Red Local del Nodo Móvil ( <i>Mobile Node's Home Network Prefix</i> ).
<b>MPLS:</b>	Conmutación de Etiquetas Multi-Protocolo ( <i>Multiprotocol Label Switching</i> ).
<b>NETLMM:</b>	Gestión de Movilidad Localizada Basada en Red ( <i>Network-based Localized Mobility Management</i> ).
<b>NGWN:</b>	Red Inalámbrica de Nueva Generación ( <i>Next Generation Wireless Network</i> ).
<b>NH:</b>	Siguiente Salto ( <i>Next Hop</i> ).
<b>NH-LSR:</b>	Siguiente LSR ( <i>Next Hop - LSR</i> ).
<b>OSI:</b>	Interconexión de Sistemas Abiertos ( <i>Open System Interconnection</i> ).
<b>PBA:</b>	Confirmación de Asociación Proxy ( <i>Proxy Binding Ack</i> ).
<b>PBU:</b>	Actualización de Asociación Proxy ( <i>Proxy Binding Update</i> ).
<b>PM2PLS:</b>	Integración de PMIPv6 y MPLS ( <i>Integrating Proxy Mobile IPv6 and MPLS</i> ).
<b>PMIPv6:</b>	Proxy IP Móvil Versión 6 ( <i>Proxy Mobile IPv6</i> ).
<b>Proxy-CoA:</b>	Dirección del Nodo Móvil en una Red Visitada Proxy ( <i>Proxy-Care of Address</i> ).
<b>QoS:</b>	Calidad de Servicio ( <i>Quality of Service</i> ).
<b>RSVP:</b>	Protocolo de Reserva de Recursos ( <i>Resource Reservation Protocol</i> ).
<b>RSVP-TE:</b>	RSVP con extensión de Ingeniería de Tráfico ( <i>Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering</i> ).

**RtrAdv:** Anuncio de Enrutador (*Router Advertisement*).

**RtrSol:** Solicitud de Enrutador (*Router Solicitation*).

**TC:** Clase de Tráfico (*Traffic Class*).

**TE:** Ingeniería de Tráfico (*Traffic Engineering*).

**TTL:** Tiempo de Vida (*Time to Live*).

**VP:** Canal Virtual (*Virtual Pipe*).

## INTRODUCCIÓN

El auge experimentado en el desarrollo de las tecnologías de red en la última década, ha generado un fenómeno a escala global que ha facilitado el crecimiento de Internet y el aumento del tráfico en las redes de telecomunicaciones tanto fijas como móviles. Esto debido en gran parte al éxito de las aplicaciones basadas en IP como al uso de servicios Web, las aplicaciones multimedia y los servicios en tiempo real.

A esto se suma el crecimiento exponencial experimentado por la telefonía móvil y la tecnología inalámbrica, generando un incremento en el uso de terminales móviles, al punto de convertirlos en una alternativa eficaz para complementar el acceso a Internet brindado por las redes fijas; aumentando significativamente la demanda de aplicaciones basadas en IP.

La proliferación de terminales móviles supone nuevas oportunidades en la evolución de Internet, puesto que los usuarios pretenden acceder a los servicios basados en IP, independientemente de la forma en que se conecten a la red. Con base en ello, el protocolo IP que ha sido diseñado para redes fijas, a menudo se ve afectado en su comportamiento cuando su despliegue se realiza sobre las redes inalámbricas, lo que hace necesario, la creación de protocolos de gestión de movilidad IP, que proporcionen un nivel de calidad comparable al ofrecido en redes fijas.

Con esta premisa, se propone una solución que introduzca las características más relevantes de algunas tecnologías o protocolos, en los protocolos de gestión de movilidad IP. Esta solución intenta mejorar el desempeño de los protocolos en ambientes móviles, a fin de proporcionar una alternativa eficiente que garantice un nivel de calidad necesario para no degradar un servicio.

El interés de este trabajo se centra en determinar las consideraciones necesarias que permitan analizar la viabilidad de realizar la integración del protocolo PMIPv6 y MPLS en un ambiente de micromovilidad IP y de ser esto posible se evaluará el impacto que presente la integración en el desempeño de la red.

Este documento se divide en cinco capítulos estructurados de la siguiente manera:

Capítulo 1. Presenta una síntesis de los esquemas de integración a nivel protocolar, enfatizando los aspectos más relevantes para su elección, estableciendo el grado de asociación de los protocolos que se busca integrar.

Capítulo 2. Define los conceptos referentes a movilidad, así como las características y aspectos más importantes de los protocolos que se desean integrar (en este caso PMIPv6 y MPLS).

Capítulo 3. Realiza la propuesta de integración de los protocolos PMIPv6 y MPLS, describiendo los elementos, consideraciones y limitaciones del mismo.

Capítulo 4. Desarrolla y evalúa mediante simulación, la integración de PMIPv6 y MPLS, realizando adicionalmente el análisis de resultados respectivo.

Capítulo 5. Se exponen las conclusiones del proyecto y se presentan una serie de recomendaciones para el desarrollo de trabajos e investigaciones en este campo; finalmente se genera una serie de ideas que pueden contribuir a realizar una profundización en esta área.



## 1. INTEGRACIÓN

El actual avance en los sistemas de telecomunicaciones y su necesidad de proporcionar información a los usuarios de manera continua, independiente del lugar, instante, dispositivo utilizado y tecnología de acceso, es una tendencia dirigida a mejorar la disponibilidad de los diferentes servicios ubicados en Internet. Esta predisposición hacia la conectividad en todo momento y lugar adquiere cada día mayor importancia dentro de las redes de datos, recibiendo especial atención las Redes Inalámbricas de Nueva Generación (NGWN, *New Generation Wireless Networks*) debido al crecimiento que ha experimentado esta tecnología en las últimas décadas y al surgimiento de dispositivos móviles que hacen necesario el soporte de la movilidad de los terminales en Internet [1]. El crecimiento de Internet, la alta demanda de sus servicios y aplicaciones por parte de los usuarios y la actual convergencia de múltiples redes de acceso diferentes, ha convertido al protocolo IP en el núcleo de esta evolución. Con el auge de las distintas tecnologías de acceso inalámbricas, es necesario implementar en sus enlaces radio, mecanismos que permitan ofrecer un mejor desempeño y calidad a la red IP [1] [2].

El mayor desafío que enfrentan las redes de acceso inalámbrico se presenta cuando el usuario se desplaza entre diferentes zonas de cobertura, ya que durante este desplazamiento se genera la interrupción momentánea de la comunicación, derivando en problemas de sobrecarga de señalización, pérdida de paquetes y retardo, entre otros. A este proceso que ocurre mientras el terminal se mueve entre celdas adyacentes se le denomina *Handover*<sup>1</sup> y la calidad de la comunicación, de los servicios y de las aplicaciones dependen en gran medida de la eficiencia con que este se realice. La comunidad científica dirige muchas de sus investigaciones hacia la creación y adecuación de mecanismos que propongan la posibilidad de brindar soluciones efectivas a los problemas que se ocasionan durante el *Handover*, optimizando el rendimiento y la movilidad del terminal<sup>2</sup> dentro de una arquitectura *All-IP*. Es en este contexto donde se desarrollan las técnicas de Gestión de Movilidad (MM, *Mobility Management*) que ofrecen movilidad transparente a los nodos conectados a Internet y tienen como objetivo principal mantener las conexiones que el terminal móvil posea, así este cambie constantemente su localización y por ende, su punto de acceso a la red [3].

---

<sup>1</sup> *Handover*: proceso que permite a un nodo móvil mantener continua la comunicación establecida, mientras este cambia su punto de acceso a la red.

<sup>2</sup> Movilidad del Terminal: es la capacidad de un nodo móvil de cambiar su punto de acceso a la red [3].

Dentro de las redes inalámbricas avanzadas el manejo de altas velocidades de transmisión de datos, el mantenimiento de la integridad y la seguridad de la información, son aspectos que requieren de una óptima gestión de movilidad y de recursos como el ancho de banda y el espectro radioeléctrico, con el propósito de asignarlos apropiadamente acorde a los requerimientos de los nodos móviles conectados a la red, esto se puede lograr incluyendo técnicas de Ingeniería de Tráfico (TE, *Traffic Engineering*) y mecanismos de Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*) [4] [5] [6] [7].

Para atender estos requerimientos, el Grupo de Trabajo de Ingeniería de Internet (IETF, *Internet Engineering Task Force*) dentro de los diferentes protocolos de gestión de movilidad existentes ha propuesto y desarrollado IPv6 Móvil (MIPv6, *Mobile IPv6*) como protocolo de movilidad básico, concebido para dar solución al problema de la movilidad sin tener que realizar modificaciones en los enrutadores o en los nodos móviles en Internet. MIPv6 es una extensión de las funcionalidades del protocolo IPv6 que permite a los nodos continuar recibiendo información independientemente de la red a la que estén actualmente conectados, lo que conlleva a mensajes de control adicionales con los que se maneja el direccionamiento de los paquetes [8]. Sin embargo, MIPv6 demostró ser inadecuado para dar soluciones efectivas de movilidad, porque es un macro-sistema de gestión de movilidad donde si bien no se pierde la conexión mientras ocurre el *Handover*, se ve afectado notablemente por su alta latencia y por la gran sobrecarga de señalización durante este proceso, lo cual no es conveniente para tráficos sensibles y críticos como voz o video, haciendo de estos factores determinantes en el desempeño de un protocolo de movilidad. Basándose en esto, MIPv6 se tomó como punto de partida para realizar otras extensiones con mejoras muy significativas, que buscaron reducir la alta latencia consumida durante el *Handover* y la sobrecarga de señalización pero con enfoques diferentes al protocolo original [9]. Este problema ha sido tratado en muchos trabajos y queda fuera del objetivo de esta propuesta.

Después de intensificar esfuerzos en esta área, las investigaciones apuntan a disminuir la latencia y la sobrecarga de señalización durante el *Handover*, permitiendo a los protocolos existentes que dan soporte y soluciones de movilidad ser cada vez más maduros, robustos y de fácil despliegue; inclusive planteando esquemas de funcionamiento conjunto de varios de estos protocolos o integrando características propias de otros ubicados en capas inferiores, como estrategia eficaz para brindar alternativas que se beneficien de estas tecnologías, en el proceso de mejorar la eficiencia protocolar y optimizar el rendimiento global de la red en un ambiente de movilidad IP [10].

Con esta premisa el interés se centró en encontrar tecnologías que junto a los protocolos de gestión de movilidad IP llevaran a disminuir los problemas presentes durante el proceso de *Handover*, mejorando el modelo de envío de datagramas en ambientes móviles [10]. En los últimos años se ha evidenciado que la tecnología de Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo (MPLS, *MultiProtocol Label Switching*) con su paradigma de

conmutación rápida de etiquetas y sus mecanismos que permiten establecer túneles<sup>3</sup> [11], tiende en gran medida a ser incorporada en ambientes de alta movilidad [12] [13] [14] [15] [16], para disminuir el tiempo de procesamiento en las entidades de movilidad presentes en la red, teniendo un impacto significativo en los procesos de establecimiento de las conexiones y la continuidad de las sesiones iniciadas por el usuario final en el contexto de movilidad [11 - 20].

Este trabajo de investigación, determina la viabilidad y el grado de integración<sup>4</sup> desde la perspectiva protocolar y mediante simulación del protocolo: *Proxy IP Móvil Versión 6* (PMIPv6, *Proxy Mobile IPv6*) y MPLS, aprovechando la característica propia de MPLS como tecnología de establecimiento de túneles que supera las técnicas propuestas en PMIPv6 (por ejemplo IP-sobre-IP) [12]. La viabilidad de la integración permitirá conocer si mejora el desempeño de la movilidad en un entorno de micromovilidad<sup>5</sup> IP, y a partir de ello establecer si es una alternativa eficiente para solucionar los inconvenientes mencionados anteriormente.

A continuación se presentan los tipos de integración más citados en la literatura, los cuales indican el grado de integración que se puede lograr a nivel protocolar.

## 1.1. TIPOS DE INTEGRACIÓN

La definición de un protocolo de comunicaciones indica el conjunto de normas necesarias para iniciar y mantener una comunicación [21] [22]. Estas normas pre-establecidas son las que definen la sintaxis<sup>6</sup>, semántica<sup>7</sup> y sincronización<sup>8</sup> del protocolo; a partir de los cuales es posible identificar tres tipos de esquemas de integración a nivel protocolar. Basados en la literatura consultada [13] [17] [18] [19] [20], se identifica una clasificación de los esquemas de integración de la siguiente manera: esquema suave (interoperabilidad), esquema semi-suave (superposición), y esquema duro (integrado).

---

<sup>3</sup> Túneles (MPLS): es una ruta para tráfico específico establecido entre un enrutador origen a un enrutador destino a lo largo de una red MPLS.

<sup>4</sup> Integración: en este contexto, integración se empleará para describir una solución de coexistencia y correcta asociación de los protocolos, para que puedan funcionar conjuntamente.

<sup>5</sup> Micromovilidad: movilidad dentro de un mismo dominio de red.

<sup>6</sup> Sintaxis: según [22] define los conjuntos de bits para la creación de datagramas, por ejemplo la combinación de unos y ceros establecidos en un campo para dar origen a cierto datagrama (definición lógica).

<sup>7</sup> Semántica: según [22] define el significado exacto de los bits dentro de los campos de los datagramas, por ejemplo el significado que tiene una combinación de unos y ceros dentro de cierto campo en algún datagrama (definición de significados).

<sup>8</sup> Sincronización: según [22] define el ajuste temporal de eventos, cuándo determinados procesos deben ocurrir en un orden establecido anteriormente. Así, estos procesos puedan ser simultáneos o secuenciales.

### 1.1.1. Esquema suave (Interoperabilidad)

Este esquema se define en [13] como integración suave, y en [17] [18] [19] [20] se conoce como esquema de interoperabilidad<sup>9</sup>, sin embargo en ambos casos es el primer esquema donde se logra la integración entre dos protocolos diferentes de manera leve, en el sentido que aún se mantienen tan separados como sea posible, operando cada uno bajo las respectivas normas pre-establecidas con las que se crearon y acorde a la capa donde se ejecutan en el modelo de Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI, *Open System Interconnection*).

En este funcionamiento independiente y de baja integración, solo ocurre una alteración del conjunto de normas que definen la sincronización de los protocolos, ya que cada parte realiza sus procesos y eventos normalmente; es decir, el protocolo de la capa inferior inicia y termina el evento o proceso de la manera como fue concebido, obedeciendo el conjunto de reglas que le permiten comunicarse y enviar información, para dar paso inmediatamente al protocolo de nivel superior con el que está inter-operando quien acata las normas pre-establecidas en su estándar. Este modo de operación sincronizada se mantendrá según lo requiera el evento o proceso en ejecución.

El esquema de integración suave debe cumplir con las condiciones especificadas en los estándares respecto a sintaxis y semántica, sin alterar su relación con las capas adyacentes en el modelo OSI, permitiendo un despliegue rápido y sencillo de la arquitectura que utiliza este esquema, con un funcionamiento muy simple y sin la necesidad de generar nuevos procesos de seguridad, ya que no se influirá en los dictaminados por ambos protocolos en su concepción [17] [18] [19] [20].

En la integración suave, está limitado el acceso a información de tablas de enrutamiento y datos almacenados por parte del protocolo con el que establece relación, siendo imposible realizar eventos o combinar procesos como un solo protocolo, por tanto no es posible influir en su contraparte para cambiar acciones, mecanismos o respuestas a partir de un evento que está en proceso de ejecución [17] [18] [19] [20].

Los problemas de latencia y sobrecarga de red son más críticos en este esquema de integración, ya que el mecanismo de sincronización de los protocolos requiere de más mensajes de confirmación que los empleados regularmente, para comunicar las partes involucradas con protocolos de la misma capa o de la capa siguiente, aumentando el nivel de retardo.

Mediante este esquema de integración no es posible dar soporte de TE y mecanismos que brinden QoS debido a los problemas descritos anteriormente.

<sup>9</sup> Interoperabilidad: según [21] es la habilidad de dos o más sistemas o componentes para intercambiar información y utilizar la información intercambiada.

### 1.1.2. Esquema semi-suave (Superposición)

Este esquema de integración se conoce como esquema semi-suave [13] o esquema de superposición [17] [18] [19] [20], donde los protocolos superan el grado de integración con respecto al esquema suave. Aunque estrictamente, aún deben operar en sus respectivas capas acorde con el modelo OSI.

En este caso los protocolos asumen un comportamiento complementario; es decir, uno de los protocolos realiza un proceso (envío de un mensaje de confirmación, mensaje de actualización, mensaje de señalización, etc.) el cual genera una reacción particular en el otro protocolo; de esta manera, este proceso influye directamente en el comportamiento del dominio<sup>10</sup> donde se despliega el esquema de integración semi-suave [17] [18] [19] [20].

Al igual que en el esquema suave, el conjunto de reglas que definen la sintaxis de los protocolos se conservan bajo la línea con la que se crearon en primera instancia, pero la normativa que define la sincronización y la semántica se modifica, al considerar el uso de algunos campos dentro de los datagramas (campos experimentales) que los protocolos poseen para usos alternativos, con la premisa de no alterar la definición lógica que se estableció inicialmente para el conjunto de bits que dan origen a estos datagramas. Por esta condición los procesos de seguridad con los que se concibieron los protocolos también permanecen inalterables y en este orden de ideas, el desplegar una arquitectura con este esquema será rápido y sencillo, encontrando un equilibrio entre simplicidad de realización y rendimiento del sistema [20].

En este esquema los protocolos que interactúan pueden acceder a los datos almacenados y a las tablas de enrutamiento del otro, permitiendo sustancialmente mejorar ciertos procesos y aumentar la eficiencia en general de la arquitectura que la implementa con respecto al esquema de integración suave. No obstante, se deben mantener los términos expuestos en los párrafos anteriores, de manera que no se tendrán procesos y eventos como una nueva entidad protocolar [17] [18] [19] [20].

A pesar de los beneficios que ya se han explicado, el aumento en el número de mensajes producto del acceso a información del otro protocolo y los procesos donde se realiza una interpretación de los campos que se varían en el datagrama (campos experimentales), genera dentro de la integración semi-suave problemas de latencia y sobrecarga de red, sin embargo, se ven afectados de manera leve los procesos de establecimiento y continuidad de las sesiones durante el proceso de *Handover*, en un dominio de movilidad [17] [19].

<sup>10</sup> Dominio: se emplea el término dominio para definir un conjunto de dispositivos que se conectan entre sí para conformar una red que posee características comunes, como su protocolo, su administración, su tecnología de acceso, etc.

En este esquema de integración resulta complejo proveer servicios como el soporte de TE y mecanismos de QoS [13], debido a que aún no se mantiene una estrecha relación entre los protocolos, sin embargo, es posible soportarlos.

### 1.1.3. Esquema duro (Integrado)

El tercer esquema de integración conocido como esquema duro [13] o integrado [17] [18] [19] [20], se diferencia de los dos esquemas anteriores porque en este caso el nivel de integración de los protocolos es superior, sin tener la estricta necesidad de operar por separado en sus respectivas capas acorde con el modelo OSI.

En este caso, con la combinación de ciertas características protocolares se genera una nueva entidad protocolar, a partir de la modificación o creación del conjunto de normas que definen la sintaxis, semántica y sincronización, siguiendo para su elaboración las especificaciones y recomendaciones de los entes reguladores y estandarizadores [17] [22], por lo que se debe establecer nuevas tablas de enrutamiento, identificar las entidades que almacenan los datos, modificar o crear campos dentro de los datagramas (según sea el ajuste necesario), definir las interpretaciones lógicas de estos campos nuevos o modificados y establecer los ajustes en los tiempos de operación de los procesos [17] [18] [19] [20].

Debido a esto, los procesos y eventos de estos protocolos se realizan como una sola entidad, aprovechando las características de ambos para mejorar la eficiencia de las operaciones de red (por ejemplo: procesos de control y señalización) y el rendimiento del sistema en comparación con los esquemas anteriores [19], contribuyendo a optimizar los recursos de red, brindando un buen soporte de TE, e incorporando mecanismos de QoS extremo a extremo [22], haciendo de este un esquema fiable y robusto para su implementación.

Al alterar la sintaxis, semántica y sincronización para la comunicación con capas adyacentes o en su mismo nivel, este esquema requiere de un complejo y exhaustivo proceso de investigación para identificar las normativas, especificaciones y recomendaciones que permitan su integración. En el mismo sentido los cambios realizados sobre los protocolos originales, impactarán sobre los protocolos que se encuentran en su mismo nivel acorde con el modelo OSI, ya que se necesitará de complicados procesos a nivel protocolar para atender un datagrama modificado. Teniendo como resultado una arquitectura cuyo despliegue es lento y complejo a nivel global [18].

## 1.2. ASPECTOS QUE IMPACTAN LA INTEGRACIÓN

Dentro de los esquemas de integración citados, se pueden identificar aspectos relevantes que a priori permitirán apreciar el grado de dificultad y el nivel de integración que se puede lograr en un esquema:

- **Procesos en común:** indica que los protocolos propuestos para integrarse en alguno de estos esquemas, realizan eventos o procesos comunes que permiten establecer una comunicación o enviar información (por ejemplo: procesos de autenticación, control, señalización, etc.) como una sola entidad protocolar [17] [18] [19] [20].
- **Modificación de datagramas:** se refiere a la posibilidad de modificar las reglas de sintaxis y/o semántica de los protocolos que hacen parte del esquema de integración, provocando que la estructura normal de los datagramas se afecte, cambiando todo el datagrama o algunos campos del mismo [17] [18] [19] [20].
- **Despliegue global del sistema:** este aspecto, a partir del grado de dificultad del esquema, infiere cómo será el nivel de complejidad de la implementación para dicha integración [17] [18] [19] [20].
- **Soporte de TE:** define la posibilidad de realizar o no en la red, la gestión del tráfico a través de la planificación, dimensionamiento, diseño y supervisión de la red, de acuerdo a las demandas de los servicios ofrecidos [13].
- **Mecanismos de QoS:** se refiere a la capacidad de etiquetar los paquetes, de tal forma que estos puedan ser asociados a un flujo<sup>11</sup> de datos entre el transmisor y el receptor para solicitar un trato especial de estos paquetes [13].
- **Seguridad:** es la cualidad de la red de adoptar y/o desarrollar características de seguridad de acuerdo con el esquema de integración [17] [18] [19] [20].

La tabla 1.1 sintetiza los elementos más significativos de los esquemas de integración protocolar acorde a lo presentado; siendo los más importantes: los procesos en común, la modificación de datagramas y el despliegue global del sistema. Estos aspectos determinan el grado de integración que se puede lograr entre los protocolos, la dificultad en el despliegue del sistema y las ventajas y desventajas frente a las soluciones de movilidad.

<sup>11</sup> Flujo de datos: según [21] es la secuencia en que se lleva a cabo la transferencia, uso y transformación de datos, durante la ejecución de la comunicación de los protocolos.

Aspectos de operación	Esquema suave (Inter-operabilidad)	Esquema semi-suave (Superposición)	Esquema duro (Integrado)
<b>Procesos en común</b>	No se realizan	Depende de las modificaciones propuestas	Si se realizan
<b>Modificación de datagramas</b>	No se realiza	En algunos campos de los datagramas(campos experimentales)	Modificación y creación de campos de los datagramas
<b>Despliegue global del sistema</b>	Rápido y sencillo	Levemente sencillo y rápido	Lento y complejo
<b>Soporte de TE</b>	No se soporta	Implementación soportada con alto nivel de complejidad	Soportado
<b>Mecanismos de QoS</b>	No soporta	Implementación soportada con alto nivel de complejidad	Soportado
<b>Seguridad</b>	Inherente a la integración	Inherente a la integración	Dependiente de la integración

**Tabla 1.1. Síntesis de los esquemas de integración. Por los Autores.**

La identificación de los esquemas de integración es un proceso que debe realizarse con la intención de definir las estrategias que mejoren las funciones protocolares y permitan el desarrollo de nuevas arquitecturas, que conlleven a la integración de protocolos dentro de las redes de comunicación. Como se ha podido identificar existen varias formas de realizar un proceso de integración a nivel protocolar, dentro de las redes de comunicación de datos. El siguiente capítulo describirá los elementos, funciones y características más importantes de los protocolos que forman parte de la integración.



## 2. CARACTERÍSTICAS, ELEMENTOS Y FUNCIONES DE PMIPv6 y MPLS QUE INCIDEN EN LA INTEGRACIÓN

Las redes de datos han evolucionado sus arquitecturas basadas en conmutación de paquetes, con el fin de mejorar la prestación de servicios multimedia y de aplicaciones en tiempo real, entre otros. Adicionalmente la adopción del protocolo IP, dentro de las NGWN permite proporcionar mecanismos de gestión de movilidad que hacen posible incrementar el número de usuarios móviles, brindando además, técnicas fiables para el transporte de información [4]. Dado que IP no se diseñó para dar soporte de movilidad, hay varios problemas de investigación que necesitan ser resueltos antes de continuar con el despliegue de las redes inalámbricas IP; por tanto, es necesario aportar una serie de mejoras a los protocolos de movilidad, para lograr que estas redes además de brindar conectividad a Internet, garanticen ancho de banda, latencia reducida, baja carga de señalización y baja tasa de paquetes perdidos, acorde con los requerimientos propios de los servicios desplegados [23] [24].

Para soportar movilidad IP en los Nodos Móviles (MN, *Mobile Node*), se han especificado un conjunto de protocolos como MIPv6 [8] y unas extensiones del mismo: IPv6 Móvil Jerárquico (HMIPv6, *Hierarchical Mobile IPv6*) [25] y *Handover* Rápido para IP Móvil (FMIPv6, *Fast Handover For Mobile IPv6*) [26], no obstante estos protocolos no son utilizados con frecuencia en implementaciones reales, debido principalmente a que su despliegue requiere de ciertas modificaciones en los MN a fin de realizar procesos de señalización y funciones de control [27]. Para solucionar este inconveniente se ha desarrollado el protocolo PMIPv6, que logra mantener la carga de señalización y todas las respectivas funciones de control sobre la movilidad IP en la infraestructura de red, disminuyendo el procesamiento y el consumo de energía en el MN [28].

La tecnología MPLS donde se integra el control que proporciona el enrutamiento del nivel de red con la simplicidad de la conmutación del nivel de enlace (según el modelo OSI), es desplegada por la mayoría de operadores de red para el transporte de tráfico IP [29], adquiriendo importancia en los últimos años la tendencia de introducir MPLS en el terreno móvil [12] [30].

En este capítulo se describen los escenarios de movilidad que permiten realizar una clasificación de los protocolos de gestión de movilidad, también se describe el funcionamiento de *Proxy Mobile IPv6*, protocolo de interés para esta investigación debido a que ha demostrado un buen desempeño y una mejora sustancial para proporcionar movilidad a los MNs, en comparación con MIP y sus variaciones (MIPv6, HMIPv6 y

FMIPv6) [30] [31]; posteriormente se describe el funcionamiento de MPLS con el propósito de apreciar las características de velocidad de procesamiento de paquetes, y su capacidad de establecimiento de túneles dentro de los enrutadores de *backbone*<sup>12</sup>. Finalmente se hace una síntesis que permita identificar los parámetros de estos dos protocolos que serán tenidos en cuenta como estrategia para realizar la integración.

## 2.1. ESCENARIOS DE MOVILIDAD

Probablemente el acceso inalámbrico a Internet superará todas las otras formas de acceso en un futuro cercano, por lo que los usuarios de redes móviles esperarán obtener los mismos niveles de calidad en la prestación de un servicio, que los ofrecidos en las redes fijas [32]; esta visión presenta una serie de desafíos técnicos para IP móvil en términos de rendimiento y escalabilidad, por tanto son necesarios protocolos que realicen la gestión de movilidad del MN entre diferentes subredes dentro de un mismo dominio de red o entre diferentes dominios de red. Por ello, la gestión de movilidad ha adquirido mucha importancia, al encargarse de definir el conjunto de funciones utilizadas para proporcionar movilidad al usuario, al servicio y al terminal, abarcando funciones desde la comunicación con la red local, hasta los procesos de autenticación, autorización, actualización de ubicación y descarga de información de usuario [33], valiéndose para ello de los mensajes de señalización.

A partir de lo anterior, se han definido diferentes tipos de usuarios que pueden beneficiarse de la movilidad: un ser humano, software y hardware. Estos dan lugar a tres tipos fundamentales de movilidad: Movilidad personal, Movilidad de aplicación y Movilidad del terminal [34] respectivamente.

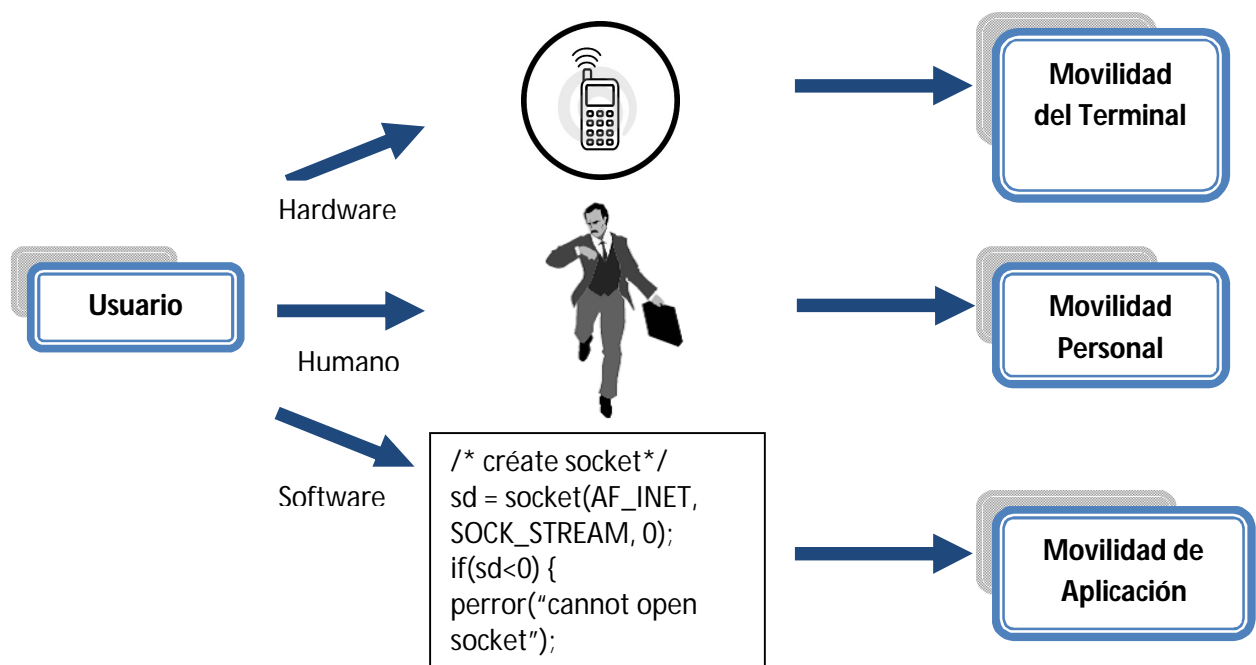
- **Movilidad Personal:** permite a un usuario acceder a los servicios independientemente del terminal empleado y la red a la cual se desee conectar, así el usuario puede obtener el servicio desde cualquier red en cualquier sitio; por ejemplo el acceso a correo electrónico, donde obtiene acceso remoto al buzón personal.
- **Movilidad de Aplicación:** permite a un proceso de software en ejecución relocalizarse o incluso ser movido entre equipos.
- **Movilidad del Terminal:** el terminal cambia su localización, manteniendo todos los servicios, así la movilidad del terminal es la capacidad de un nodo móvil de cambiar su punto de acceso a la red, manteniendo todas las comunicaciones existentes y utilizando la misma dirección IP en su nuevo enlace (definición aplicable a enfoques que se basan en traspasos en el nivel

<sup>12</sup> *Backbone*: término que define el segmento donde se maneja la mayor densidad de tráfico en una red de comunicaciones.

de capa de red del modelo de referencia OSI) [35]. De lo anterior se han clasificado dos tipos de movilidad del terminal, movilidad discreta (portabilidad) y la movilidad continua.

- **Movilidad discreta:** el dispositivo interrumpe las comunicaciones durante el movimiento, por lo tanto el usuario re-establece la comunicación en su nueva localización.
- **Movilidad continua:** el dispositivo asegura que las conexiones activas no se interrumpan mientras el terminal cambia su posición, independiente de las limitaciones geográficas y de la tecnología de red.

La figura 2.1 ejemplifica y presenta un resumen sobre estos tipos de clasificación de movilidad.



**Figura 2.1. Clasificación de movilidad de acuerdo a la categoría de usuarios.**  
Adaptado de [34].

Los protocolos de gestión de movilidad dependiendo del tipo de movilidad que se desee proporcionar se clasifican de forma general en dos grupos: protocolos de macromovilidad IP y protocolos de micromovilidad IP [2].

### 2.1.1. Macromovilidad

Es un ambiente que describe el movimiento de los nodos móviles entre dos o más subredes, a través de dos o más dominios de red diferentes. Los protocolos de macromovilidad IP están diseñados para manejar el movimiento del nodo móvil entre diferentes dominios administrativos sin la necesidad de una desconexión. Una de las características más destacadas de los protocolos de macromovilidad IP es que estos protocolos cooperan con mecanismos de enrutamiento IP para integrar redes fijas y móviles [36] [37] [38] [39].

### 2.1.2. Micromovilidad

Es un ambiente que describe el movimiento de los nodos móviles entre dos o más subredes dentro del mismo dominio de red. En este entorno, el nodo móvil cambia su punto de acceso a la red con frecuencia, por tanto, los protocolos de micromovilidad están diseñados para manejar el movimiento en este entorno, proporcionando *Handover* rápido y sin problemas [36] [37] [38] [39].

Los protocolos de micromovilidad tienen la capacidad de reducir la sobrecarga de señalización relacionada con las migraciones de los nodos móviles utilizando capacidades de transmisión *multicast* dentro de un dominio de red. La transmisión de datos simultáneamente a dos localizaciones (estaciones o puntos de acceso) ofrece importantes ventajas que facilitan un *Handover* sin pérdidas y favorece el desarrollo de mejores procesos que permiten una madurez tecnológica de fácil adaptación a entornos móviles IPv6.

La figura 2.2 muestra los alcances a nivel de dispositivos de red, de los dos tipos de ambientes de movilidad.

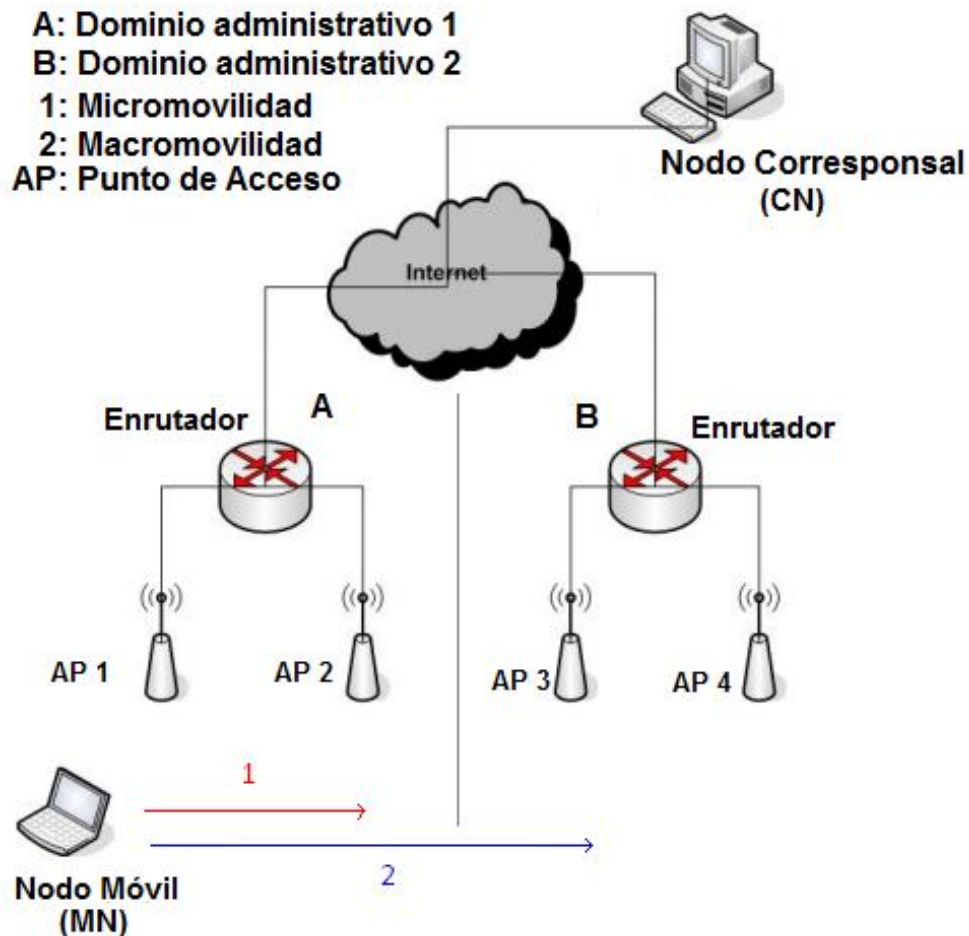


Figura 2.2. Ambientes de movilidad IP: micromovilidad y macromovilidad.  
 Adaptado de [39].

## 2.2. PROXY MOBILE IPv6 (PMIPv6)

PMIPv6 fue propuesto y diseñado por la IETF como especificación para brindar a MN Gestión de Movilidad Localizada Basada en Red (NETLMM, *Network-Based Localized Mobility Management*) [28] [40] [41]. PMIPv6 se diferencia de MIPv6 y sus extensiones (FMIPv6 y HMIPv6) debido al enfoque que propone; mientras que MIPv6, FMIPv6 y HMIPv6 tienen un enfoque basado en host, PMIPv6 se enfoca en red [41]. Este enfoque hace que los proveedores de servicios ofrezcan movilidad a tantos usuarios como les sea posible, sin exclusividad alguna; teniendo la oportunidad de controlar la red en términos de tráfico, además con la opción de brindar mecanismos de calidad de servicio; esto debido a que el MN no requiere modificación en la pila de protocolos, instalación extra de drivers o software para soportar los protocolos de movilidad, puesto que el terminal no es

participe del proceso de señalización ya que la red es quien realiza el intercambio de mensajes con los agentes de movilidad. Por ende, la sobrecarga y el número de mensajes intercambiados con los agentes de movilidad producto del arribo a una nueva red se ven reducidos, con lo que se obtiene un mejor uso de los recursos de red, punto vital cuando se habla de un dominio de micromovilidad.

### 2.2.1. Entidades de PMIPv6

Dentro del dominio PMIPv6 se definen dos entidades primordiales para su funcionamiento: el Anclaje de Movilidad Local (LMA, *Local Mobility Anchor*) y la Pasarela de Acceso Móvil (MAG, *Mobility Access Gateway*) [42] [43].

**2.2.1.1. LMA:** esta entidad es el Agente Local (HA, *Home Agent*) para el MN, se encarga de mantener el acceso del MN con el exterior del dominio PMIPv6 y proporciona el prefijo de red para este dominio. Sus funciones están definidas en el RFC 3775, y se agregan algunas características para soportar PMIPv6 en el RFC 5213.

**2.2.1.2. MAG:** esta entidad se encarga de la gestión de los mensajes de señalización de movilidad en representación de los MN conectados a su enlace de acceso, notificando al LMA un evento de asociación o desasociación de un MN.

Así mismo para el correcto funcionamiento de PMIPv6, es necesario establecer comunicación entre el LMA y el MAG, para esto se definen las siguientes direcciones IPv6: Dirección del MN en una red Visitada Proxy (Proxy-CoA, *Proxy Care of Address*) y la Dirección del LMA (LMAA, *LMA Address*).

**2.2.1.3. Proxy-CoA:** es la dirección global configurada en la interfaz de salida de la entidad MAG. El LMA ve esta dirección como la dirección del MN en una red visitada (CoA, *Care of Address*) y la registra en la Entrada del Cache de Asociación (BCE, *Binding Cache Entry*) para ese MN.

**2.2.1.4. LMAA:** es la dirección que se configura en la interfaz del LMA. El MAG envía mensajes de Actualización de Asociación Proxy (PBU, *Proxy Binding Update*) a esta dirección que es almacenada en la Lista de Actualización de Asociación (BUL, *Binding Update List*).

El correcto funcionamiento de PMIPv6 está relacionado también con una serie de mensajes que definen los procesos de señalización y se envían entre las entidades

fundamentales del dominio PMIPv6 (LMA - MAG). Los mensajes definidos son: PBU y Confirmación de Asociación Proxy (PBA, *Proxy Binding Acknowledgement*).

**2.2.1.5. PBU:** es un mensaje de petición enviado por el MAG al LMA indicándole la Proxy-CoA del MN asociado, con el fin de establecer un enlace entre el prefijo de red inicial del móvil que está asignado a una interfaz determinada y su actual dirección proxy-CoA. Todas las características de este mensaje están especificadas en el RFC 5213.

**2.2.1.6. PBA:** es un mensaje enviado por la entidad LMA en respuesta a un mensaje PBU emitido por el MAG, indicando el resultado de la Actualización de la Asociación (BU, *Binding Update*). Todas las características de este mensaje están especificadas en el RFC 5213.

Dentro de un dominio PMIPv6 es posible tener múltiples LMA y MAG. La figura 2.3 muestra una topología típica de un dominio PMIPv6 [28].

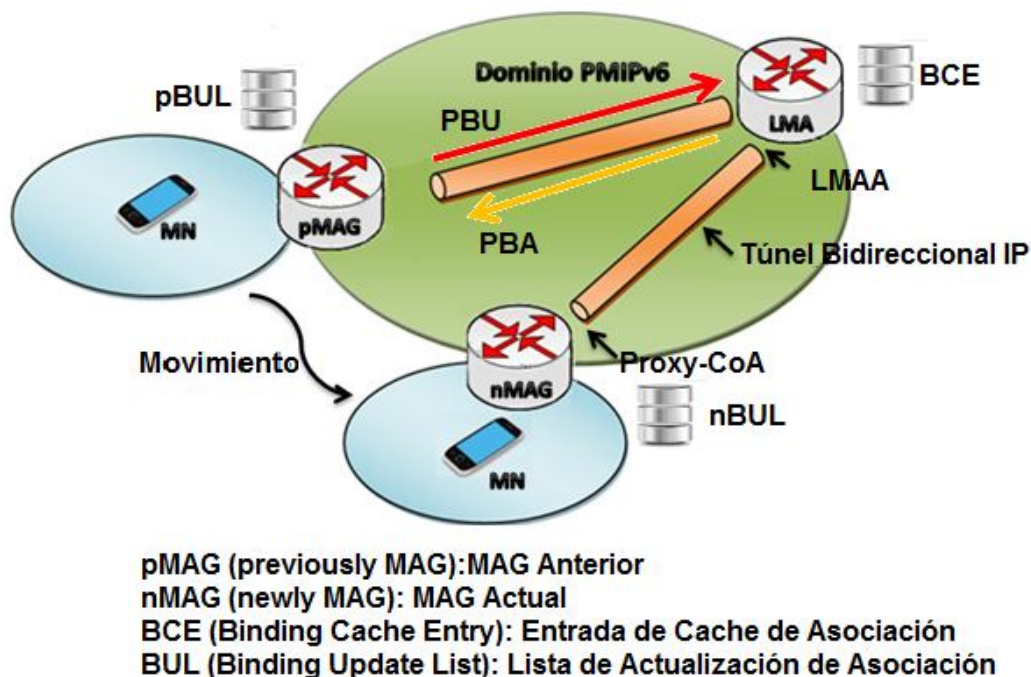


Figura 2.3. Descripción general del dominio PMIPv6. Adaptado de [43].

### 2.2.2. Operación de PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad

Cuando un MN entra en un dominio PMIPv6 y se asocia a un enlace de acceso, el MAG ubicado sobre ese enlace, identifica al MN y ejecuta una autorización de acceso, determinando si el móvil tiene permisos para acceder al servicio de NETLMM [28] [40] [41]. Si la autorización es aprobada, la red se asegura que se utilice cualquier mecanismo de configuración de dirección escogido por el MN, para que el LMA proporcione a través del MAG un conjunto de prefijos de direcciones únicos, que se pueden utilizar para la configuración de las direcciones de las interfaces con la cual está conectado el MN y poder así desplazarse a cualquier lugar dentro del dominio PMIPv6.

En la figura 2.4 se observa el flujo de señalización cuando el MN entra en el dominio PMIPv6. El mensaje de Solicitud de Enrutador (RtrSol, *Router Solicitation*) proveniente del MN puede llegar en cualquier momento después de la asociación del MN y no existe una estricta relación con los otros mensajes aquí presentados.

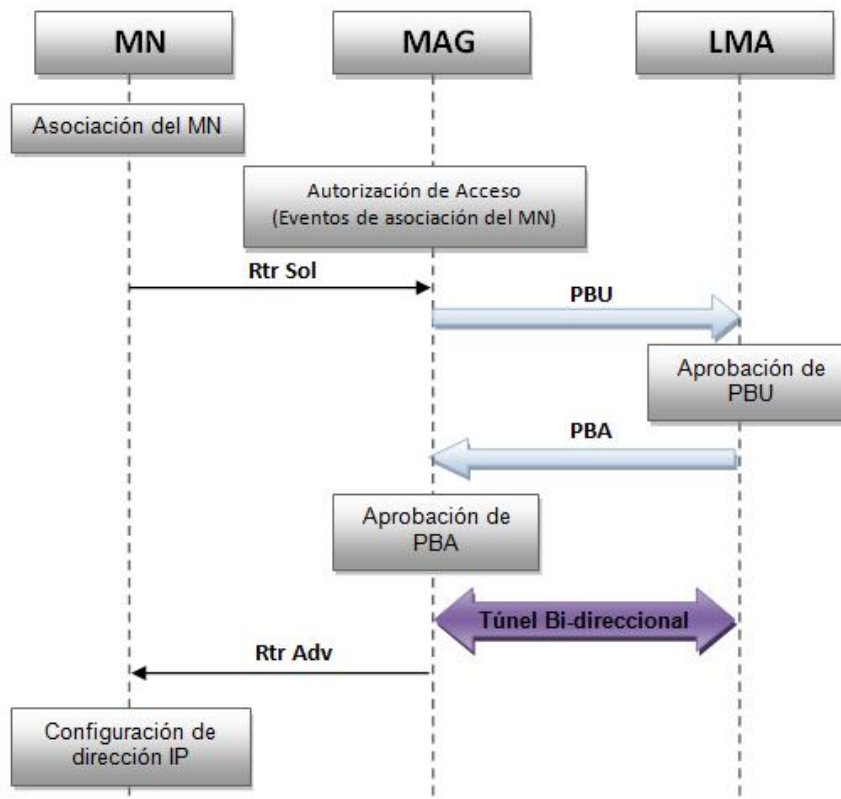


Figura 2.4. Flujo de señalización - Conexión del MN. Adaptado de [28].



1. Una vez que el MAG desea actualizar la ubicación del MN, envía un mensaje PBU al LMA; luego de aceptar este mensaje, el LMA envía un mensaje PBA donde incluye el prefijo de red local asignado al móvil, creando una BCE y estableciendo el túnel bidireccional, al adicionar un *tunnel header*<sup>13</sup> tal como se describe en el RFC 2473 con punto final en la dirección *Proxy-CoA* (MAG).
2. Este último, al recibir el mensaje PBA del mismo modo establece el túnel bidireccional con punto final en la dirección LMAA (LMA) y se prepara para enviar el tráfico del MN por este túnel. Así el MAG tiene toda la información necesaria para emular el enlace local del MN.
3. EL MAG envía mensajes de Anuncio de Enrutador (RtrAdv, *Router Advertisement*) al MN que se encuentra sobre el enlace de acceso. El MN, al recibir este mensaje, inicia la configuración de sus interfaces basándose en los modos que se permiten sobre el enlace de acceso como se indicó en el mensaje RtrAdv.
4. El LMA recibe los paquetes enviados al MN por parte de cualquier nodo dentro o fuera del dominio PMIPv6, para luego enviarlos al MAG a través del túnel bidireccional establecido previamente.
5. El MAG recibe estos paquetes en el otro extremo de dicho túnel, elimina el encabezado extra y envía los paquetes al MN. El tráfico de datos dirigido a cualquier nodo en Internet por parte del MN será recibido por el MAG y enviado al LMA utilizando el túnel bi-direccional. Del mismo modo, el LMA recibe el paquete en el otro extremo, quita el encabezado extra y enruta el paquete al destinatario correspondiente.

### 2.2.3. *Handover* en PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad

La decisión de un MN de cambiar de MAG se basa en la potencia de la señal recibida y la disponibilidad de recursos en la nueva red. Los Puntos de Acceso (AP, *Access Point*) disponibles se pueden identificar con antelación basándose en el ancho de banda, la latencia, la pérdida de paquetes y el tiempo de espera para las conexiones [40] [41] [42]. La figura 2.5 sintetiza el proceso que se realiza durante el *Handover* en un dominio PMIPv6.

<sup>13</sup> *Tunnel Header*: es un encabezado extra que se adiciona al paquete IPv6, a fin de encapsular el paquete original sobre el túnel IP-sobre-IP.

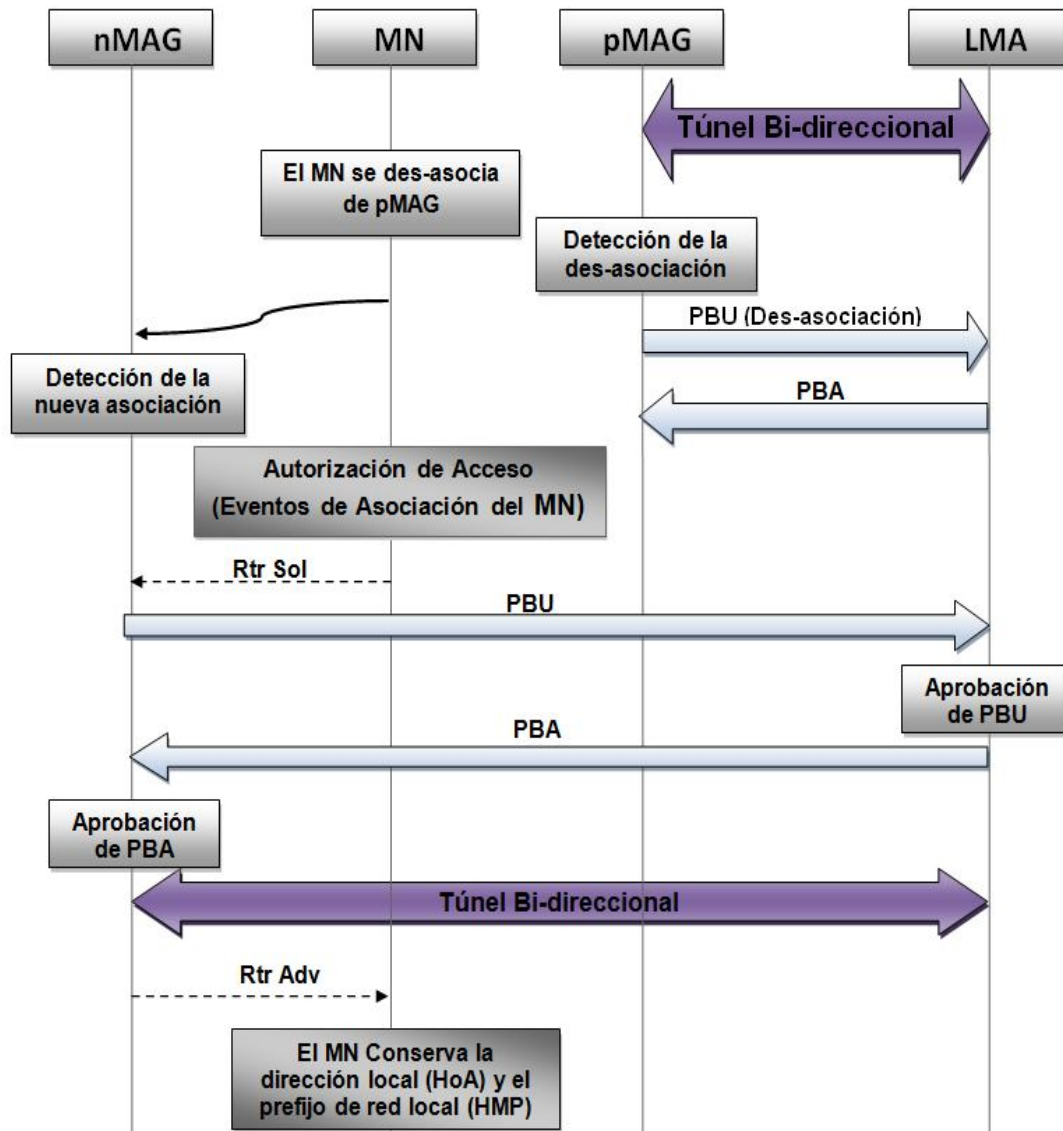


Figura 2.5. Flujo de señalización – *Handover* en PMIPv6. Adaptado de [28].

1. El MN está asociado al pMAG y tiene una sesión establecida a través de un túnel entre el pMAG y el LMA. El MN inicia el desplazamiento hacia el área de cobertura del nMAG, disminuyendo el nivel de intensidad de la señal del pMAG.
2. En este instante, se inicia el proceso de *Handover* que es ejecutado en tres fases: Exploración, Autenticación y Re-asociación [44] [45].

- El proceso de *Handover* se atribuye a la gestión de movilidad, cuando la fuerza de la señal y la relación Señal/Ruido<sup>14</sup> (S/N) se degrada y se inicia el *Handover* de capa 2<sup>15</sup>. En PMIPv6, inmediatamente el MN se desconecta del pMAG/LER, se pone en funcionamiento el *Handover* de capa 2 y de capa 3<sup>16</sup>.
  - En este punto el MN no puede comunicarse con el pMAG y se inicia la fase de exploración; hay dos métodos en esta fase: Activo y Pasivo. En el método Pasivo el MN solo espera escuchar periódicamente señales transmitidas por los MAG vecinos; en el método Activo, el MN envía mensajes de prueba en cada canal en su lista y recibe la respuesta de MAG en su rango de cobertura.
  - Cuando la estación encuentra su nuevo MAG se inicia la fase de autenticación mediante el envío de un mensaje de autenticación.
  - Una vez autenticado, el MN puede enviar el mensaje de re-asociación (RtrSol).
3. Cuando el MN se des-asocia del enlace con el pMAG, este envía un mensaje PBU al LMA con el fin de actualizar el registro BCE del MN. En ese momento el LMA espera un tiempo limitado después de recibir el mensaje, para que el nMAG actualice esta asociación en caso de que el MN se haya asociado a su interfaz, si esto no sucede, esta asociación se eliminará del BCE.
  4. El LMA envía un mensaje PBA como respuesta al PBU enviado por el pMAG que cancela el registro BCE del MN.
  5. Una vez que el MN envía el mensaje de re-asociación al nMAG, este detecta el evento y envía un mensaje PBU al LMA, quien recibe la notificación y envía un mensaje PBA incluyendo el prefijo de red local que se registrara como la *Proxy-CoA* asociada al MN. Si el evento es exitoso se crea una BCE y se establece el túnel bidireccional entre el LMA y el nMAG.
  6. Los eventos explicados en 3, 4 y 5 de la sección 2.2.2. se realizan nuevamente.

<sup>14</sup> Relación Señal/Ruido: se define en [45] como la relación generalmente expresada en decibelios (dB), de la potencia de la señal deseada a la potencia del ruido coexistente en un punto específico en un canal de transmisión.

<sup>15</sup> *Handover* de capa 2: se produce cuando el nodo móvil cambia de un AP a otro y estos AP están conectados a un mismo enrutador de acceso. Este tipo de *Handover* ocurre en la capa de enlace de datos, así, la dirección IP del nodo no cambia, por tanto no se necesita utilizar ningún mecanismo de movilidad [46].

<sup>16</sup> *Handover* de capa 3: implica un *Handover* de capa de enlace de datos y además un cambio de enrutador de acceso. En este *Handover* se produce un cambio de subred por lo que hay un cambio de dirección IP en la interfaz del nodo, necesitando de algún mecanismos de movilidad [46].

Después de terminar este proceso con éxito el MN conserva su dirección de red local y continua con las sesiones establecidas previamente, este proceso es transparente para el Nodo Corresponsal (CN, *Correspondent Node*), quien no participa en la señalización y no requiere de alguna actualización de información para continuar con la comunicación. No obstante, este proceso es crítico para servicios con requerimientos en tiempo real (VoIP, VoD, IPTV, etc.) cuando el MN realiza múltiples trasposos entre un número elevado de APs [47], pues necesitará asociarse a un nuevo AP durante cada *Handover*; el tiempo empleado para configurar su interfaz y obtener una Proxy-CoA se extiende, incrementando la latencia y la pérdida de paquetes, provocando un deterioro de la comunicación en curso e inclusive se puede llegar a perder la conexión [48].

#### 2.2.4. Síntesis de PMIPv6

En esta sección se sintetizan las funciones, elementos y características que a priori identifican al protocolo PMIPv6 para una posible integración con MPLS.

- **Alcance de movilidad:** PMIPv6 es un protocolo diseñado para desplegarse en un escenario de micromovilidad [28] [49]; necesitando procesamiento rápido en cada enrutador del *backbone* (característica propia de MPLS [18]) para realizar un manejo efectivo de los múltiples *Handover*, típicos de un ambiente de micromovilidad.
- **Infraestructura requerida:** PMIPv6 requiere solo dos elementos de red funcionales (LMA y MAG), que evitan al MN realizar los procesos de señalización involucrados con la movilidad [28]. Por tanto, únicamente estas dos entidades podrían incorporar características de MPLS.
- **Modificación en los terminales:** en un dominio PMIPv6 los MN no necesitan modificación alguna para tener movilidad continua (NETLMM) [27] [28]; además las características de MPLS tampoco deberán ser soportadas en los MN.
- **Soporte de Túneles:** PMIPv6 desde su concepción definió el soporte de túneles IP-sobre-IP conocido como Enrutador de Encapsulamiento Genérico (GRE, *Generic Routing Encapsulation*) [28], brindando la posibilidad de incorporar el soporte de túneles MPLS [12].

Este protocolo se diseñó básicamente para minimizar los problemas presentes en MIPv6, HMIPv6 y FMIPv6, con la condición de dejar al MN fuera de los procesos referentes a señalización de movilidad IP. Sin embargo, a pesar de presentar las ventajas mencionadas es necesario efectuar mejoras a procesos como el retardo del *Handover*, la pérdida de paquetes y la optimización de rutas.

## 2.3. MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING (MPLS)

La Conmutación de Etiquetas Multiprotocolo (MPLS) fue inicialmente presentada por la IETF a finales de 1998, con el propósito de brindar velocidad de procesamiento y reducir el tiempo en que los paquetes permanecen en los enrutadores. Por esta razón se considera a MPLS como una tecnología importante dentro de las redes de datos [50], debido a que mejora el desempeño de los dispositivos, de las subredes y las redes en general.

### 2.3.1. Elementos de MPLS

Dentro de la arquitectura MPLS, es conveniente definir tres elementos que son primordiales para su funcionamiento: Etiqueta (*Label*), Clase Equivalente de Envío (FEC, *Forwarding Equivalence Class*) y Trayecto Conmutado de Etiquetas (LSP, *Label Switched Path*).

**2.3.1.1. Etiqueta:** es un identificador de tamaño fijo que distingue los paquetes IP que pertenecer a una misma clase de tráfico de datos en una red MPLS.

**2.3.1.2. FEC:** es la representación de un conjunto de paquetes que son reenviados sobre la misma ruta a través de la red MPLS. La FEC además de contener la ruta de los paquetes, define el tratamiento que recibirá el paquete al pasar por cada uno de los LSR [29].

**2.3.1.3. LSP:** es un trayecto virtual unidireccional que siguen los paquetes de una misma conexión. Tiene asignado una etiqueta en cada salto y se establece mediante protocolos de enrutamiento o de forma manual [29].

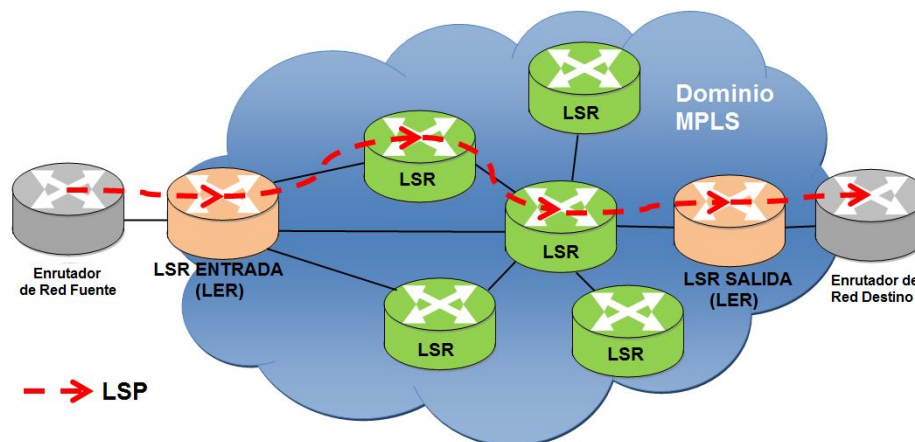
Una vez mencionados estos elementos, se definen en esta arquitectura dos dispositivos que permiten su funcionamiento: el Enrutador de Conmutación de Etiquetas (LSR, *Label Switched Router*) y el Enrutador de Borde de Etiquetas (LER, *Label Edge Router*), a continuación se menciona brevemente su función dentro de MPLS.

**2.3.1.4. LSR:** es un enrutador localizado en el *backbone* de la red MPLS, es especializado en reemplazar etiquetas (*SWAP*) y realizar re-envío de paquetes basado en la identificación dada por la etiqueta al flujo de paquetes que ingresan a la red [29].

**2.3.1.5. LER:** es un enrutador ubicado en el borde de la red MPLS, conecta distintas redes de acceso. Es especializado en asignar (*PUSH*) y remover (*POP*) etiquetas de los paquetes IP [29].

Los enrutadores de la red MPLS no necesitan examinar ni procesar el encabezado IP, solo precisan reenviar el paquete dependiendo del valor de su etiqueta, esta es una de las ventajas que tienen los enrutadores MPLS sobre los enrutadores IP, en donde el proceso de reenvío es más complejo [29]. En un enrutador IP cada vez que se recibe un paquete, se analiza su encabezado IP para compararlo con la Tabla de Enrutamiento (*Routing Table*) y ver cuál es el Siguiendo Salto (NH, *Next Hop*). El hecho de examinar el encabezado IP de estos paquetes en cada uno de los puntos de tránsito que deberán recorrer para llegar a su destino final, significa un mayor tiempo de procesamiento en los nodos y por tanto, una mayor duración en el recorrido.

La figura 2.6 muestra un dominio MPLS, donde se puede visualizar sus componentes.



**Figura 2.6. Dominio MPLS. Adaptado de [29].**

La reducción en el tiempo de procesamiento se refleja tras la inserción de la etiqueta entre el encabezado de Nivel de Enlace (Nivel 2) y el encabezado de Nivel de Red (Nivel 3) del modelo OSI. La etiqueta está conformada por 32 bits de longitud, distribuidos en cuatro campos, cada uno con una función específica, el manejo de cada uno de los campos de esta etiqueta se queda por fuera del alcance de este trabajo, en [51] [52] [53] se da una explicación más detallada.

La figura 2.7 muestra cada uno de los campos de la etiqueta MPLS.

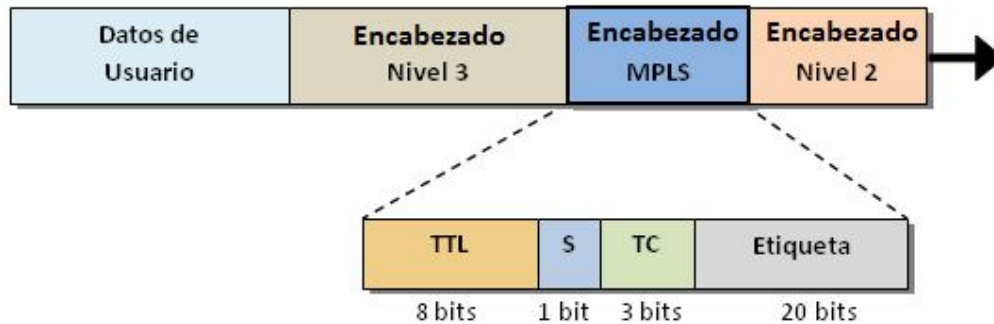


Figura 2.7. Formato de etiquetas MPLS. Adaptado de [54] [55].

### 2.3.2. Establecimiento de un LSP

Para el establecimiento de un LSP en la red MPLS se requieren de la Asignación y la Distribución de Etiquetas.

#### 2.3.2.1. Asignación y Distribución de Etiquetas

La decisión de asignar una etiqueta a un FEC particular, es determinada por el LSR - *Downstream* (localizado en el sentido opuesto al flujo de datos), quien le informa al LSR - *Upstream* (localizado en el sentido del flujo de datos) que debe asignar una etiqueta para este FEC; por tanto la asignación de etiquetas se realiza en sentido contrario al flujo de datos.

La figura 2.8 muestra el mecanismo de Asignación de Etiquetas.

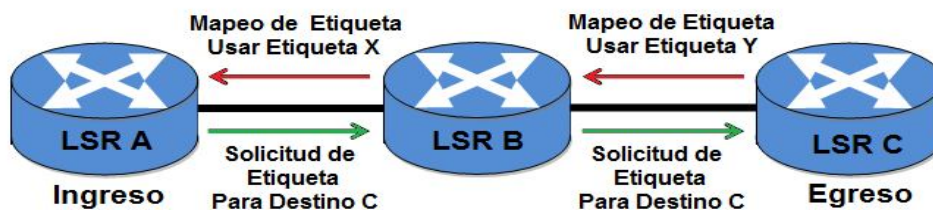


Figura 2.8. Mecanismo de asignación de etiquetas. Por los Autores.

Una vez asignadas las etiquetas se distribuyen mediante un mecanismo de señalización o protocolo de Distribución de Etiquetas. Existen dos mecanismos de distribución: No Solicitadas en Sentido Descendente (*Unsolicited Downstream*) y Solicitada en Sentido Descendente (*Downstream on Demand*).

- No Solicitado en el Sentido Descendente:** el LSR distribuye la asignación de etiquetas a sus vecinos inmediatos. Un LSR localizado en el sentido opuesto al flujo de datos registra la etiqueta en su Base de Información de Envío de Etiquetas (LFIB, *Label Forwarding Information Base*). Los otros LSR pueden ignorarla o guardarla para su uso futuro. La figura 2.9 ilustra este proceso de asignación de etiquetas.

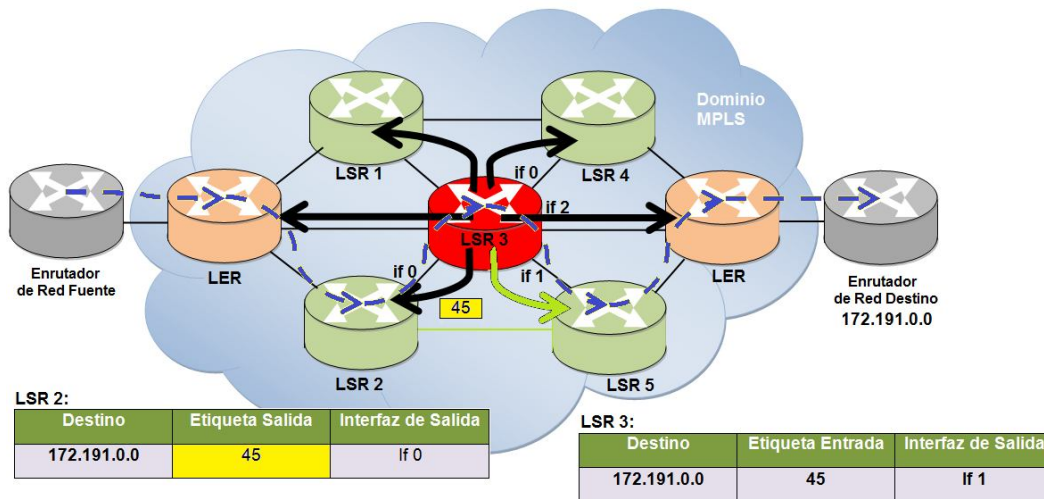


Figura 2.9. Asignación de etiquetas - *Unsolicited Downstream*. Adaptado de [55].

- Solicitado en el Sentido Descendente:** un LSR localizado en el sentido opuesto al flujo de datos, solicita la asignación de etiqueta para un FEC al LSR localizado en el sentido del flujo de datos. En este esquema, el LSR localizado en el extremo del sentido del flujo de datos hace la asociación, pero no la distribuye hasta que se lo solicita en forma explícita un LSR localizado en sentido contrario al flujo de datos. La figura 2.10 ilustra este proceso de asignación de etiquetas.



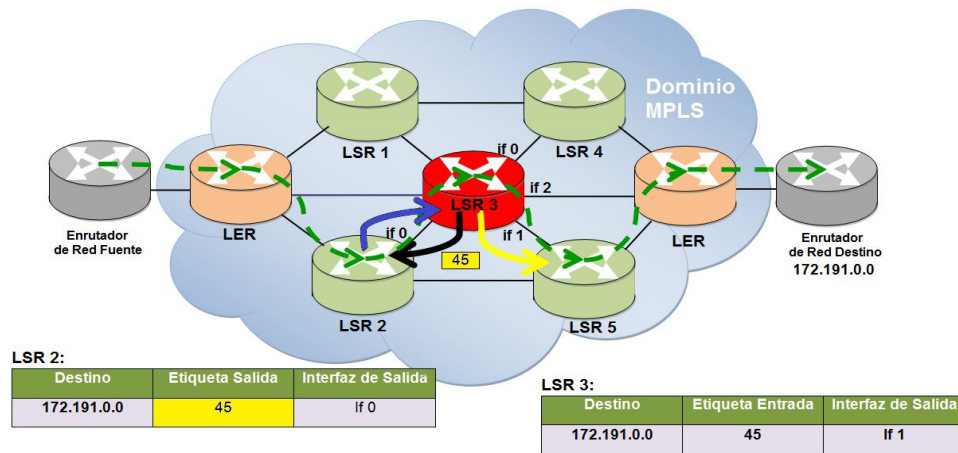
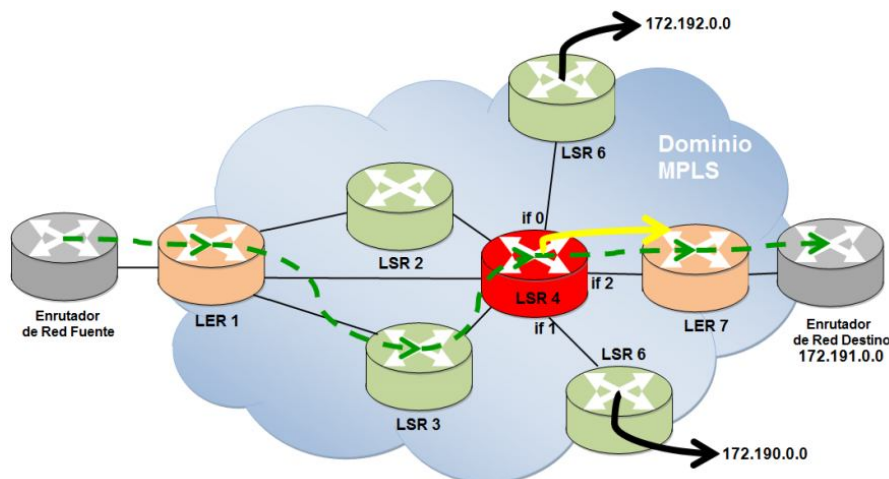


Figura 2.10. Asignación de etiquetas - Downstream on Demand. Adaptado de [55].

Después de que un LSR le asigna una etiqueta a un FEC, el LSR registra esta acción en su tabla de enrutamiento de etiquetas y la distribuye a los LSR adyacentes, para el registro en su LFIB, esto hace posible el establecimiento de un LSP mediante el uso del Enrutamiento Salto por Salto (*Hop-by-Hop Routing*) o el Enrutamiento Explícito (*Explicit Routing*).

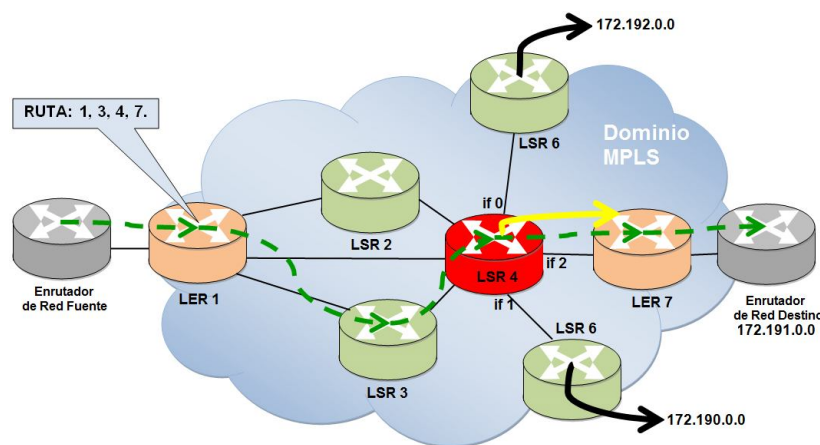
- **Enrutamiento Salto a Salto:** donde cada LSR selecciona independientemente el próximo salto para un FEC determinado (similar al método de enrutamiento de redes IP) [29] [55]. La figura 2.11 muestra el enrutamiento Salto a Salto.



La Figura 2.11. Enrutamiento Salto a Salto. Adaptado de [55].

- **Enrutamiento Explícito:** donde cada LER de entrada determina la secuencia explícita de saltos desde la entrada hasta la salida [29] [55]. El encaminamiento explícito puede clasificarse en:
  - ✓ **Estricto (*Strict*):** es aquella ruta que incluye todos los nodos, nodos abstractos y sistemas autónomos por los que pasa y el orden establecido.
  - ✓ **Tolerante (*Loose*):** es aquella ruta en la que se pueden incluir algunos nodos necesarios para alcanzar el destino específico.

La figura 2.12 muestra el Enrutamiento Explícito.



La Figura 2.12. Enrutamiento Explícito. Adaptado de [55].

Una vez asignadas las etiquetas, también se pueden distribuir mediante un protocolo de Distribución de Etiquetas; entre los protocolos existentes se destacan principalmente: el Protocolo de Distribución de Etiquetas (LDP, *Label Distribution Protocol*) y el Protocolo de Reserva de Recursos (RSVP, *Resource Reservation Protocol*).

- **Protocolo de Distribución de Etiquetas - LDP**

Es un protocolo usado para establecer y mantener la distribución de etiquetas para un LSP asociado con un FEC. El establecimiento de un LSP se realiza salto a salto o a través de una ruta explícita, de forma solicitada o no solicitada y en sentido contrario al flujo de datos, a través de los LSR que pueden o no ser adyacentes, usando una sesión LDP que opera sobre TCP para garantizar confiabilidad en el intercambio de etiquetas [56]. Este proceso se realiza utilizando los mensajes que se presentan en la tabla 2.1.

En LDP un LSR envía periódicamente mensajes *Hello* a todos los LSR de la red para anunciarse; en seguida establece y mantiene activa una sesión con un par LDP, a través del envío de un mensaje *Initialization* y *Keep alive* respectivamente. Para el establecimiento de un LSP, LDP realiza el envío de un mensaje *Label Request* a los destinos, solicitando una etiqueta para un FEC particular; una vez el destino reciba este mensaje, podrá responder a la solicitud con un mensaje *Label Mapping* que contiene la etiqueta para dicho FEC.

Categoría	Descripción	Nombre
<b>Notificación</b>	Notificaciones sobre un error o recomendaciones sobre el estado de la sesión.	<i>Notification</i>
<b>Descubrimiento</b>	Permiten anunciar y mantener la presencia de un LSR en la red.	<i>Hello</i>
<b>Sesión o Adyacencia</b>	Encargados de establecer, mantener y terminar una sesión LDP.	<i>Initialization</i>
		<i>Keep Alive</i>
		<i>Address</i>
		<i>Address Withdraw</i>
<b>Anuncio</b>	Encargados de crear, cambiar y borrar asignaciones de etiquetas para un FEC.	<i>Label Mapping</i>
		<i>Label Request</i>
		<i>Label Withdraw</i>
		<i>Label Release</i>
		<i>Label Abort Request</i>

**Tabla 2.1. Mensajes LDP para asignación de etiquetas. Adaptado de [30] [56].**

Cuando el mensaje *Label Request* llega al LSR de salida, ha solicitado en cada nodo por el que ha pasado la asignación de etiquetas para ese flujo de datos; este LSR de salida responderá con un mensaje *Label Mapping*, que contiene la etiqueta que permitirá identificar ese flujo de datos particular. Cuando un LSR reciba este mensaje *Label Mapping*, sabrá qué etiqueta debe usar como etiqueta de salida para dicho flujo. Una vez hecho esto, el LSR asignará una etiqueta que será la futura etiqueta entrante y enviará su mensaje *Label Mapping* al siguiente LSR. Este proceso se repite hasta que el mensaje llegue a la fuente. En ese momento se puede decir que se ha establecido el LSP.

- **Protocolo de Reserva de Recursos - RSVP**

Es un protocolo de señalización diseñado para el establecimiento y mantenimiento de reserva de recursos, siendo utilizado tanto por *hosts* como por enrutadores para pedir o entregar niveles específicos de QoS para los flujos de datos particulares. RSVP define cómo deben hacer las reservas de recursos y cómo liberar los recursos reservados. Las operaciones generalmente dan como

resultado una reserva de recursos en cada nodo a lo largo de una ruta [57]. Debido a que puede ser empleado para transportar todo tipo de información, se propuso su uso en MPLS.

El Protocolo de Reserva de Recursos con extensión de Ingeniería de Tráfico (RSVP-TE, *Resource Reservation Protocol – Traffic Engineering*), es una extensión de RSVP propuesto para implementarse en MPLS; RSVP-TE es un protocolo de señalización que pretende garantizar servicios a flujos de datos particulares, a través de mecanismos de QoS, reserva de recursos, definición de políticas para el tratamiento de paquetes, establecimiento de rutas explícitas, etc. Además es el encargado de la construcción del LSP, ofreciendo escalabilidad y robustez a la transmisión de información [58], a través de una ruta explícita, de forma solicitada y en sentido contrario al flujo de datos.

Dentro del funcionamiento de RSVP-TE, se utiliza los mensajes que se presentan en la tabla 2.2.

Descripción	Tipo de mensaje
<b>Solicitud de reserva</b>	<i>Path</i>
<b>Mensaje de reserva</b>	<i>Resv</i>
<b>Rta. de error a PATH</b>	<i>Path_Err</i>
<b>Rta. de error a RESV</b>	<i>Resv_Err</i>
<b>Tumbar el camino PATH</b>	<i>PathTear</i>
<b>Tumbar el camino RESV</b>	<i>ResvTear</i>
<b>Msg. Confirmación res.</b>	<i>ResvConf</i>

**Tabla 2.2. Mensajes de RSVP-TE para asignación de etiquetas.**  
Adaptado de [57] [58].

Para el establecimiento de un LSP, RSVP-TE realiza el envío de un mensaje PATH a los destinos, una vez el destino reciba el mensaje PATH, podrá responder a la solicitud con el envío de un mensaje RESV. El mensaje PATH solicita los recursos necesarios que un flujo particular requiere, el mensaje RESV confirma que los recursos han sido reservados [59].

Cuando el mensaje PATH llega al LSR de salida, ha solicitado en cada nodo por el que ha pasado, la reserva de recursos para ese flujo de datos; este LSR de salida responderá con un mensaje RESV, que contiene la etiqueta que permitirá identificar ese flujo de datos particular. Cuando un LSR reciba este mensaje RESV, sabrá que etiqueta debe usar como etiqueta de salida para dicho flujo. Una vez hecho esto, el LSR asignará una etiqueta que será la futura etiqueta entrante y enviará su mensaje RESV al siguiente LSR. Este proceso se repite hasta que el mensaje llegue a la fuente. En ese momento se puede decir que se ha establecido el LSP.

### 2.3.3. Funcionamiento MPLS

Para entender el funcionamiento de MPLS, es necesario comprender la relación entre las etiquetas, los LSP y los FEC. La división del tráfico en FEC es la característica principal de MPLS, cada FEC viaja por medio de un LSP dentro del dominio MPLS. Los paquetes dentro de un FEC tienen validez en este LSP, ya que las etiquetas asignadas a este, únicamente tienen significado local.

El procedimiento necesario para que dos paquetes de datos (a y b) sean enviados a través de una red MPLS se presenta a continuación:

1. Un enrutador fuente siguiendo el enrutamiento tradicional IP envía dos paquetes (a y b) a un LSR de ingreso (LER). Al entrar en la red MPLS los paquetes son clasificados en un FEC en particular por el LER; sin embargo, antes de transmitir los paquetes, es necesario establecer un LSP entre los enrutadores de la red MPLS. Este LSP sirve como túnel de transporte a lo largo de la red y determina la cantidad de recursos que se deben reservar para cada FEC, las políticas de descarte y la cola de procesos en todos los LSR [60].
2. Luego, se asignan etiquetas a los paquetes (a y b) para clasificarlos en un FEC particular; se distribuyen estas etiquetas para hacer referencia a la ruta que el FEC debe seguir hasta llegar a su destino [29] [60].
3. En este momento el paquete ya está dentro del dominio MPLS, el LER envía los paquetes con su respectiva etiqueta al siguiente LSR (NH-LSR, *Next Hop - LSR*). Cada LSR tiene una tabla de reenvío para cada LSP que pasa por sus interfaces. La tabla de un LSR de entrada (LER) maneja el FEC, la interfaz de salida y etiqueta de salida, los LSR siguientes manejan etiqueta e interfaz, ambas de entrada y salida [29] [60]. El LSR que recibe el paquete lleva a cabo los siguientes procesos:
  - Lee la etiqueta y el puerto por el que ingresan, desecha la etiqueta de entrada y les añade una nueva etiqueta de salida.
  - Envía el paquete al siguiente LSR dentro del LSP, por la interfaz respectiva, es por ello que las etiquetas solo tienen significado local.
4. Finalmente el LER de salida remueve la etiqueta del paquete entrante, analiza el encabezado IP de dicho paquete para compararlo con la tabla de enrutamiento y ver cuál es el NH, para enviarlo al destino final a través del proceso de enrutamiento IP tradicional [60]. La figura 2.13 ilustra este proceso.

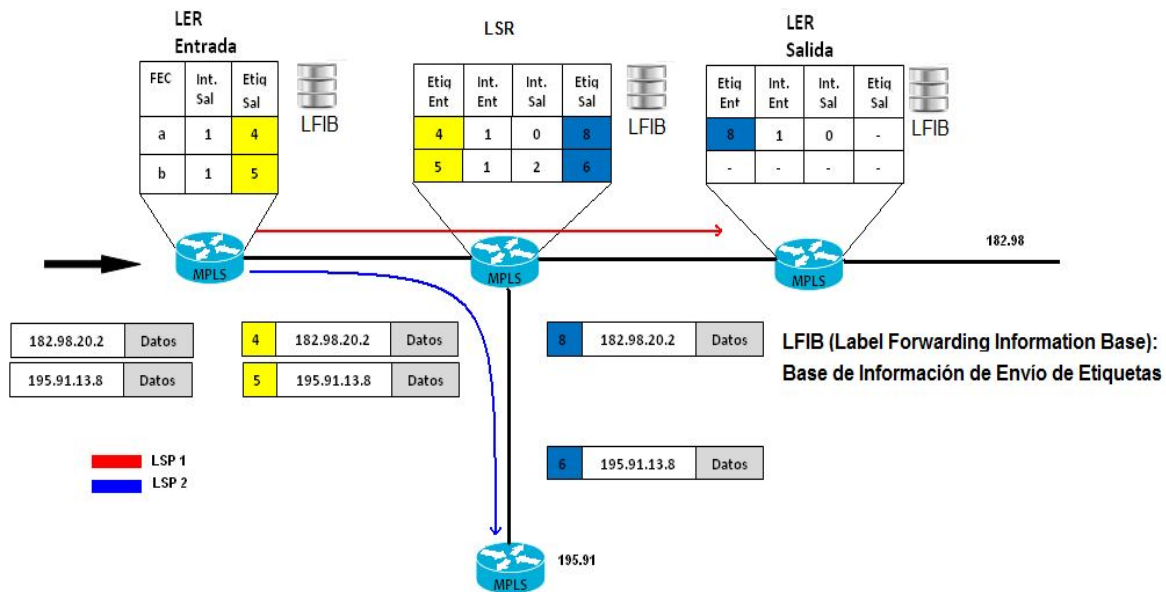


Figura 2.13. Manejo de etiquetas de MPLS. Adaptado de [54].

### 2.3.4. Síntesis de MPLS

En esta sección se sintetizan las funciones, elementos y características que a priori identifican la arquitectura MPLS para una posible integración con el protocolo PMIPv6.

- **Despliegue:** MPLS desde su concepción se diseñó para usarse como tecnología de transporte en los *backbone* de las redes, realizando un procesamiento rápido de paquetes en cada enrutador [50].
- **Infraestructura requerida:** MPLS solo requiere dos elementos de red, el LSR y el LER.
- **Modificación de los elementos:** los enrutadores que se encuentren en el borde del dominio MPLS (LER), podrían incorporar características de PMIPv6 [14 - 20], los demás enrutadores deberán soportar características normales MPLS.
- **Soporte de túneles:** el normal funcionamiento de MPLS permite la creación de rutas virtuales con el fin de conmutar los paquetes entre los destinos; esta característica tiene mayor eficiencia que el enrutamiento tradicional IP, por tanto es una estrategia a considerar dentro de PMIPv6 [54].

## 2.4. CARACTERÍSTICAS A CONSIDERAR PARA INTEGRAR PMIPv6 Y MPLS

La tabla 2.3 resume las características a tener en cuenta, tanto de PMIPv6 como de MPLS para establecer una estrategia de integración, la cual permita determinar la viabilidad de integrar características de MPLS y de PMIPv6.

Consideraciones de integración	PMIPv6	MPLS
<b>Entidades a operar</b>	LMA - MAG	LER - LSR
<b>Despliegue</b>	Red de acceso	Red de transporte
<b>Alcance</b>	Micromovilidad	<i>Backbone</i>
<b>Procesos a considerar</b>	<i>Handover</i> Gestión de Movilidad IPv6 Mensajes de Movilidad IPv6	Establecimiento de LSP Conmutación de etiquetas

**Tabla 2.3. Consideraciones de Integración. Por los Autores.**

En este capítulo se abordó la descripción de las características más importantes de los protocolos en cuestión a fin de identificar los elementos destacados de cada uno de ellos. PMIPv6 mejora el *Handover* de MIPv6, área que sigue en continuo estudio buscando optimizar la eficiencia y el desempeño de este proceso con la incorporación de características de otros protocolos. MPLS es una tecnología que permite optimizar el procesamiento de paquetes mediante el uso de etiquetas y el establecimiento de rutas (túneles MPLS), característica importante a considerar dentro del funcionamiento de PMIPv6, para contribuir en la reducción del tiempo empleado al configurar la interfaz y adquirir una nueva dirección cuando un MN cambie su punto de acceso a la red. Esto lleva a analizar la viabilidad de integrar características de MPLS y de PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad.

El siguiente capítulo identifica y sintetiza los factores técnicos que permitan establecer una hipótesis con la cual llevar a cabo una estrategia de integración de los protocolos presentados en este apartado, para determinar el impacto que presente en un entorno de movilidad IP.

### 3. INTEGRACIÓN PMIPv6 y MPLS

A partir de las características, funciones y elementos de MPLS y PMIPv6 descritas en el capítulo anterior, en este se presenta, los argumentos que permiten asumir la posibilidad de integración de PMIPv6 y MPLS. La posibilidad de integración de estos protocolos se considerará desde la perspectiva semántica y de sincronización, aspectos fundamentales para lograr una efectiva integración.

#### 3.1. ANTECEDENTES

Para analizar de qué forma es posible integrar los protocolos PMIPv6 y MPLS, se tomó como hipótesis los argumentos y elementos citados en [61], destacando los siguientes aspectos:

- Uso del tipo de Integración semi-suave (superposición).
- Uso de PMIPv6 como protocolo de gestión de movilidad.
- Uso de MPLS como tecnología encargada para el envío de información entre el MAG y el LMA.
- Uso del protocolo RSVP-TE para la distribución de etiquetas y el establecimiento del LSP.
- Sustitución de los túneles IP-sobre-IP propios de PMIPv6, por un LSP bi-direccional (un LSP entre LMA-MAG y otro LSP entre MAG-LMA).
- Adopción de la conmutación de etiquetas de MPLS por parte del LMA y el MAG propios de PMIPv6.
- Apropiación de los componentes de red que definen el dominio PMIPv6/MPLS.



### 3.2. RESTRICCIONES PARA LA INTEGRACIÓN

Definidos los argumentos y elementos que se requiere considerar para realizar la propuesta integración de PMIPv6 y MPLS, es necesario identificar las restricciones que limitan el alcance de la misma:

- Esta propuesta al igual que PMIPv6, brinda soporte a tráfico *unicast*, el soporte de tráfico *multicast*, queda por fuera del alcance de esta integración.
- No se emplea LDP como protocolo de distribución de etiquetas y establecimiento de LSP.
- A pesar de considerar el uso del protocolo RSVP-TE, no se abordan criterios de QoS y TE.
- No se utilizan funciones de restablecimiento de ruta ya que estas funciones no son objeto de estudio de este trabajo.

### 3.3. CONSIDERACIONES PARA LA INTEGRACIÓN

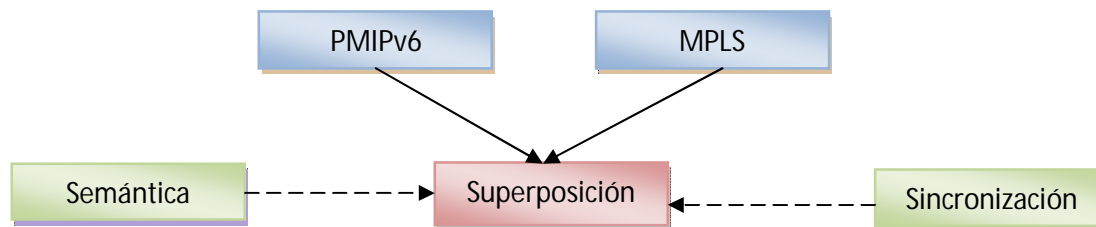
Definidos los argumentos, elementos y las restricciones que se tendrán en cuenta para realizar la propuesta de integración, es necesario especificar las consideraciones que caracterizan este proceso.

- Se considera el manejo de nodos con soporte del protocolo IPv6, ya que hace parte de las NGWN.
- Con el fin de establecer un *backbone* MPLS necesario para el transporte de datos dentro de PMIPv6, el LMA y el MAG deben integrar las funciones que realiza un enrutador de borde MPLS (LER), garantizando la agregación y remoción de etiquetas.
- Dentro del dominio PMIPv6/MPLS, los nodos encargados del transporte de datos deben soportar exclusivamente las funciones que realiza un enrutador MPLS (LSR).
- Es necesario que el túnel bi-direccional entre el MAG y el LMA se utilice para el envío de datos desde el MN al CN y viceversa.
- El establecimiento del LSP bi-direccional, se realiza a través de Enrutamiento Explícito – Estricto; los otros tipos de configuración de LSP quedan por fuera del alcance de este trabajo.

Estas consideraciones permiten visualizar la introducción de las características de MPLS, dentro del funcionamiento de PMIPv6, haciendo que tanto el LMA como el MAG modifiquen su funcionamiento, sin necesidad de alterar la sintaxis con la cual se diseñaron.

### 3.4. INTEGRACIÓN PMIPv6 Y MPLS

Como se citó en 1.2, para el desarrollo de la integración semi-suave se mantuvo a los protocolos operando en sus respectivas capas según el modelo OSI y se necesitó de un ajuste en la semántica y en la sincronización de PMIPv6 (ver figura 3.1). La estrategia de integración se centró en el LMA y el MAG, dos entidades importantes para el funcionamiento de PMIPv6, a las cuales se les adicionan funciones de LER MPLS; a partir de ahora estas se denominarán LMA/LER y MAG/LER respectivamente.



**Figura 3.1. Diagrama general para integración por superposición.  
Por los Autores.**

El túnel bi-direccional IP-Sobre-IP de PMIPv6 establecido entre el LMA y el MAG, es sustituido por el LSP bi-direccional de PMIPv6/MPLS compuesto por dos LSP: uno de ellos que maneja el flujo de datos en sentido ascendente y el otro que maneja el flujo de datos en sentido descendente; MPLS asigna las respectivas etiquetas al flujo de datos que circula desde el LMA/LER hasta el MAG/LER y viceversa, para lograr conformar dicho LSP.

#### 3.4.1. Integración desde la perspectiva semántica

Acorde con los aspectos, las restricciones y las consideraciones de integración, la estrategia desde la perspectiva semántica precisó que el LMA/LER y el MAG/LER conserven las funciones citadas en 2.2.1.1 y 2.2.1.2, con la incorporación de funciones exclusivas de enrutadores LER citadas en 2.3.1.3, a fin de interpretar exactamente los mensajes utilizados en un dominio PMIPv6 necesarios para la construcción de un LSP. La figura 3.2 ilustra este proceso.

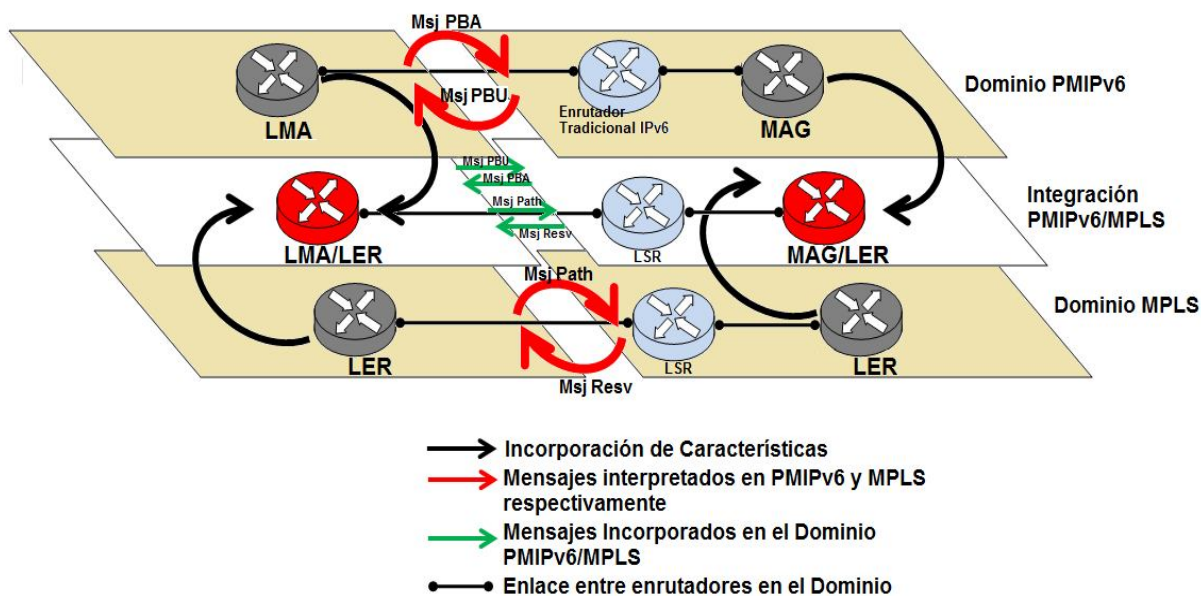


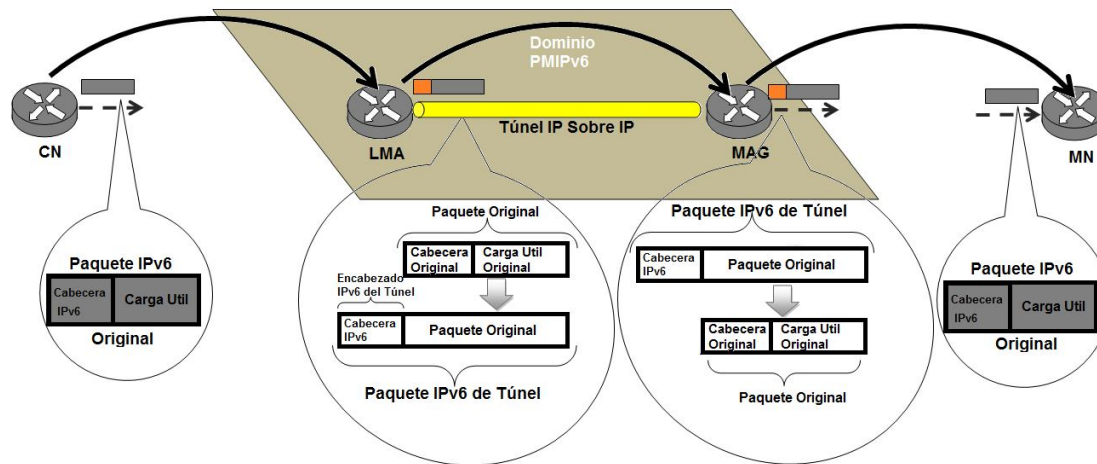
Figura 3.2. Integración desde la perspectiva semántica. Por los Autores.

En esta estrategia no se requirió una interpretación diferente a los campos de la etiqueta MPLS, tampoco se necesitó definir un nuevo algoritmo (sintaxis) que permita realizar la conmutación de etiquetas; fue necesario adaptar dentro del LMA/LER y el MAG/LER, las funciones de conmutación de etiquetas de MPLS que permiten la construcción de un LSP, a fin de sustituir el establecimiento de túneles IP-sobre-IP de PMIPv6.

En el dominio PMIPv6/MPLS, el LMA/LER y el MAG/LER no agregan el encabezado del túnel (*tunnel header*) necesario para realizar el encapsulamiento del paquete IPv6 dentro del túnel IP-sobre-IP (como se menciona en la sección 2.2.2), en este caso, el MAG/LER envía el mensaje PATH al LMA/LER para iniciar la construcción de un LSP; luego, el LMA/LER envía un mensaje RESV al MAG/LER confirmando el establecimiento de dicho LSP que maneja el flujo de datos en sentido ascendente. Este proceso se realiza de igual manera en el sentido LMA/LER - MAG/LER para manejar el flujo de datos en sentido descendente. En la figura 3.3 se aprecia este proceso.

El LMA/LER debe registrar en su BCE todas las direcciones de los MN asociados a un MAG/LER específico y actualizar en su LFIB la etiqueta de entrada, la etiqueta de salida, la interfaz de entrada y la interfaz de salida del LSP que se está estableciendo en sentido MAG/LER - LMA/LER. Del mismo modo, el MAG/LER registra en su BUL la dirección de los MN a los que brinda el prefijo de red y actualiza su LFIB para el LSP que se está estableciendo en sentido LMA/LER - MAG/LER; completando el LSP bi-direccional como se observa en la figura 3.3.

a) Dominio PMIPv6



b) Dominio PMIPv6/MPLS

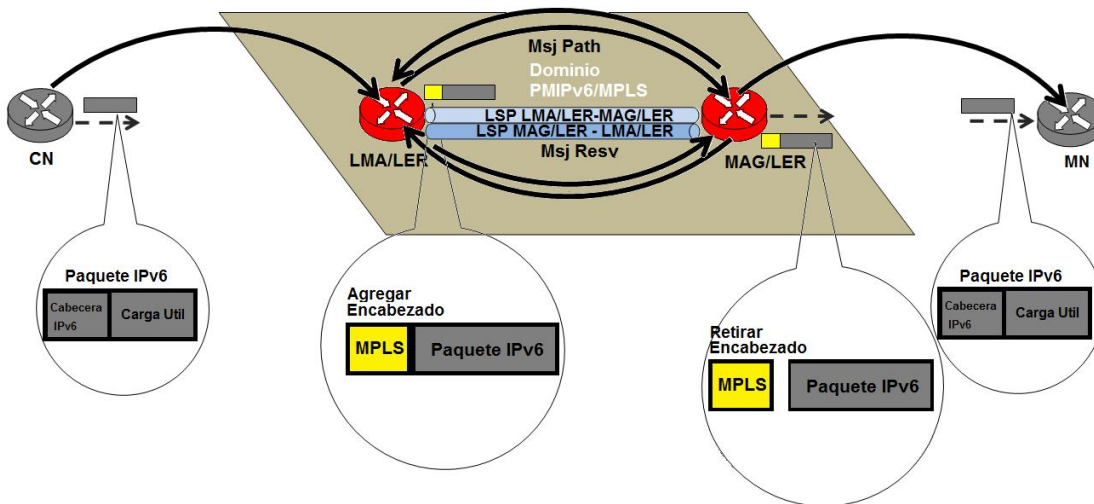
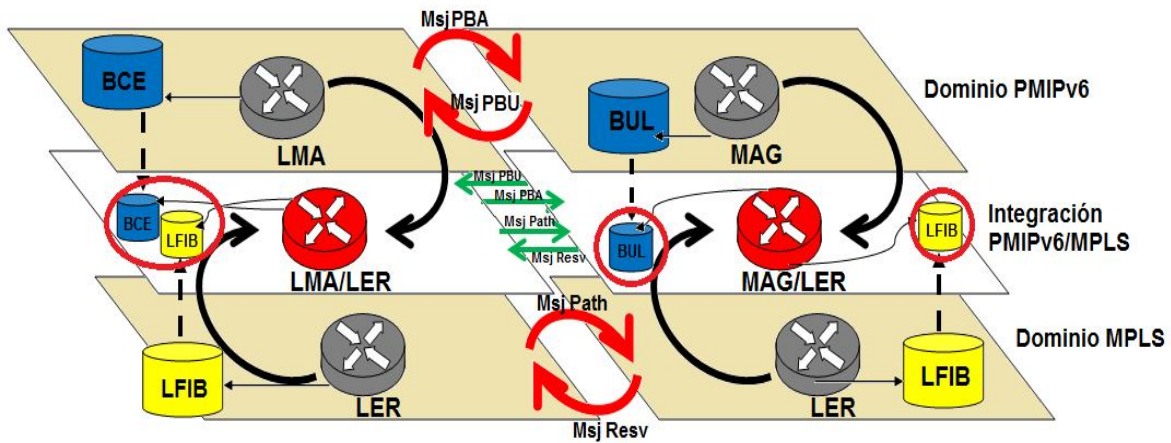


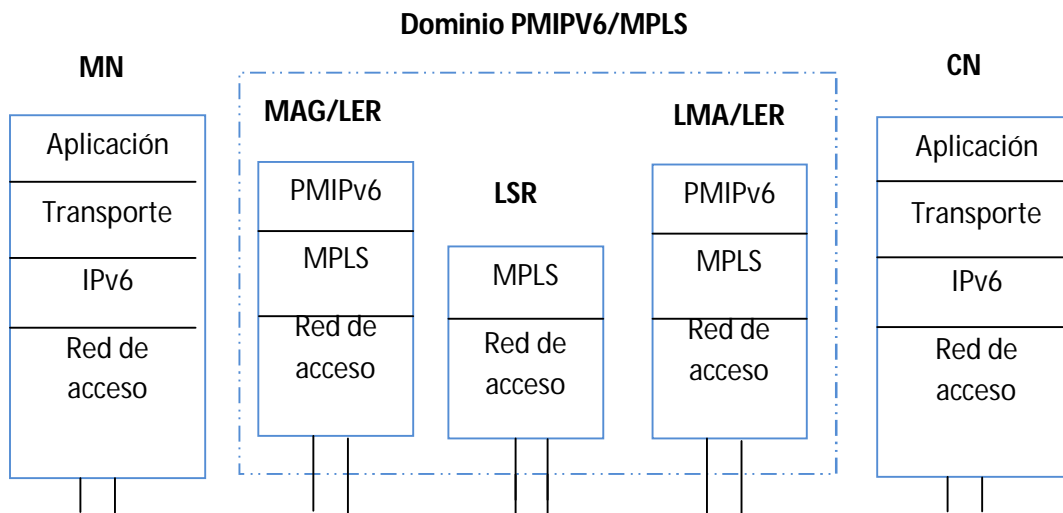
Figura 3.3. Construcción de ruta, dominio PMIPv6 vs dominio PMIPv6/MPLS. Por los Autores.

Dentro del dominio PMIPv6/MPLS la información almacenada en la BCE, la BUL y la LFIB no se integra en una nueva base de datos, se mantienen por separado compartiendo su información, permitiendo que los mensajes PBU, PBA, PATH y RESV, se interpreten con éxito y se envíen al destino correspondiente. La figura 3.4 ilustra este proceso.



**Figura 3.4. Asociación de las bases de datos en PMIPv6, MPLS y PMIPv6/MPLS. Por los Autores.**

Al final de este proceso se obtiene una pila protocolar como se ve en la figura 3.5 en donde a los paquetes IP provenientes del nivel 3, se les agrega una etiqueta MPLS y continúan su funcionamiento en la capa de enlace (nivel 2 de acuerdo a OSI), según el evento correspondiente dentro de cada elemento de red.



**Figura 3.5. Componentes de la pila de protocolos en PMIPv6/MPLS. Tomado de [61].**

Se distingue en esta pila de protocolos la adopción de las características MPLS en el funcionamiento del LMA/LER y el MAG/LER, así mismo es importante destacar que el *backbone* de PMIPv6/MPLS está constituido por LSR y no por enrutadores tradicionales IP. PMIPv6 fue diseñado para proporcionar Gestión de Movilidad Basada en Red (NETLMM), por tanto el MN no debe realizar señalización relacionada con la movilidad, es por ello que no sufre cambios en su pila de protocolos. El CN por no formar parte de esta integración es considerado como un nodo con soporte IPv6 únicamente.

### 3.4.2. Integración desde la perspectiva de sincronización

Como se indicó, la operación del MAG/LER desde la perspectiva semántica debe interpretar el mensaje PBA y el mensaje PATH para operar correctamente; del mismo modo, el LMA/LER debe entender el mensaje PBU y el mensaje RESV para construir el LSP y permitir que lleguen los datos al MN; sin embargo, para que PMIPv6/MPLS opere adecuadamente no es suficiente con interpretar los mensajes, es imprescindible realizar la estrategia desde la perspectiva de sincronización, como se describe a continuación:

1. Un MN dentro de la zona de cobertura de un MAG/LER, solicita asociación para recibir información.
2. Al identificar un evento de asociación de un MN el módulo MAG/LER, debe sincronizar el envío de un mensaje PBU al LMA/LER.
3. El LMA/LER al interpretar el evento de recepción del mensaje PBU, sincroniza el envío de una confirmación con el mensaje PBA, como se indica en 2.2.1.6.
4. El módulo MAG/LER atiende este evento y sincroniza el envío de un mensaje PATH al LMA/LER; identificando el inicio del algoritmo de conmutación de etiquetas que da lugar al establecimiento del LSP.
5. El módulo LMA/LER interpreta el evento del mensaje PATH enviado por el MAG/LER y responde con un mensaje de confirmación RESV, que sincroniza el proceso de construcción del LSP en sentido LMA/LER - MAG/LER.
6. El LMA/LER sincroniza el envío de un mensaje PATH hacia el MAG/LER.
7. El MAG/LER interpreta este evento y sincroniza el envío de un mensaje RESV hacia el LMA/LER que da lugar al proceso de construcción del LSP en sentido MAG/LER - LMA/LER, completando el evento del establecimiento del LSP bidireccional.

8. Una vez construido el LSP bi-direccional, las entidades de PMIPv6/MPLS (LMA/LER y MAG/LER) están listas para enviar y recibir datos. La figura 3.6 ilustra estos eventos.

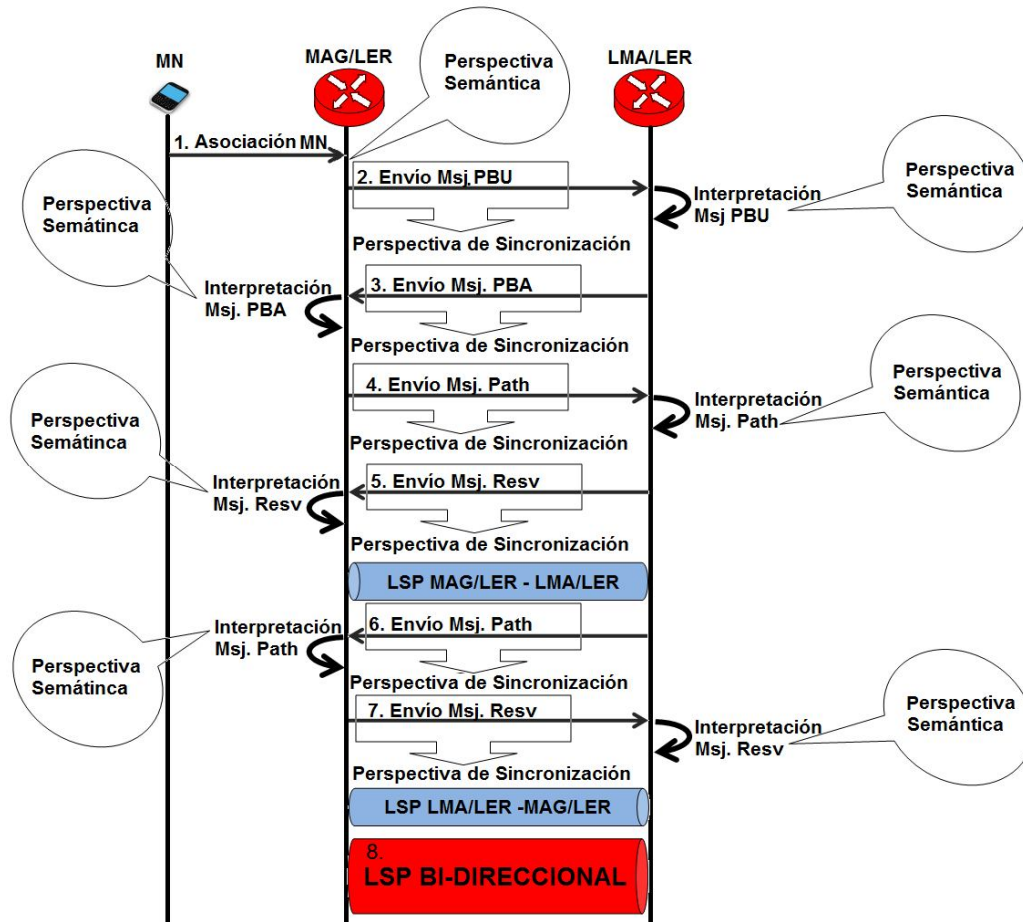


Figura 3.6. Integración desde la perspectiva de sincronización. Por los Autores.

Después de recibir el mensaje PBA, el MAG/LER no ejecuta el proceso de construcción del túnel bi-direccional IP-sobre-IP citado en la sección 2.2.2; por el contrario da lugar a la construcción de LSP bi-direccional.

La construcción del LSP se consideró a partir del RFC 3209 y el tiempo de vida del LSP bi-direccional entre las entidades de PMIPv6/MPLS es determinado por el protocolo RSVP-TE (*softstate*<sup>17</sup>); por tanto el campo del mensaje PBU que determina el tiempo de vida del túnel IP-sobre-IP (como se explica en la sección 5.3 del RFC 5213), se ignora.

<sup>17</sup> *SoftState*: es un enfoque de RSVP-TE en el cual las reservas solicitadas en cada enrutador se deben refrescar cada cierto tiempo mediante mensajes PATH y RESV.

### 3.5. FUNCIONAMIENTO DE LA INTEGRACIÓN

Conocida la estrategia de integración, es necesario definir el funcionamiento de las entidades LMA/LER y el MAG/LER, una vez que el proceso de establecimiento del LSP bi-direccional haya finalizado.

#### 3.5.1. Operación del MAG/LER

Una vez se tenga la asociación registrada de un MN en el BUL, el MAG/LER asigna una etiqueta que identifique el tráfico de datos desde el MN hacia el LMA/LER. Los campos de la etiqueta MPLS: Clase de Tráfico (TC, Traffic Class) y Apilamiento (S, Stack), se fijan en cero y el campo Tiempo de Vida (TTL, *Time to Live*) se fija de acuerdo con RSVP-TE (*softstate*).

Cuando un paquete IP tiene como destino al CN, el MAG/LER lo procesa de la siguiente manera:

- Localiza la dirección IP del MN en las entradas de la lista BUL.
- Identifica la etiqueta del túnel que contiene la LMAA del LMA/LER.
- Agrega al paquete la etiqueta MPLS, y se envía según el procedimiento de MPLS que se describe en el RFC 3031.

Cuando los paquetes IP tienen como origen el MN, el MAG/LER retira la etiqueta MPLS y lo envía con enrutamiento tradicional IPv6 hacia el MN.

#### 3.5.2. Operación del LMA/LER

Con base en el perfil del MN y la dirección IP asignada a este, el LMA/LER asigna una etiqueta para identificar el tráfico de datos dirigido al MN que ha sido registrado en el BCE. El valor del campo etiqueta es asignado por el LMA/LER para identificar el tráfico en este sentido, los campos de la etiqueta MPLS: TC y S, se fijan en cero y el campo TTL se fija de acuerdo con RSVP-TE (*softstate*).

Una vez que un paquete IP tiene como destino al MN, el LMA/LER lo procesa de la siguiente manera:

- Localiza la dirección IP del MN basándose en la asociación dentro del BCE.



- Identifica la etiqueta del túnel que tiene como destino la dirección *Proxy-CoA* del MAG/LER.
- Agrega al paquete la etiqueta MPLS, y se envía según el procedimiento de MPLS que se describe en el RFC 3031.

Cuando los paquetes IP tienen como destino el CN, el LMA/LER retira la etiqueta MPLS y los envía por enrutamiento tradicional IPv6 hacia el CN.

Los componentes de red que definen el dominio PMIPv6/MPLS y la asociación que existe entre cada componente se ilustra en la figura 3.7.

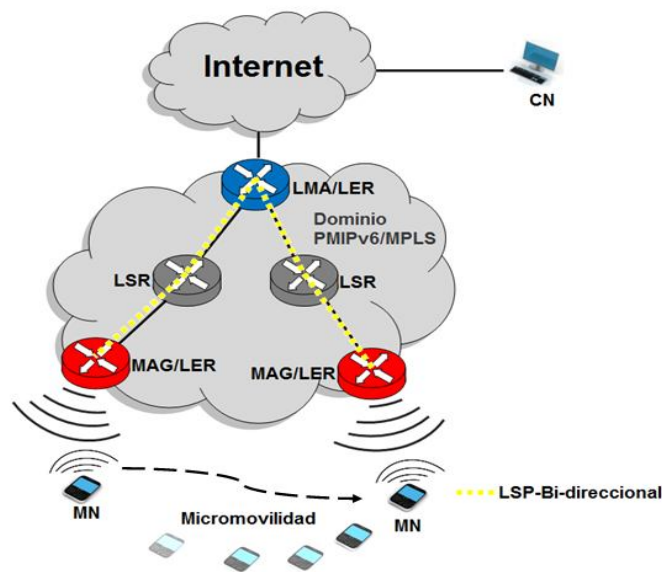


Figura 3.7. Dominio PMIPv6/MPLS. Por los Autores.

La tabla 3.1 sintetiza los componentes que intervienen en el funcionamiento de la integración PMIPv6/MPLS.

Componentes de red	Capacidad MPLS	Capacidad PMIPv6	Operación
MAG/LER	Soportada	Soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enviar el tráfico proveniente del MN hacia el dominio PMIPv6/MPLS y viceversa</li> <li>• Enviar PBU hacia la LMAA del LMA/LER</li> <li>• Asignar y remover etiquetas</li> <li>• Actualizar la BUL y la LFIB</li> <li>• Solicitar el establecimiento del LSP en sentido LMA/LER-MAG/LER</li> </ul>

LMA/LER	Soportada	Soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Enviar el tráfico proveniente del interior de la red PMIPv6/MPLS hacia el exterior y viceversa</li> <li>• Asignar y remover etiquetas</li> <li>• Proporcionar el prefijo de red a este dominio</li> <li>• Mantener la localización de los MN</li> <li>• Actualizar la BCE y la LFIB</li> <li>• Enviar PBA hacia el PCoA del MAG/LER</li> <li>• Solicitar el establecimiento del LSP en sentido MAG/LER-LMA/LER</li> </ul>
LSR	Soportada	No Soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Interconectar el MAG/LER y el LMA/LER</li> <li>• Actualizar la LFIB</li> <li>• Realizar Conmutación de Etiquetas</li> </ul>
MN	No Soportada	Soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar una asociación con el MAG/LER</li> <li>• Enviar datos al CN</li> </ul>
CN	No Soportada	Soportada	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Realizar una asociación con el LMA/LER</li> <li>• Enviar datos al MN</li> </ul>

**Tabla 3.1. Componentes de PMIPv6/MPLS.**

A partir de lo mencionado en las secciones 3.4 y 3.5 el funcionamiento de la integración está relacionado con el establecimiento del LSP bi-direccional como se describe a continuación.

### 3.6. MÉTODO DE ESTABLECIMIENTO DEL LSP BI-DIRECCIONAL

En MPLS, para la transmisión de datos se establece un LSP como se cita en la sección 2.3.1.3. Estos trayectos se pueden establecer de dos maneras: por la detección del tráfico al momento de iniciar la transmisión (*Data-driven*) o antes del inicio de la transmisión de algún flujo de datos (*Control-driven*), tal como que se describe en el RFC 3209.

El método de establecimiento *Data-Driven*, realiza el intercambio de mensajes para la asignación de etiquetas solo en el momento de transmitir datos, creando un LSP únicamente para aquellos datos que se desean enviar. En el método de establecimiento *Control-Driven*, el intercambio de mensajes para la asignación de etiquetas se realiza en cualquier momento, creando un LSP antes de la transmisión de algún paquete de datos.

Para el establecimiento del LSP bi-direccional, se seleccionó en primera instancia el establecimiento *Data-Driven*, que realiza el establecimiento del trayecto después de la asociación de un MN con un MAG/LER particular, cuando finalice el envío de los mensajes de señalización (PBU y PBA). Este método de establecimiento se denominó *LSP-Data-Driven* y permite a los MN que se asocien posteriormente a este MAG/LER, hacer uso de dicho LSP.

A partir del establecimiento del *LSP-Data-Driven*, se consideró el método *Control Driven*, para el establecimiento del LSP bi-direccional antes de la solicitud de asociación que envía un MN a un MAG/LER específico. A este método de establecimiento se le denominó *LSP-Control-Driven* y los MN que se asocien posteriormente a dicho MAG/LER pueden hacer uso de este LSP. Estos métodos de establecimiento se describen a continuación.

### 3.6.1. *LSP-Data-Driven*

- Inicia cuando un MN solicita autorización para pertenecer a la red y se autentica ante esta.
- Una vez el MN se ha autenticado, puede enviar un mensaje de asociación (RtrSol) al pMAG/LER, quien envía un PBU al LMA/LER.
- El LMA/LER acepta el PBU y registra la asociación en el BCE y envía un PBA como confirmación a dicho PBU.
- Cuando el pMAG/LER acepta el PBA, se inicia inmediatamente el proceso de establecimiento del LSP. Primero se establece el LSP en el sentido LMA/LER-pMAG/LER y posteriormente en sentido contrario.
- Una vez se complete el proceso de establecimiento del LSP bi-direccional, el pMAG/LER envía un mensaje de confirmación (RtrAdv) al MN, autorizando su vinculación con este dominio; en este momento la red está lista para transmitir información entre el CN y el MN a través de la conmutación de etiquetas.

El proceso más delicado en un entorno de movilidad es el *Handover* como se cita en la sección 2.2.3, por ello se desea evidenciar el funcionamiento de la integración durante este proceso.

Cuando el MN no puede comunicarse con el pMAG/LER se inicia el proceso de *Handover* que impacta directamente la comunicación del MN con el dominio PMIPv6/MPLS.

- El MN después de des-asociarse del pMAG/LER, busca una re-asociación en el menor tiempo posible con un MAG/LER que se encuentre a su alcance (nMAG/LER).
- El proceso de *Handover* es ejecutado en tres fases: Exploración, Autenticación y Re-asociación como se mencionó en 2.2.3.
- Una vez autenticado, el MN puede enviar el mensaje de re-asociación (RtrSol).

- En este momento se da lugar al establecimiento del LSP desde el nMAG/LER hasta el LMA/LER. La figura 3.8 muestra el flujo de eventos presentes en PMIPv6/MPLS.

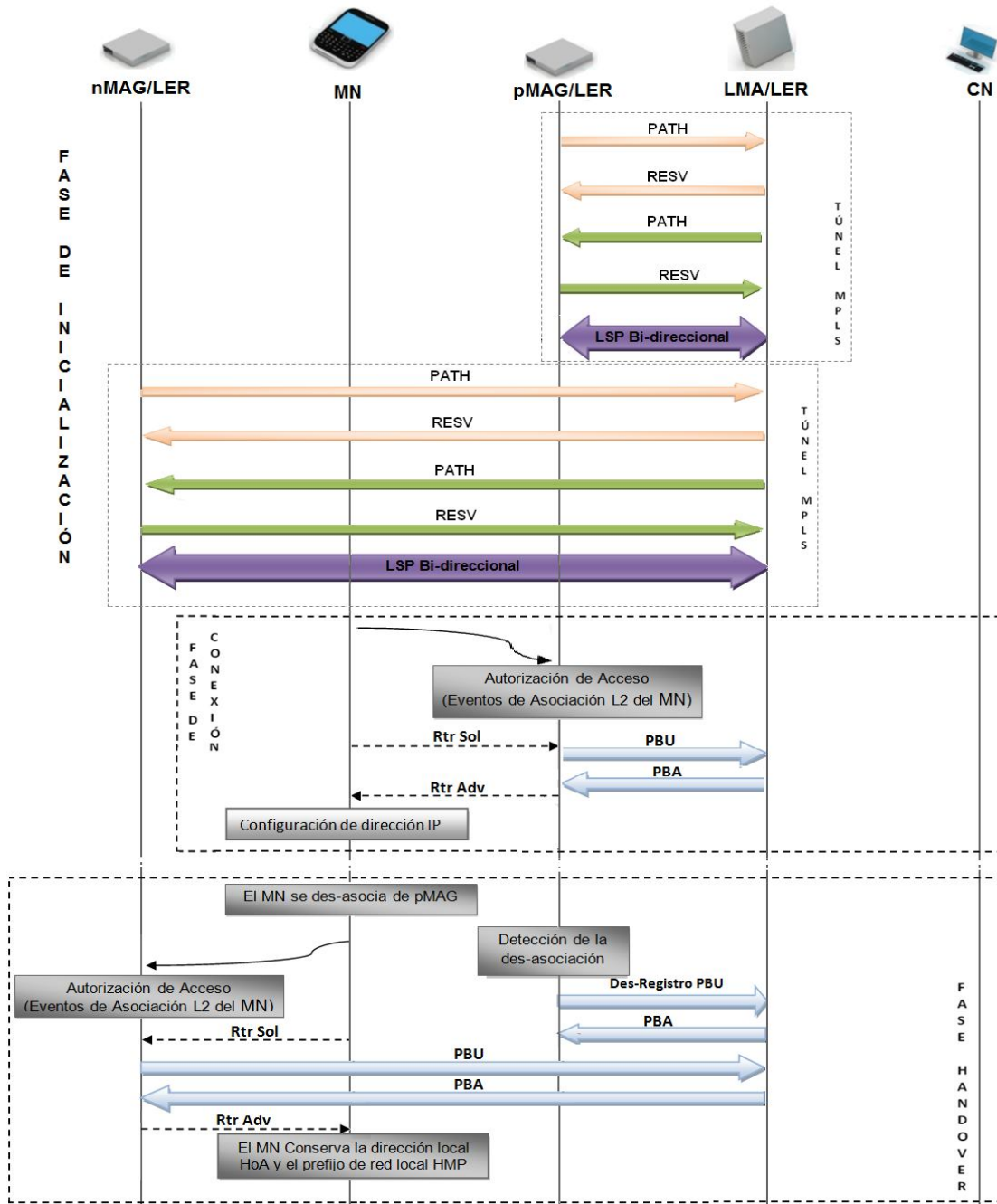


Figura 3.8. Flujo de eventos en PMIPv6/MPLS, con establecimiento de *LSP-Data-Driven*. Adaptad de [61].

En la estrategia de integración que se planteó, se espera mantener activo el LSP bi-direccional (pMAG/LER – LMA/LER), de tal forma que cuando exista un nuevo *Handover* desde nMAG/LER hacia pMAG/LER, no sea necesario establecer un nuevo LSP bi-direccional, ya que se puede generar más tráfico de señalización en la red.

### 3.6.2. LSP-Control-Driven

El LSP bi-direccional se establece antes de que un MN solicite autorización para pertenecer a la red:

- Primero se envían los mensajes correspondientes al establecimiento del LSP, mediante el uso de RSVP-TE y se establece el LSP en el sentido LMA/LER-MAG/LER y luego en sentido contrario.
- Posteriormente, el MN puede autenticarse con la red y enviar un mensaje de asociación (RtrSol) al pMAG/LER.
- Una vez recibido el mensaje de asociación, el pMAG/LER envía un PBU al LMA/LER por medio de la conmutación de etiquetas.
- El LMA/LER acepta el PBU, registra la asociación en el BCE y envía un PBA (por conmutación de etiquetas) como confirmación del mensaje PBU.
- Una vez el pMAG/LER acepta el PBA, envía un mensaje de confirmación (RtrAdv) al MN, autorizando su vinculación con este dominio, en este momento la red está lista para transmitir información entre el CN y el MN, a través de la conmutación de etiquetas.

Cuando el MN no puede comunicarse con el pMAG/LER se inicia el proceso de *Handover* como se explicó en la sección 2.2.3.

- Una vez autenticado, el MN puede enviar el mensaje de re-asociación (RtrSol), dando lugar nuevamente al envío de los paquetes PBU y PBA a través de la conmutación de etiquetas, debido a que el LSP fue establecido en la fase de inicialización de la red.
- Una vez que el proceso de re-asociación es realizado, el MN ya puede enviar y recibir paquetes empleando el LSP bi-direccional.

Del mismo modo, se espera mantener activo el LSP bi-direccional como se citó en la sección 3.5.3. La figura 3.9 muestra el flujo de eventos presentes en PMIPv6/MPLS con *LSP-Control-Driven*.

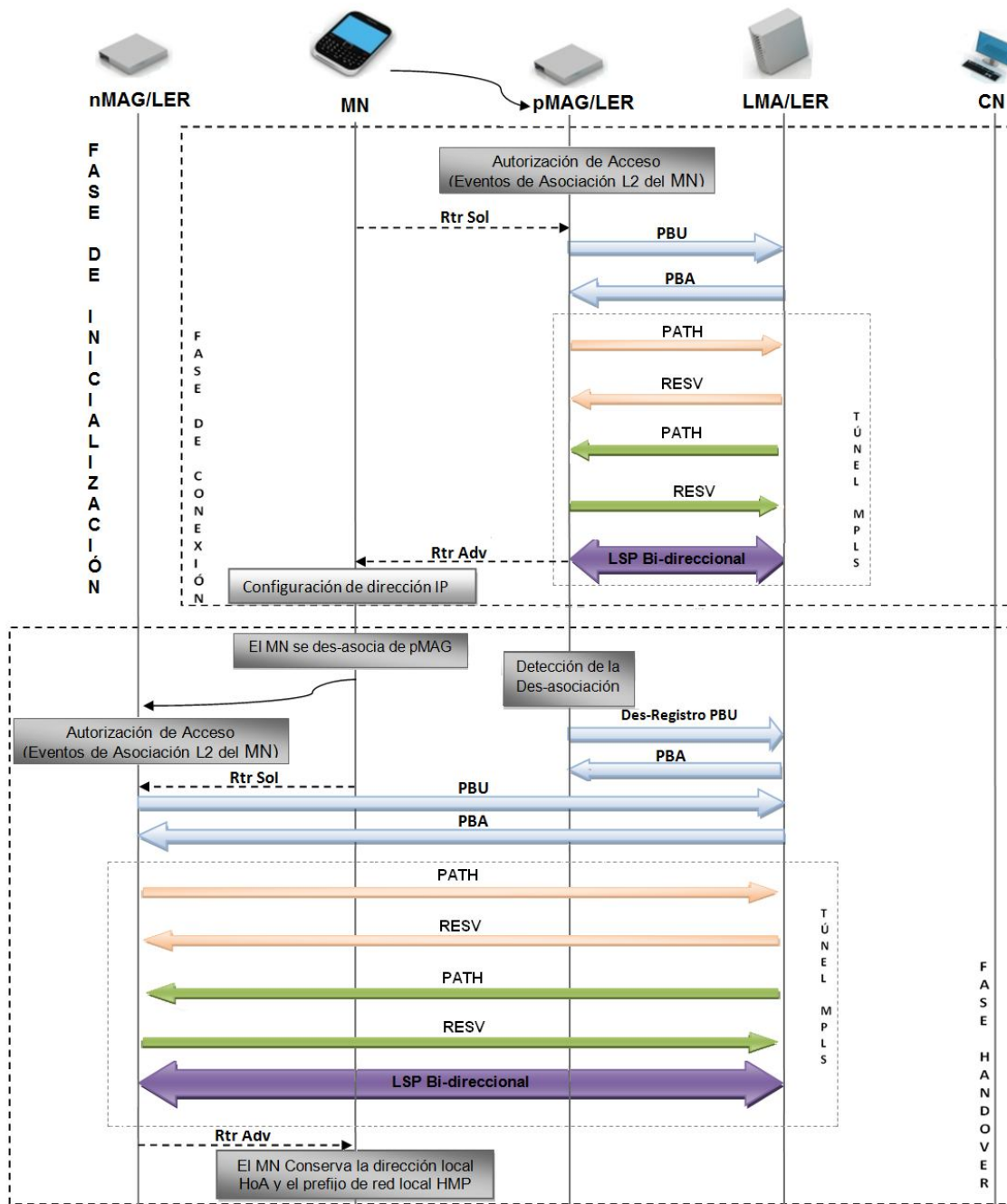


Figura 3.9. Flujo de eventos en PMIPv6/MPLS, con establecimiento de *LSP-Control-Driven*. Por los Autores.

En este capítulo se estableció la posibilidad de integración entre PMIPv6 y MPLS, destacando los elementos funcionales que participan y la forma en la que lo hacen. Con base en la estrategia presentada, el siguiente capítulo analiza la propuesta de integración, realizando las pruebas de simulación a fin de obtener los resultados que evidencien si se tienen o no mejoras en el desempeño de la movilidad IP.

## 4. SIMULACIÓN, PRUEBAS Y RESULTADOS DE LA INTEGRACIÓN ENTRE PMIPv6 Y MPLS

En este capítulo se presenta el análisis de la integración semi-suave PMIPv6/MPLS realizada mediante simulación; para ello se adopta una metodología a fin de seleccionar una herramienta que permita realizar el plan de pruebas y evaluar el impacto que presenta la integración. A partir de los resultados obtenidos se evalúa su funcionamiento y se presenta una tabla comparativa que determina el impacto que tiene la integración en comparación con PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad.

### 4.1. METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN

Para analizar la integración de PMIPv6 y MPLS, se adapta de [62] y [63] una metodología que permita desarrollarla, enfocándose en la simulación. Los pasos definidos para desarrollar metodológicamente la evaluación de la integración son:

- a. **Análisis de las herramientas de simulación:** se exploran algunas herramientas de simulación, para determinar cuál de ellas cumple con los requerimientos mínimos, necesarios para desarrollar y evaluar la integración.
- b. **Definición de los escenarios y casos de simulación:** se definen los escenarios según las facilidades de la herramienta seleccionada y se plantean los casos sobre los cuales se ejecutaran las pruebas de integración.
- c. **Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación:** se definen los parámetros técnicos que conforman los escenarios de simulación.
- d. **Ejecución de las pruebas de simulación:** se ejecuta el plan de pruebas para los escenarios y los casos de simulación previamente definidos.
- e. **Análisis de resultados:** se procede a realizar un análisis de los resultados obtenidos en la simulación, evaluando el impacto que presente la integración.



#### 4.1.1. Análisis de las herramientas de simulación

Es necesario que la herramienta a seleccionar soporte principalmente, requerimientos tales como: la comunicación inalámbrica, la arquitectura MPLS, los protocolos de gestión de movilidad basados en IPv6 y permita la generación de resultados.

Se analizaron cuatro herramientas de simulación que cumplen con los requisitos anteriores, estas son: OPNET, OMNET++, NS-2 y NS-3. A continuación se mencionan algunas características relevantes a tener en cuenta de cada herramienta, para su selección.

##### 4.1.1.1. OPNET (*OP*timized *Network Engineering Tools*)

Es una herramienta de simulación de uso comercial empleada para el análisis de redes de comunicaciones, disponible para los sistemas operativos *Windows*, *Solaris* y *Linux*; cuenta con librerías y módulos muy completos, con la posibilidad de elaborar nuevos módulos para extender sus funciones utilizando el lenguaje de programación C++ [64].

La creación de escenarios se realiza de forma gráfica a través de una serie de atributos configurables; además dispone una amplia lista de protocolos y variables específicas que el usuario puede modificar y estudiar, se destacan *throughput*, *jitter*, retardo extremo a extremo, retardo de permanencia en cola, uso de ancho de banda, pérdida de paquetes y calidad de la transmisión, entre otros [64] [65].

OPNET cuenta principalmente con:

- El módulo *Modeler Wireless* que soporta la simulación de diferentes tecnologías de red inalámbricas, como:
  - Redes celulares (GSM, CDMA, UMTS, WIMAX, LTE, entre otras).
  - Redes Ad hoc.
  - Redes IEEE 802.11x.
  - Redes de Área Personal (PAN, *Personal Area Network*) (*Bluetooth*, *ZigBee*).
  - Redes satelitales.
  
- El módulo MPLS que soporta las características de esta arquitectura como:
  - Configuración de LSP estática y dinámica.
  - Capacidad de re-enrutamiento rápido.
  - Compatibilidad con VPNs de capa de red.
  - TE.

- El módulo para IPv6 que incluye las siguientes características:
  - Direccionamiento Expandido.
  - Implementación de doble pila, IPv4 e IPv6.
  - *Mobile* IPv6.
  - Túneles IPv6.
  - ICMPv6.
  - *Neighbor Discovery*.
  - *Stateless Address Autoconfiguration*.

Este programa es un sistema robusto que permite simular varias áreas, incluyendo las aplicaciones y las redes de telecomunicaciones; sin embargo, se debe crear un módulo para agregar el protocolo PMIPv6, ya que OPNET brinda soporte únicamente para *Mobile* IPv6 [66]. Además, la herramienta es un *software* propietario que presenta un costo elevado por la adquisición de su licencia.

#### 4.1.1.2. OMNET ++ (*Objective Modular Network Testbed in C++*)

Es un simulador basado en eventos discretos orientado a objetos y de código abierto aplicado a la simulación de redes de comunicaciones. OMNET utiliza C++ para implementar módulos simples que realizan funciones específicas de un protocolo, varios módulos simples se unen y forman un módulo compuesto usando un lenguaje de alto nivel (*NED, Network Descriptor*), que además determina la configuración de la simulación [67].

Los módulos que existen para simular en OMNET++ son:

- *INET Framework*: contiene una amplia colección de protocolos de redes cableadas, entre los cuales soporta: UDP, TCP, IPv6, Ethernet, OSPF, la arquitectura MPLS, SCTP, PPP, entre otros.
- *Mobility Framework* (ahora *MIXIM*): contiene una amplia colección de protocolos de redes móviles e inalámbricas, entre los cuales soporta: Wi-Fi, Ad hoc, WSN, 802.11x, AODV, entre otros.
- *Extensible Mobile IPv6 (xMIPv6) Simulation framework* [68]: permite el soporte de movilidad IPv6 y a partir de él se pueden crear módulos de simulación, que tengan como base el funcionamiento de MIPv6 (FMIPv6, HMIPv6, PMIPv6, etc.).

OMNET++ es de distribución gratuita para uso académico, el uso comercial requiere de una licencia. Cuenta con un excelente conjunto de herramientas para el análisis de resultados, donde se incluye gráficas, estadísticas, diagramas de tiempo, filtros, etc.

#### 4.1.1.3. Network Simulator 2 (NS-2)

Es un simulador de eventos discretos usado principalmente en ambientes académicos y de investigación [69]; permite desarrollar y probar protocolos y aplicaciones de red; cuenta principalmente con módulos para el soporte de:

- Redes inalámbricas (IEEE 802.11x, WIMAX 802.16) y Redes satelitales.
- PAN (ZigBee, Bluetooth, Red de Sensores Inalámbrica (WSN, *Wireless Sensor Network*)).
- Protocolos TCP, UDP, OSPF, RIP, AODV, MIPv6, HMIPv6, PMIPv6, entre otros.
- Arquitectura MPLS.
- Enrutamiento *Unicast* y *multicast*.

Los módulos de NS2 están implementados en C++, sin embargo se usa un segundo lenguaje denominado OTcl (*Object-orient Tool Command Language*) con el que se elaboran los *scripts*<sup>18</sup> que definen la topología de red, los elementos que la componen, la configuración y el funcionamiento de las simulaciones [69].

Actualmente existen versiones del simulador conocidas como Todo-en-Uno (*All-in-One*), que integran todas las herramientas para el análisis, interpretación y visualización de la simulación [70]. Sin embargo, es posible realizar el análisis de los resultados de forma manual o con herramientas de terceros. La extensa documentación en línea, permite flexibilidad en la construcción y manejo de los *scripts*.

#### 4.1.1.4. Network Simulator 3 (NS-3)

Es una herramienta de simulación de eventos discretos y de *software* libre bajo la licencia de GNU, dirigido principalmente a la investigación, extiende las características soportadas por su predecesor al permitir adaptar manualmente sus módulos. La implementación de los módulos y la configuración de la simulación se realizan en C++, sin embargo se puede realizar la configuración de la simulación a través Python<sup>19</sup> [71].

NS-3 permite simular gran cantidad de protocolos de cualquier capa del modelo OSI (802.3, 802.11, protocolos de enrutamiento, RTP, TCP, UDP, http, telnet, ftp, cbr, CSMA/CA, entre muchos otros), proporciona simulaciones inalámbricas IP/no-IP, incluye módulos adicionales a los soportados por NS-2, como 4G, LTE y una variedad de protocolos de enrutamiento estático y dinámico como OLSR.

<sup>18</sup> *Script*: es un conjunto de instrucciones almacenadas en un archivo de texto plano, interpretadas línea a línea para su ejecución.

<sup>19</sup> Python: es un lenguaje de programación de alto nivel y de código abierto, utilizado en gran variedad de aplicaciones para integrar sistemas de manera eficaz, es compatible con la licencia pública general de GNU.

NS-3 es compatible con un programador de tareas que facilita interactuar con sistemas reales, donde los usuarios pueden enviar y recibir notificaciones emitidas por los dispositivos de red; así, esta herramienta puede servir como un marco de interconexión para añadir enlaces entre máquinas virtuales [72].

NS-3 mejora los inconvenientes de escalabilidad y procesamiento de NS-2, sin embargo, el soporte del protocolo PMIPv6 aún se encuentra en fase experimental y su escasa documentación está a disposición de la comunidad investigativa con el fin de depurar el protocolo.

La tabla 4.1 sintetiza las características de cada herramienta mencionada anteriormente.

	OPNET	OMNET++	NS-2	NS-3
<b>Soporte PMIPv6</b>	No	No	Si (Mediante Extensión)	Si (Mediante Extensión)
<b>Soporte MPLS</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Soporte Inalámbrico</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Incorporación de funciones (Extensiones)</b>	Desconocido	Si	Si	Si
<b>Animación de simulación</b>	No	Si	Si (Mediante Extensión)	Si (Mediante Extensión)
<b>Módulo gráfico</b>	Si	Si	Si (Mediante Extensión)	Si (Mediante Extensión)
<b>Licencia</b>	Pagada	Libre (académica)	Libre	Libre
<b>Obtención de resultados</b>	Si	Si	Si	Si
<b>Análisis de resultados</b>	Propio de la herramienta	Propio de la herramienta	Herramienta externa	Herramienta externa

**Tabla 4.1. Síntesis de las características de las herramientas de simulación.  
Por los Autores.**

#### 4.1.1.5. Elección de la herramienta de simulación

Después de realizar la exploración de las herramientas de simulación, se encontró que NS-2 y NS-3 soportan PMIPv6 mediante extensión; sin embargo, en OMNET++ es posible crear una extensión con xMIPv6 que conlleve a la implementación de PMIPv6, pero el tiempo demandado en la construcción y validación de este módulo obligan a descartar este simulador.

OPNET es descartada debido al inconveniente con su licencia propietaria, la cual hace necesario considerar fuentes de financiación externas para su consecución, dado que no existen versiones académicas o de prueba, para los módulos MPLS y PMIPv6. La versión académica OPNET-IT GURU es restringida y no contiene los módulos anteriores.

Al evaluar NS-3, se consideró que la extensión que permite implementar y simular PMIPv6 está en una versión experimental que puede presentar fallas, además aún no se tiene incorporado en esta extensión, un módulo para el soporte de redes inalámbricas.

Con base en lo anterior, la herramienta seleccionada fue NS-2 por presentar soporte comprobado de la arquitectura MPLS, de la red inalámbrica IEEE 802.11x y de PMIPv6 como extensión; requerimientos necesarios para el desarrollo de este trabajo.

NS-2 es una herramienta de distribución gratuita, código abierto y cuenta con una extensa y variada documentación en todos los idiomas y disponible en numerosos sitios en Internet, donde diferentes usuarios realizan contribuciones dirigidas a mitigar y mejorar inconvenientes presentes en los módulos y en los procesos de simulación [73].

#### 4.1.2. Definición de los escenarios y casos de simulación

Para analizar el impacto que presenta la integración PMIPv6/MPLS en comparación con el protocolo PMIPv6 en un ambiente de micromovilidad, se proponen 2 escenarios de simulación. El primer escenario considerado “escenario base”, opera con PMIPv6 en su pila de protocolos; el segundo escenario mantiene la misma estructura que el anterior, pero opera en su pila de protocolos con PMIPv6/MPLS, este representa la integración.

En el segundo escenario, el establecimiento del LSP bi-direccional da lugar a dos casos de simulación:

- Primer caso (caso 1), donde el establecimiento del LSP bi-direccional se realiza con *LSP-Data-Driven*, como se explicó en la sección 3.5.3.

- Segundo caso (caso 2), donde el establecimiento del LSP bi-direccional se realiza con *LSP-Control-Driven*, como se explicó en la sección 3.5.4.

El primer caso (caso 1) y el segundo caso (caso 2) tendrán dos variaciones determinadas por la forma de desplazamiento del MN en la simulación. La figura 4.1 resume como se definen los escenarios de simulación.

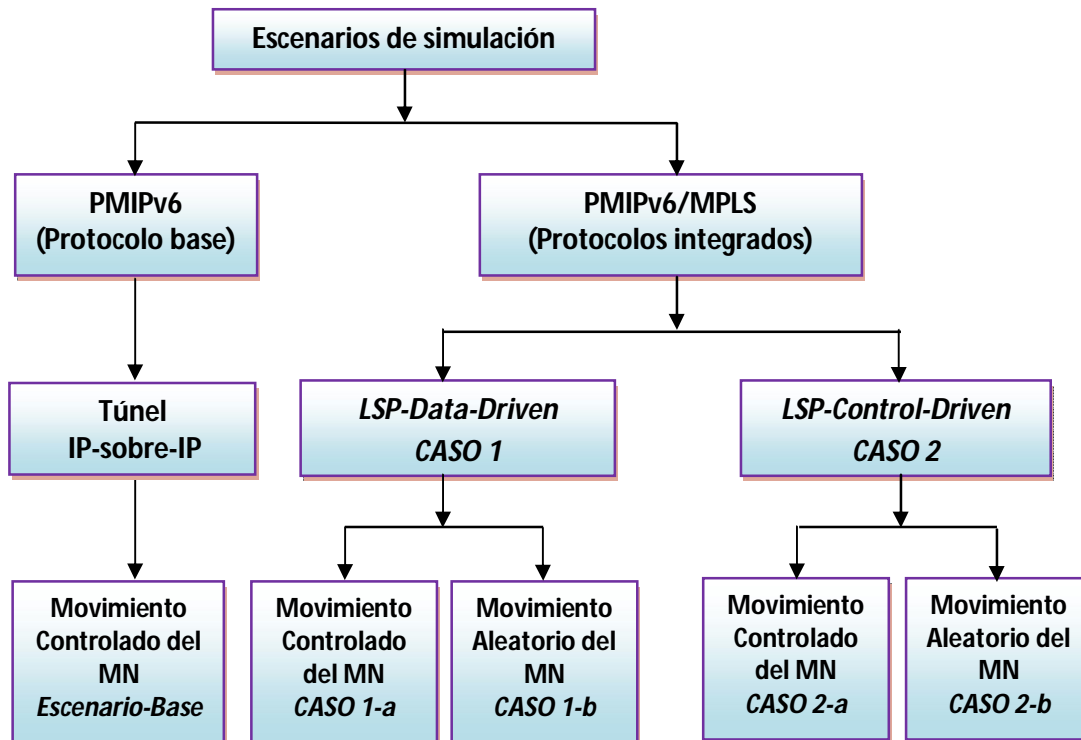


Figura 4.1. Definición de los casos de simulación. Por los Autores.

- **Escenario de simulación No. 1:** éste escenario consta de 7 nodos: CN, LMA 1, Enrutador 1, Enrutador 2, MAG 1, MAG 2 y MN, como se observa en la figura 4.2. En la figura se muestran, las áreas de cobertura de los MAG y la distribución de los canales en este escenario.

El MN se conecta inalámbricamente al MAG 1, el cual actúa como un AP. El CN envía datos hacia el MN, los nodos LMA 1, MAG 1 y 2, presentan características del protocolo PMIPv6 como se menciona en la sección 2.2.1; los Enrutadores 1 y 2 son dispositivos con capacidades de enrutamiento IPv6 tradicional.

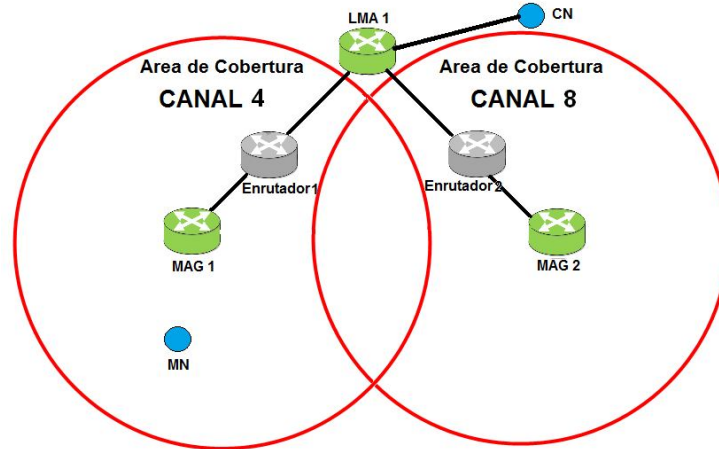


Figura 4.2. Escenario de simulación No. 1. Por los Autores.

- **Escenario de simulación No. 2:** éste escenario consta de 7 nodos: CN, LMA/LER 1, LSR 1, LSR 2, MAG/LER 1, MAG/LER 2 y MN, como se observa en la figura 4.3. En la figura se muestran, las áreas de cobertura de los MAG/LER y la distribución de los canales en este escenario.

El MN se conecta inalámbricamente al MAG/LER 1, el cual actúa como un AP. El CN envía datos hacia el MN, los nodos LMA/LER 1, MAG/LER 1 y 2, presentan características de la integración PMIPv6/MPLS como se menciona en la sección 3.5. Los LSR 1 y 2 son dispositivos con capacidades MPLS.

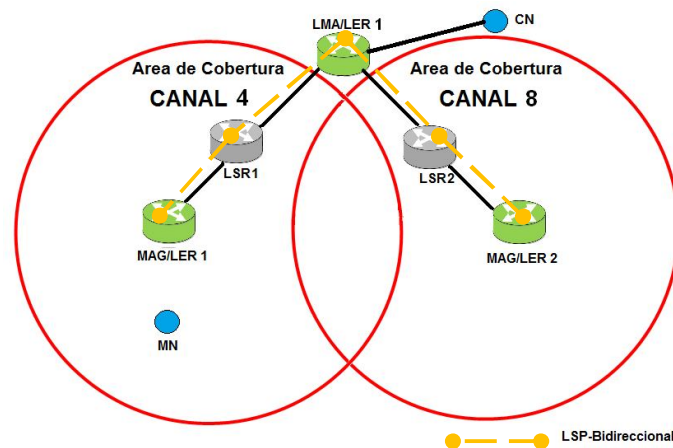


Figura 4.3. Escenario de simulación No. 2. Por los Autores.

En el escenario 2 se implementa la integración semi-suave de PMIPv6 y MPLS, utilizando el módulo NIST MOBILE de código libre distribuido por NIST (extensión para el soporte de ambientes de movilidad en NS-2) y la extensión que implementa el RFC 5213 [74] (estándar de la IETF para brindar soporte de las funcionalidades de PMIPv6), a la cual se incorpora el funcionamiento de la arquitectura MPLS, que se implementa como un módulo de enrutamiento separado conocido como MPLS para NS-2 (MNS, *MPLS Network Simulator*) [75] y que se ha modificado para el soporte de enrutamiento jerárquico<sup>20</sup> necesario para su funcionamiento en ambientes de movilidad [76].

Se elabora un *script* en OTcl que permite adaptar la construcción de un LSP dentro de los dispositivos definidos para el funcionamiento de PMIPv6 (LMA y MAG).

Para realizar la integración, en primera instancia, se define el tipo de enrutamiento jerárquico para los nodos en la red con el uso del comando:

```
$ns node-config -addressType hierarchical
```

Este comando permite agregar el módulo jerárquico (*hierarchical module*) a la lista de módulos que son cargados al momento de crear un nodo en la red.

El siguiente paso es cargar el módulo de MPLS con la ejecución del comando:

```
$ns node-config -MPLS ON
```

Es importante que el módulo MPLS deba agregarse después del módulo jerárquico, puesto que invertir el orden en estos comandos evita que el módulo MPLS utilice direcciones con jerarquía, generando un conflicto de direccionamiento, puesto que las redes móviles en NS-2 están implementadas con este tipo de enrutamiento, afectando el dominio de la integración PMIPv6/MPLS.

Después de este comando, todos los nodos que se crean tienen soporte de MPLS; sin embargo, con la inclusión del módulo jerárquico es necesario agregar de forma manual a la lista de nodos MPLS, todos los nodos que deban soportar capacidades MPLS con los siguientes comandos:

```
set lma/ler [$ns node 1.0.0]  
$ns add-to-mpls-list $lma/ler
```

Es imprescindible instalar el agente LMA en este nodo para dar soporte a las capacidades citadas en la sección 2.2.1.1, para ello se utiliza el siguiente comando:

---

<sup>20</sup> Enrutamiento jerárquico: permite a los enrutadores dividirse en regiones o aéreas y conocer la información de enrutamiento dentro de su región, sin tener información de la estructura interna de las otras regiones.



```
set lma/ler_pm [$lma/ler install-lma]
```

Con esto, el nodo LMA/LER proporciona soporte a las capacidades de PMIPv6 y MPLS, como se planteó en la sección 3.4. A continuación se crea un nodo que a su vez se agrega a la lista de nodos MPLS con estos comandos:

```
set mag/ler1 [$ns node 1.3.0]  
$ns add-to-mpls-list $mag/ler1
```

En este nodo, se instala el agente MAG para proporcionar soporte a las capacidades de PMIPv6, como se planteó en la sección 2.2.1.2 con el comando:

```
set mag/ler1_pm [$mag/ler1 install-mag]
```

Con esto, el nodo MAG/LER proporciona soporte a las capacidades de PMIPv6 y MPLS, como se planteó en la sección 3.4. Ahora es necesario configurar el agente RSVP-TE en los nodos de la red que tienen soporte de capacidades MPLS con el comando:

```
$ns configure-rsvp-te-on-all-mpls-nodes
```

Para el establecimiento del LSP, se elige el método *Data-Driven* o *Control-Driven*, como se menciona en la sección 3.6, a través de los siguientes comandos según el caso que corresponda:

```
$ns enable-data-driven  
$ns enable-control-driven
```

En este instante es necesario establecer el LSP bi-direccional, mediante una sesión entre los nodos LMA/LER y MAG/LER que establece el primer LSP en sentido MAG/LER – LMA/LER y otra sesión entre MAG/LER y LMA/LER que establece el LSP en sentido contrario, como se propone en la sección 3.4, utilizando los comandos:

```
set ses(1) [$LMA/LER session $mag/ler1 1]  
set ses(2) [$MAG/LER session $lma/ler 1]
```

Por último se establece el trayecto para cada sesión, a fin de crear los LSP que conforman el LSP bi-direccional, como se plantea en la sección 3.4. Para ello se usan los siguientes comandos:

```
$ns at 0.2 "$LMA/LER PATH-resv-er $ses(1) 1Mb 50 50 $mag/ler1 1000 5 5 1.0.0_1.3.0"  
$ns at 0.0 "$MAG/LER PATH-resv-er $ses(3) 1Mb 50 50 $lma/ler 1200 5 5 1.3.0_1.0.0"
```

En el anexo A y B se explica de manera específica cada término en estos comandos que se utilizan para el establecimiento del LSP bi-direccional entre el LMA/LER y el MAG/LER que sustituye el túnel IP-sobre-IP de PMIPv6, como se propone en el capítulo 3.

#### 4.1.3. Definición de las características técnicas de los escenarios de simulación

Dado que NS-2 necesita configurar el tipo de red de acceso, con parámetros de funcionamiento como: velocidad de transmisión, tipo de antenas, ganancias, etc., se considera el uso de las características de la tecnología de red inalámbrica 802.11g [77] y se seleccionan los canales 4 y 8 a fin de reducir la interferencia por canal adyacente dentro de los escenarios de simulación.

Se pretende observar en condiciones ideales el impacto que presente la integración PMIPv6/MPLS en un ambiente de micromovilidad, por tanto, los problemas de radio-frecuencia y/o radio-propagación presentes en la transmisión inalámbrica (desvanecimiento por multi-trayecto, por dispersión y/o la pérdida de la señal, entre otros) no son objeto del trabajo. Cabe resaltar que considerar estos problemas puede afectar la comunicación influyendo en el análisis de los parámetros de desempeño.

Los MAG y MAG/LER emplean antenas omnidireccionales y usan transmisores con potencia constante, para ofrecer zonas de cobertura fijas y predecibles.

Las características técnicas generales, se presentan en las tablas 4.2 y 4.3, donde se exponen particularidades de los escenarios y de los enlaces inalámbricos considerados en la simulación.

Características	Escenario 1	Escenario 2			
Establecimiento de LSP	-	<i>LSP-Data-Driven</i>		<i>LSP-Control-Driven</i>	
Movimiento del MN	Controlado	Controlado	Aleatorio	Controlado	Aleatorio
Velocidad del MN	25 m/s	25 m/s	Aleatorio	Aleatorio	25 m/s
Canales de Transmisión (802.11g)	4, 8	4, 8	4, 8	4, 8	4, 8
Radio de cobertura de las Bases	400 m	400 m	400 m	400 m	400 m
Potencia de Transmisión	25mw	25mw	25mw	25mw	25mw
Umbral de Recepción	-72 dBm	-72 dBm	-72 dBm	-72 dBm	-72 dBm
Modelo de Propagación	Two Ray Ground	Two Ray Ground	Two Ray Ground	Two Ray Ground	Two Ray Ground
Tiempo de simulación	60s	60s	500s	60s	500s
Tipos de antena	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional	Omnidireccional

Tabla 4.2. Características generales de simulación. Por los Autores.

Los enlaces entre los nodos cableados de la red, presentan un ancho de banda de un *Megabit por segundo* (1Mbps) (valor mínimo del estándar 802.11g), a fin de analizar el impacto de la integración en las condiciones mínimas para mantener la comunicación en la red.

Enlaces	Ancho de Banda
CN – LMA	1Mbps
LMA – LSR	1Mbps
LSR – MAG	1Mbps

**Tabla 4.3. Características de los enlaces de Simulación. Por los Autores.**

En las aplicaciones de tiempo real donde no es posible realizar retransmisiones, se utiliza generalmente el Protocolo de Datagrama de Usuario (UDP, *User Datagram Protocol*) que se adapta a este tipo de tráfico por no realizar confirmación de recepción. Para simular una aplicación de tiempo real como la voz, es necesario transmitir en forma continua los datagramas UDP, por ello se utiliza una Tasa de Bits Constante (CBR, *Constant Bit Rate*), que genere paquetes consecutivos a una misma tasa [78].

Una fuente CBR permite que se reserve un ancho de banda fijo que puede ser usado durante toda la comunicación, mientras que una Tasa de Bits Variable (VRB, *Variable Bit Rate*) varía sus requerimientos de ancho de banda durante la comunicación, lo cual puede afectar negativamente la prestación de un servicio si no existe suficiente ancho de banda en un momento dado.

En todos los escenarios de simulación se conecta un agente UDP al CN y un agente *skin*<sup>21</sup> al MN, a fin de representar el tráfico de voz desde CN hacia MN. Sobre el agente UDP se establece un generador de tráfico CBR, transmitiendo datagramas de 256 bytes con intervalos entre paquetes de 0,032 segundos (con una tasa de 64 Kbps, acorde al códec G.711 estandarizado por la ITU).

Para evaluar el comportamiento de la aplicación de tiempo real (voz) dentro de la simulación PMIPv6/MPLS, se consideran los siguientes parámetros de desempeño, asumidos de [79]:

- Paquetes perdidos durante el *Handover*.
- Duración del *Handover*.
- Retardo extremo a extremo.
- Variación del retardo (*Jitter*).
- *Throughput*.

<sup>21</sup> *Skin*: es un agente de NS-2 que se conecta a un nodo destino, permitiendo la recolección de datos.

#### 4.1.4. Ejecución de las pruebas de simulación

Los escenarios descritos en la sección 4.1.3 son implementados en NS-2. El tiempo para cada simulación es definido en 60s (caso 1) y 500s (caso 2), el cual es determinado por la velocidad y el desplazamiento del MN, con el objetivo de realizar tres procesos de *Handover* en cada escenario. Una vez termina el tiempo de simulación, son generados los archivos de traza (.tr, .nam) que se procesan a través de AWK<sup>22</sup>, a fin de graficar los parámetros de desempeño mencionados.

#### 4.1.5. Análisis de resultados

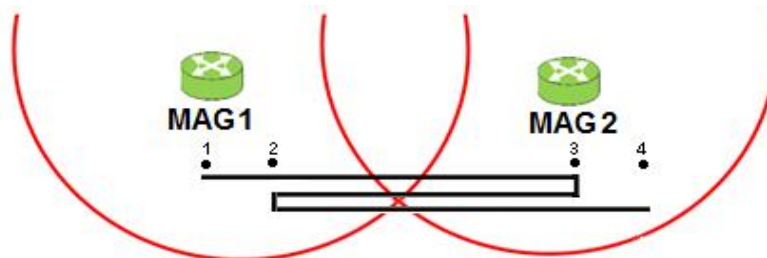
##### 4.1.5.1. Escenario No. 1: PMIPv6

El funcionamiento del escenario 1 se basa en la extensión del módulo de movilidad para NS-2 que especifica todas las funciones del protocolo PMIPv6, la configuración del escenario se realiza acorde con lo mencionado en la sección 4.1.3 y 4.1.4. A continuación se describen los aspectos de movilidad que caracterizan este escenario.

Se realizan 3 procesos de *Handover* durante el tiempo de simulación. El nodo móvil se mueve controladamente y con velocidad constante (determinado por el usuario), como se indica a continuación:

- a) El MN parte del punto 1 y se dirige al punto 3.
- b) El MN parte del punto 3 y se dirige al punto 2.
- c) El MN parte del punto 2 y se dirige al punto 4.

La figura 4.4 muestra el desplazamiento del MN en el primer escenario de simulación.



**Figura 4.4. Desplazamiento del nodo móvil para el escenario base.**

<sup>22</sup> AWK: es una herramienta de distribución libre del sistema UNIX, diseñada para trabajar con archivos estructurados y patrones de texto, al procesar y buscar datos, generando informes simples [80].

Las figuras 4.5 y 4.6 muestran en una línea de tiempo la señalización correspondiente al funcionamiento de PMIPv6, asociada particularmente a cada proceso de *Handover*. En las gráficas se pueden determinar los instantes de tiempo en los que se realizan los *Handover* y la duración de estos.

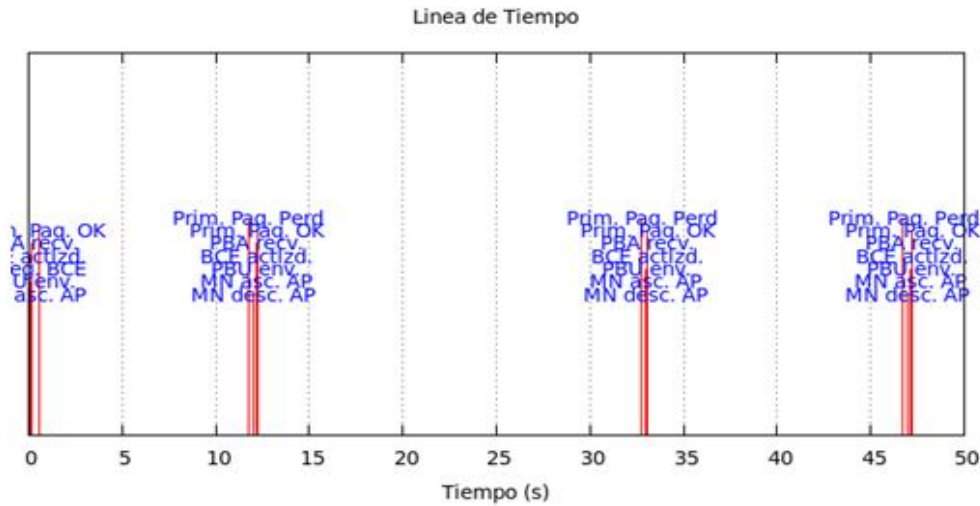


Figura 4.5. Señalización en PMIPv6.

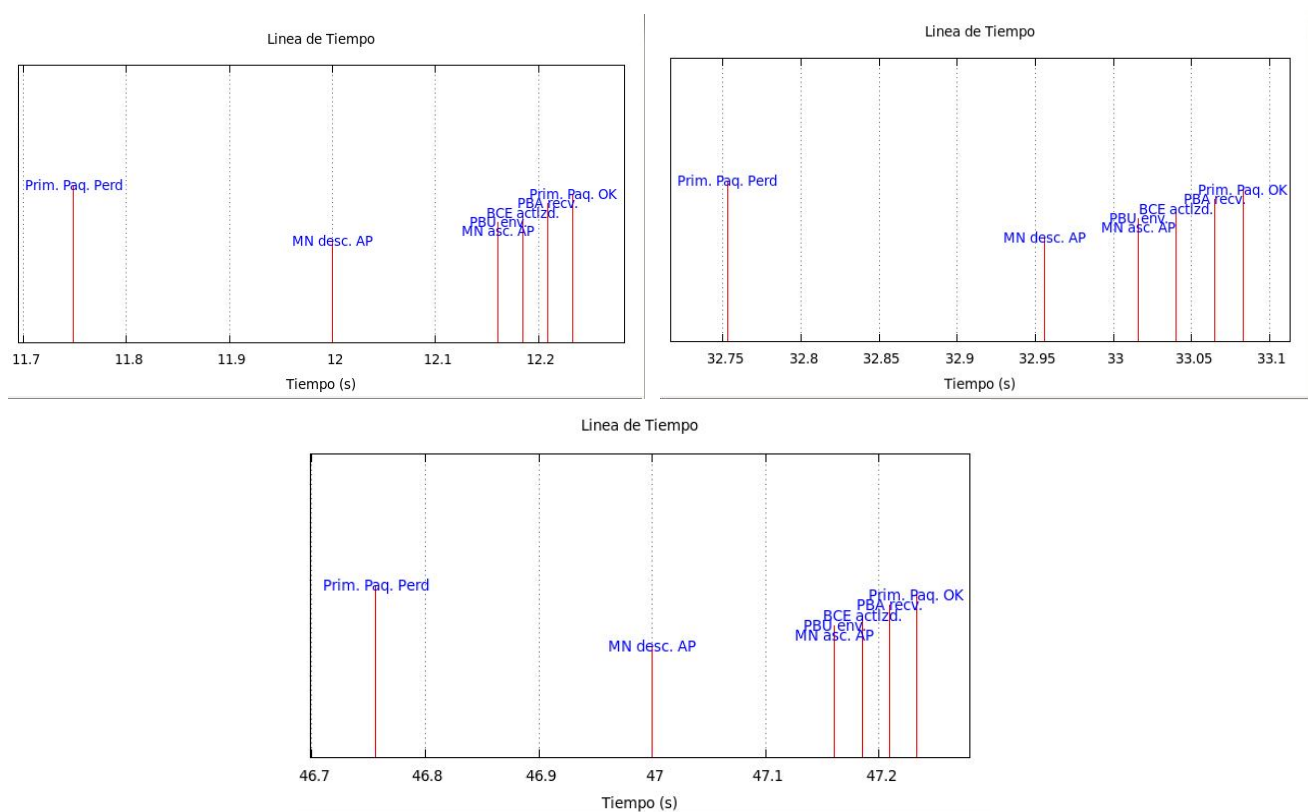


Figura 4.6. Señalización en los eventos de *Handover* en PMIPv6 (HO1, HO2, HO3 respectivamente).

En la línea de tiempo de las figura 4.5 y 4.6 se muestra la señalización acorde con el funcionamiento teórico de PMIPv6 que es descrito mediante las figuras 2.4 y 2.5 en la sección 2.2.2.

Según los datos de los archivos .tr y .nam arrojados por el simulador, durante el tiempo de simulación se obtuvieron los siguientes valores de paquetes enviados, recibidos y perdidos, la tabla 4.4 resume estos datos.

Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	Porcentaje de Paquetes Perdidos
1844	1802	42	2,277

**Tabla 4.4. Flujo de paquetes en PMIPv6.**

La tabla 4.5 presenta el tiempo de inicio de cada *Handover* y los paquetes que se pierden durante este proceso, además en la tabla 4.6 se muestra la duración de cada *Handover*.

Paquetes perdidos <i>Handover</i> 1 ( $t \approx 11,75$ )	Paquetes perdidos <i>Handover</i> 2 ( $t \approx 32,76$ )	Paquetes perdidos <i>Handover</i> 3 ( $t \approx 46,77$ )
15	11	16

**Tabla 4.5. Paquetes perdidos durante el *Handover* en PMIPv6.**

Duración aproximada <i>Handover</i> 1	Duración aproximada <i>Handover</i> 2	Duración aproximada <i>Handover</i> 3
0,462857510 seg.	0,330504762 seg.	0,485710527 seg.

**Tabla 4.6. Duración de cada *Handover* en PMIPv6.**

De la información suministrada en las tablas 4.5 y 4.6, se concluye que la duración promedio de un *Handover* es de 0,4263 segundos y en este periodo se tiene una pérdida promedio de 14 paquetes.

Las figuras 4.7 y 4.8 indican la tasa de paquetes perdidos durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

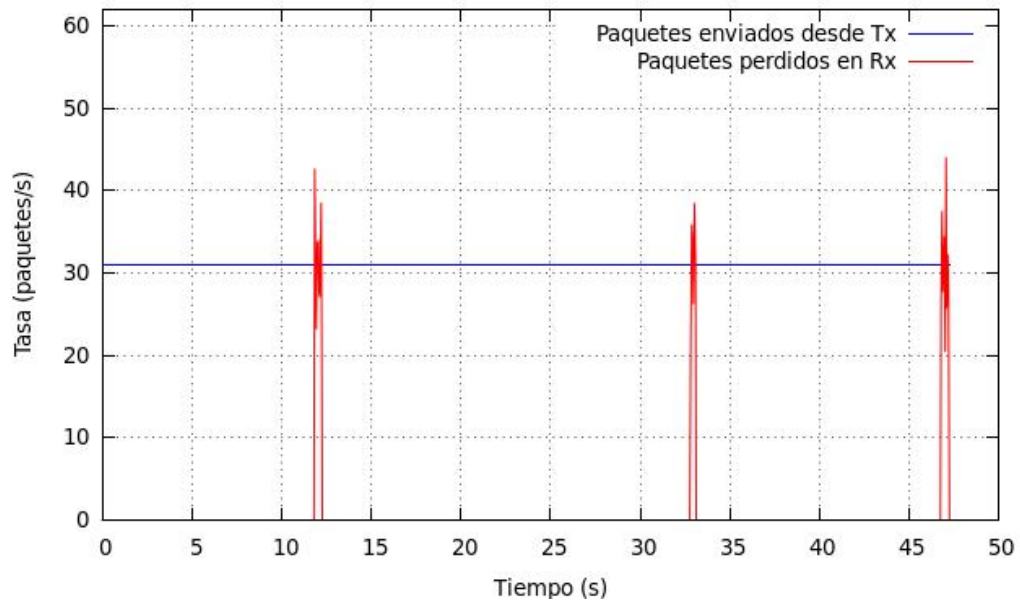


Figura 4.7. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6.

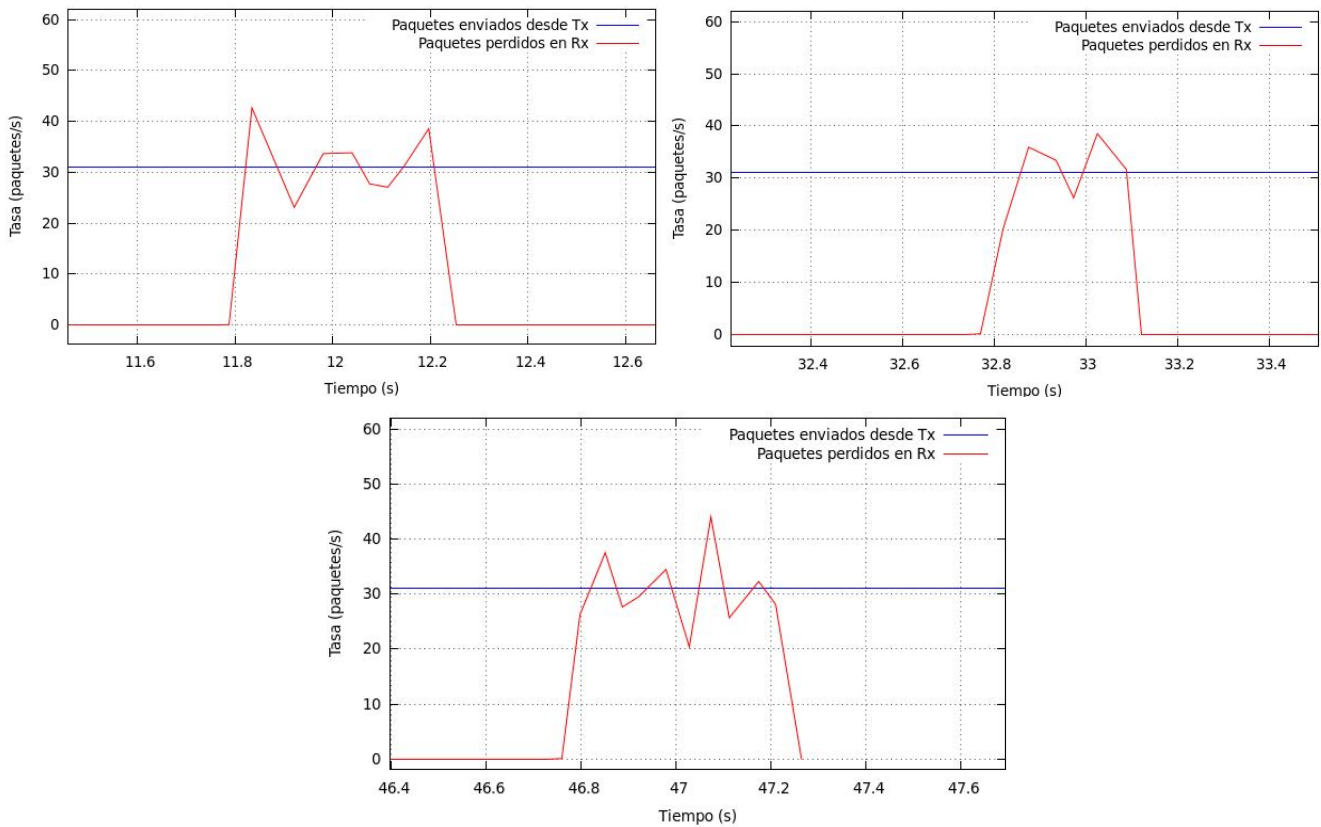
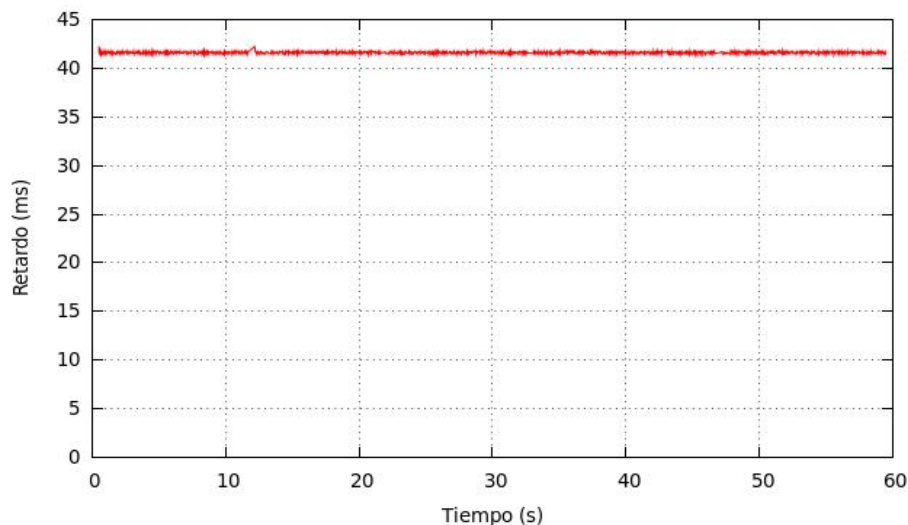


Figura 4.8. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6 (HO1, HO2, HO3 respectivamente).

En la figura 4.7 se aprecia la existencia de un flujo de paquetes constante entre el CN y el MN, producto de utilizar una fuente CBR tal como se mencionó en 4.1.4, este flujo está representado por la línea de color azul y es constante a lo largo de la simulación.

De la figura 4.8 se observa con detalle que el tiempo durante el cual se genera pérdida de paquetes es mayor a la duración del proceso de *Handover*, debido a que en el momento que inicia este proceso, el MAG 1 tiene paquetes en cola para ser transmitidos. Antes de ser descartados los paquetes en cola por el MAG 1, se retransmiten hasta 7 veces; las retransmisiones son definidas acorde a la configuración de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*) de 802.11g [77].

La figura 4.9 y la figura 4.10 presentan las gráficas del comportamiento del retardo extremo a extremo durante la simulación y durante la ocurrencia de cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.9. Comportamiento del retardo en PMIPv6.**

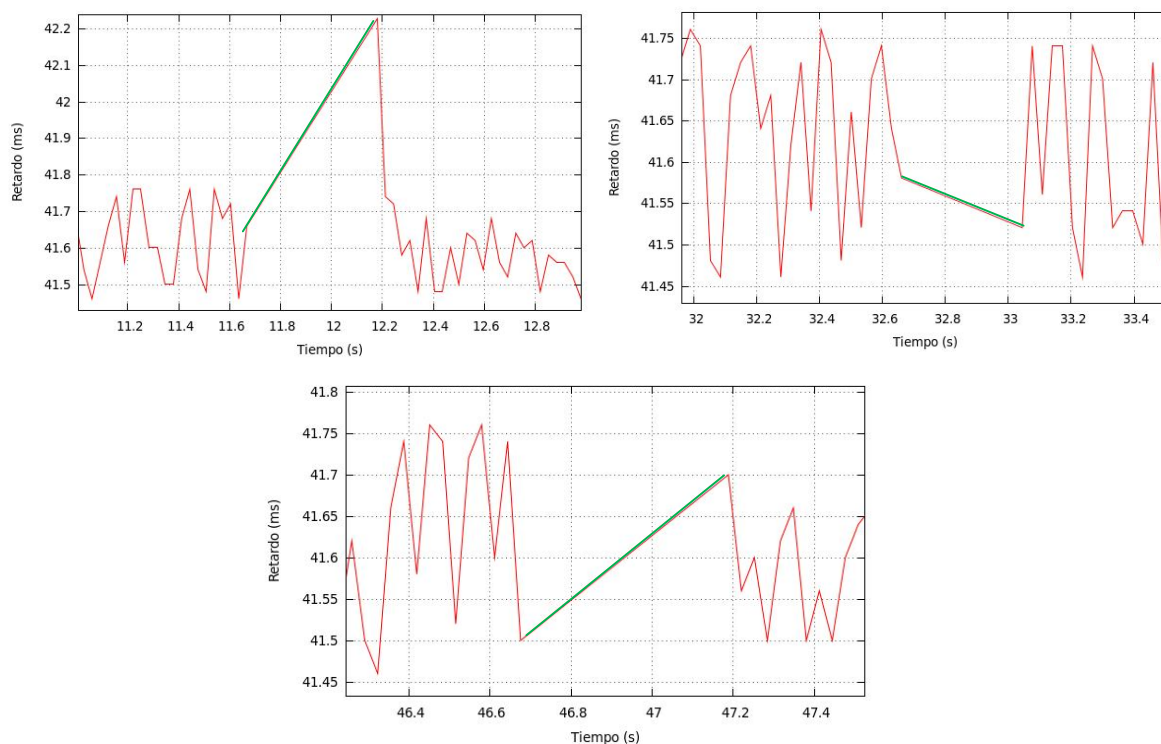
Para asegurar las condiciones óptimas de QoS, el máximo retardo admitido en aplicaciones que requieran la transmisión de audio y video en tiempo real es de 150 ms, según la recomendación G.1010 de la ITU-T.

Las gráficas 4.9 y 4.10 muestran que antes y después del proceso de *Handover* el retardo toma valores comprendidos entre 41,45 ms y 41,76 ms (41,60 ms en promedio), cumpliendo de manera satisfactoria con las condiciones sugeridas en la recomendación G.1010 de la ITU.



La línea de color verde apreciada en la figura 4.10 no representa un valor de retardo, solo es utilizada por la herramienta de simulación para unir los valores de retardo presentes antes y después del *Handover*, durante este tiempo el retardo es indeterminado, puesto que de los paquetes se conoce el tiempo de salida, pero no el tiempo de llegada.

El pico que se aprecia durante la ocurrencia del primer *Handover* en la figura 4.9 representa un aumento en el retardo, producto de la conexión del MN por primera vez al MAG 2, requiriendo de un proceso de señalización que introduce retardos adicionales al establecer el túnel IP-sobre-IP que permite alcanzar al LMA.



**Figura 4.10. Comportamiento del retardo en PMIPv6 (HO1, HO2, HO3 respectivamente).**

Las figuras 4.11 y 4.12 presentan las gráficas del comportamiento del *jitter* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

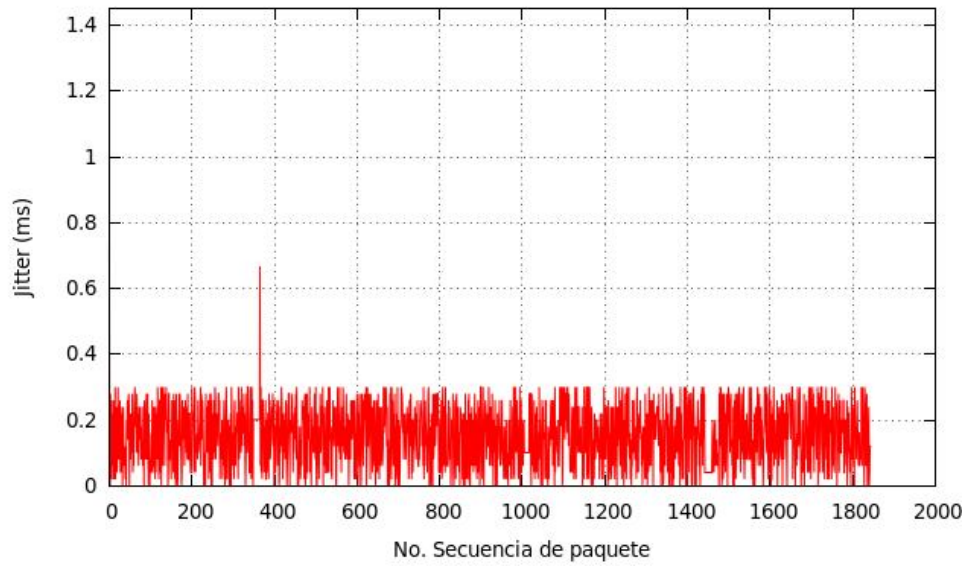


Figura 4.11. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6.

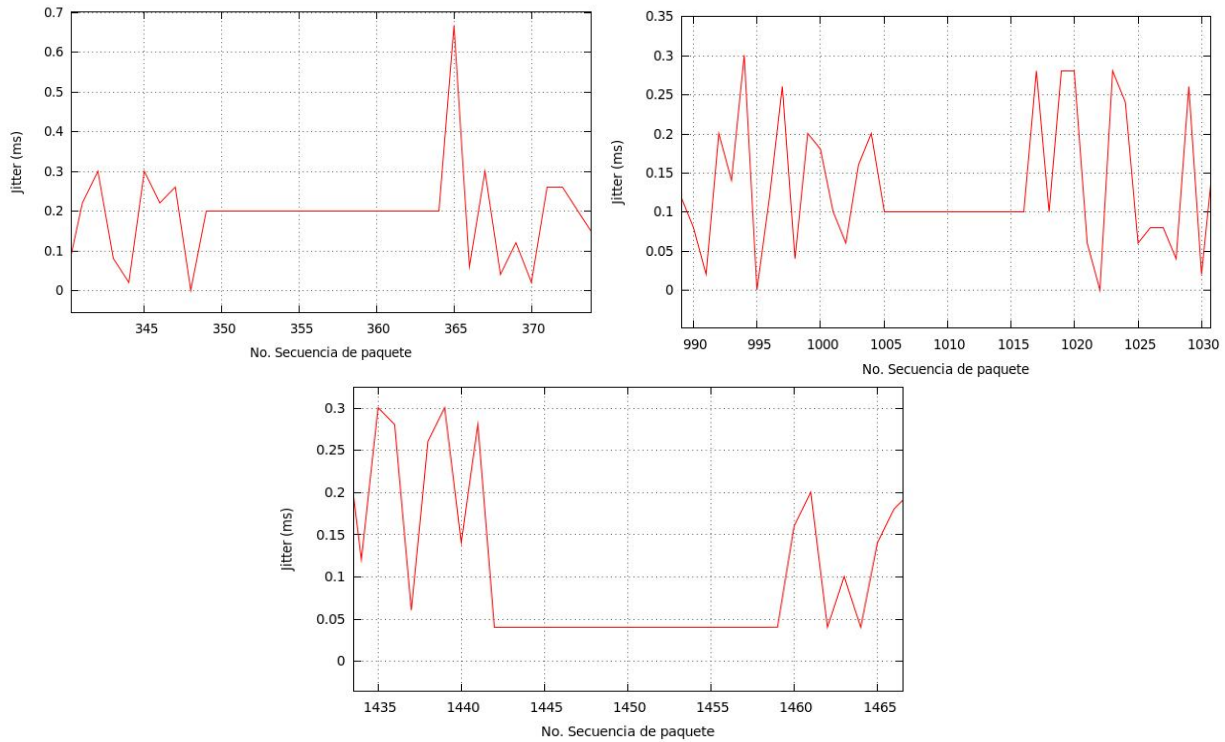
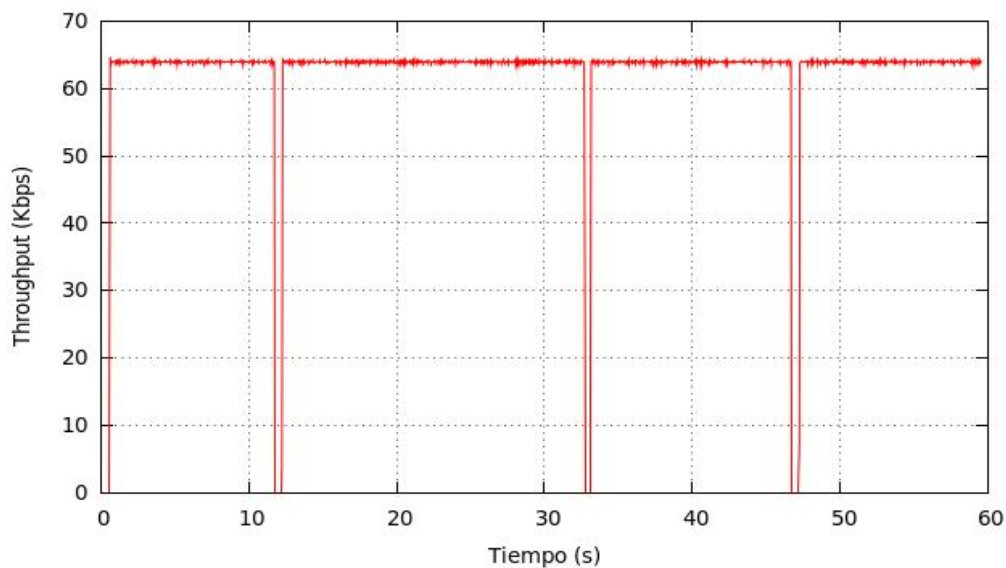


Figura 4.12. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6 (*HO1, HO2, HO3* respectivamente).

Debido a la sensibilidad del oído humano ante la variación del retardo en la voz, la recomendación G.1010 de la ITU-T, sugiere un valor de *jitter* mucho menor a 1 ms. En la figura 4.11 se evidencia el cumplimiento de este requerimiento, sin embargo el pico que sobrepasa el valor de 0.6 ms obedece a las razones que justifican el pico apreciado en la figura 4.10.

En la figura 4.12 se observa que la variación del retardo durante la simulación, toma valores entre 0 y 0,3 ms, viéndose afectada en los instantes en los que se presentan los *Handover*, debido a la pérdida de paquetes. Cuando los paquetes se pierden durante un *Handover*, el retardo de los mismos es indeterminado, dado que el simulador tiene información de su tiempo de salida más no del tiempo de llegada, esto se representa con la línea recta que no debe interpretarse como un valor constante de *jitter*, solo es usada por la herramienta para indicar que los paquetes se han perdido.

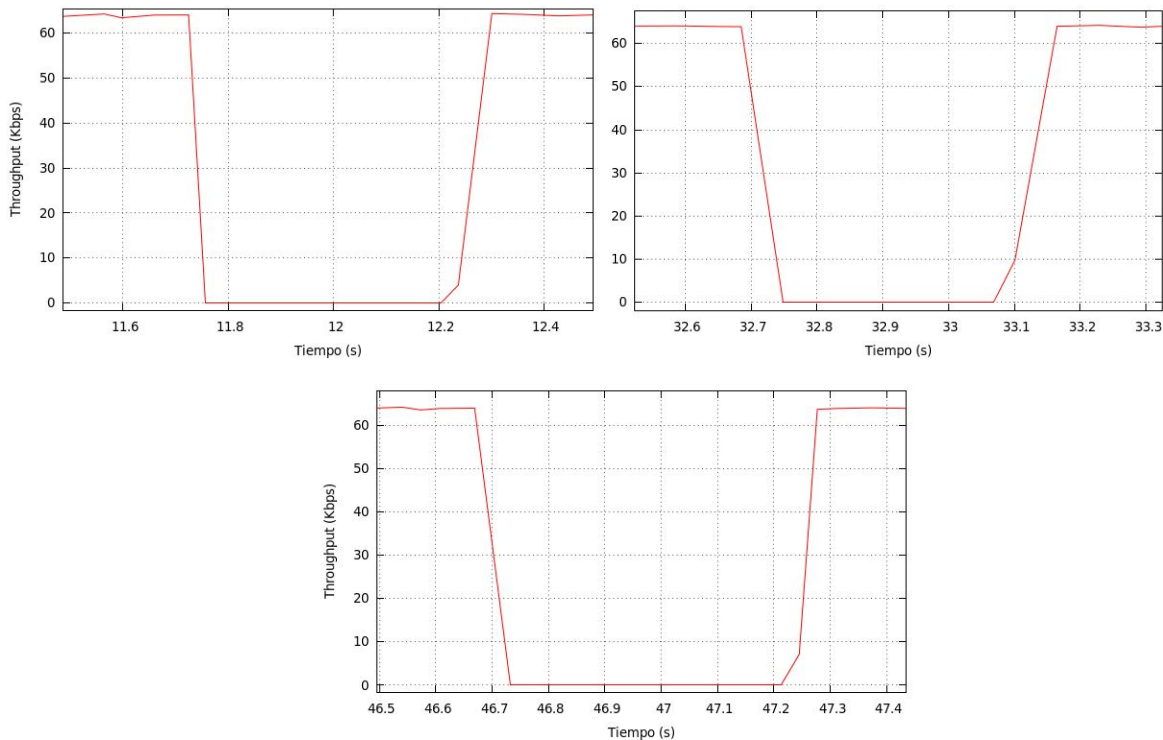
Las figuras 4.13 y 4.14 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *throughput* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.13. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6.**

En la figura 4.13 se aprecia que antes y después de los *Handover* la tasa de transmisión tiene un valor relativamente constante de 64 Kbps, no obstante durante los intervalos en los cuales ocurren los *Handover*, la tasa de transmisión del enlace es cero, producto de la des-asociación del MN.

La figura 4.14 muestra el *throughput* de cada uno de los *Handover*, las caídas observadas en las gráficas, concuerdan con el momento y la duración en las que sucede el *Handover*.



**Figura 4.14. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6 (*HO1*, *HO2*, *HO3* respectivamente).**

#### 4.1.5.2. Escenario No. 2: PMIPv6/MPLS

Para realizar la simulación se definen dos casos dentro de este escenario, acorde a la forma como se realiza el establecimiento del LSP bi-direccional: *LSP-Data-Driven* (caso 1) y *LSP-Control-Driven* (caso 2), como se mencionó en las secciones 4.1.3 y 4.1.4. A continuación se describen los aspectos que identifican cada caso.

##### 4.1.5.2.1. Caso 1: Establecimiento del *LSP-Data-Driven*

En el momento que un MN se conecta al MAG/LER 1, se establece un LSP bi-direccional que permite el transporte de los paquetes de datos; en primera instancia, se realizó un análisis del caso en un entorno donde el movimiento y la velocidad del MN son controlados (determinado por el usuario), posteriormente se analizó el caso alternativo donde el movimiento y la velocidad del MN son aleatorias (determinado por NS-2).

En el anexo A, se encuentra el *script* implementado en NS-2 que corresponde a la integración PMIPv6/MPLS con establecimiento del *LSP-Data-Driven* y movimiento controlado.

#### 4.1.5.2.1.1. Caso 1-a: Movimiento controlado del MN

Similar al escenario base, en este escenario, se realizan 3 procesos de *Handover* durante el tiempo de simulación. El nodo móvil se mueve controladamente y con velocidad constante como se indica a continuación:

- a) El MN parte del punto 1 y se dirige al punto 3.
- b) El MN parte del punto 3 y se dirige al punto 2.
- c) El MN parte del punto 2 y se dirige al punto 4.

La figura 4.15 muestra el desplazamiento del nodo móvil.

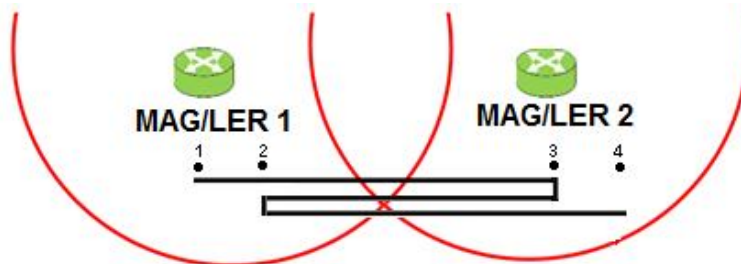


Figura 4.15. Desplazamiento del nodo móvil para el escenario 2 - caso 1-a.

Las figuras 4.16, 4.17 y 4.18 muestran en una línea de tiempo la señalización correspondiente al funcionamiento de PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven*), asociada particularmente a cada proceso de *Handover*. En las gráficas se pueden identificar los instantes de tiempo en los que ocurren los *Handover* y la duración de estos.

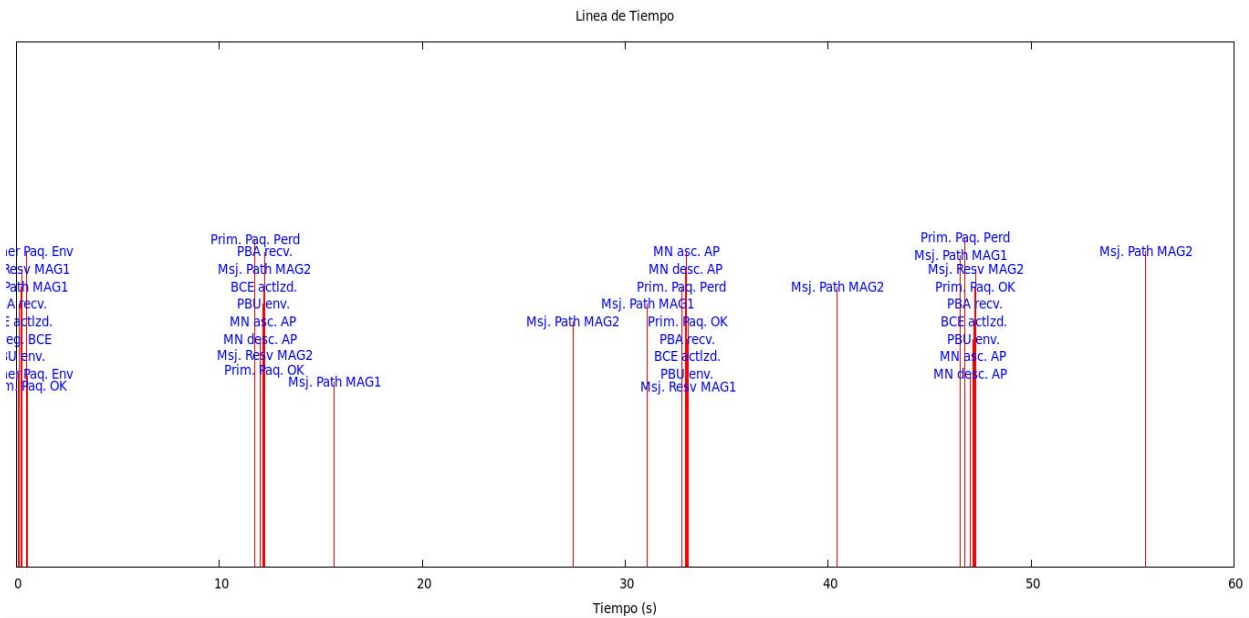


Figura 4.16. Señalización en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).

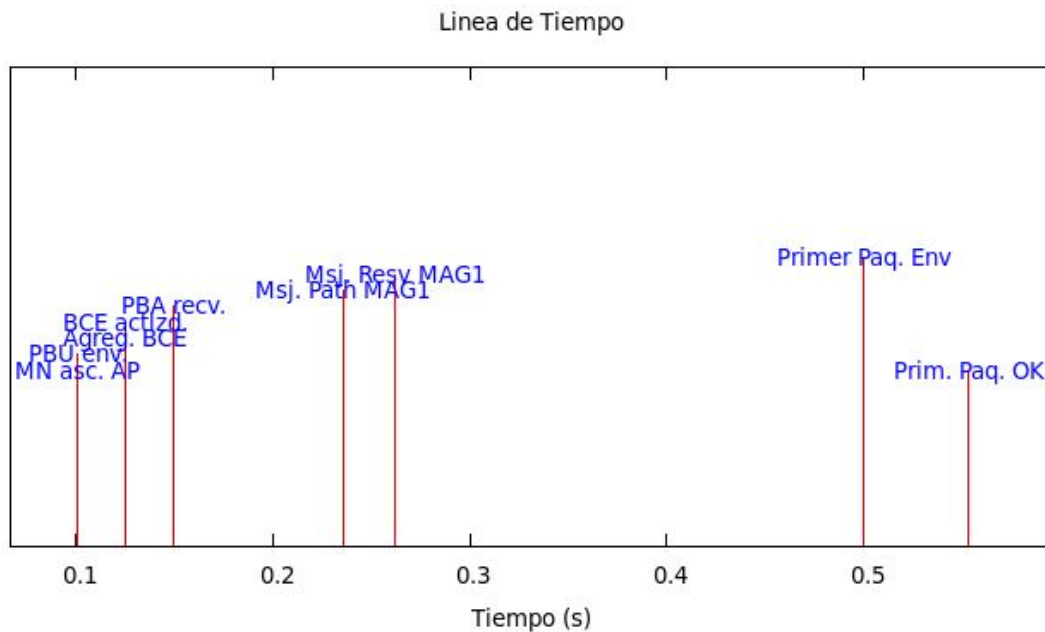
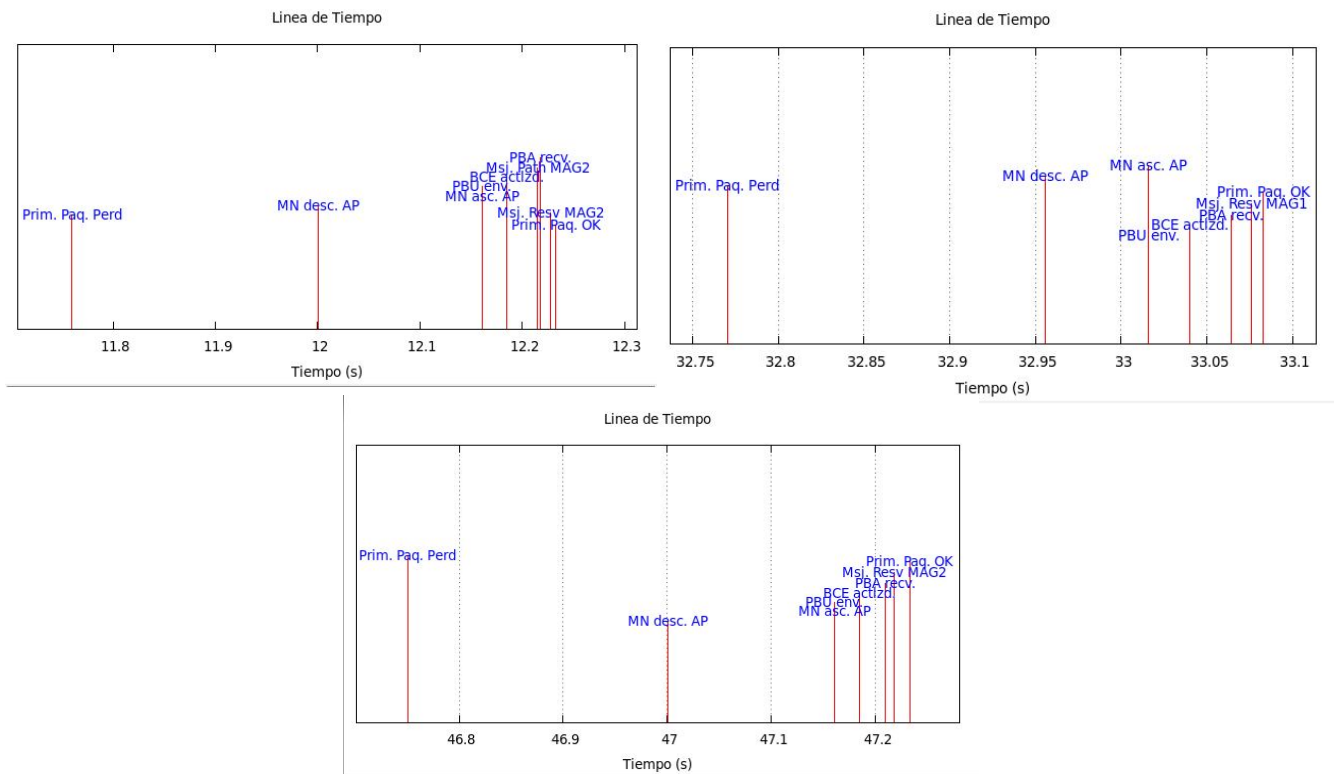


Figura 4.17. Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).



**Figura 4.18. Señalización en los eventos de Handover en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

En la figura 4.16 se observa que una vez el MN se conecta al MAG/LER 1, solicita el establecimiento del LSP bi-direccional, como se define en la sección 3.5.

La figura 4.17 muestra claramente el inicio del funcionamiento de PMIPv6/MPLS, donde el MAG/LER 1 realiza los eventos definidos en la sección 3.5.3, corroborando que la señalización es acorde con el correcto funcionamiento de la integración. Del mismo modo la línea de tiempo de la figura 4.18 muestra detalladamente la señalización durante el Handover.

Según los datos de los archivos .tr y .nam, arrojados por el simulador, durante el tiempo de simulación se obtuvieron los valores correspondientes a paquetes enviados, recibidos y perdidos, la tabla 4.9 resume estos datos.

Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	Porcentaje de Paquetes Perdidos
1844	1803	41	2,23

**Tabla 4.7. Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

En este caso de simulación, la cantidad de paquetes perdidos se reduce en 1, este indicador evidencia que PMIPv6/MPLS tiene un comportamiento similar a PMIPv6, presentando una leve mejoría dado que los paquetes de datos son enviados por medio de la conmutación de etiquetas y no por enrutamiento tradicional IP.

La tabla 4.8 presenta el tiempo de ocurrencia de los *Handover* y los paquetes perdidos durante este proceso. Por otra parte la tabla 4.9 indica la duración de cada *Handover*.

Paquetes perdidos <i>Handover 1</i> ( $t \approx 11,75$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 2</i> ( $t \approx 32,76$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 3</i> ( $t \approx 46,76$ )
15	11	15

**Tabla 4.8. Paquetes perdidos durante el *Handover* en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

Duración aproximada <i>Handover 1</i>	Duración aproximada <i>Handover 2</i>	Duración aproximada <i>Handover 3</i>
0,452097512 seg.	0,330504762 seg.	0,462030528 seg.

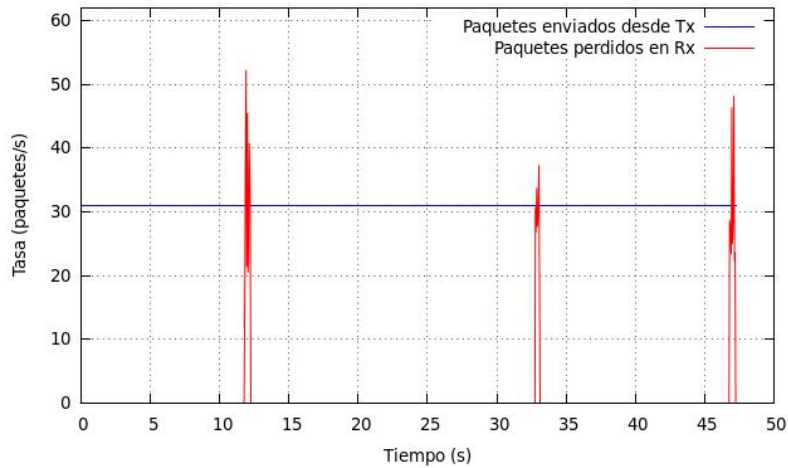
**Tabla 4.9. Duración de cada *Handover* en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

De la información suministrada en la tabla 4.8 y la tabla 4.9, se concluye que la duración promedio de un *Handover* es de 0,4148 segundos y en este periodo se tiene una pérdida promedio de 13,66 paquetes.

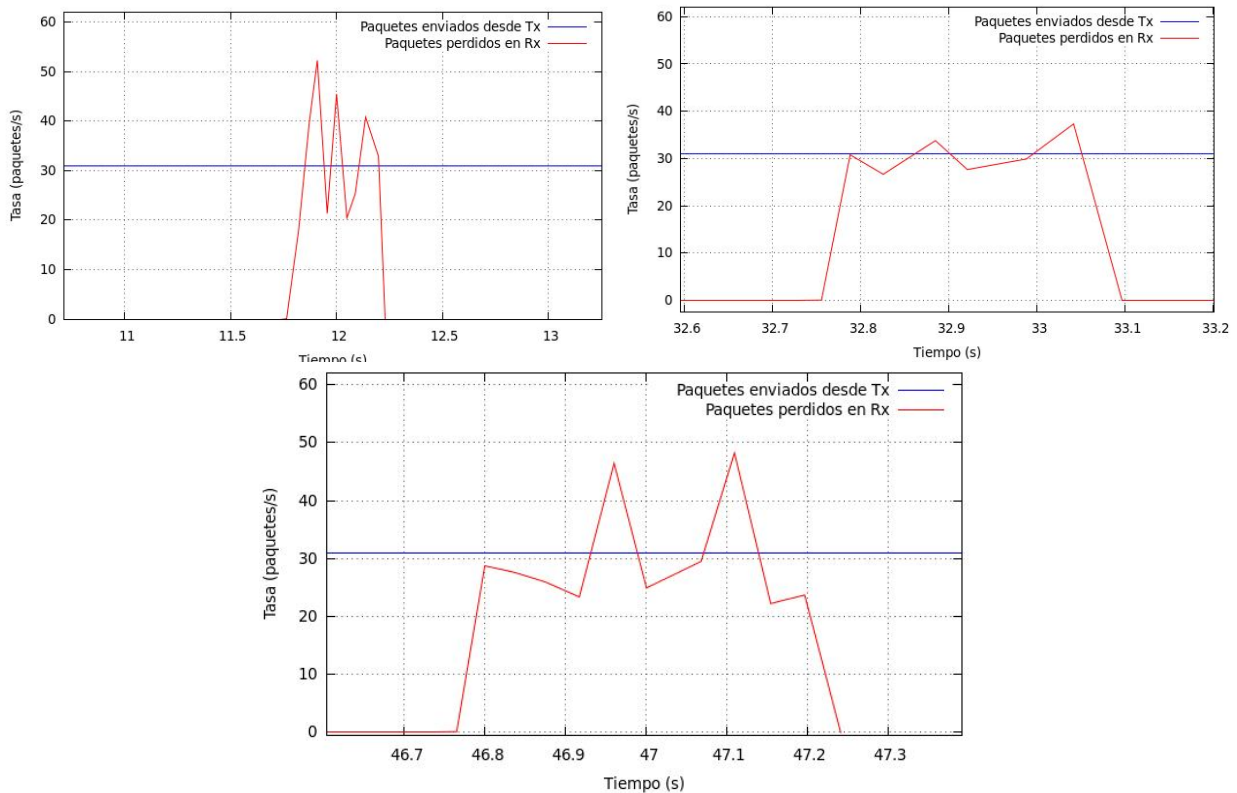
En este escenario la duración promedio del *Handover* disminuye en 11,5 ms, en comparación con el escenario base, confirmando que la integración presenta una mejora sustancial durante el proceso de *Handover*. Esta reducción es significativa en un entorno de micromovilidad, ya que es necesario proporcionar *Handover* rápido y sin problemas, como se menciona en la sección 2.1.2. El promedio de paquetes perdidos durante el *Handover* experimenta una leve reducción de 0,34 evidenciando el impacto que tiene la sustitución del túnel IP-sobre-IP.



Las figuras 4.19 y 4.20 muestran la tasa de paquetes perdidos durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.19. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven - Movimiento controlado*).**

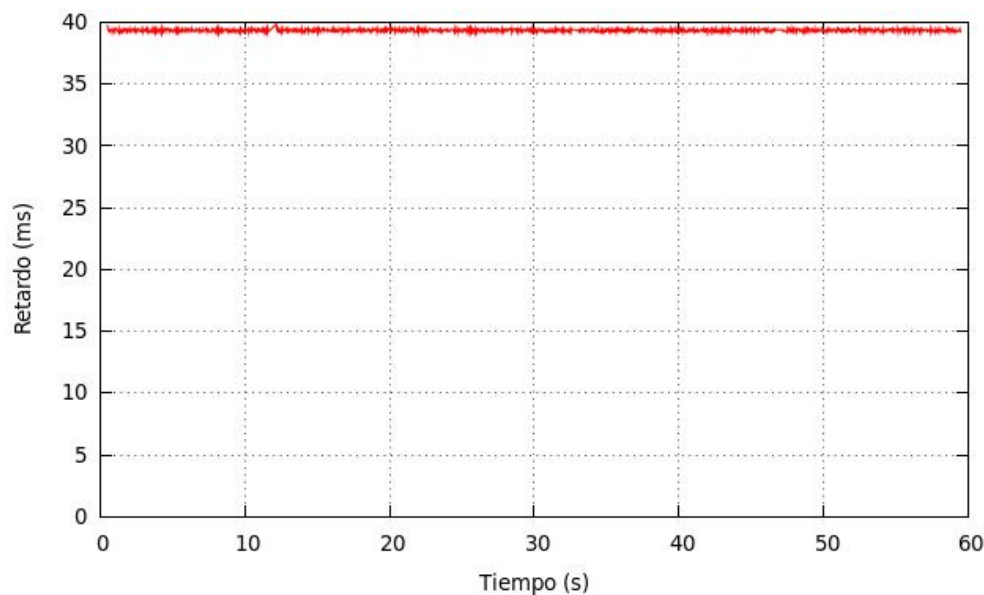


**Figura 4.20. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Data-Driven - Movimiento controlado*).**

Al igual que en el escenario base, la figura 4.19 muestra el flujo de paquetes constante entre el CN y el MN, producto de utilizar una fuente CBR, este flujo está representado por la línea azul y es constante a lo largo de la simulación.

La figura 4.20 posee un comportamiento muy similar al escenario base, por tanto su análisis concuerda con lo expresado para la figura 4.8.

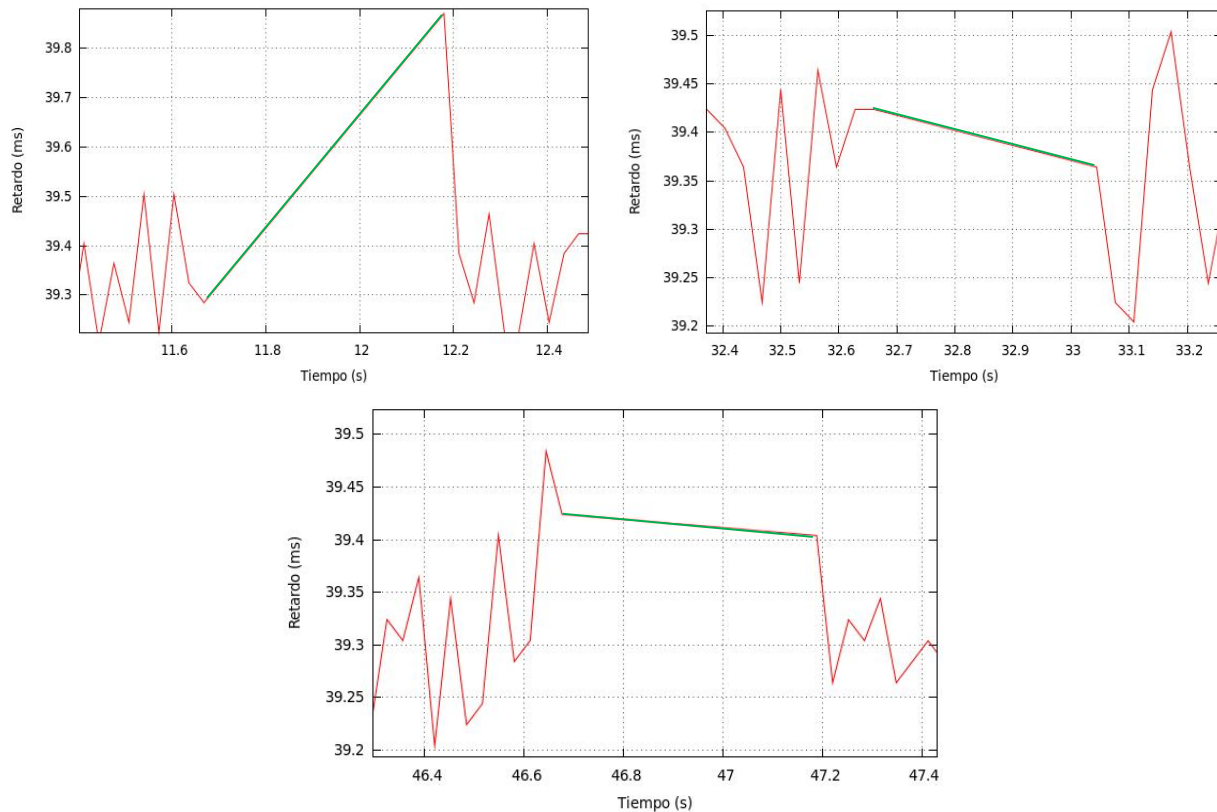
Las figuras 4.21 y 4.22 presentan las gráficas del comportamiento del retardo extremo a extremo durante la simulación y durante cada *Handover*.



**Figura 4.21. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven - Movimiento controlado*).**

Se observa en las gráficas 4.21 y 4.22, que antes y después del proceso de *Handover* el retardo es relativamente constante, tomando valores comprendidos entre 39,23 ms y 39,36 ms (39,29 ms en promedio), cumpliendo con el requerimiento de calidad definido en la recomendación G.1010 de la ITU-T.

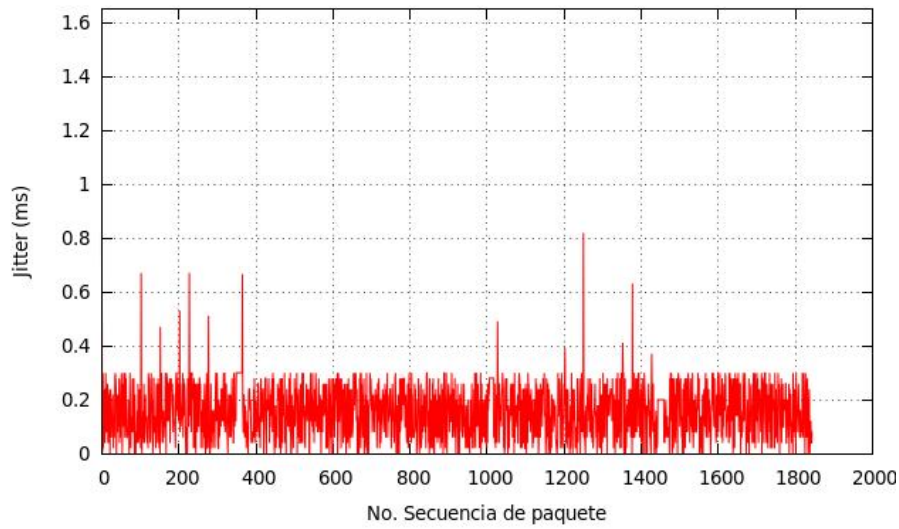
La reducción del promedio del retardo, en comparación con el escenario base es de 2,315 ms, lo cual contribuye a mejorar la calidad del servicio que se preste, en este caso el servicio de voz, que es sensible a este parámetro tal como se menciona en [62].



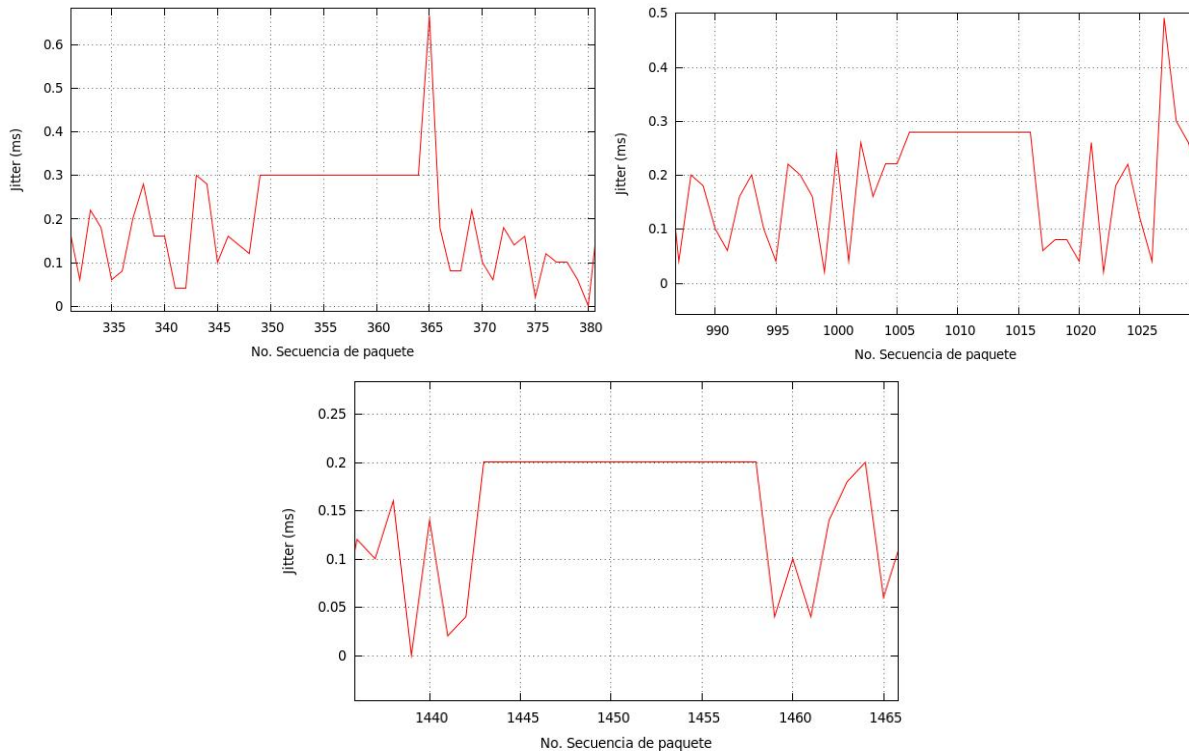
**Figura 4.22. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

El comportamiento visto en las gráficas de la figura 4.22 concuerda con el análisis expuesto en el escenario base. Por otra parte los picos presentes en las gráficas, representan un incremento en el retardo asociado a los mensajes que mantienen el establecimiento del LSP (RSVP-TE *softstate*), los cuales son procesados con mayor prioridad que un paquete de datos.

Las figuras 4.23 y 4.24 presentan las gráficas del comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.23. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven* - Movimiento controlado).**

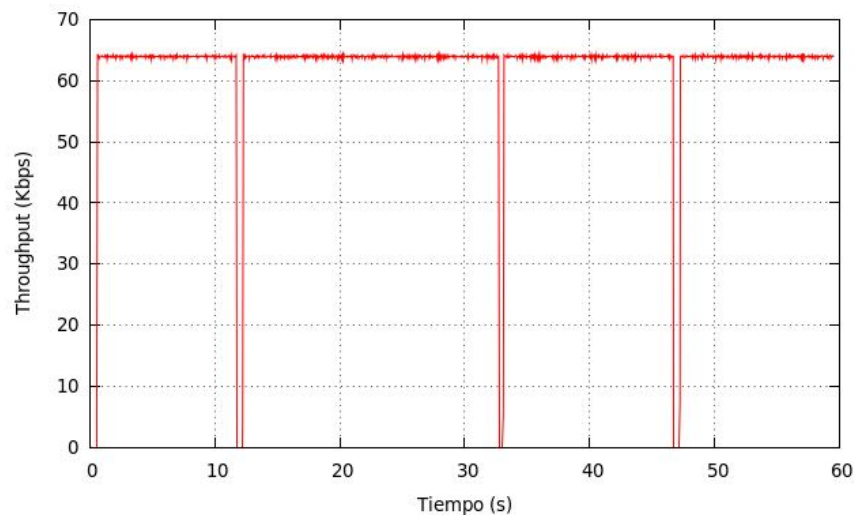


**Figura 4.24. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Data-Driven* - Movimiento controlado).**

A partir del comportamiento observado en la figura 4.23 se puede afirmar que se da cumplimiento al valor de *jitter* requerido para garantizar una buena calidad del servicio. Los picos presentados en la gráfica que están por debajo de 0,9 ms, son producto del procesamiento prioritario que tienen los mensajes que mantienen el establecimiento del LSP, como se mencionó anteriormente.

En la figura 4.24 se observa que la variación del retardo permanece casi constante durante la simulación, tomando valores entre 0 y 0,3 ms, viéndose afectada en los instantes en los que se presentan los *Handover*, debido a la pérdida de paquetes. El análisis para estas gráficas coincide con lo expresado en el escenario base.

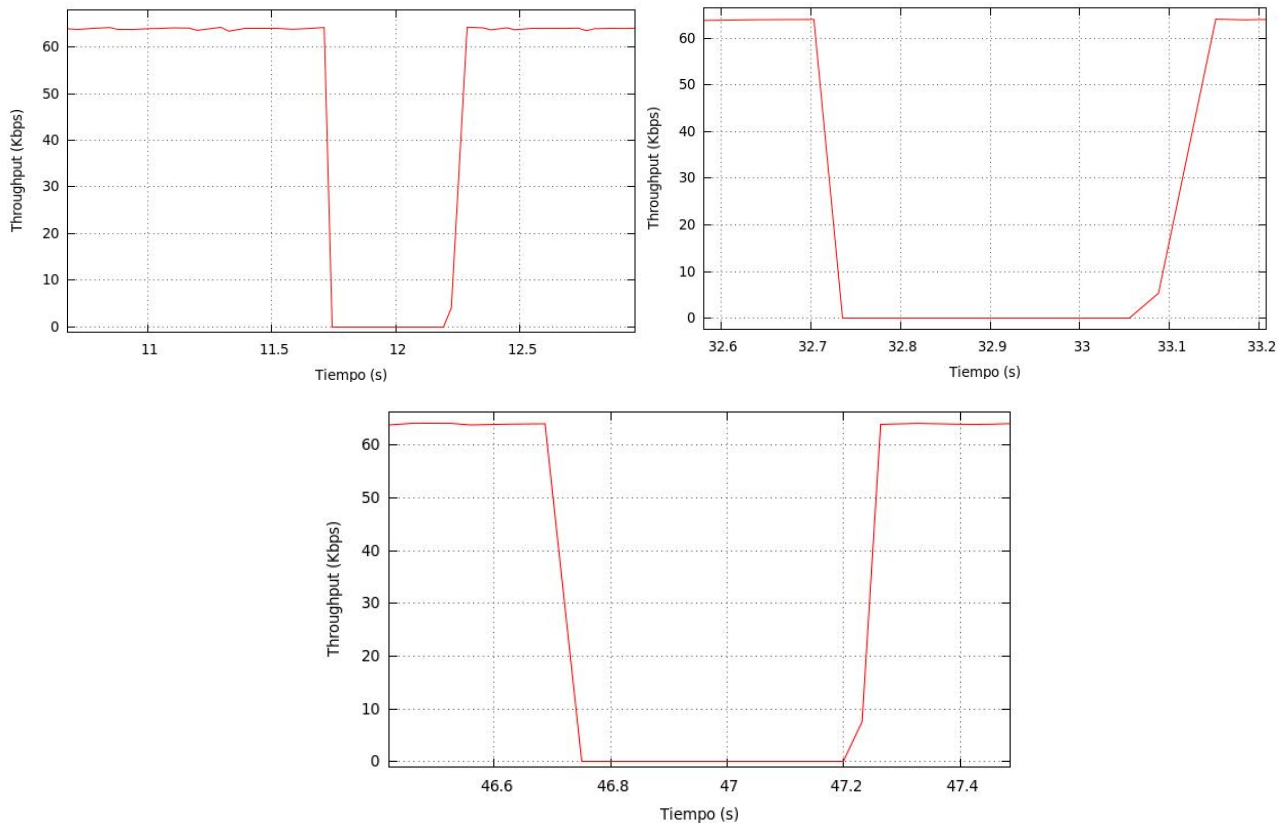
La figura 4.25 y la figura 4.26 presentan las gráficas respectivas del *throughput* de la transmisión y el *throughput* durante cada *Handover*.



**Figura 4.25. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven - Movimiento controlado*).**

En la figura 4.25 se observa que antes y después del *Handover*, la tasa de transmisión es relativamente constante (64 Kbps) y durante los intervalos en los que ocurren los *Handover*, la capacidad del enlace es nula, debido a la des-asociación que sufre el MN durante este proceso, evitando que los paquetes transmitidos sean entregados correctamente al MN.

Las caídas observadas en las gráficas de la figura 4.26, concuerdan con el momento y la duración en que sucede el *Handover*. El análisis para estas gráficas coincide con lo expresado en el escenario base.



**Figura 4.26. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Data-Driven - Movimiento controlado).**

#### 4.1.5.2.1.2. Caso 1-b: Movimiento aleatorio del MN

Al habilitar el movimiento aleatorio, se le permite al MN desplazarse con velocidad variable por todo el escenario donde se define la simulación; esto, con el fin de apreciar resultados donde no se tenga un control sobre sus movimientos y su velocidad.

Para llevar a cabo este escenario se adicionan las líneas al *script* del Anexo A. En la declaración de variables se establece el valor del generador de números aleatorios:

```
set conf (rndseed) 8
```

El movimiento aleatorio se define como un objeto de la clase Generadora de Números Aleatorios (RNG, *Random Number Generator*) mediante:

```
global defaultRNG
$defaultRNG seed $conf (rndseed)
```

Para que las entidades MAG/LER 1 y MAG/LER 2 soporten el movimiento aleatorio del MN se debe habilitar la opción de movimiento aleatorio para estaciones base.

```
$mag1 random-motion 1  
$mag2 random-motion 1
```

Finalmente cuando se crea el MN, no es necesario proporcionarle una posición inicial, basta con habilitar la opción de movimiento aleatorio para nodos móviles e inicializarlo.

```
$mn random-motion 1  
$mn start
```

Los resultados obtenidos en esta simulación se presentan en el Anexo C.

#### 4.1.5.2.2. Caso 2: Establecimiento del *LSP-Control-Driven*

Como se menciona en la sección 3.5.4, el establecimiento del *LSP-Control-Driven* realiza la creación del LSP bi-direccional antes del arribo de un MN por primera vez a un MAG/LER, esta forma de establecimiento permite que tanto mensajes de señalización como paquetes de datos sean transportados por el LSP bi-direccional. Se realizó un análisis del caso en un entorno donde el movimiento y la velocidad del MN son controladas (determinado por el usuario), posteriormente se analizó el caso alterno donde el movimiento y la velocidad del MN son aleatorias (determinado por NS-2).

En el anexo B, se encuentra el *script* implementado en NS-2 que corresponden a la integración PMIPv6/MPLS con establecimiento del *LSP-Control-Driven* y movimiento Controlado.

##### 4.1.5.2.2.1. Caso 2-a: Movimiento controlado del MN

Similar que en el escenario base, en este escenario, se realizan 3 procesos de *Handover* durante el tiempo de simulación. El nodo móvil se mueve controladamente y con velocidad constante como se indica a continuación:

- a) El MN parte del punto 1 y se dirige al punto 3.
- b) El MN parte del punto 3 y se dirige al punto 2.
- c) El MN parte del punto 2 y se dirige al punto 4.

La figura 4.27 muestra el desplazamiento del nodo móvil.

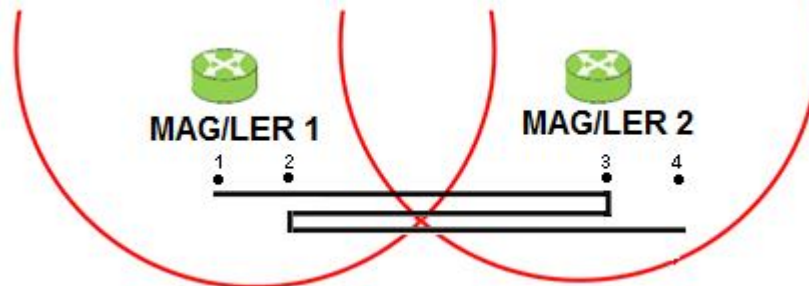


Figura 4.27. Desplazamiento del nodo móvil para el escenario 2 - caso 2-a.

Las figuras 4.28, 4.29 y 4.30 muestran en una línea de tiempo, la señalización correspondiente al funcionamiento de PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven*), asociada particularmente a cada proceso de *Handover*. En las gráficas se pueden identificar los instantes de tiempo en los que ocurren los *Handover* y determinar su duración.

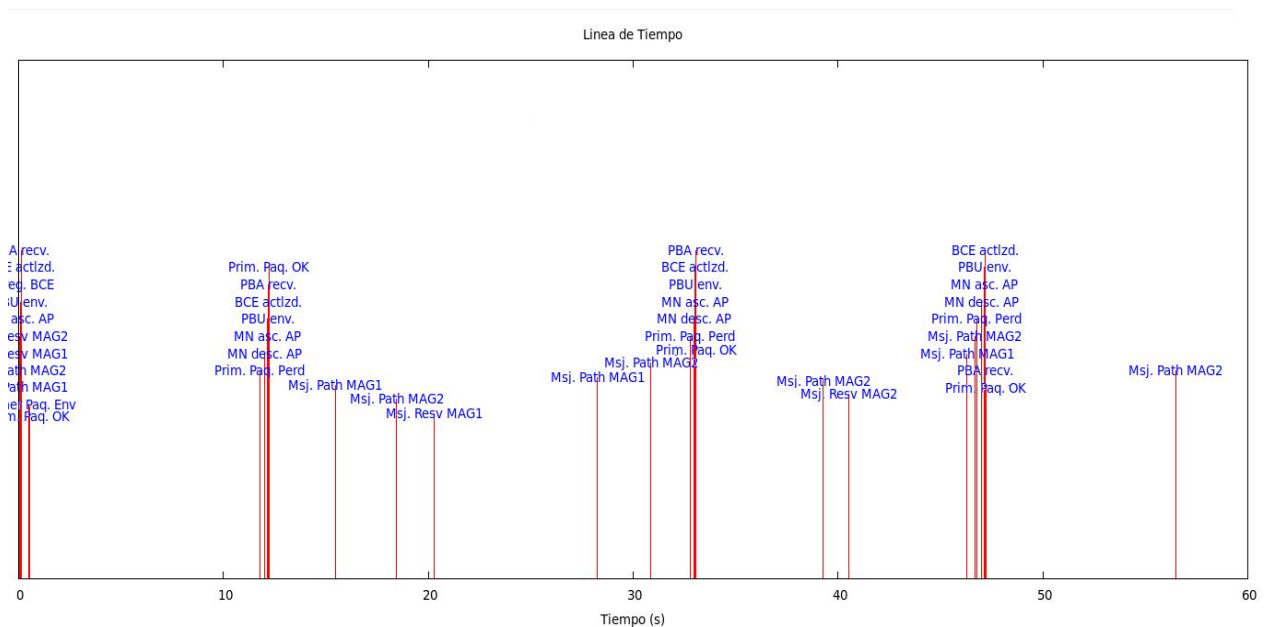


Figura 4.28. Señalización en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).



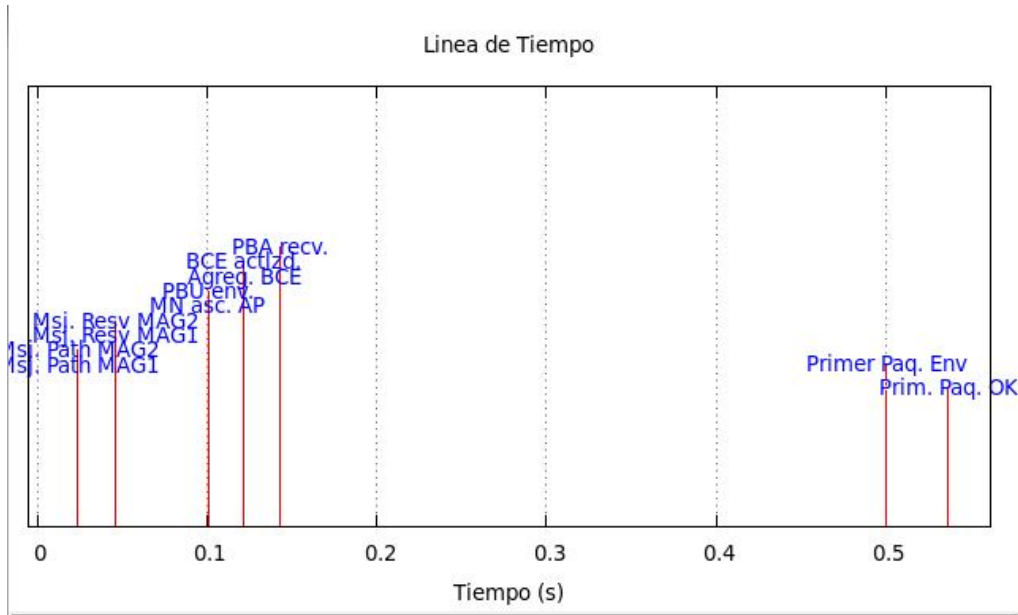


Figura 4.29. Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización (*LSP-Control-Driven - Movimiento controlado*).

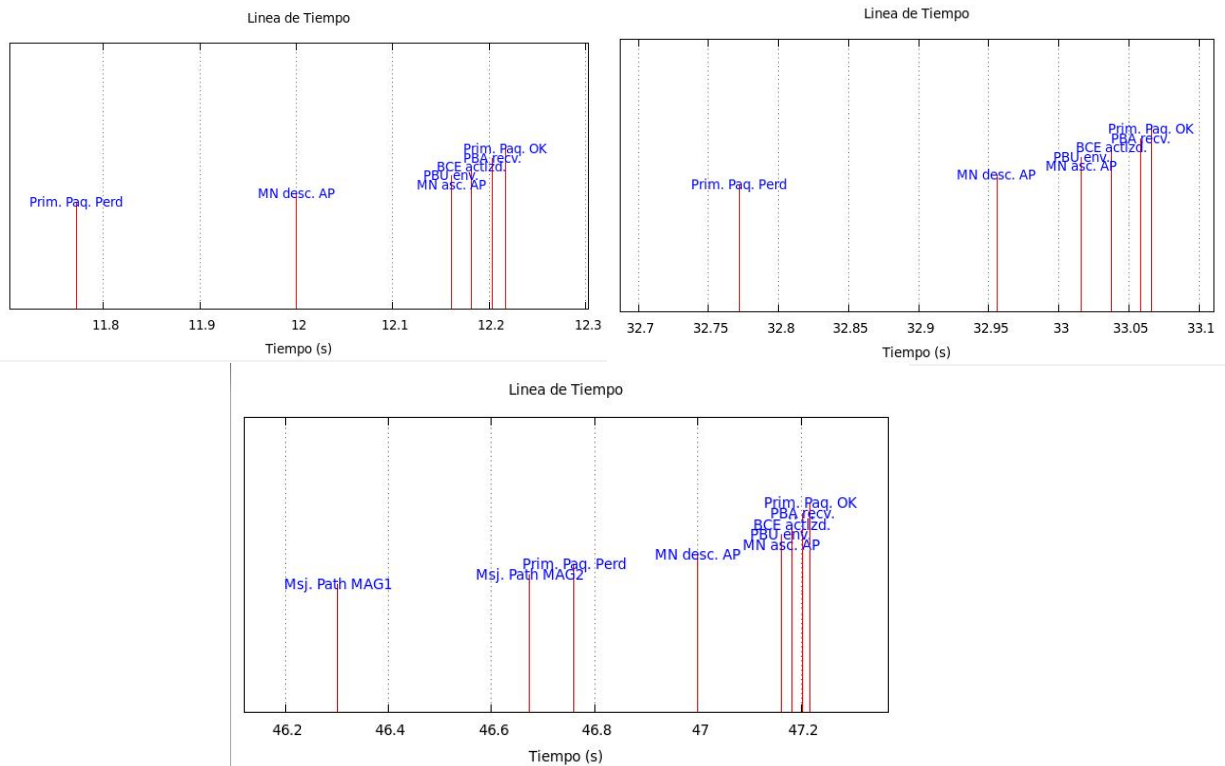


Figura 4.30. Señalización en los eventos de *Handover* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven - Movimiento controlado*).

En las figuras 4.28 y 4.29 se observa que el establecimiento del LSP bi-direccional se realiza antes del arribo de un MN por primera vez a un MAG/LER, esta forma de establecimiento permite que tanto mensajes de señalización como paquetes de datos sean transportados por el LSP bi-direccional como se menciona en la sección 3.5.4.

Los mensajes PATH\_MAG y RESV\_MAG, se emplean para solicitar el establecimiento de cada LSP, que permite enviar mediante conmutación de etiquetas los paquetes de señalización y los paquetes de datos.

La figura 4.30 indica detalladamente en una línea de tiempo la señalización durante cada *Handover*.

Durante el tiempo de simulación se obtuvieron los siguientes valores de paquetes enviados, recibidos y perdidos, la tabla 4.10 presenta estos datos.

Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	Porcentaje de Paquetes Perdidos
1844	1844	40	2,169

**Tabla 4.10. Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**

Bajo este escenario de simulación, la cantidad de paquetes perdidos se reduce de 42 a 40 (comparado con el escenario base) y de 41 a 40 (comparado con el caso 1-a), el decremento de paquetes perdidos, evidencia la mejora que implica el envío de todos los paquetes que circulan en el dominio PMIPv6/MPLS, a través de la conmutación de etiquetas.

La tabla 4.11 presenta el tiempo de ocurrencia de los *Handover* y los paquetes perdidos durante este proceso. Por otra parte la tabla 4.11 muestra la duración de cada *Handover*.

Paquetes perdidos <i>Handover 1 (t ≈ 11,78)</i>	Paquetes perdidos <i>Handover 2 (t ≈ 32,77)</i>	Paquetes perdidos <i>Handover 3 (t ≈ 46,67)</i>
15	10	15

**Tabla 4.11. Paquetes perdidos durante el Handover en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**

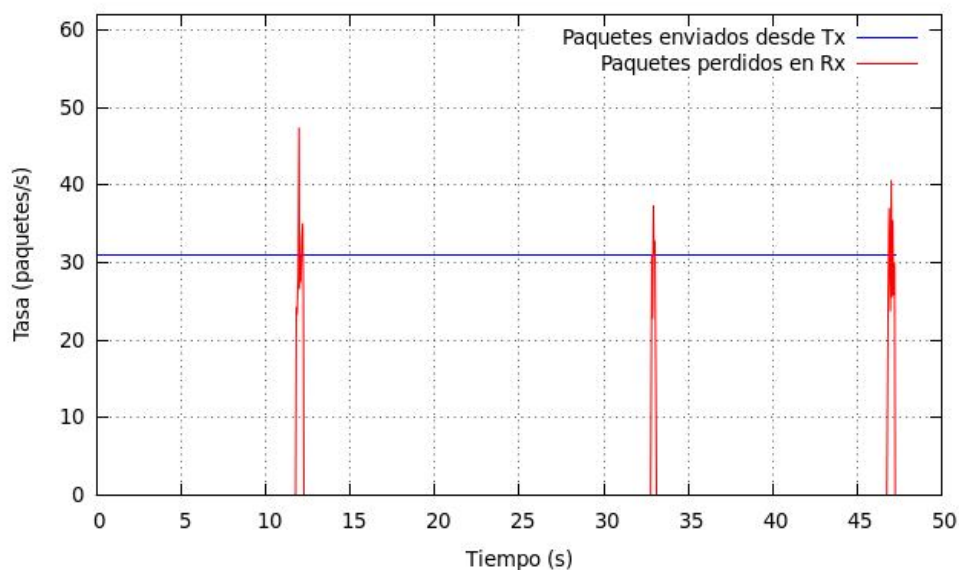
Duración aproximada <i>Handover</i> 1	Duración aproximada <i>Handover</i> 2	Duración aproximada <i>Handover</i> 3
0,449997507 seg.	0,297810540 seg.	0,462030528 seg.

**Tabla 4.12. Duración del *Handover* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**

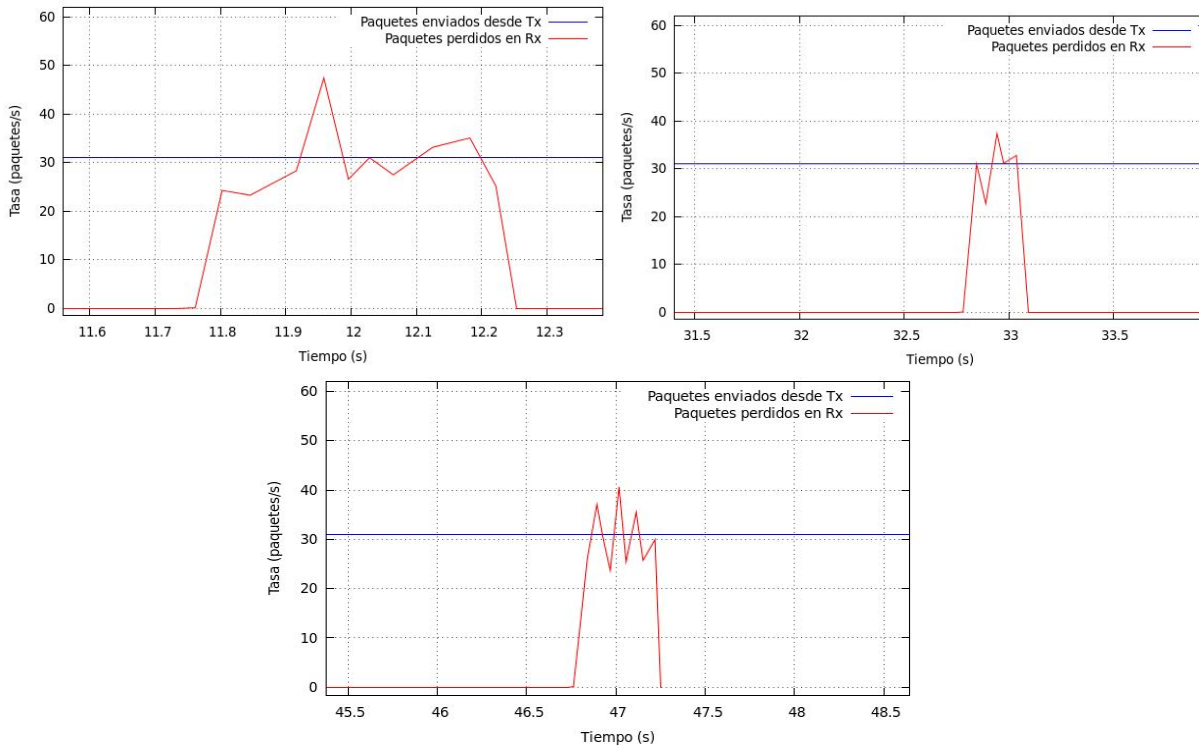
De la información suministrada en las tablas 4.11 y 4.12 se concluye que la duración promedio de un *Handover* es de 0,4032 segundos y en este periodo se tiene una pérdida promedio de 13,33 paquetes.

En este escenario la duración promedio del *Handover* disminuye en 23,1 ms, en comparación con el escenario base y en 11,6 ms en comparación con el caso 1-a (*LSP-Data-Driven* y movimiento controlado), esta reducción confirma que la integración presenta una mejora durante el proceso de *Handover*. El promedio de paquetes perdidos durante este proceso también presentan una sutil reducción de 0,66 en comparación con el escenario base y de 0,33 en comparación con el caso 1-a, evidenciando que el envío de todos los paquetes a través de conmutación de etiquetas mejora el desempeño del proceso de *Handover*.

La figura 4.31 y la figura 4.32 muestran la tasa de paquetes perdidos durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



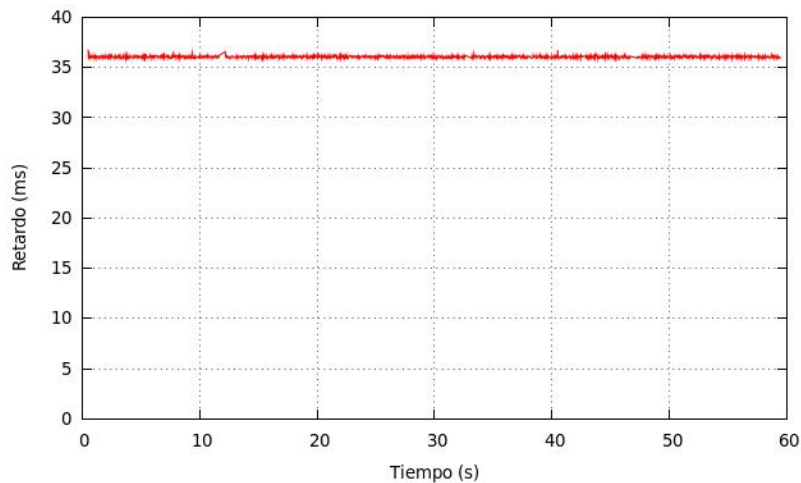
**Figura 4.31. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**



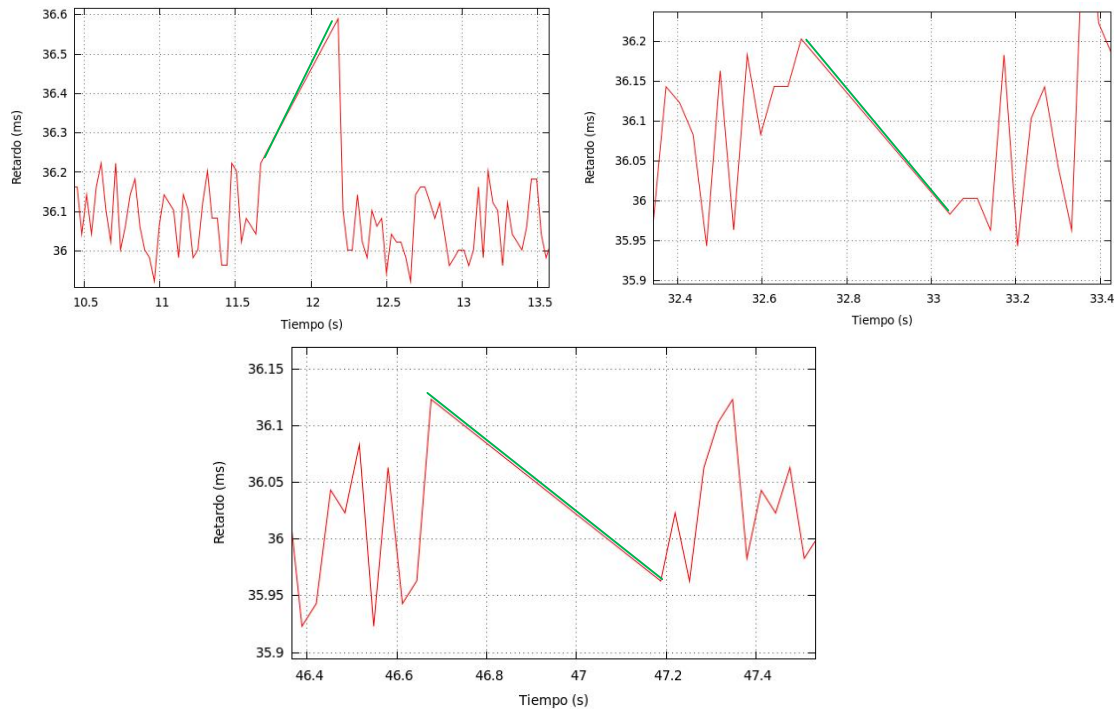
**Figura 4.32. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Control-Driven - Movimiento controlado).**

El análisis para las gráficas de las figuras 4.31 y 4.32 concuerdan con el análisis expresado en el escenario base.

Las figuras 4.33 y 4.34 presentan las gráficas del comportamiento del retardo extremo a extremo durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.33. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (LSP-Control-Driven - Movimiento controlado).**



**Figura 4.34. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Control-Driven - Movimiento controlado).**

Se observa en las gráficas 4.33 y 4.34, que antes y después del proceso de *Handover*, el retardo es relativamente constante, tomando valores entre 35.94 ms y 36.22 ms (36,08 ms en promedio), cumpliendo con el requerimiento de calidad definido en la recomendación G.1010 de la ITU-T.

Esta reducción del promedio del retardo en comparación con el escenario base es de 5,52 ms y de 3,21 ms con el caso 1-a, demostrando que existe una pequeña mejora en el desempeño general de la red.

El análisis del comportamiento visto en la figura 4.33 concuerda con los argumentos expuestos para el escenario base. Los picos presentes en la gráfica, representan un incremento en el retardo asociado a los mensajes que mantienen el establecimiento del LSP, los cuales son procesados con mayor prioridad que un paquete de datos.

La figura 4.35 y la figura 4.36 presentan las gráficas del comportamiento del *jitter* durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

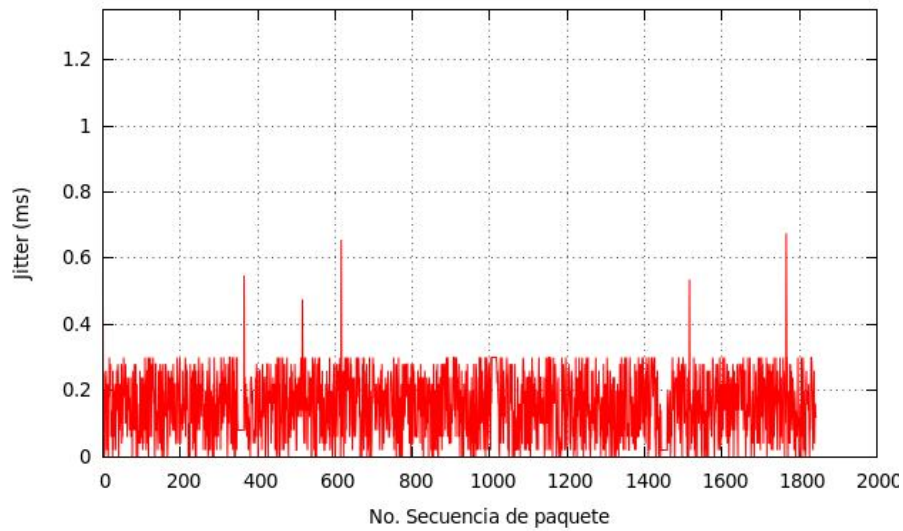


Figura 4.35. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven - Movimiento controlado*).

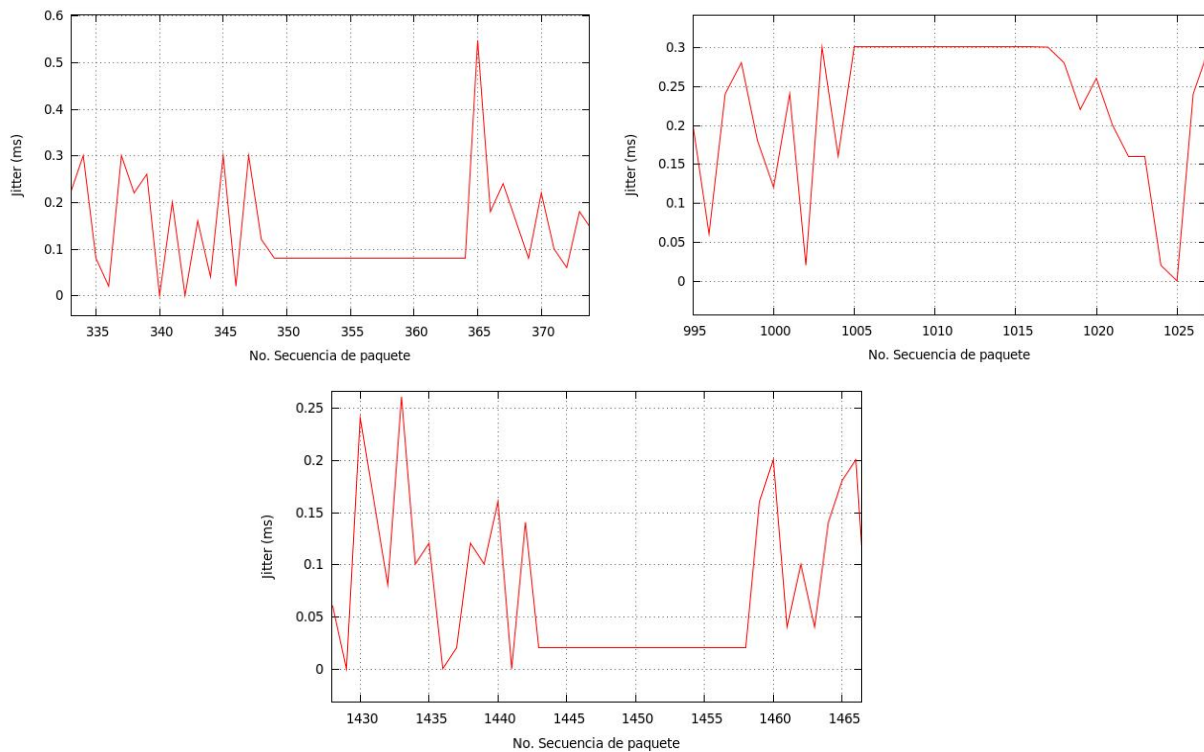
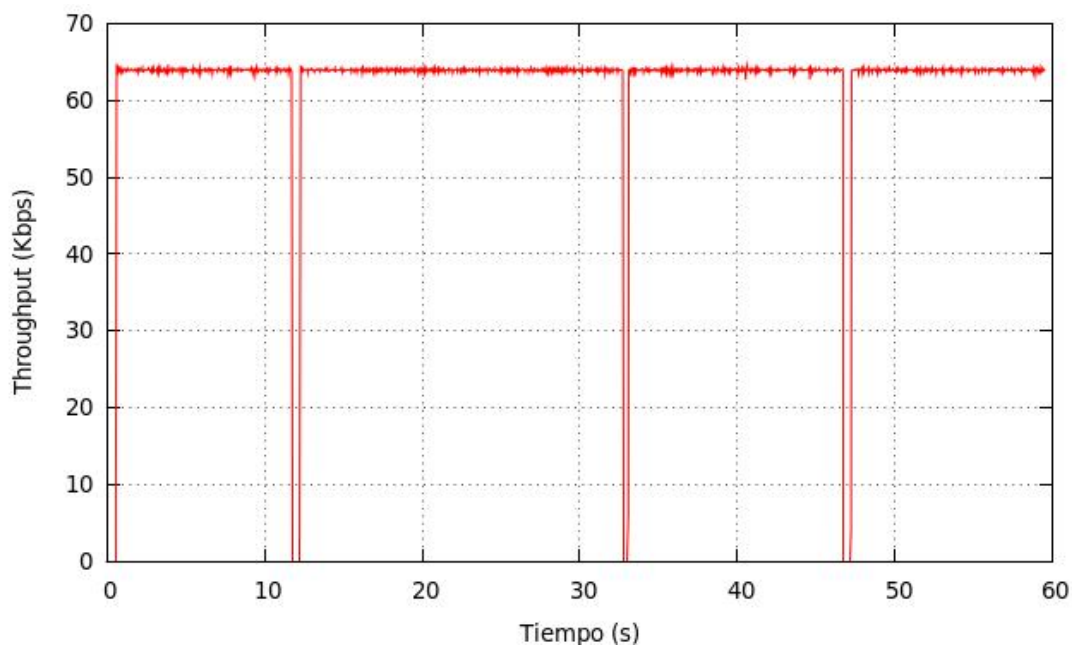


Figura 4.36. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven - Movimiento controlado*).

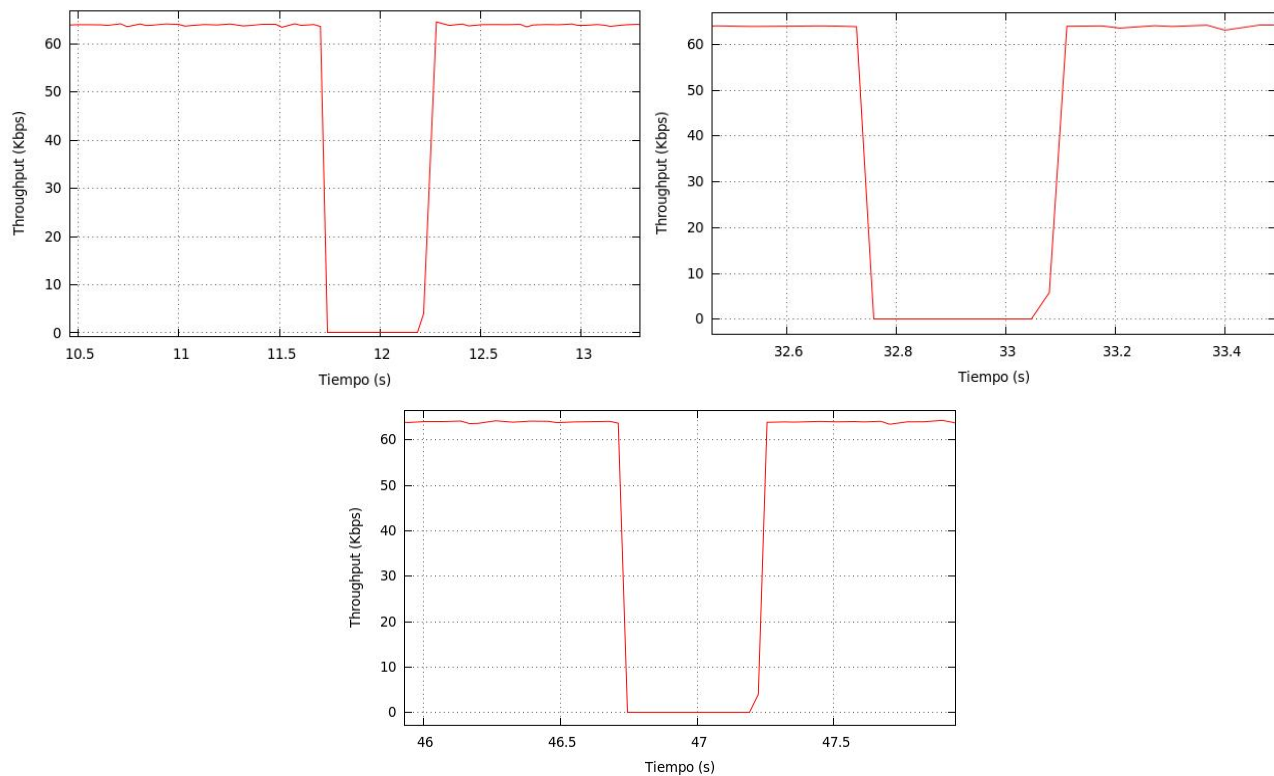
A partir del comportamiento observado en la figura 4.35 se puede afirmar que se da cumplimiento al valor de *jitter* requerido para garantizar una buena calidad del servicio. Los picos presentados en la gráfica que están por debajo de 0,7 ms, son producto del procesamiento prioritario que tienen los mensajes que mantienen el establecimiento del LSP, como se expuso en el caso 1-a.

En la figura 4.36 se observa que la variación del retardo permanece casi constante durante la simulación, tomando valores entre 0 y 0,3 ms, viéndose afectada en los instantes en los que se presentan los *Handover*, debido a la pérdida de paquetes. El análisis para estas gráficas concuerda con lo expresado para el escenario base.

La figura 4.37 y la figura 4.38 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *throughput* durante el tiempo de simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura 4.37. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**



**Figura 4.38. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*HO1*, *HO2*, *HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven* - Movimiento controlado).**

En las figura 4.37 se puede observar que antes y después de los *Handover*, la tasa de transmisión es relativamente constante y durante los intervalos en los que ocurren los *Handover* la capacidad del enlace es nula, debido a la des-asociación que sufre el MN durante este proceso; esta des-asociación no permite que los paquetes transmitidos sean entregados correctamente al MN. El análisis de la figura 4.38 concuerda con lo expuesto en el caso 1-a.

#### 4.1.5.2.2.2. Caso 2-b: Movimiento aleatorio del MN

Para habilitar en simulación el movimiento aleatorio, se deben agregar de igual forma al *script* del Anexo B, las líneas que se mencionan en la sección 4.1.6.2.1.2.

Los resultados obtenidos en esta simulación se presentan en el Anexo C.

Después de realizar los respectivos análisis para cada caso descrito, la tabla 4.13, presenta una síntesis de los resultados obtenidos en simulación a fin de comparar el comportamiento de PMIPv6 y PMIPv6/MPLS.



Características	Escenarios de simulación				
	Escenario 1 PMIPv6	Escenario 2 PMIPv6/MPLS			
	Escenario Base	Caso 1 <i>LSP-Data-Driven</i>		Caso 2 <i>LSP-Control-Driven</i>	
		Caso 1-a	Caso 1-b	Caso 2-a	Caso 2-b
<b>Movimiento del MN</b>	Controlado	Controlado	Aleatorio	Controlado	Aleatorio
<b>Número de HO</b>	3	3	3	3	3
<b>Duración promedio del HO (Seg.)</b>	0,4263	0,4148	0,4210	0,4032	0,4036
<b>Paquetes Perdidos durante el HO</b>	42	41	41	40	40
<b>Promedio de Paquetes Perdidos durante un HO</b>	14	13,66	13,66	13,33	13,33
<b>Throughput durante el HO</b>	0 Kbps	0 Kbps	0 Kbps	0 Kbps	0 Kbps
<b>Retardo durante el HO</b>	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado
<b>Jitter durante el HO</b>	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado	Indeterminado
<b>Porcentaje de Paquetes Perdidos</b>	2,277	2,223	0,2626	2,169	0,2562
<b>Throughput promedio</b>	64 Kbps	64 Kbps	64 Kbps	64 Kbps	64 Kbps
<b>Promedio Retardo Extremo a extremo (mseg.)</b>	41,605	39,29	37,09	36,08	36,08
<b>Jitter</b>	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,3	0 - 0,3

**Tabla 4.13. Resumen de datos del comportamiento de la integración.**

En la tabla 4.13 se observa que la integración PMIPv6/MPLS tiene un mejor comportamiento que PMIPv6, además el establecimiento de un *LSP-Control-Driven* con respecto al *LSP-Data-Driven*, evidencia de mejor manera el impacto que tiene la integración en un entorno de micromovilidad, presentando mejoras en la reducción del retardo extremo a extremo, en el tiempo y el número de paquetes perdidos durante el *Handover*, impactando positivamente el desempeño de la red.

Este capítulo presentó un análisis en un contexto de micromovilidad sobre el impacto que tiene la integración PMIPv6/MPLS en comparación con un escenario PMIPv6. Se consideraron algunos parámetros de desempeño como el retardo, *throughput*, *jitter*, entre otros, utilizados para valorar el efecto que produce la integración al simular un servicio de tiempo real (voz) y su comportamiento frente al *Handover*.

El siguiente capítulo presenta las conclusiones a las que se llegaron después del desarrollo del proyecto, las recomendaciones y los trabajos futuros que se pueden implementar en base a este tema.

## 5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan las conclusiones, recomendaciones y los trabajos futuros, resultado de la realización de este trabajo. Las conclusiones se basan en los objetivos propuestos y en su desarrollo; las recomendaciones se dan acerca de la metodología de trabajo; los trabajos futuros con respecto a las herramientas de simulación, los protocolos de movilidad, la simulación y sus resultados.

### 5.1. CONCLUSIONES

#### 5.1.1. Respecto al proceso de integración protocolar

- Es fundamental tener en cuenta los procesos de identificación de las características de los protocolos, selección del esquema de integración y establecimiento de las consideraciones y restricciones de la propuesta de integración, para plantear una adecuada estrategia de integración a nivel protocolar.
- La determinación y/o identificación de funciones, elementos y características de los protocolos a integrar, fue esencial a fin de realizar la selección adecuada del esquema de integración. En este proyecto se identificó en PMIPv6, la gestión de movilidad, el *Handover*, el MAG, el LMA, el despliegue sobre la red de acceso y el establecimiento del túnel IP-sobre-IP, como aspectos importantes que facilitarían la integración; asimismo, en MPLS se identificó la conmutación de etiquetas, el LER, el LSR, el despliegue sobre la red de transporte y el establecimiento de LSP, como aspectos considerados en la misma.
- Se seleccionó el esquema de integración semi-suave en el presente trabajo, pues permitió realizar una integración a nivel protocolar que brinda una solución de coexistencia y funcionamiento conjunto entre PMIPv6 y MPLS. El nivel de complejidad de esta integración fue moderado con respecto a la implementación y al tiempo de ejecución, presentando una eficiencia aceptable en las operaciones de red.

### 5.1.2. Respecto a la simulación

- NS-2 permitió simular el proceso de integración a nivel protocolar, de dos formas complementarias: la primera, consiste en modificar el *script* en lenguaje OTcl sin la necesidad de compilar el simulador, obteniendo los resultados de simulación de forma rápida, sin embargo, la interpretación del script por medio del simulador es lenta debido al proceso de incorporación de librerías en tiempo de ejecución en el lenguaje nativo de NS-2 C++. La segunda forma consiste en modificar el código en lenguaje C++ del módulo que implementa los protocolos, necesitando generar un proceso de compilación tedioso y demorado para incorporar estos cambios en el simulador, sin embargo, se mejora la eficiencia en la interpretación de los scripts en lenguaje Otcl por medio del simulador en tiempo de ejecución, obteniendo resultados de simulación de una forma más rápida.
- Al trabajar con NS-2, es imprescindible conocer la versión con la cual se va a implementar la integración, con el fin de encontrar los parches adecuados de los módulos PMIPv6 y MPLS que permitan incorporar sus funciones dentro de los nodos MAG/LER y LMA/LER.
- Para implementar en un entorno real los escenarios de simulación especificados en este proyecto, se deben definir todos los aspectos que caracterizan ambientes híbridos de micromovilidad IP, tales como topologías basadas en conexiones cableadas, tecnologías de acceso inalámbricas, áreas de cobertura, tamaño de los paquetes e intervalo de envío de los mismos, modelo del canal de propagación, tipo de interfaz, modelo de la antena, entre otros aspectos, conservando los límites que permiten obtener resultados que se puedan analizar.

### 5.1.3. Respecto a los resultados de simulación

- La sustitución del túnel IP-sobre-IP de PMIPv6 por el LSP bi-direccional de PMIPv6/MPLS, reduce el retardo extremo a extremo, debido a que los enrutadores deben procesar una etiqueta de tamaño fijo y de menor longitud en comparación con el encabezado IPv6, agilizando el proceso de envío de paquetes.
- La integración a nivel protocolar utilizando un esquema semi-suave, entre protocolos de movilidad y MPLS, ofrece en un dominio de alta movilidad, la posibilidad de tener mecanismos de QoS y soporte de TE, que pueden brindar a los usuarios un servicio con un nivel de calidad adecuado.

- Dentro de la integración PMIPv6/MPLS, el establecimiento del LSP bi-direccional *LSP-Control-Driven* reduce significativamente la duración del *Handover* y por tanto los paquetes perdidos durante este proceso, debido a que tanto paquetes de datos y de señalización son enviados por LSP bi-direccional, en comparación con el establecimiento *LSP-Data-Driven*.
- Mantener el establecimiento del LSP bi-direccional contribuye a la reducción del tiempo de *Handover* y por tanto la pérdida de paquetes, ya que no es necesario realizar su construcción cada vez que sucede este proceso, sin embargo, este establecimiento aumenta el nivel de *jitter* debido a la prioridad para atender los mensajes RSVP-TE (*soft-state*) que mantienen activo dicho LSP en comparación con los datos.
- La introducción de características de MPLS en un ambiente de micromovilidad IPv6, no altera el nivel de *jitter* y de retardo extremo a extremo según lo definido por la especificación G.1010 de la ITU-T, permitiendo que los servicios y aplicaciones en tiempo real, tengan óptimos niveles de calidad y por tanto se cumpla con los requerimientos esperados por la misma.
- La integración PMIPv6/MPLS mejora el desempeño global de la red en comparación con un escenario PMIPv6, presentando una reducción de 5,5 ms en el retardo extremo a extremo y de 2,3 ms en la duración del *Handover*, permitiendo disminuir en 2, los paquetes perdidos durante este proceso. Esto evidencia el impacto positivo que tiene la introducción de MPLS en un dominio PMIPv6 y por tanto en un entorno de micromovilidad IP.

## 5.2. RECOMENDACIONES

- Para abordar el análisis de problemas de redes y su desempeño, mediante el uso de simulación, es vital la selección de una estrategia adecuada de trabajo y una sólida metodología de simulación, pues, esto permitirá abordar la solución al problema de forma clara y estratégica, permitiendo obtener un resultados coherentes y satisfactorios.
- Para la selección de una herramienta de simulación, es necesario realizar una exploración de sus características, las variables de desempeño que monitorea, la configuración de fuentes de datos, entre otras, a fin de determinar si esta cumple con los requisitos de simulación planteados, evitando que se presenten inconvenientes durante el desarrollo del plan de pruebas y análisis de resultados.

- Cuando se trabaje con *scripts* de simulación, es recomendable mantener el código estructurado y organizado, complementado con comentarios que describan el significado de las líneas. Del mismo modo es posible tener múltiples escenarios de simulación que tengan características en común, por tanto utilizar un código a manera de plantilla permite realizar cambios y pruebas mucho más rápido.
- Es recomendable mantener un proceso de control de versiones de los *scripts* de simulación, mediante herramientas colaborativas basadas en Internet (Git, mercurial, svn, entre otros) que permiten administrar eficientemente los cambios realizados en cada uno de los *scripts* de trabajo.

### 5.3. TRABAJOS FUTUROS

- La integración semi-suave presentó un mejor rendimiento en comparación con un escenario PMIPv6. Se plantea una propuesta integración dura (desde la perspectiva de la sintaxis, semántica y sincronización) entre PMIPv6 y MPLS, a fin de establecer un nuevo protocolo y evidenciar su rendimiento en comparación con la propuesta realizada en este trabajo.
- La integración semi-suave de PMIPv6/MPLS a pesar de utilizar RSVP-TE no considero soportar características como QoS y/o TE, por ello se propone realizar un análisis de la integración que incorpore estas características, a fin de observar su aporte dentro de la red.
- Existen herramientas de simulación que admiten realizar modificaciones a sus módulos de funcionamiento, permitiendo realizar integración protocolar, por tanto se propone realizar la integración PMIPv6/MPLS mediante el uso de otra herramienta de simulación, comparando el nivel de complejidad en implementación y ejecución, así como los resultados obtenidos.
- Para caracterizar la integración de PMIPv6/MPLS se consideró una red de acceso 802.11g. Se propone realizar un análisis de la integración sobre un tipo de red de acceso diferente, como es el caso de Wimax, LTE, Ad hoc, entre otros.
- En este trabajo se consideró un único MN y escenarios inalámbricos ideales. Se plantea realizar un análisis de PMIPv6/MPLS en donde se consideren múltiples MNs y escenarios inalámbricos que presenten problemas de radio-frecuencia y/o radio-propagación, a fin de asemejar los escenarios simulados a un ambiente real.

- La transmisión de datos a dos localizaciones simultáneamente, podría reducir la sobrecarga de señalización relacionada con las migraciones de los MNs, *Handover* sin pérdidas y favorecer el desarrollo de procesos que permitan fácil adaptación a entornos móviles IPv6. Se propone una estrategia de integración de PMIPv6/MPLS que soporte tráfico *multicast*.

## REFERENCIAS

- [1] J. Kellokoski, T. Hamalainen, "User-centric approach to always-best-connected networks," *Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on*, vol., no., pp.1-6, 5-7 Oct. 2011.
- [2] M. F. Abduljalil, S. K. Bodhe, "A survey of integrating IP mobility protocols and mobile ad hoc networks," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol.9, no.1, pp. 14-30, Primer Cuarto 2007.
- [3] D. Saha, A. Mukherjee, I.S. Misra, M. Chakraborty, N. Subhash, "Mobility support in IP: a survey of related protocols," *Network, IEEE*, vol.18, no.6, pp. 34-40, Nov.-Dic. 2004.
- [4] K.P. Makhecha, K.H. Wandra, "4G Wireless Networks: Opportunities and Challenges," *India Conf. (INDICON), 2009 Annual IEEE*, vol., no., pp.1-4, 18-20 Dic. 2009.
- [5] A. Vaish, "Plenary talk: Ericsson's initiatives on 4G technologies," *Recent Trends in Information Technology (ICRTIT), 2011 International Conf. on*, vol., no., pp.3, 3-5 Junio 2011.
- [6] J.L Chen, M.C. Chen, S.W. Liu, J.Y. Jhuo, "Cross-layer QoS architecture for 4G heterogeneous network services," *Advanced Communication Technology, 2009. ICACT 2009. 11th International Conf. on*, vol.01, no., pp.73-77, 15-18 Feb. 2009.
- [7] L.B.S Marques, S. Motoyama, "Vertical handoff algorithms with QoS guarantee for 4G networks," *Communications, 2009. LATINCOM '09. IEEE Latin-American Conf. on*, vol., no., pp.1-6, 10-11 Sept. 2009.
- [8] D. Johnson, C. Perkins, and J. Arkko, "Mobility Support in IPv6," IETF RFC 3775, Junio 2004.
- [9] D. Cortés, C. Vecino, G. Sánchez, "Análisis y optimización del *Handover* en redes Mobile IP," tesis de Maestría, Universidad de Extremadura, Extremadura, España, 2008.

- [10] S. Lee, et al., "A wireless access network based on WDM-PON for HMIPv6 mobility support," *Wireless Networks*, vol. 16, no. 6, pp. 1707-1722, Agosto 2010.
- [11] R. Langar, N. Bouabdallah, R. Boutaba, "A Comprehensive Analysis of Mobility Management in MPLS-Based Wireless Acces Networks," *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol.16, no.4, pp.918-931, Agosto 2008.
- [12] F. Xia, B. Sarikaya. "MPLS Tunnel Support for Proxy Mobile IPv6," IETF Internet Draft, disponible como draft-xia-netlmmmpls-tunnel-00.txt. Oct. 2008.
- [13] J. Ortiz, "Mecanismos para proveer Calidad de Servicios en redes de nuevas generaciones (4G)," tesis Doctoral, University of Castilla - La Mancha and CNRI, Ciudad Real, España. 2010.
- [14] R. G. Garroppo, S. Giordano, L. Tavanti, "Network-based micro- mobility in Wireless Mesh Networks: is MPLS convenient?," *Global Telecommunications Conf., Honolulu., GLOBECOM 2009. Hawaii. 30 Noviembre – 04 Diciembre, 2009.* pp. 1-5.
- [15] Zhao Liang, et al., "A Mobility Management based on Proxy MIPv6 and MPLS in Aeronautical Telecommunications Network," *Information Science and Engineering, 2009 1st International Conf. on, Beijing, ICISE.*, pp. 2452-2455, 26-28 Diciembre, 2009.
- [16] I. Joe, H. Lee., "GM-MPLS: Group-based Mobile MPLS for Mobility Management in Wired/Wireless Networks," *Networked Computing, 2010 6th International Conf. on, Gyeongju, INC.*, pp. 1-6., 11-13 Mayo 2010.
- [17] V. Vassiliou, "Handover operation in mobile IP-over-MPLS networks," In *Networking Technologies, Services, and Protocols; Performance of Computer and Communication Networks; Mobile and Wireless Communications Systems*, vol. 3976, F. Boavida, Ed. Springer Berlin, pp. 568-579, 2006.
- [18] V. Vassiliou, et al., "M-MPLS: Micromobility-enabled multiprotocol label switching," *Communications, 2003. ICC '03. IEEE International Conf. on*, vol.1, no., pp. 250- 255 vol.1, 11-15 Mayo 2003.
- [19] V. Vassiliou, "Supporting mobility events within a hierarchical mobile IP-over-MPLS network," In *Journal of Communications*, Vol. 2, No. 2, Marzo 2007.
- [20] D. Barlow, "An integration framework and a signaling protocol for MPLS/DiffServ/HMIP radio access networks," tesis Doctoral, Georgia Institute of Technology, Atlanta, Georgia, USA, Abr. 2002.



- [21] Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE Standard Computer Dictionary: A Compilation of IEEE Standard Computer Glossaries. New York, NY: 1990.
- [22] R. L. Freeman, "The OSI model and data link-layer," in *Practical Data Communications*, 2da ed., C. Fernández, Ed. John Wiley & Sons Inc, 2001, pp.13-41.
- [23] D. D. Clark and D. L. Tennenhouse, "Architectural considerations for a new generation of protocols," in *Symposium on Communications Architectures and Protocols, Philadelphia, SIGCOMM IEEE, Pensylvania*. Septiembre, Vol. 20, no.4, 1990. pp. 200 - 208.
- [24] P. Reinbold, O. Bonaventure, "IP micro-mobility protocols," *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol.5, no.1, pp.40-57, Primer Cuarto 2003.
- [25] H. Soliman, C. Castellucia, K. ElMalki, y L. Bellier, "Hierarchical Mobile IPv6 (HMIPv6) Mobility Management," IETF RFC 5380, Oct. 2008.
- [26] R. Koodli, "Mobile IPv6 Fast *Handovers*," IETF RFC 5568, Jul. 2009.
- [27] K.-S. Kong, W. Lee, Y.-H. Han, M.-k. Shin, and H. You, "Mobility Management for All-IP Mobile Networks: Mobile IPv6 vs. Proxy Mobile IPv6," *Wireless Communications, IEEE*, vol.15, no.2, pp.36-45, Abr. 2008.
- [28] S. Gundavelli, K. Leung, V. Devarapalli, K. Chowdhury, y B. Patil, "Proxy Mobile IPv6," IETF RFC 5213, Agosto 2008.
- [29] E. Rosen, A. Viswanathan, y R. Callon, "Multiprotocol Label Switching Architecture," IETF RFC 3031, Enero 2001.
- [30] R. G. Garroppo, S. Giordano, L. Tavanti, "Network-based micro- mobility in Wireless Mesh Networks: is MPLS convenient?," *Global Telecommunications Conf., Honolulu., GLOBECOM 2009. Hawaii*. 30 Noviembre – 04 Diciembre, 2009. pp. 1-5.
- [31] X. Perez, M. Moreno, and H. Hartenstein, "A performance comparison of mobile IPv6, hierarchical mobile IPv6, fast *Handovers* for mobile IPv6 and their combination," *ACM Mobile Computing and Commun. Rev.*, vol. 7, no. 4, pp. 5-19, Oct. 2003.
- [32] J. Kellokoski, T. Hamalainen, "User-centric approach to always-best-connected networks," *Ultra-Modern Telecommunications and Control Systems and*

- Workshops (ICUMT), 2011 3rd International Congress on, vol., no., pp.1-6, 5-7 Oct. 2011.
- [33] ITU-T Rec. Q.1741.6, "IMT-2000 references to Release 8 of GSM-evolved UMTS core network", 2009.
- [34] M. Selivanova, "Applying different types of mobility on one network (Particular case: Mobile IP and SIP)," tesis de maestría, Universidad de Oslo, Oslo, Noruega, Oct. 2002.
- [35] Do Van Than, "Mobile Communications," Universidad de Oslo (lecture notes in Mobile Communications). 2001.
- [36] I. F. Akyildiz, J. Xie, and S. Mohanty, "A Survey of Mobility Management in Next Generation ALL-IP-Based Wireless System," *Wireless Communications, IEEE*, vol.11, no.4, pp. 16-28, Ago. 2004.
- [37] D. Saha et al., "A mobility Supporting in IP: A Survey of Related Protocols," *Network, IEEE*, vol.18, no.6, pp.34-40, Nov.-Dic. 2004.
- [38] T. R. Henderson, "Host Mobility for IP Networks: A comparison," *Network, IEEE*, vol.17, no.6, pp. 18- 26, Nov. - Dic. 2003.
- [39] B.M. Ali, M.H. Habaebi, Al-Talib, S.J. Mysore, and V. Bharghavan, "A New Multicast-based Architecture for Internet Host Mobility in IPv6," *Communications, 2003. APCC 2003. The 9th Asia-Pacific Conf. on*, vol.2, no., pp. 623- 629 Vol.2, 21-24 Sept. 2003.
- [40] J. Kempf, "Goals for Network-Based Localized Mobility Management (NETLMM)," IETF RFC 4831, Abril. 2007.
- [41] A. Rasem, "O-PMIPv6: Optimized Proxy Mobile IPv6," tesis de Maestría, Universidad Carleton, Ottawa, Ontario, Canada, 2011.
- [42] M. Alnas, I. Awan, and R. Holton, "A Survey of Handoff Performance in Mobile IP," *Computer Modeling and Simulation, 2009. EMS '09. Third UK Sim European Symposium on*, vol., no., pp.517-522, 25-27 Nov. 2009.
- [43] "Proxy Mobile IPv6", Open Air Interface, 2008.  
<http://www.openairinterface.org/components/page1095.en.htm>

- [44] A. Diab, A. Mitschele-Thiel, K. Getov, and O. Blume, "Analysis of Proxy MIPv6 Performance compared to Fast MIPv6," in *Proceedings of 33rd IEEE Conference on Local Computer Networks 2008 (LCN 2008)*, pp. 579-580, 2008.
- [45] A. Mishara, M. Shin, and W. Arbaugh, "An Empirical Analysis of the IEEE 802.11 MAC Layer Handoff Process," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 33, no. 2, pp. 93-102, Abr. 2003.
- [46] K. Ray, K. Pawlikowski, H. Sirisena, "Handover in Mobile WiMAX Networks: The State of Art and Research Issues," Department of Computer Science and Software Engineering, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Canterbury, 2009.
- [47] J. C. Lee, J. S. Park, "Fast Handover for Proxy Mobile IPv6 based on 802.11 Networks," *Advanced Communication Technology, 2008. ICACT 2008. 10th International Conf. on*, vol.2, no., pp.1051-1054, 17-20 Feb. 2008.
- [48] V. Toledo, "Análisis y Diseño de Mecanismos de Handoff en Redes Inalámbricas de Banda Ancha *IEEE802.16e*," Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [49] C. J. Bernardos, et al., "Network-based Localized IP mobility Management: Proxy Mobile IPv6 and Current Trends in Standardization," *Wireless Mobile Networks, Ubiquitous Computing, and Dependable Applications*, vol. 1, no 2/3, pp. 16-35, Oct. 2010.
- [50] B. S. Davie, and A. Farrel. *MPLS: Next Steps*, Morgan Kaufmann Publishers ed., 2008. [E-book] Disponible: Amazon e-book.
- [51] J. I. Doménico, L. V. García, "Medición y análisis de tráfico en redes MPLS," tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2008.
- [52] E. Rosen, D. Tappan, G. Fedorkow, Y. Rekhter, D. Farinacci, T. Li, A. Conta, "MPLS Label Stack Encoding," IETF RFC 3032, Enero 2001.
- [53] L. Andersson, R. Asati, " Multiprotocol Label Switching (MPLS) Label Stack Entry: "EXP" Field Renamed to "Traffic Class" Field," IETF RFC 5462, Febrero 2009.
- [54] C. Metz, "Multiprotocol Label Switching and IP, Part 2 (Multicast Virtual Private Networks)," *IEEE Internet Computing*, vol. 2, p. 5, Enero-Febrero 2006.
- [55] Trillium (2000). "MultiProtocol Label Switching (MPLS)". Web Pro Forum Tutorials, The International Engineering Consortium (IEC). <http://www.iec.org>.

- [56] L. Andersson, et al., "LDP Specification," IETF RFC 5036, Octubre 2007.
- [57] R. Brander, et al., "Resource ReSerVation Protocol (RSVP)," IETF RFC 2205, Septiembre 1997.
- [58] A. Farrel, et al., "Encoding of Attributes for Multiprotocol Label Switching (MPLS) Label Switched Path (LSP) Establishment Using Resource ReserVation Protocol – Traffic Engineering (RSVP-TE)," IETF RFC 4420, Febrero 2006.
- [59] D. Awduche, et al., "RSVP-TE: Extensions to RSVP for LSP Tunnels," IETF RFC 3209, Diciembre 2001.
- [60] L. D. Ghein. *MPLS Fundamentals*, Cisco Press ed., 2007. [E-book] Disponible: Safari e-book.
- [61] Astudillo, C. A.; Calderón, O. J.; Ortiz, J. H., "PM<sup>2</sup>PLS: Integrating Proxy Mobile IPv6 and MPLS in Wireless Access Networks," *New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2011 4th IFIP International Conference on*, vol. 8, no. 1, pp. 1-5, 7-10 Febrero 2011.
- [62] M. Ulgen, J. Black, B. Johnsonbaugh, R. Klungle, "Simulation Methodolgy – A Practitioner's Perspective", Michigan Simulation User Group, Technical Committee on Simulation Methodology, 2006.
- [63] V. Wojcik, "Steps in Simulation and Model Building", Simulation Methodology – Discrete Event Simulation, 2003.
- [64] "Business Data Communications and Networking", University Program, 2012. [http://www.opnet.com/university\\_program/teaching\\_with\\_opnet/textbooks\\_and\\_materials/bdcn\\_materials/bdcn\\_labmanual.html](http://www.opnet.com/university_program/teaching_with_opnet/textbooks_and_materials/bdcn_materials/bdcn_labmanual.html)
- [65] Universidad Politécnica de Catalunya - Departamento de Ingeniería telemática, "OPNET: Manual de Usuario," septiembre, *www.opnet.com*, Academic OPNET Research and Educational Projects, 2004. [Pdf]. Disponible: [http://www.opnet.com/university\\_program/teaching\\_with\\_opnet/textbooks\\_and\\_materials/materials/OPNET\\_Modeler\\_Manual.pdf](http://www.opnet.com/university_program/teaching_with_opnet/textbooks_and_materials/materials/OPNET_Modeler_Manual.pdf). [Accesado: 26 de Marzo 2012].
- [66] "OPNET Modeler Wireless Suite," Wireless Network Simulation, 2012. [http://www.opnet.com/solutions/network\\_rd/modeler\\_wireless.html](http://www.opnet.com/solutions/network_rd/modeler_wireless.html).
- [67] "OMNeT++ Community Site," User Manual, Enero 2008. <http://www.omnetpp.org/doc/omnetpp/manual/usman.html>.

- [68] F. Zarrar, C. Bauer, C. Wietfed, "An Accurate and Extensible Mobile IPv6 (xMIPv6) Simulation Model for OMNeT++," OMNeT++ 2008: Proceedings of the 1st International Workshop on OMNeT++ (hosted by SIMUTools 2008), Marseille, France: ICST Institute for Computer Sciences, Social-Informatics and Telecommunications Engineering, 2008.
- [69] "The Network Simulator - ns-2" NS Manual, 1995. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>
- [70] K. Fall, K. Varadhan, "The NS Manual," VINT Project. URL: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation>, Nov. 2011.
- [71] "The Network Simulator - ns-3," Documentation, 2010. <http://www.nsnam.org/>.
- [72] "ns-3 Tutorial," ns-3 vns-3.12 documentation, 2010. <http://www.nsnam.org/docs/release/3.12/tutorial/singlehtml/index.html>.
- [73] "MobiWan: NS-2 extensiones to study mobility in Wide-Area IPv6 Networks" Documentation, 2002. <http://www.inrialpes.fr/planete/mobiwan/>
- [74] F. Liza, W. Yao, "Implementation Architecture of Proxy Mobile IPv6 Protocol for NS2 Simulator Software," *Communication Software and Networks, 2009. ICCSN '09. International Conf. on*, vol., no., pp.287-291, 27-28 Feb. 2009.
- [75] G. Ahn, W. Chun, "Design and implementation of MPLS network simulator (MNS) supporting QoS," *Information Networking, 2001. Proceedings. 15th International Conf. on*, vol., no., pp.694-699, 2001.
- [76] H. Zhou, C. Yeh, H.T. Mouftah, "DHMM: A QoS Capable Micro-Mobility Management Protocol for Next Generation All-IP Wireless Networks," *Global Telecommunications Conf., 2007. GLOBECOM '07. IEEE*, vol., no., pp.4989-4993, 26-30 Nov. 2007.
- [77] S. Choi, J. del Prado, "802.11g CP: A Solution for IEEE 802.11g and 802.11b Inter-Working," *Vehicular Technology Conf., 2003. VTC 2003-Spring. The 57th IEEE Semiannual*, vol.1, no., pp. 960 – 964 vol.1, 22-25 April 2003.
- [78] J. Wong, "Optimizar la Calidad de Voz con el RTP Packet Size," en el *Blog "VoIP y mas..."*, Junio 2008. [En línea] Disponible: <http://voip-peru.blogspot.com/2008/06/optimizar-la-calidad-de-voz-con-el-rtp.html>. [Accesado: 28 Marzo 2012].

- [79] L. Teran, M. Cuastuza, "Evaluación del efecto del *Handover* en un contexto de micromovilidad IPv6 sobre un servicio de tiempo real," tesis de Pregrado, Universidad del Cauca, Popayán, Cauca, Colombia, Ago. 2011.
- [80] Vidal. Jesús. *El lenguaje de programación AWK/GAWK*, Madrid, Febrero 2002.  
[pdf] Available: [http://xavi.ivars.me/arxius/manuals/awk/manual\\_awk.pdf](http://xavi.ivars.me/arxius/manuals/awk/manual_awk.pdf).

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA INTEGRACIÓN *PROXY MOBILE* IPV6 (PMIPV6) Y  
*MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING* (MPLS).**

**ANEXOS**



**Juan Pablo Pantoja Bastidas  
Danny Alejandro Solano Concha**

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de**  
**Comunicaciones**  
Popayán, Septiembre de 2012

**ANÁLISIS DE VIABILIDAD DE LA INTEGRACIÓN PROXY MOBILE IPV6 (PMIPV6) Y  
MULTIPROTOCOL LABEL SWITCHING (MPLS).**

**ANEXOS**



**Juan Pablo Pantoja Bastidas  
Danny Alejandro Solano Concha**

Director: Ing. Oscar Josué Calderón C.

Universidad del Cauca  
**Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones**  
**Departamento de Telecomunicaciones**  
**Línea de Investigación Gestión Integrada de Redes, Servicios y Arquitecturas de**  
**Comunicaciones**  
Popayán, Septiembre de 2012



## TABLA DE CONTENIDO

Anexo A.	<b>SCRIPT DE SIMULACIÓN DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE <i>LSP-DATA-DRIVEN</i> Y MOVIMIENTO CONTROLADO.....</b>	<b>1</b>
Anexo B.	<b>SCRIPT DE SIMULACIÓN DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE <i>LSP-CONTROL-DRIVEN</i> Y MOVIMIENTO CONTROLADO.....</b>	<b>11</b>
Anexo C.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE <i>LSP-DATA-DRIVEN</i> Y MOVIMIENTO ALEATORIO.....</b>	<b>21</b>
Anexo D.	<b>ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE <i>LSP-CONTROL-DRIVEN</i> Y MOVIMIENTO ALEATORIO.....</b>	<b>29</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura C.1.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>21</b>
<b>Figura C.2.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>21</b>
<b>Figura C.3.</b>	Señalización en los eventos de <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>22</b>
<b>Figura C.4.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>24</b>
<b>Figura C.5.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>24</b>
<b>Figura C.6.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>25</b>
<b>Figura C.7.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>26</b>
<b>Figura C.8.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>26</b>
<b>Figura C.9.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>27</b>
<b>Figura C.10.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>28</b>
<b>Figura C.11.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio)..	<b>28</b>
<b>Figura D.1.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>29</b>
<b>Figura D.2.</b>	Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>29</b>

<b>Figura D.3.</b>	Señalización en los eventos de <i>Handover</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>30</b>
<b>Figura D.4.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>32</b>
<b>Figura D.5.</b>	Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>32</b>
<b>Figura D.6.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>33</b>
<b>Figura D.7.</b>	Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>33</b>
<b>Figura D.8.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>34</b>
<b>Figura D.9.</b>	Comportamiento del <i>Jitter</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>35</b>
<b>Figura D.10.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>36</b>
<b>Figura D.11.</b>	Comportamiento del <i>Throughput</i> de PMIPv6/MPLS ( <i>HO1, HO2, HO3</i> respectivamente) ( <i>LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio</i> ).....	<b>36</b>

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla C.1.</b>	Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS (Movimiento aleatorio – <i>LSP-Data-Driven</i> ).....	<b>22</b>
<b>Tabla C.2.</b>	Paquetes perdidos durante el Handover en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>23</b>
<b>Tabla C.3.</b>	Duración de cada Handover en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Data-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>23</b>
<b>Tabla D.1.</b>	Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>30</b>
<b>Tabla D.2.</b>	Paquetes perdidos durante el Handover en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>31</b>
<b>Tabla D.3.</b>	Duración de cada Handover en PMIPv6/MPLS ( <i>LSP-Control-Driven</i> - Movimiento aleatorio).....	<b>31</b>

## ANEXO A. SCRIPT DE SIMULACIÓN DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE LSP-DATA-DRIVEN Y MOVIMIENTO CONTROLADO

```

#####
# INTEGRACION SEMI-SUAVE (SUPERPOSICION) DE PMIPv6 Y MPLS, PARA INTEGRAR
# ESTOS DOS MODULOS ES NECESARIO TENER INSTALADO SOBRE LA VERSION DE
# NETWORK SIMULATOR 2.29 EL PAQUETE DE SOPORTE NIST ns-2.29-nist-mob,
# SUMINISTRADO POR MOBI-WAN, Y LOS PARCHES DE PMIPv6 PARA ESTA VERSION,
# Y EL PARCHA DE HierMPLS EN SU VERSION BETA PARA NS2.27 SUMINISTRADO
# POR AHMAD SAEED.
# /*****
#// Heirarchial Support in MPLS Node //
#// Ahmad Saeed(ahmad.saeed@gmail.com) //
#// Matthias Schneider(matthias.schneider@stud.tu-ilmenau.de)//
#// this version is high experimental and should //
#// not be distributed //
# /*****//
#// Proxy Mobile IPv6 para ns-2 es una implementacion
#// del RFC 5213 del IETF creada por HyonYoung Choi
#####
#/ESQUEMA DE INTEGRACION CON LSP-BAJO DEMANDA\#
#/ CON MOVIMIENTO CONTROLADO DEL NODO MOVIL \#
#####
#-----#
# DECLARACIÃ“N DE VARIABLES #
# DEL DOMINIO PMIP/MPLS #
#####
set nombre_arch_tr bajodemanda.out
set conf(debug) 1
set conf(agentType) Agent/UDP
set conf(sinkType) Agent/LossMonitor
set conf(trafficType) Application/Traffic/CBR
set conf(cbrInterval) 0.032 ;# Solo para CBR
intervalo en segundos
set conf(cbrPacketSize) 256 ;# Solo para CBR Tama en en
Bytes
set conf(chan) Channel/WirelessChannel ;# Tipo de canal
set conf(prop) Propagation/TwoRayGround ;# Modelo de
Propagacion Radio
set conf(netif) Phy/WirelessPhy ;# Tipo de interface
Fisica
set conf(mac) Mac/802_11 ;# Tipo de MAC
set conf(ifq) Queue/DropTail/PriQueue ;# Tipo de interface,
Modelo de colas(fifo)/Da prioridad a los protocolos de enrutamiento.
Interfaz de colas
set conf(ll) LL ;# Tipo de Capa de
Enlace
set conf(ant) Antenna/OmniAntenna ;# Modelo de Antena
set conf(ifqlen) 50 ;# numero maximo de paquetes
en cola
set conf(adhocRouting) DSDV ;# protocolo de
enrutamiento

```

```

#####
#Configuracion MAC para 802.11g#
#####
Mac/802_11 set SlotTime_          0.000020 ;# 20us
Mac/802_11 set SIFS_              0.000009 ;# 9us
Mac/802_11 set RTSThreshold_      3000      ;# bytes
Mac/802_11 set ShortRetryLimit_   7          ;# retransmisiones
Mac/802_11 set LongRetryLimit_    4          ;# retransmisiones
Mac/802_11 set dataRate_ 54Mb     ;# Tasa de Tx de datos
Mac/802_11 set basicRate_ 6Mb     ;# Tasa de Tx de
señalización
Mac/802_11 set amc_ 1              ;# Velocidad Multirate

#####
#Configuracion Phy para 802.11g#
#####
Antenna/OmniAntenna set Gt_       1            ;# Ganancia antena Tx
Antenna/OmniAntenna set Gr_       1            ;# Ganancia antena Rx
Phy/WirelessPhy set freq_         2.412e9      ;# Frecuencia (Hz)
Phy/WirelessPhy set L_            1.0         ;# Perdidas del Sistema
Mac/802_11 set CWMin_             15
Mac/802_11 set CWMax_             1023
Mac/802_11 set PreambleLength_    96         ;# 96 bit
Mac/802_11 set PLCPHeaderLength_  24         ;# 24 bits
Mac/802_11 set PLCPDataRate_     6.0e6       ;# 1Mbps

#####
# PARA RECEPCION DE LAS TRAMAS#
#####
#Si Pr es menor del umbral CStresh_ no se detecta la señal
#Si Pr es mayor que CStresh_, pero menor que el segundo umbral
RXThresh_, se detecta pero se recibe con error
#Si Pr es mayor que RXThresh_ la trama se recibe correctamente
#Area de cobertura para las BS 25mW de Tx y -72dBm de RxTh -> 200 m
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025          ;#Potencia en W
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.28289e-11 ;#Umbral de
recepcion en W, es el Umbral de sensado de portadora de los nodos.
#Debe ser al menos del mismo
valor que el umbral de recepci3n
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

#####
#DEBUG#
#####
Mac/802_11 set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6 set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6/MAG set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6/LMA set debug_ $conf(debug)

#####
#Se define el procedimiento ~finish~#
#####
proc finish {} {
global ns nf sink nombre_arch_tr conf

```

```

# se coloca el numero de paquetes perdidos despues de acaba la simulacion
puts " "
puts "Paquetes recibidos [$sink set npkts_]"
puts "Paquetes perdidos [$sink set nlost_]"
puts "Paquetes enviados [expr [$sink set npkts_] + [$sink set nlost_]]"
puts " "
set plossf [open $nombre_arch_tr.pkl.dat w]
puts $plossf "[$sink set nlost_] [$sink set npkts_]"
$ns flush-trace
#Se cierra el archivo de almacenamiento de los datos de la simulaciÃ³n
close $plossf
close $nf
#MUESTRA LAS GRAFICAS DE PAQUETES ENVIADOS/PERDIDOS/RECIBIDOS- Y LA
GRAFICA DE LOS PAQUETES PERDIDOS EN RX CON RESPECTO AL TIEMPO
#
# cbrInterval dst_a flow
exec sh intento.drp2.sh $nombre_arch_tr 0.032 6 2 &
exec sh intento.pkl.sh $nombre_arch_tr &
#MUESTRA LA GRAFICA DEL RETARDO EXTREMO EXTREMO
##
# src_oldf dst_a dst_oldf flow
exec sh intento.e2e.sh $nombre_arch_tr 0.0.0.0 6 1.0.1.0 2 &
##
# tic src_a dst_a flow pkt_sz
#MUESTRA LA GRAFICA DE THROUGHPUT
exec sh intento.tp.sh $nombre_arch_tr 0.032 1 6 2 $conf(cbrPacketSize) &
#MUESTRA LA GRAFICA DE JITTER
##
# tic src_oldf dst_a dst_oldf flow
exec sh intento.jt3.sh $nombre_arch_tr 0.032 0.0.0.0 6 1.0.1.0 2 &
#MUESTRA LA GRAFICA DE LINEA DE TIEMPO DE LOS EVENTOS
#
# archivo dst_a
exec bash intento1.tmln2.sh $nombre_arch_tr 6 &
#ORDENA LA TRAZA PARA NAM. ORGANIZA LOS NODOS
exec sh ordenartraza2.sh $nombre_arch_tr.nam
exec nam $nombre_arch_tr.nam &
exit
}

#####
#MAIN DEL PROGRAMA#
#####
#=====#
# CREACION Y CONFIGURACION DE LA SIMULACION #
#=====#
set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace
# SE CREA LA TOPOGRAFIA DONDE SE COLOCARAN LOS NODOS y EL NODO MOVIL
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1000 1000

#####
#CREACION DE ARCHIVOS DE TRAZA#
#####
#Se abre un archivo nam, un archivo tr y se crean los archivos que
guardan los datos de la simulaciÃ³n
set f0 [open $nombre_arch_tr w]
$ns trace-all $f0
set nf [open $nombre_arch_tr.nam w]

```

```

$ns namtrace-all $nf
$ns namtrace-all-wireless $nf 1000 1000

#####
# HABILITACION DE ENRUTAMIENTO JERARQUICO #
#####
#===== DE ACUERDO CON EL PARCHE DE MNSv2.1 ES NECESARIO DEFINIR EN
#===== PRIMERA INSTANCIA LA JERARQUIA DE NODOS
#=====
# 1. Definicion de enrutamiento jerarquico en los nodos de la red. #
$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 2 ;# NUMERO DE
DOMINIOS
AddrParams set cluster_num_ {1 5} ;# NUMERO DE CLUSTER EN
CADA DOMINIO
AddrParams set nodes_num_ {1 2 1 1 1 1} ;# NUMERO DE NODOS
EN CADA CLUSTER
create-god 3 ;# Numero de Nodos con
interfaz inalambrica habilitada

#=====
# CREACION DE LOS NODOS DE LA RED #
#=====
#####
## NODO CORRESPONDIENTE ##
#####
set cn [$ns node 0.0.0]
$cn set X_ 350.0
$cn set Y_ 500.0
$cn set Z_ 0.0
# 2. Configuracion de Nodos MPLS. como se explico debe ir siempre despues
de la definicion de enrutamiento jerarquico. #
$ns node-config -MPLS ON

#####
## LMA/LER ##
#####
#*****#
# ESTOS NODOS SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPv6 LA PRIMERA
# PARTE DE LA INTEGRACION SE VE AQUI ==#
#*****#
set lma [$ns node 1.0.0]
#=====
# con esto se agrega el nodo a la lista MPLS #
#=====
$ns add-to-mpls-list $lma
$lma set X_ 350.0
$lma set Y_ 400.0
$lma set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPV6 EN EL LMA
set lma_pm [$lma install-lma]

```



```

#####
## LSR ##
#####
set lsr [$ns node 1.1.0]
$ns add-to-mpls-list $lsr
$lsr set X_ 250.0
$lsr set Y_ 350.0
$lsr set Z_ 0.0
set lsr1 [$ns node 1.2.0]
$ns add-to-mpls-list $lsr1
$lsr1 set X_ 450.0
$lsr1 set Y_ 350.0
$lsr1 set Z_ 0.0

#####
## CONFIGURACION DE LAS ESTACIONES BASE ##
#####
#-----#
#---Configuracion para soportar BS (Access Point)---#
#-----#
$ns node-config -adhocRouting $conf(adhocRouting) \
                -llType $conf(ll) \
                -macType $conf(mac) \
                -ifqType $conf(ifq) \
                -ifqLen $conf(ifqlen) \
                -antType $conf(ant) \
                -propType $conf(prop) \
                -phyType $conf(netif) \
                -channel [new $conf(chan)] \
                -topoInstance $topo \
                -wiredRouting ON \
                -agentTrace ON \
                -routerTrace ON \
                -macTrace ON \
                -movementTrace OFF

#####
#== LOS NODOS MAG DEBEN SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPv6 ==#
#####

#####
## MAG/LER-1 ##
#####
set mag1 [$ns node 1.3.0]
#-----#
# se inhabilita la opcion de moviento aleatorio #
#-----#
$mag1 random-motion 0
$ns add-to-mpls-list $mag1
$mag1 set X_ 100.0
$mag1 set Y_ 300.0
$mag1 set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPV6 EN EL MAG 1
set mag1_pm [$mag1 install-mag]
set lmaa [$lma node-addr]
##=registro con el lma=##

```

```

$mag1_pm set-lmaa [AddrParams addr2id $lmaa]
#Configuracion inalambrica para las mag

#####
# mag1 #
#####
set mag1_mac [$mag1 getMac 0]
set mag1_addr [$mag1_mac id]
$mag1_mac bss_id $mag1_addr
$mag1_mac set-channel 1
$mag1_mac enable-beacon
[$mag1 set netif_(0)] setTechno 802.11
#configuracion inalambrica para soportar asociacion a BS
$mag1_mac set use_pmip6_ext_ 1
$mag1_mac pmip6-agent $mag1_pm

#####
##= LOS NODOS MAG DEBEN SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPV6 ==#
#####
#####
## MAG/LER-2 ##
#####
set mag2 [$sns node 1.4.0]
$sns add-to-mpls-list $mag2
$mag2 set X_ 600.0
$mag2 set Y_ 300.0
$mag2 set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPV6 EN EL MAG 2
set mag2_pm [$mag2 install-mag]
##=registro con el lma=##
$mag2_pm set-lmaa [AddrParams addr2id $lmaa]
#Configuracion inalambrica para las mag

#####
# mag2 #
#####
set mag2_mac [$mag2 getMac 0]
set mag2_addr [$mag2_mac id]
$mag2_mac bss_id $mag2_addr
$mag2_mac set-channel 6
$mag2_mac enable-beacon
[$mag2 set netif_(0)] setTechno 802.11
#configuracion inalambrica para soportar asociacion a BS
$mag2_mac set use_pmip6_ext_ 1
$mag2_mac pmip6-agent $mag2_pm
# CREACION Y ORIENTACION PARA NAM DE LOS ENLACES ALAMBRICOS
# ENLACE DEL DOMINIO PMIPV6/MPLS
# Droptail = (FIFO) Queue, CBQ: Class-based Queueing
# Se realizan los enlaces con retardo de 10 milisegundos constante.
$sns duplex-link $cn $lma 2Mb 10ms DropTail
$sns duplex-link-op $cn $lma orient left-down
$sns duplex-link $lma $lsr 1Mb 10ms CBQ
$sns duplex-link-op $lma $lsr orient down
$sns duplex-link $lma $lsr1 1Mb 10ms CBQ
$sns duplex-link-op $lma $lsr1 orient right-down

```

```
$ns duplex-link $mag1 $lsr 1Mb 10ms CBQ
$ns duplex-link-op $mag1 $lsr orient right-up
$ns duplex-link $mag2 $lsr1 1Mb 10ms CBQ
$ns duplex-link-op $mag2 $lsr1 orient left-up

#####
#=#*****=#
#=#*CONFIGURACION MPLS*=#
#=#*****=#
#####
#####
#*CONFIGURACION DE AGENTE RSVP-TE EN TODOS LOS NODOS MPLS INCLUYENDO EL
LMA Y LOS NODOS MAG DE LA RED**#
#####
$ns configure-rsvpte-on-all-mpls-nodes
#SE COLOCA COLOR A LOS MENSAJES RSVP-TE PARA IDENTIFICARLOS EN NAM
$ns PATH-color "red"
$ns PATHERR-color "orange"
$ns PATHTEAR-color "yellow"
$ns RESV-color "blue"
$ns RESVERR-color "green"
$ns RESVCONF-color "grey"
Agent/RSVP set noisy_ 255 ; #Se habilita el trazado de Eventos RSVP
Agent/RSVP set refresh_ 30
Agent/RSVP set lifetime_factor_ 3
Agent/RSVP set ip6_ 0
Agent/RSVP set nam_ 1
Agent/RSVP set fid_ 2
#*-----*#
#*En MPLS se tienen 3 clases de niveles y 4 servicios:-----*#
#*SBTS: Simple Bess-effort Traffic Service (Servicio de trafico de mejor
esfuerzo simple)-----*#
#*HBTS: High Priority Bess-effort Traffic service (Servicio de trafico de
mejor esfuerzo de prioridad alta )-----*#
#*STS: Signaling Traffic Service (servicio de trafico de seÑalizacion)*#
#*RTS: Rea-Time Traffic Service (servicio de trafico de tiempo real)---*#
#*-----*#
#*Se Configura la cola CBQ asignandole el 10% del BW a el trÃ¡fico SBTS,
el 5% a HBTS, el 80% a RTS y el 5% a STS. La Ã³nica clase que no-----*#
#*presta ancho de banda es la correspondiente al trÃ¡fico RTS.-----*#
#*-----*#
#*$ns cfg-cbq-for-HBTS QSize(1) QType(2) Qborrow(3) Qbandw(4) MaxIdel(5)
Delay(6)-----*#
#*Donde:-----*#
#*--3.Qborrow: es un boleano (0/1) indicando que la clase permite prestar
BW a uno de sus pares.-----*#
#*--4.Qbandw: es la maxima fraccion del BW asignado a la clase en el
enlace. expresado entre un numero del 0.0 a 1.0 (como porcentaje)-----*#
#*--5.MaxIdel: es la cantidad maxima de tiempo que una clase puede
requerir para tener sus paquetes encolados antes de que se les permita-*#
#*ser enviados.-----*#
#*--6.Delay: incrementa el retraso experimentado por un clase de retardo
en el tiempo especificado-----*#
#*-----*#
$ns cfg-cbq-for-SBTS 10 CBQ 1 0.1 auto 0
```

```

$ns cfg-cbq-for-HBTS 10 CBQ 1 0.05 auto 0
$ns cfg-cbq-for-STS 10 CBQ 1 0.05 auto 0
$ns cfg-cbq-for-RTS 10 CBQ 0 0.8 auto 0
#se asocia a los paquetes RSVP-TE el servicio SBTS, HBTS y STS.
$ns bind-rsvpte-to-SBTS
#$ns bind-rsvpte-to-HBTS
#$ns bind-rsvpte-to-STS
# Se establece el tipo de servicio para el flujo de tráfico que se
corresponde con la etiqueta especificada.
$ns bind-flowid-to-SBTS 0
$ns bind-flowid-to-SBTS 1
$ns bind-flowid-to-SBTS 2
# SE ESCOGE EL MODO DE ASIGNACION Y DISTRIBUCION DE ETIQUETAS PARA TODOS
LOS NODOS MPLS EN LA RED
$ns enable-data-driven
#$ns enable-on-demand
#$ns enable-control-driven
#$ns enable-ordered-control
$ns compute-routes

#=====
# ESTABLECIMIENTO DE TUNEL BIDIRECCIONAL LSP ENTRE LAS ENTIDADES LMA/LER
Y MAG/LER MOSTRANDO EL NIVEL DE INTEGRACION #
# SEMI-SUAVE, YA QUE EL AGENTE PMIPv6 NO REALIZA EL ENCAPSULAMIENTO IP
TIPICO SINO Q REALIZA EL ESTABLECIMIENTO DEL LSP#
#=====
#SE AGREGA UN AGENTE RSVP A CADA NODO MPLS DE LA RED
set rsvp0 [$lma add-rsvp-agent]
set rsvp1 [$lsr add-rsvp-agent]
set rsvp2 [$mag1 add-rsvp-agent]
set rsvp3 [$mag2 add-rsvp-agent]
set rsvp4 [$lsr1 add-rsvp-agent]

#=====
# MODULOS-MPLS #
#=====
set LSR1 [eval $lma get-module "MPLS"]
set LSR2 [eval $lsr get-module "MPLS"]
set LSR3 [eval $lsr1 get-module "MPLS"]
set LSR4 [eval $mag1 get-module "MPLS"]
set LSR5 [eval $lma get-module "MPLS"]
set LSR6 [eval $mag2 get-module "MPLS"]
####-----#####
#-->Sesion Fuente-----Destino
set ses(1) [$LSR1 session $mag1 1]
set ses(2) [$LSR5 session $mag2 1]
set ses(3) [$LSR4 session $lma 1]
set ses(4) [$LSR6 session $lma 1]
#>>>-- -----> Sol. sesion ttl dst lspid N-List
#>>>-- -----> Sol. Reserva sesion BW buck. ttl dst lspid
sprio hprio N-List
$ns at 0.2 "$LSR1 PATH-resv-er $ses(1) 1Mb 50 50 $mag1 1000 5
5 1.0.0_1.1.0_1.3.0"
$ns at 0.2 "$LSR4 PATH-resv-er $ses(3) 1Mb 50 50 $lma 1200 5
5 1.3.0_1.1.0_1.0.0"

```

```

$ns at 12.18 "$LSR5  PATH-resv-er  $ses(2) 1Mb 50 50 $mag2 1100
5 5 1.0.0_1.2.0_1.4.0"
$ns at 12.18 "$LSR6  PATH-resv-er  $ses(4) 1Mb 50 50 $lma 1300
5 5 1.4.0_1.2.0_1.0.0"

#vinculando flujo al lsp
$ns at 0.5 "$LSR1  bind-flow-erlsp 1.0.0 2 1000"
$ns at 0.5 "$LSR2  bind-flow-erlsp 1.1.0 2 1000"
$ns at 0.5 "$LSR4  bind-flow-erlsp 1.3.0 2 1000"
$ns at 12.20 "$LSR3  bind-flow-erlsp 1.2.0 2 1100"
$ns at 12.20 "$LSR6  bind-flow-erlsp 1.4.0 2 1100"

#####
## NODO MOVIL ##
#####
#CREACION Y ASOCIACION DEL MN A LAS ESTACIONES BASES
#=====
# COMO SE INDICA EN LA INTEGRACION EL MN NO SOPORTA CARACTERISTICAS DE
MPLS Y PMIPv6 #
#=====
$ns node-config -MPLS OFF
# EL MN NO PUEDE TENER HABILITADO EL ENRUTAMIENTO CABLEADO
$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON

#Creacion del mn
set mn [$ns node 1.0.1]
$mn random-motion 0
#CONEXION CON LA ESTACION BASE
$mn base-station [AddrParams addr2id [$mag1 node-addr]]
$mn set X_ 100.0
$mn set Y_ 250.0
$mn set Z_ 0.0
#POSICION INICIAL DEL NODO MOVIL
$ns at 0.0 "$mn setdest [$mn set X_] [$mn set Y_] 0.0"
#Configuraciones inalambricas del mn
set mn_mac [$mn set mac_(0)]
[$mn set mac_(0)] set-channel 1
[$mn set netif_(0)] setTechno 802.11
#REGISTRO DEL MN CON EL LMA
$lma_pm register-mn-addr [$mn_mac id] [AddrParams addr2id [$mn node-
addr]]
#ETIQUETAS PARA IDENTIFICAR LOS NODOS
$cn label "CN"
$lma label "LMA/LER1"
$lslr label "LSR"
$mag1 label "MAG/LER2"
$mag2 label "MAG/LER3"
$mn color blue
$mn label "MN"
# imprimir en pantalla el identificador de cada nodo
puts "Acn=[$cn id] Alma=[$lma id] Alsr=[$lslr id] Alsr1=[$lslr1 id]
Amag1=[$mag1 id] Amag2=[$mag2 id] AMN=[$mn id]"

#CONFIGURACION DE LOS AGENTES DE TRAFICO
set agent [new $conf(agentType)]

```

```
$agent set packetSize_ $conf(cbrPacketSize)
$agent set class_ 2
$agent set fid_ 2
$ns color 2 "blue" ;#Para identificar el flujo
$ns attach-agent $cn $agent
set traffic [new $conf(trafficType)]
$traffic attach-agent $agent
if { $conf(trafficType) == "Application/Traffic/CBR" } {
    $traffic set packetSize_ $conf(cbrPacketSize)
    $traffic set interval_ $conf(cbrInterval)
}

set sink [new $conf(sinkType)]
$ns attach-agent $mn $sink
$ns connect $agent $sink

$ns at 0.5 "$traffic start"

#####-----#####
##---*Movimiento Controlado del MN*---#
#####-----#####
$ns at 1.0 "$mn setdest 600.00 250.00 25.00"
$ns at 22.0 "$mn setdest 200.00 250.00 25.00"
$ns at 40.0 "$mn setdest 700.00 250.00 25.00"
$ns at 59.5 "$traffic stop"
#SE DESPLIEGAN LAS TABLAS DE GESTION DE LAS ETIQUETAS PARA CADA NODO MPLS
DE LA RED
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 60 "finish"
$ns run
```

## ANEXO B. SCRIPT DE SIMULACIÓN DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE LSP-CONTROL-DRIVEN Y MOVIMIENTO CONTROLADO

```

#=====#
# INTEGRACION SEMI-SUAVE (SUPERPOSICION) DE PMIPv6 Y MPLS, PARA INTEGRAR
# ESTOS DOS MODULOS ES NECESARIO TENER INSTALADO SOBRE LA VERSION DE
# NETWORK SIMULATOR 2.29 EL PAQUETE DE SOPORTE NIST ns-2.29-nist-mob,
# SUMINISTRADO POR MOBI-WAN, Y LOS PARCHES DE PMIPv6 PARA ESTA VERSION,
# Y EL PARCHA DE HierMPLS EN SU VERSION BETA PARA NS2.27 SUMINISTRADO
# PIR AHMAD SAEED.
#/******//
#//                                                    //
#// Heirarchial Support in MPLS Node                    //
#// Ahmad Saeed(ahmad.saeed@gmail.com)                 //
#// Matthias Schneider(matthias.schneider@stud.tu-ilmenau.de)//
#//   this version is high experimental and should     //
#//   not be distributed                                //
#//                                                    //
#/******//
#=====#
#/ESQUEMA DE INTEGRACION CON LSP-NO SOLICITADO\#
#/  CON MOVIMIENTO CONTROLADO DEL NODO MOVIL  \#
#=====#
#=====#
#  DECLARACION DE VARIABLES  #
#  DEL DOMINIO PMIP/MPLS    #
#=====#
set nombre_arch_tr      intento.out
set conf(debug)         1
set conf(agentType)     Agent/UDP
set conf(sinkType)      Agent/LossMonitor
set conf(trafficType)   Application/Traffic/CBR
set conf(cbrInterval)   0.032                ;# Solo para CBR
intervalo en segundos
set conf(cbrPacketSize) 256                  ;# Solo para CBR Tama en en
Bytes
set conf(chan)          Channel/WirelessChannel ;# Tipo de canal
set conf(prop)          Propagation/TwoRayGround ;# Modelo de
Propagation Radio
set conf(netif)         Phy/WirelessPhy       ;# Tipo de interface
Fisica
set conf(mac)           Mac/802_11           ;# Tipo de MAC
set conf(ifq)           Queue/DropTail/PriQueue ;# Tipo de interface,
Modelo de colas(fifo)/Da prioridad a los protocolos de enrutamiento.
Interfaz de colas
set conf(ll)            LL                    ;# Tipo de Capa de
Enlace
set conf(ant)           Antenna/OmniAntenna  ;# Modelo de Antena
set conf(ifqlen)        50                   ;# numero maximo de paquetes
en cola
set conf(adhocRouting)  DSDV                 ;# protocolo de
enrutamiento

```

```
#####
#Configuracion MAC para 802.11g#
#####
Mac/802_11 set SlotTime_          0.000020 ;# 20us
Mac/802_11 set SIFS_              0.000009 ;# 9us
Mac/802_11 set RTSThreshold_      3000      ;# bytes
Mac/802_11 set ShortRetryLimit_   7          ;# retransmisiones
Mac/802_11 set LongRetryLimit_    4          ;# retransmisiones
Mac/802_11 set dataRate_ 54Mb     ;# Tasa de Tx de datos
Mac/802_11 set basicRate_ 6Mb     ;# Tasa de Tx de
señalizacion
Mac/802_11 set amc_ 1              ;# Velocidad Multirate

#####
#Configuracion Phy para 802.11g#
#####
Antenna/OmniAntenna set Gt_       1          ;# Ganancia antena Tx
Antenna/OmniAntenna set Gr_       1          ;# Ganancia antena Rx
Phy/WirelessPhy set freq_         2.412e9    ;# Frecuencia (Hz)
Phy/WirelessPhy set L_            1.0        ;# Perdidas del Sistema
Mac/802_11 set CWMin_              15
Mac/802_11 set CWMax_              1023
Mac/802_11 set PreambleLength_     96        ;# 96 bit
Mac/802_11 set PLCPHeaderLength_   24        ;# 24 bits
Mac/802_11 set PLCPDataRate_       6.0e6     ;# 1Mbps

#####
# PARA RECEPCION DE LAS TRAMAS#
#####
#Si Pr es menor del umbral CStresh_ no se detecta la señal
#Si Pr es mayor que CStresh_, pero menor que el segundo umbral
RXThresh_, se detecta pero se recibe con error
#Si Pr es mayor que RXThresh_ la trama se recibe correctamente
#Area de cobertura para las BS 25mW de Tx y -72dBm de RxTh -> 200 m
Phy/WirelessPhy set Pt_ 0.025          ;#Potencia en W
Phy/WirelessPhy set RXThresh_ 2.28289e-11 ;#Umbral de
recepcion en W, es el Umbral de sensado de portadora de los nodos.
#Debe ser al menos del mismo
valor que el umbral de recepci3n
Phy/WirelessPhy set CStresh_ [expr 0.9*[Phy/WirelessPhy set RXThresh_]]

#####
#DEBUG#
#####
Mac/802_11 set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6 set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6/MAG set debug_ $conf(debug)
Agent/PMIPv6/LMA set debug_ $conf(debug)

#####
#Se define el procedimiento ~finish~#
#####
proc finish {} {
global ns nf sink nombre_arch_tr conf
# se coloca el numero de paquetes perdidos despues de acaba la simulacion
```



```

puts " "
puts "Paquetes recibidos [$sink set npkts_]"
puts "Paquetes perdidos [$sink set nlost_]"
puts "Paquetes enviados [expr [$sink set npkts_] + [$sink set nlost_]]"
puts " "
set plossf [open $nombre_arch_tr.pkl.dat w]
puts $plossf "[$sink set nlost_] [$sink set npkts_]"
$ns flush-trace
#Se cierra el archivo de almacenamiento de los datos de la simulaciÃ³n
close $plossf
close $nf
#MUESTRA LAS GRAFICAS DE PAQUETES ENVIADOS/PERDIDOS/RECIBIDOS- Y LA
GRAFICA DE LOS PAQUETES PERDIDOS EN RX CON RESPECTO AL TIEMPO
#
#                               cbrInterval dst_a flow
exec sh intento.drp2.sh $nombre_arch_tr 0.032 6 2 &
exec sh intento.pkl.sh $nombre_arch_tr &
#MUESTRA LA GRAFICA DEL RETARDO EXTREMO EXTREMO
##
#                               src_oldf dst_a dst_oldf flow
exec sh intento.e2e.sh $nombre_arch_tr 0.0.0.0 6 1.0.1.0 2 &
##
#                               tic src_a dst_a flow pkt_sz
#MUESTRA LA GRAFICA DE THROUGHPUT
exec sh intento.tp.sh $nombre_arch_tr 0.032 1 6 2 $conf(cbrPacketSize) &
#MUESTRA LA GRAFICA DE JITTER
##
#                               tic src_oldf dst_a dst_oldf flow
exec sh intento.jt3.sh $nombre_arch_tr 0.032 0.0.0.0 6 1.0.1.0 2 &
#MUESTRA LA GRAFICA DE LINEA DE TIEMPO DE LOS EVENTOS
#                               archivo dst_a
exec bash intento1.tmln2.sh $nombre_arch_tr 6 &
#ORDENA LA TRAZA PARA NAM. ORGANIZA LOS NODOS
exec sh ordenartraza2.sh $nombre_arch_tr.nam
exec nam $nombre_arch_tr.nam &
exit
}

#####
#MAIN DEL PROGRAMA#
#####
#=====#
# CREACION Y CONFIGURACION DE LA SIMULACION #
#=====#
set ns [new Simulator]
$ns use-newtrace
# SE CREA LA TOPOGRAFIA DONDE SE COLOCARAN LOS NODOS y EL NODO MOVIL
set topo [new Topography]
$topo load_flatgrid 1000 1000

#####
#CREACION DE ARCHIVOS DE TRAZA#
#####
#Se abre un archivo nam, un archivo tr y se crean los archivos que
guardan los datos de la simulaciÃ³n
set f0 [open $nombre_arch_tr w]
$ns trace-all $f0
set nf [open $nombre_arch_tr.nam w]
$ns namtrace-all $nf

```

```

$ns namtrace-all-wireless $nf 1000 1000

#####
# HABILITACION DE ENRUTAMIENTO JERARQUICO #
#####
#-----#
# DE ACUERDO CON EL PARCHE DE MNSv2.1 ES NECESARIO DEFINIR EN
# PRIMERA INSTANCIA LA JERARQUIA DE NODOS
#-----#
# 1. Definicion de enrutamiento jerarquico en los nodos de la red. #
$ns node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 2                ;# NUMERO DE
DOMINIOS
AddrParams set cluster_num_ {1 5}           ;# NUMERO DE CLUSTER EN
CADA DOMINIO
AddrParams set nodes_num_ {1 2 1 1 1 1}     ;# NUMERO DE NODOS
EN CADA CLUSTER
create-god 3                                 ;# Numero de Nodos con
interfaz inalambrica habilitada

#-----#
# CREACION DE LOS NODOS DE LA RED #
#-----#
#####
## NODO CORRESPONDIENTE ##
#####
set cn [$ns node 0.0.0]
$cn set X_ 350.0
$cn set Y_ 500.0
$cn set Z_ 0.0
# 2. Configuracion de Nodos MPLS. como se explico debe ir siempre despues
de la definicion de enrutamiento jerarquico. #
$ns node-config -MPLS ON

#####
## LMA/LER ##
#####
#*****#
# ESTOS NODOS SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPv6 LA PRIMERA
# PARTE DE LA INTEGRACION SE VE AQUI ==#
#*****#
set lma [$ns node 1.0.0]
#-----#
# con esto se agrega el nodo a la lista MPLS #
#-----#
$ns add-to-mpls-list $lma
$lma set X_ 350.0
$lma set Y_ 400.0
$lma set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPV6 EN EL LMA
set lma_pm [$lma install-lma]

#####
## LSR ##
#####

```

```

set lsr [$ns node 1.1.0]
$ns add-to-mpls-list $lsr
$lsr set X_ 250.0
$lsr set Y_ 350.0
$lsr set Z_ 0.0
set lsr1 [$ns node 1.2.0]
$ns add-to-mpls-list $lsr1
$lsr1 set X_ 450.0
$lsr1 set Y_ 350.0
$lsr1 set Z_ 0.0

#####
## CONFIGURACION DE LAS ESTACIONES BASE ##
#####
#-----#
#---Configuracion para soportar BS (Access Point)---#
#-----#
$ns node-config -adhocRouting $conf(adhocRouting) \
                -llType $conf(ll) \
                -macType $conf(mac) \
                -ifqType $conf(ifq) \
                -ifqLen $conf(ifqlen) \
                -antType $conf(ant) \
                -propType $conf(prop) \
                -phyType $conf(netif) \
                -channel [new $conf(chan)] \
                -topoInstance $topo \
                -wiredRouting ON \
                -agentTrace ON \
                -routerTrace ON \
                -macTrace ON \
                -movementTrace OFF
#####
#== LOS NODOS MAG DEBEN SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPv6 ==#
#####

#####
## MAG/LER-1 ##
#####
set mag1 [$ns node 1.3.0]
#=====#
# se inhabilita la opcion de moviento aleatorio #
#=====#
$mag1 random-motion 0
$ns add-to-mpls-list $mag1
$mag1 set X_ 100.0
$mag1 set Y_ 300.0
$mag1 set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPv6 EN EL MAG 1
set mag1_pm [$mag1 install-mag]
set lmaa [$lma node-addr]
##=registro con el lma=##
$mag1_pm set-lmaa [AddrParams addr2id $lmaa]
#Configuracion inalambrica para las mag

```

```
#/////#
# mag1 #
#/////#
set mag1_mac [$mag1 getMac 0]
set mag1_addr [$mag1_mac id]
$mag1_mac bss_id $mag1_addr
$mag1_mac set-channel 1
$mag1_mac enable-beacon
[$mag1 set netif_(0)] setTechno 802.11
#configuracion inalambrica para soportar asociacion a BS
$mag1_mac set use_pmip6_ext_1
$mag1_mac pmip6-agent $mag1_pm

#####
#== LOS NODOS MAG DEBEN SOPORTAN CARACTERISTICAS DE MPLS Y PMIPv6 ==#
#####
#####
## MAG/LER-2 ##
#####
set mag2 [$ns node 1.4.0]
$ns add-to-mpls-list $mag2
$mag2 set X_ 600.0
$mag2 set Y_ 300.0
$mag2 set Z_ 0.0
#SE INSTALA EL AGENTE PMIPV6 EN EL MAG 2
set mag2_pm [$mag2 install-mag]
##=registro con el lma=##
$mag2_pm set-lmaa [AddrParams addr2id $lmaa]
#Configuracion inalambrica para las mag

#/////#
# mag2 #
#/////#
set mag2_mac [$mag2 getMac 0]
set mag2_addr [$mag2_mac id]
$mag2_mac bss_id $mag2_addr
$mag2_mac set-channel 6
$mag2_mac enable-beacon
[$mag2 set netif_(0)] setTechno 802.11
#configuracion inalambrica para soportar asociacion a BS
$mag2_mac set use_pmip6_ext_1
$mag2_mac pmip6-agent $mag2_pm
# CREACION Y ORIENTACION PARA NAM DE LOS ENLACES ALAMBRICOS
# ENLACE DEL DOMINIO PMIPv6/MPLS
# Droptail = (FIFO) Queue, CBQ: Class-based Queueing
# Se realizan los enlaces con retardo de 10 milisegundos constante.
$ns duplex-link $cn $lma 2Mb 10ms DropTail
$ns duplex-link-op $cn $lma orient left-down
$ns duplex-link $lma $lsr 1Mb 10ms CBQ
$ns duplex-link-op $lma $lsr orient down
$ns duplex-link $lma $lsr1 1Mb 10ms CBQ
$ns duplex-link-op $lma $lsr1 orient right-down
$ns duplex-link $mag1 $lsr 1Mb 10ms CBQ
$ns duplex-link-op $mag1 $lsr orient right-up
$ns duplex-link $mag2 $lsr1 1Mb 10ms CBQ
```

```

$ns duplex-link-op $mag2 $lsr1 orient left-up

#####
#=*****=#
#=*CONFIGURACION MPLS*=#
#=*****=#
#####
#####
#*CONFIGURACION DE AGENTE RSVP-TE EN TODOS LOS NODOS MPLS INCLUYENDO EL
LMA Y LOS NODOS MAG DE LA RED**#
#####
$ns configure-rsvpte-on-all-mpls-nodes
#SE COLOCA COLOR A LOS MENSAJES RSVP-TE PARA IDENTIFICARLOS EN NAM
$ns PATH-color "red"
$ns PATHERR-color "orange"
$ns PATHTEAR-color "yellow"
$ns RESV-color "blue"
$ns RESVERR-color "green"
$ns RESVCONF-color "grey"
Agent/RSVP set noisy_ 255 ; #Se habilita el trazado de Eventos RSVP
Agent/RSVP set refresh_ 30
Agent/RSVP set lifetime_factor_ 3
Agent/RSVP set ip6_ 0
Agent/RSVP set nam_ 1
Agent/RSVP set fid_ 2
#*-----*#
#*En MPLS se tienen 3 clases de niveles y 4 servicios:-----*#
#*-----*#
#*SBTS: Simple Bess-effort Traffic Service (Servicio de trafico de mejor
esfuerzo simple)-----*#
#*HBTS: High Priority Bess-effort Traffic service (Servicio de trafico de
mejor esfuerzo de prioridad alta )-----*#
#*STS: Signaling Traffic Service (servicio de trafico de seÑalizacion)*#
#*RTS: Rea-Time Traffic Service (servicio de trafico de tiempo real)---*#
#*-----*#
#*Se Configura la cola CBQ asignandole el 10% del BW a el trÃ¡fico SBTS,
el 5% a HBTS, el 80% a RTS y el 5% a STS. La Ãºnica clase que no-----*#
#*presta ancho de banda es la correspondiente al trÃ¡fico RTS.-----*#
#*-----*#
#*$ns cfg-cbq-for-HBTS QSize(1) QType(2) Qborrow(3) Qbandw(4) MaxIdel(5)
Delay(6)-----*#
#*Donde:-----*#
#*--3.Qborrow: es un boleano (0/1) indicando que la clase permite prestar
BW a uno de sus pares.-----*#
#*--4.Qbandw: es la maxima fraccion del BW asignado a la clase en el
enlace. expresado entre un numero del 0.0 a 1.0 (como porcentaje)-----*#
#*--5.MaxIdel: es la cantidad maxima de tiempo que una clase puede
requerir para tener sus paquetes encolados antes de que se les permita-*#
#*ser enviados.-----*#
#*--6.Delay: incrementa el retraso experimentado por un clase de retardo
en el tiempo especificado-----*#
#*-----*#
$ns cfg-cbq-for-SBTS 10 CBQ 1 0.1 auto 0
$ns cfg-cbq-for-HBTS 10 CBQ 1 0.05 auto 0
$ns cfg-cbq-for-STS 10 CBQ 1 0.05 auto 0

```

```

$ns cfg-cbq-for-RTS 10 CBQ 0 0.8 auto 0
#se asocia a los paquetes RSVP-TE el servicio SBTS, HBTS y STS.
$ns bind-rsvpte-to-SBTS
#$ns bind-rsvpte-to-HBTS
#$ns bind-rsvpte-to-STS
# Se establece el tipo de servicio para el flujo de tráfico que se
corresponde con la etiqueta especificada.
$ns bind-flowid-to-SBTS 0
$ns bind-flowid-to-SBTS 1
$ns bind-flowid-to-SBTS 2
# SE ESCOGE EL MODO DE ASIGNACION Y DISTRIBUCION DE ETIQUETAS PARA TODOS
LOS NODOS MPLS EN LA RED
$ns enable-control-driven
#$ns enable-ordered-control
$ns compute-routes

#=====
# ESTABLECIMIENTO DE TUNEL BIDIRECCIONAL LSP ENTRE LAS ENTIDADES LMA/LER
Y MAG/LER MOSTRANDO EL NIVEL DE INTEGRACION #
# SEMI-SUAVE, YA QUE EL AGENTE PMIPv6 NO REALIZA EL ENCAPSULAMIENTO IP
TIPICO SINO Q REALIZA EL ESTABLECIMIENTO DEL LSP#
#=====
#SE AGREGA UN AGENTE RSVP A CADA NODO MPLS DE LA RED
set rsvp0 [$lma add-rsvp-agent]
set rsvp1 [$lsr add-rsvp-agent]
set rsvp2 [$mag1 add-rsvp-agent]
set rsvp3 [$mag2 add-rsvp-agent]
set rsvp4 [$lsr1 add-rsvp-agent]

#=====
# MODULOS-MPLS #
#=====
set LSR1 [eval $lma get-module "MPLS"]
set LSR2 [eval $lsr get-module "MPLS"]
set LSR3 [eval $lsr1 get-module "MPLS"]
set LSR4 [eval $mag1 get-module "MPLS"]
set LSR5 [eval $lma get-module "MPLS"]
set LSR6 [eval $mag2 get-module "MPLS"]
####-----#####
#-->Sesion Fuente-----Destino
set ses(1) [$LSR1 session $mag1 1]
set ses(2) [$LSR5 session $mag2 1]
set ses(3) [$LSR4 session $lma 1]
set ses(4) [$LSR6 session $lma 1]
#>>>-- -----> Sol. sesion ttl dst lspid N-List
#>>>-- -----> Sol. Reserva sesion BW buck. ttl dst lspid
sprio hprio N-List
$ns at 0.0 "$LSR1 PATH-resv-er $ses(1) 1Mb 50 50 $mag1 1000 5
5 1.0.0_1.1.0_1.3.0"
$ns at 0.0 "$LSR5 PATH-resv-er $ses(2) 1Mb 50 50 $mag2 1100 5
5 1.0.0_1.2.0_1.4.0"
$ns at 0.0 "$LSR4 PATH-resv-er $ses(3) 1Mb 50 50 $lma 1200 5
5 1.3.0_1.1.0_1.0.0"
$ns at 0.0 "$LSR6 PATH-resv-er $ses(4) 1Mb 50 50 $lma 1300 5
5 1.4.0_1.2.0_1.0.0"

```

```

#vinculando flujo al lsp
$ns at 0.5 "$LSR1 bind-flow-erlsp 1.0.0 2 1000"
$ns at 0.5 "$LSR2 bind-flow-erlsp 1.1.0 2 1000"
$ns at 0.5 "$LSR4 bind-flow-erlsp 1.3.0 2 1000"
$ns at 0.5 "$LSR3 bind-flow-erlsp 1.2.0 2 1100"
$ns at 0.5 "$LSR6 bind-flow-erlsp 1.4.0 2 1100"

#####
## NODO MOVIL ##
#####
#CREACION Y ASOCIACION DEL MN A LAS ESTACIONES BASES
#-----#
# COMO SE INDICA EN LA INTEGRACION EL MN NO SOPORTA CARACTERISTICAS DE
MPLS Y PMIPv6 #
#-----#
$ns node-config -MPLS OFF
# EL MN NO PUEDE TENER HABILITADO EL ENRUTAMIENTO CABLEADO
$ns node-config -wiredRouting OFF \
                -macTrace ON

#Creacion del mn
set mn [$ns node 1.0.1]
$mn random-motion 0
#CONEXION CON LA ESTACION BASE
$mn base-station [AddrParams addr2id [$mag1 node-addr]]
$mn set X_ 100.0
$mn set Y_ 250.0
$mn set Z_ 0.0
#POSICION INICIAL DEL NODO MOVIL
$ns at 0.0 "$mn setdest [$mn set X_] [$mn set Y_] 0.0"
#Configuraciones inalambricas del mn
set mn_mac [$mn set mac_(0)]
[$mn set mac_(0)] set-channel 1
[$mn set netif_(0)] setTechno 802.11
#REGISTRO DEL MN CON EL LMA
$lma_pm register-mn-addr [$mn_mac id] [AddrParams addr2id [$mn node-
addr]]
#ETIQUETAS PARA IDENTIFICAR LOS NODOS
$cn label "CN"
$lma label "LMA/LER1"
$lslr label "LSR"
$mag1 label "MAG/LER2"
$mag2 label "MAG/LER3"
$mn color blue
$mn label "MN"
# imprimir en pantalla el identificador de cada nodo
puts "Acn=[$cn id] Alma=[$lma id] Alsr=[$lslr id] Alsr1=[$lslr1 id]
Amag1=[$mag1 id] Amag2=[$mag2 id] AMN=[$mn id]"

#CONFIGURACION DE LOS AGENTES DE TRAFICO
set agent [new $conf(agentType)]
$agent set packetSize_ $conf(cbrPacketSize)
$agent set class_ 2
$agent set fid_ 2
$ns color 2 "blue" ;#Para identificar el flujo
$ns attach-agent $cn $agent

```

```
set traffic [new $conf(trafficType)]
$traffic attach-agent $agent
if { $conf(trafficType) == "Application/Traffic/CBR" } {
    $traffic set packetSize_ $conf(cbrPacketSize)
    $traffic set interval_ $conf(cbrInterval)
}

set sink [new $conf(sinkType)]
$ns attach-agent $mn $sink
$ns connect $agent $sink

$ns at 0.5 "$traffic start"

#####-----#####
##---*Movimiento Controlado del MN*---#
#####-----#####
$ns at 1.0 "$mn setdest 600.00 250.00 25.00"
$ns at 22.0 "$mn setdest 200.00 250.00 25.00"
$ns at 40.0 "$mn setdest 700.00 250.00 25.00"
$ns at 59.5.0 "$traffic stop"
#SE DESPLIEGAN LAS TABLAS DE GESTION DE LAS ETIQUETAS PARA CADA NODO MPLS
DE LA RED
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lma get-module MPLS] lib-dump"

$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr get-module MPLS] lib-dump"

$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$lsr1 get-module MPLS] lib-dump"

$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$mag1 get-module MPLS] lib-dump"

$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] pft-dump"
$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] erb-dump"
$ns at 59.8 "[$mag2 get-module MPLS] lib-dump"
$ns at 60 "finish"
$ns run
```



### ANEXO C. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE *LSP-DATA-DRIVEN* Y MOVIMIENTO ALEATORIO

En las figuras C.1, C.2 y C.3 se muestra en una línea de tiempo la señalización correspondiente al funcionamiento de PMIPv6/MPLS utilizando *LSP-Data-Driven* (movimiento aleatorio), asociada particularmente a cada proceso de *Handover*. En las gráficas se pueden determinar los instantes de tiempo en los que se realizan los *Handover*, y la duración de estos.

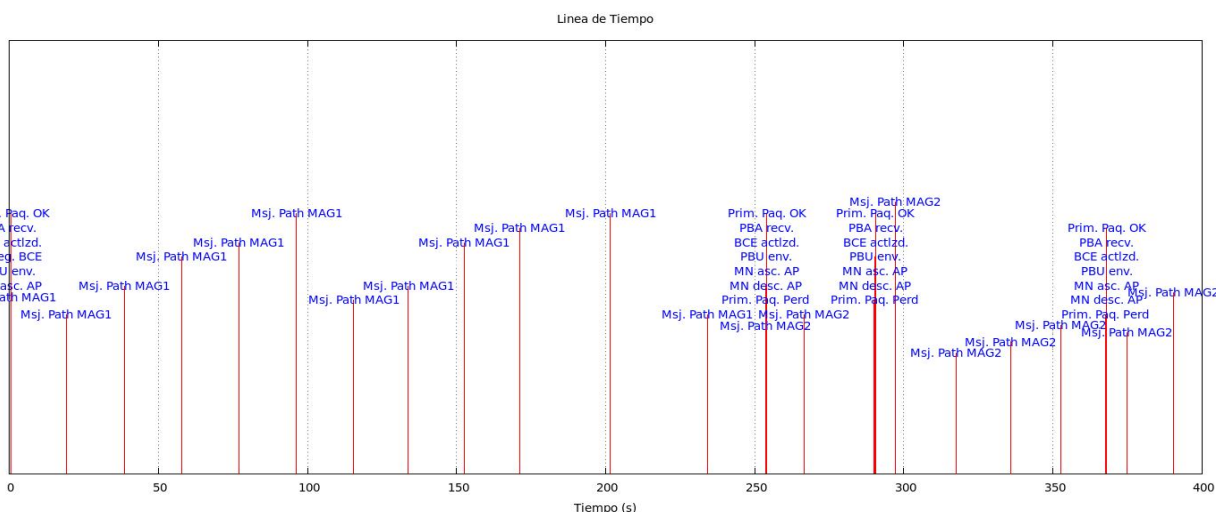


Figura C.1. Señalización en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).

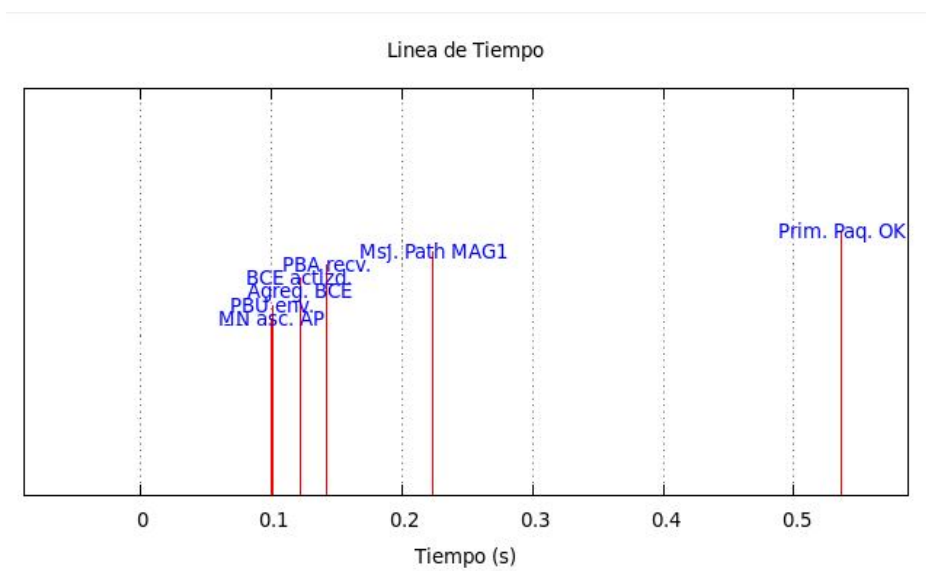
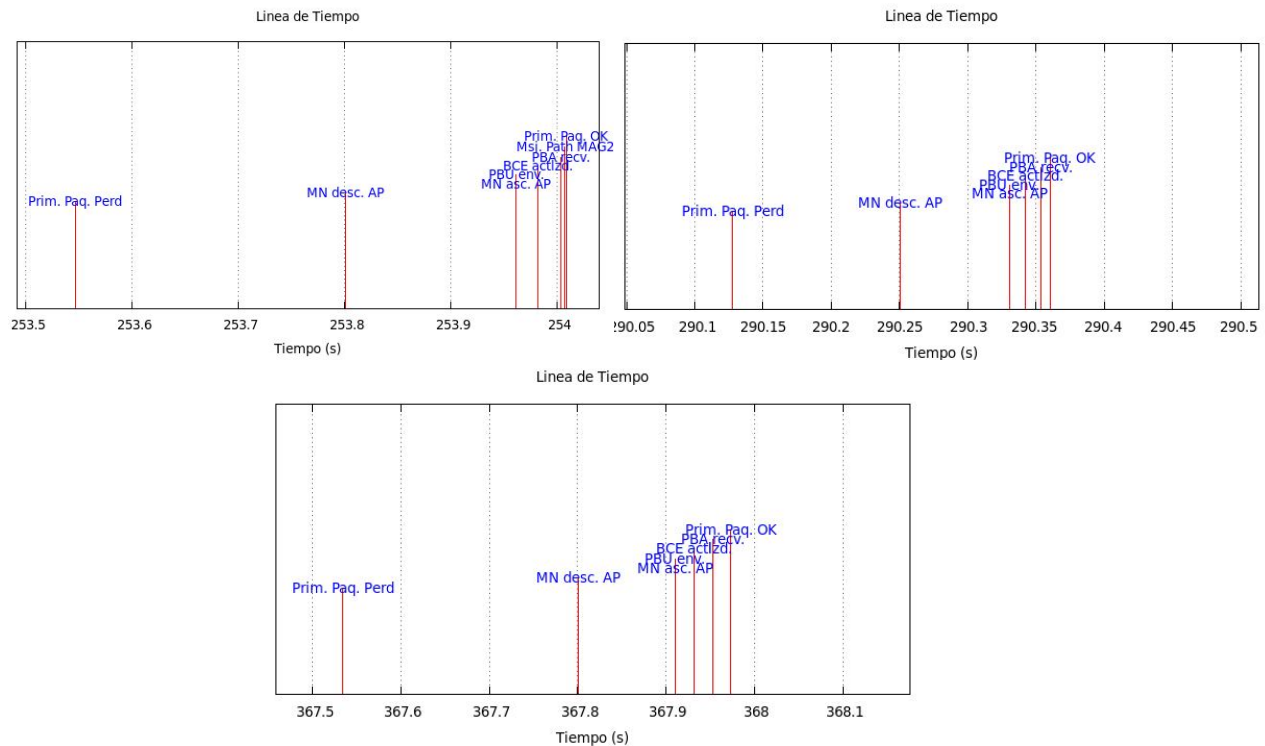


Figura C.2. Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).



**Figura C.3. Señalización en los eventos de *Handover* en PMIPv6/MPLS (*HO1*, *HO2*, *HO3* respectivamente) (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).**

En la figura C.2 se observa que una vez el MN se conecta al MAG/LER, solicita el establecimiento del *LSP-Data-Driven*; el análisis de estas gráficas concuerda con lo presentado en el *LSP-Data-Driven* y movimiento controlado.

La línea de tiempo de la figura C.3 corrobora que la señalización es acorde al funcionamiento de PMIPv6/MPLS descrito mediante la figura 3.8.

Al finalizar la simulación se obtuvieron los siguientes valores de paquetes enviados, recibidos y perdidos, la tabla C.1 resume estos datos:

Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	Porcentaje de Paquetes Perdidos
15610	15569	41	0,2626

**Tabla C.1. Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).**

En este escenario de simulación la cantidad de paquetes perdidos se mantiene igual al caso 1-a, la reducción del porcentaje de paquetes perdidos corresponde al incremento en la duración de la simulación (tiempo requerido para que el MN en su recorrido aleatorio realice 3 *Handover*), existiendo un mayor tiempo de conexión sin fisura; es importante resaltar que este valor no representa una mejora de funcionamiento.

La tabla C.2 presenta el tiempo de inicio de cada *Handover* y los paquetes que se pierden durante este proceso. Por otra parte la tabla C.3 muestra la duración de cada *Handover*.

Paquetes perdidos <i>Handover 1</i> ( $t \approx 253,55$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 2</i> ( $t \approx 290,13$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 3</i> ( $t \approx 367,52$ )
15	11	15

**Tabla C.2. Paquetes perdidos durante el *Handover* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).**

Duración aproximada <i>Handover 1</i>	Duración aproximada <i>Handover 2</i>	Duración aproximada <i>Handover 3</i>
0,462337862 seg.	0,335930539 seg.	0,464897891 seg.

**Tabla C.3. Duración de cada *Handover* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).**

De la tabla C.2 y la tabla C.3 se concluye que existe un promedio de 13,66 paquetes perdidos durante un *Handover* (valor igual que el caso 1-a), con duración promedio de 0,4210 segundos.

En comparación con el caso 1-a, existe un incremento de la duración promedio del *Handover* igual a 6,2 ms; este aumento se debe a que el movimiento del MN es aleatorio, desplazándose por zonas donde el nivel de cobertura es reducido, haciendo que su reconexión sea difícil.

La figura C.4 y la figura C.5 muestran la tasa de paquetes perdidos durante la simulación y durante cada proceso de *Handover*, respectivamente.

De la misma manera que las simulaciones anteriores, la gráfica C.4 evidencia un flujo constante de paquetes representado por la línea azul, tras la utilización de una fuente CBR entre CN y MN.

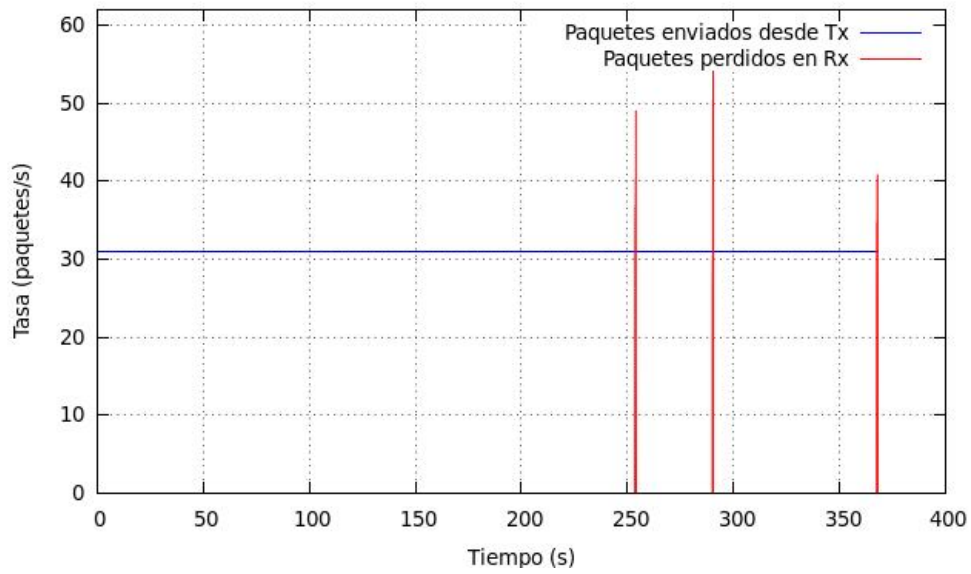


Figura C.4. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio).

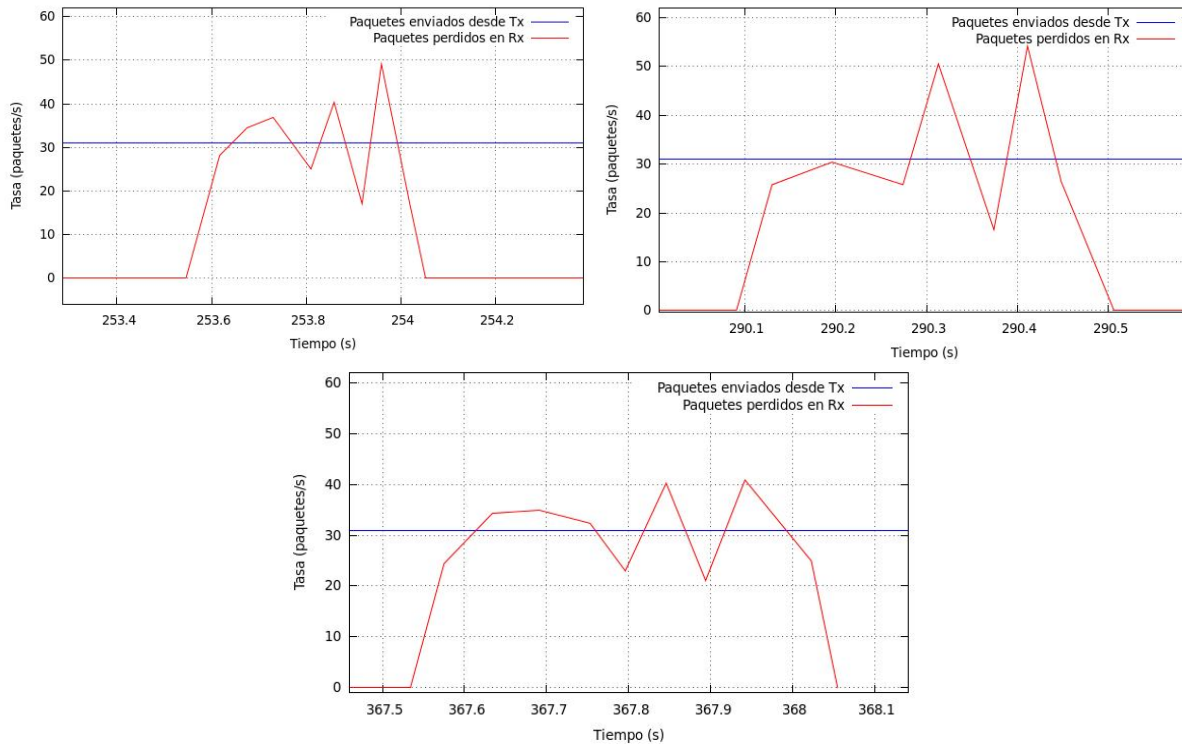
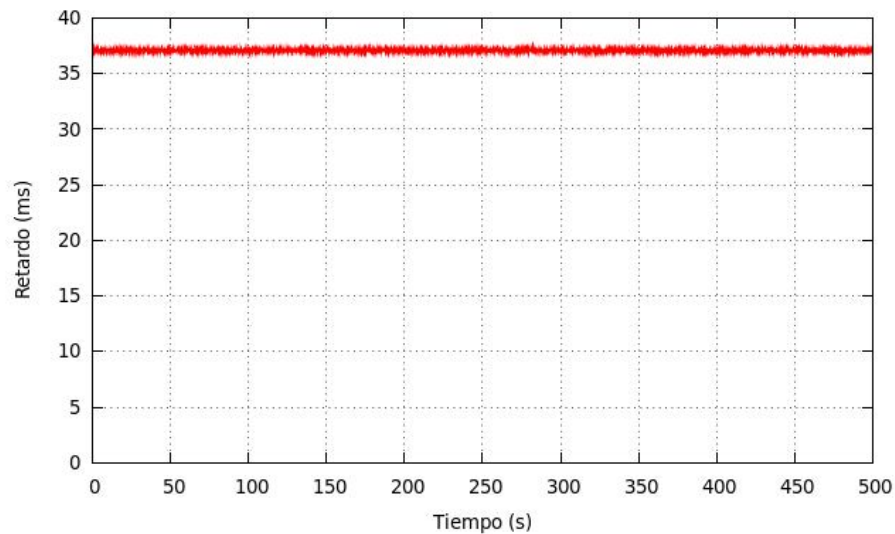


Figura C.5. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio).

En la figura C.5 se observa con mayor detalle los paquetes perdidos durante la ocurrencia de cada *Handover*; el análisis de estas gráficas concuerda con lo expresado en el caso 1-a.

La figura C.6 y la figura C.7 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del retardo extremo a extremo durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

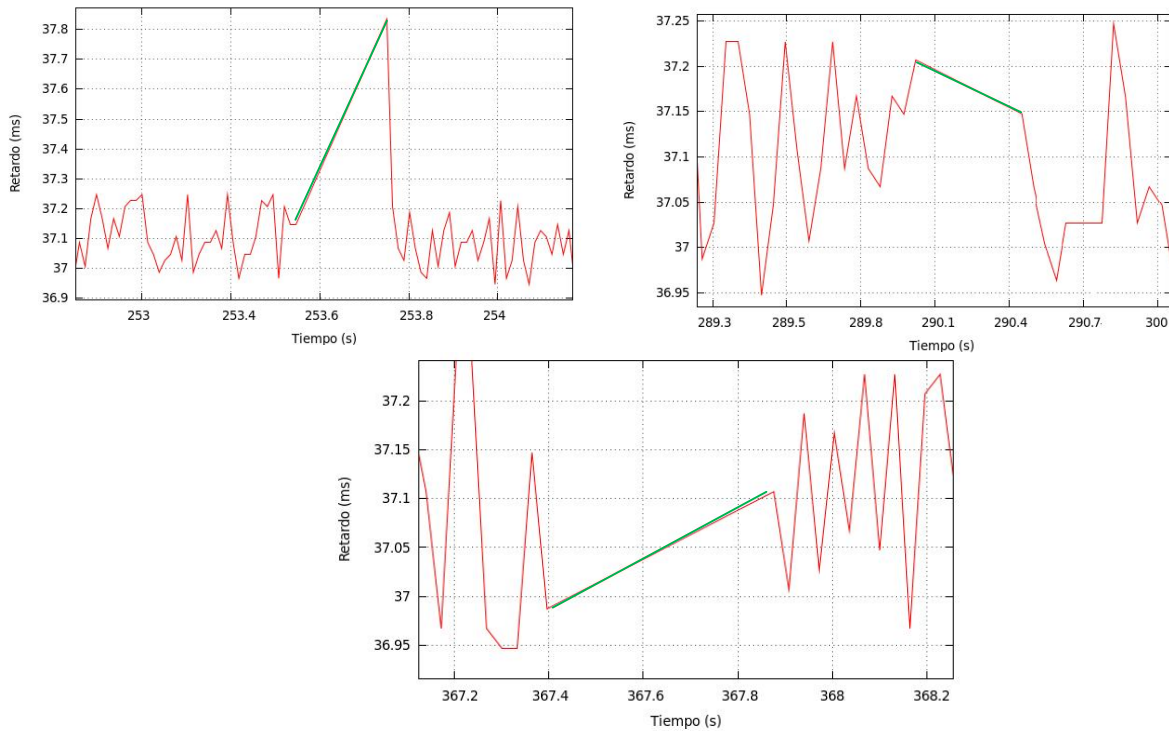


**Figura C.6. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio*).**

Se observa en las figuras C.6 y C.7 que antes y después de cada *Handover*, el retardo es relativamente constante, tomando valores entre 36.95 ms y 37.24 ms (37,09 en promedio), cumpliendo con el requerimiento de calidad definido por la recomendación G.1010 de la ITU-T.

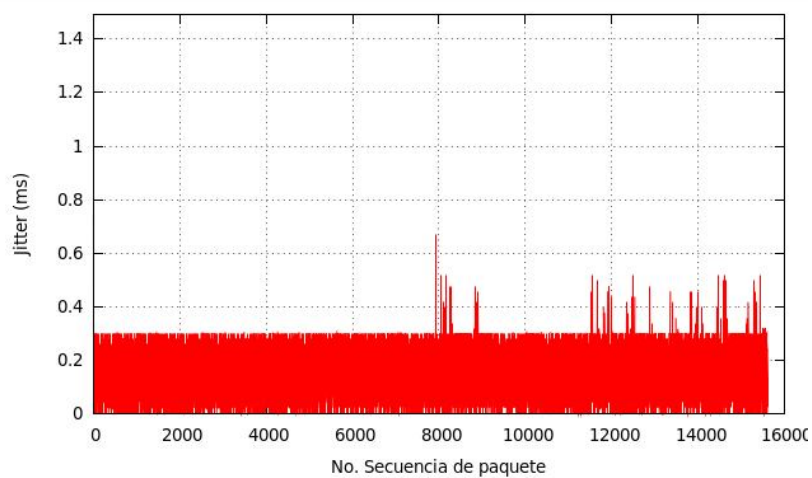
La reducción del promedio del retardo en comparación con el caso 1-a es de 2.2 ms, producto de la baja velocidad que experimenta el MN al momento del *Handover*, contribuyendo a que su localización se realice de un modo más sencillo.

El comportamiento que experimenta la línea del retardo en la figura C.7, se debe a las mismas razones explicadas en los anteriores escenarios.

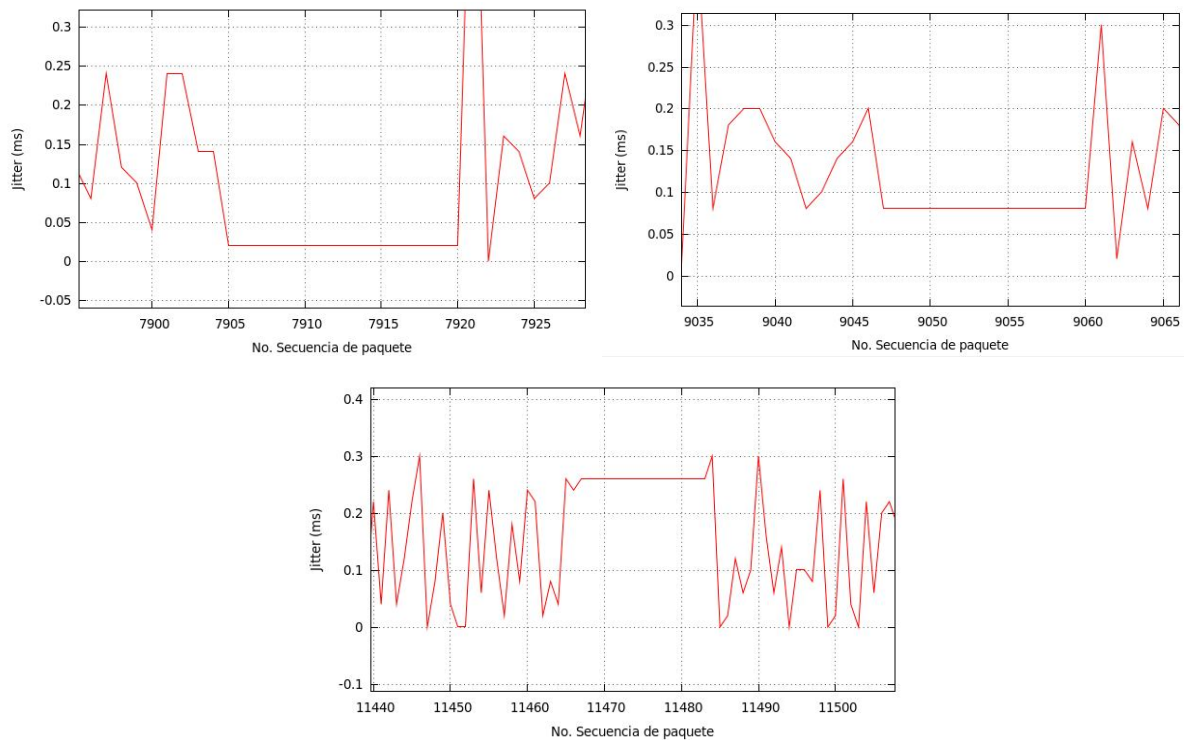


**Figura C.7. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio).**

La figura C.8 y la figura C.9 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *jitter* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura C.8. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio).**



**Figura C.9. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (*LSP-Data-Driven* - Movimiento aleatorio).**

A partir del comportamiento observado en la figura C.8 se puede afirmar que se da cumplimiento al valor de *jitter* requerido para garantizar una buena calidad del servicio; cada uno de los picos presentados en la gráfica que están por debajo de 0,7 ms, son producto del procesamiento prioritario que tiene el mensaje de mantenimiento del LSP, como se mencionó en el caso 1-a.

En la figura C.9 se observa que la variación del retardo permanece casi constante durante la simulación, tomando valores entre 0 y 0,3 ms, viéndose afectada en los instantes en los que se presentan los *Handover*, debido a la pérdida de paquetes. El análisis para estas gráficas concuerda con lo expresado para el caso 1-a.

La figura C.10 y la figura C.11 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *throughput* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

El análisis para estas dos figuras concuerda con el análisis de *throughput* realizado en *LSP-Data-Driven* con movimiento controlado.

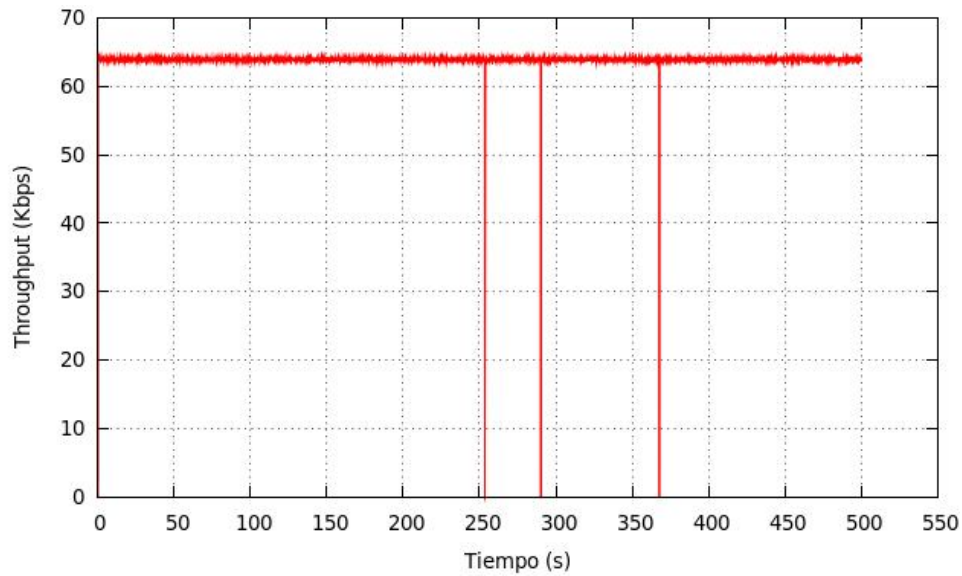


Figura C.10. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio*).

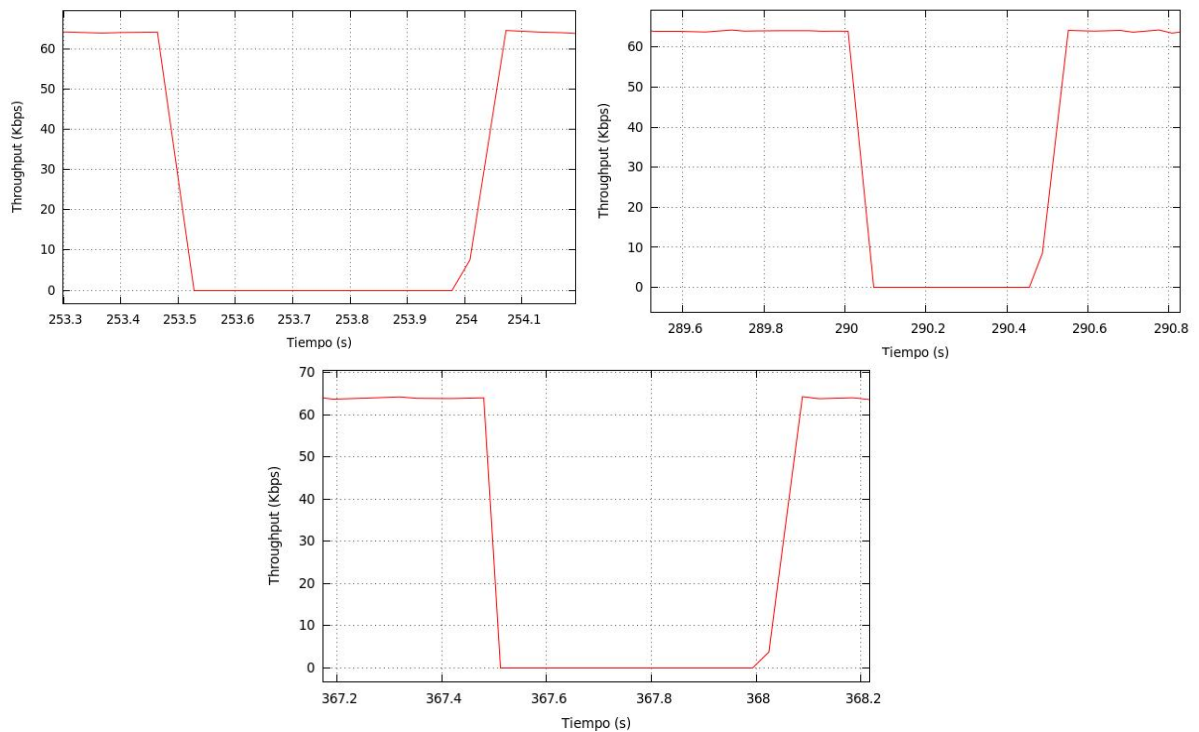
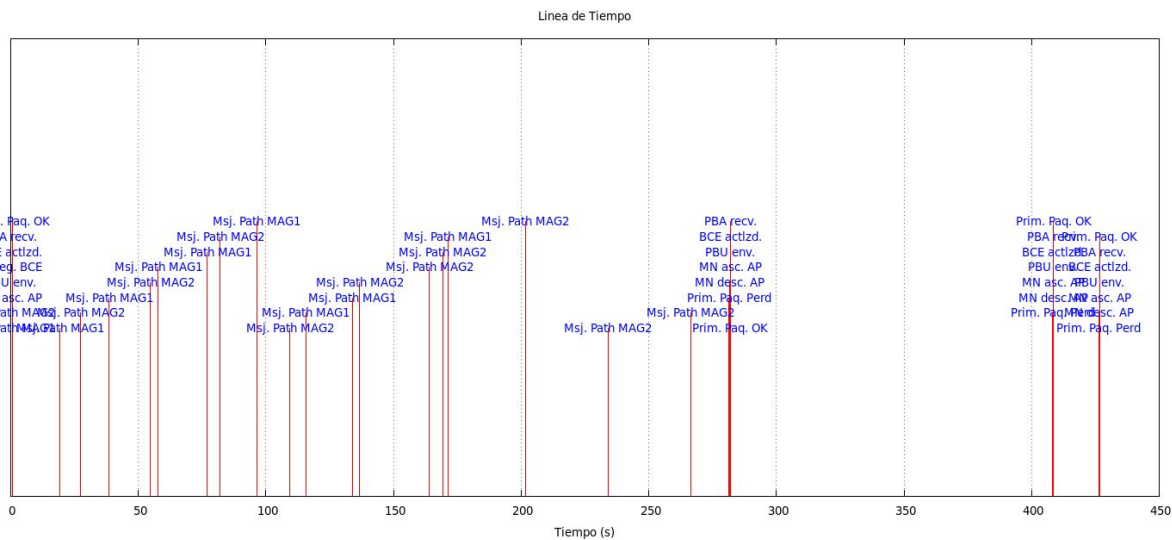


Figura C.11. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Data-Driven - Movimiento aleatorio*).

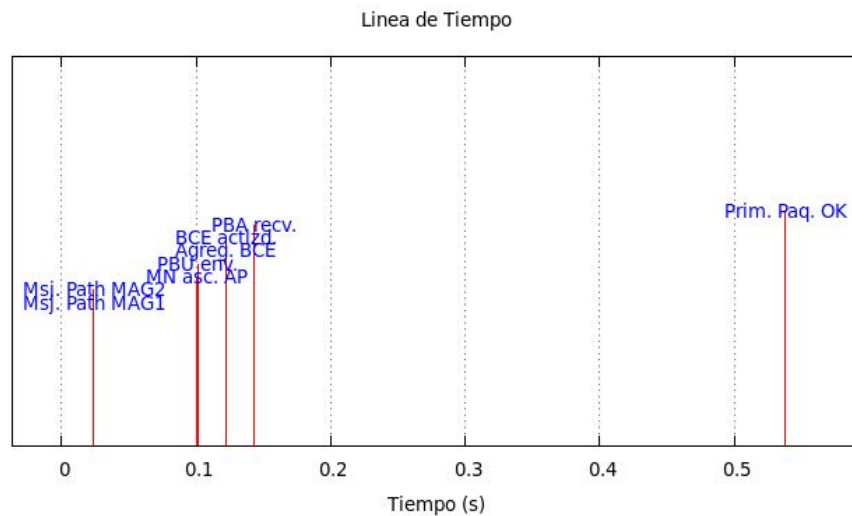


**ANEXO D. ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE PMIPv6/MPLS CON ESTABLECIMIENTO DE LSP-CONTROL-DRIVEN Y MOVIMIENTO ALEATORIO**

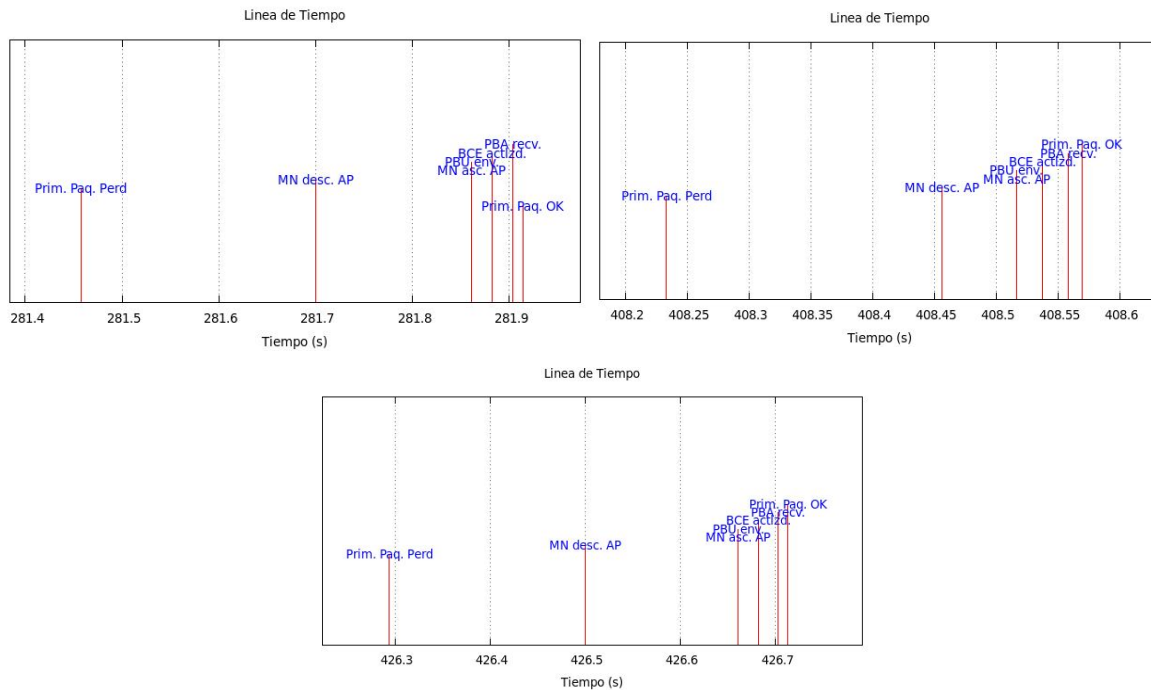
En las figuras D.1, D.2 y D.3 se muestra en una línea de tiempo la señalización correspondiente al funcionamiento de PMIPv6/MPLS utilizando *LSP-Control-Driven* (movimiento aleatorio), asociada particularmente a cada proceso de *Handover*. En las gráficas se pueden determinar los instantes de tiempo en los que se realizan los *Handover*, y la duración de estos.



**Figura D.1. Señalización en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**



**Figura D.2. Señalización en PMIPv6/MPLS – Fase de inicialización (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**



**Figura D.3. Señalización en los eventos de *Handover* en PMIPv6/MPLS (*HO1*, *HO2*, *HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**

En la figura D.2 se observa que el establecimiento del LSP bi-direccional se realiza al iniciar la simulación con el propósito de enviar todos los datos por medio de la conmutación de etiquetas.

La línea de tiempo de la figura D.3 corrobora que la señalización es acorde al funcionamiento de PMIPv6/MPLS descrito mediante la figura 3.9.

Al finalizar la simulación se obtuvieron los siguientes valores de paquetes enviados, recibidos y perdidos, la tabla D.1 resume estos datos:

Paquetes Enviados	Paquetes Recibidos	Paquetes Perdidos	Porcentaje de Paquetes perdidos
15610	15557	40	0,2562

**Tabla D.1. Flujo de paquetes en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**

En este escenario de simulación la cantidad de paquetes perdidos se mantiene igual al caso 2-a, la reducción del porcentaje de paquetes perdidos corresponde al incremento en la duración de la simulación (tiempo requerido para que el MN en su recorrido aleatorio realice 3 *Handover*), existiendo un mayor tiempo de conexión sin fisura; es importante resaltar que este valor no representa una mejora de funcionamiento.

La tabla D.1 presenta el tiempo de inicio de cada *Handover* y los paquetes que se pierden durante este proceso. Por otra parte la tabla D.2 muestra la duración de cada *Handover*.

Paquetes perdidos <i>Handover 1</i> ( $t \approx 281,46$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 2</i> ( $t \approx 408,24$ )	Paquetes perdidos <i>Handover 3</i> ( $t \approx 426,29$ )
15	11	14

**Tabla D.1. Paquetes perdidos durante el *Handover* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**

Duración aproximada <i>Handover 1</i>	Duración aproximada <i>Handover 2</i>	Duración aproximada <i>Handover 3</i>
0,456617959 seg.	0,335550574 seg.	0,418930677 seg.

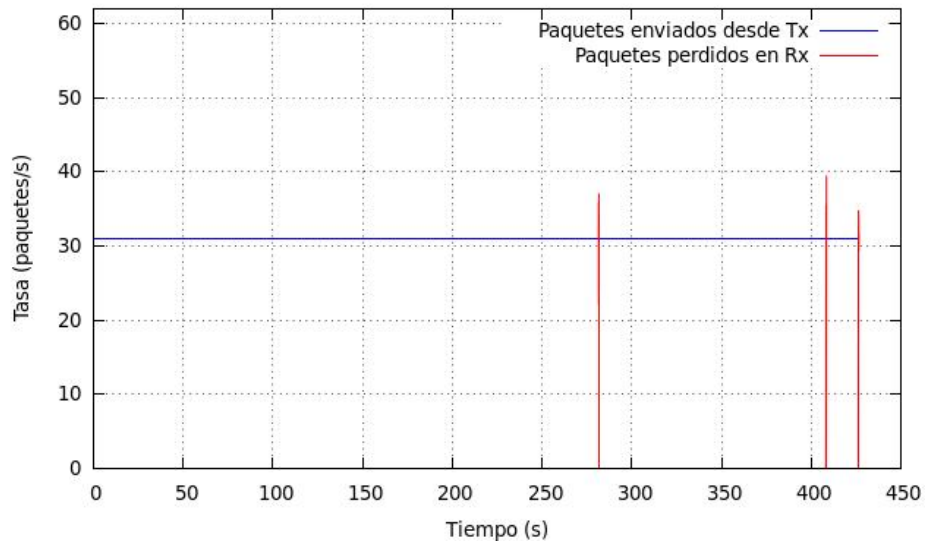
**Tabla D.2. Duración de cada *Handover* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).**

De la tabla D.1 y la tabla D.2 se concluye que existe un promedio de 13,33 paquetes perdidos durante un *Handover* (valor igual que el caso 2-a), con duración promedio de 0,4036 segundos.

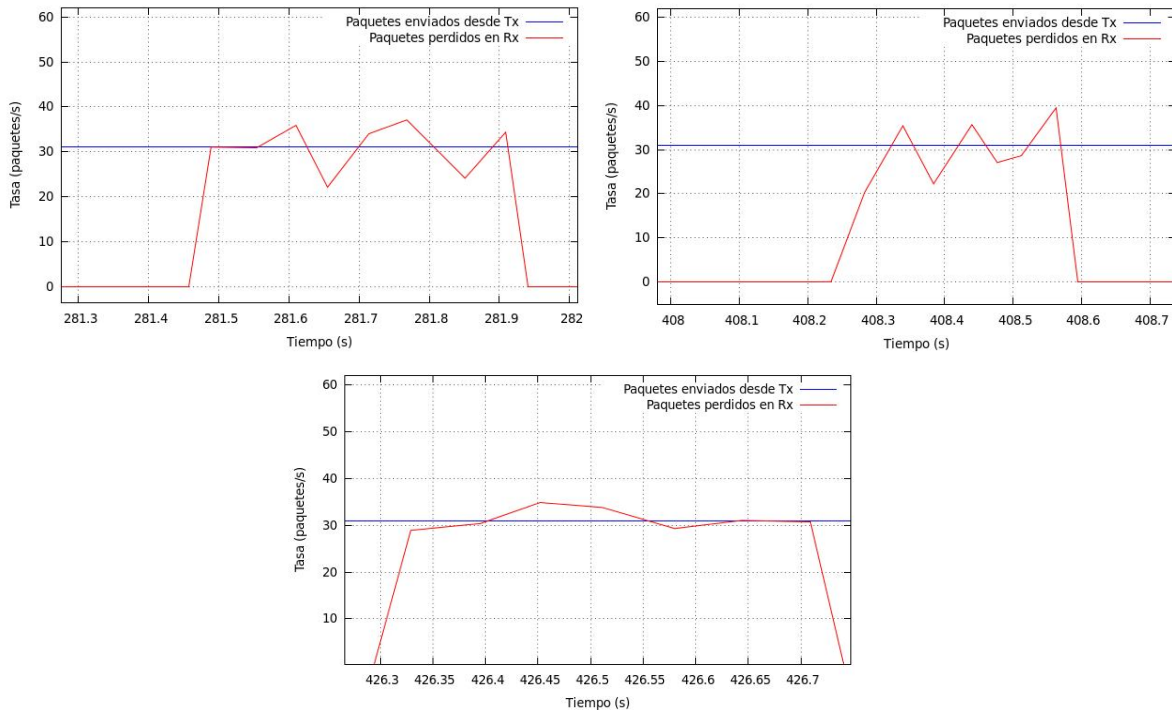
En comparación con el caso 2-a, existe un incremento de la duración promedio del *Handover* igual a 0,4 ms; este aumento se debe a que el movimiento del MN es aleatorio, desplazándose por zonas donde el nivel de cobertura es reducido, haciendo que su reconexión sea difícil.

Las figuras D.4 y D.5 muestran la tasa de paquetes perdidos durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

De la misma manera que las simulaciones anteriores, la gráfica D.4 evidencia un flujo de paquetes constante representado por la línea azul, tras la utilización de una fuente CBR entre CN y MN.



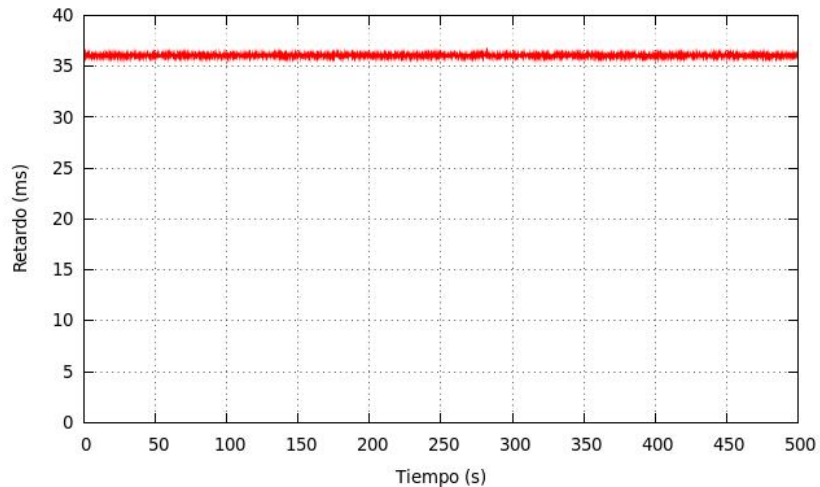
**Figura D.4. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio).**



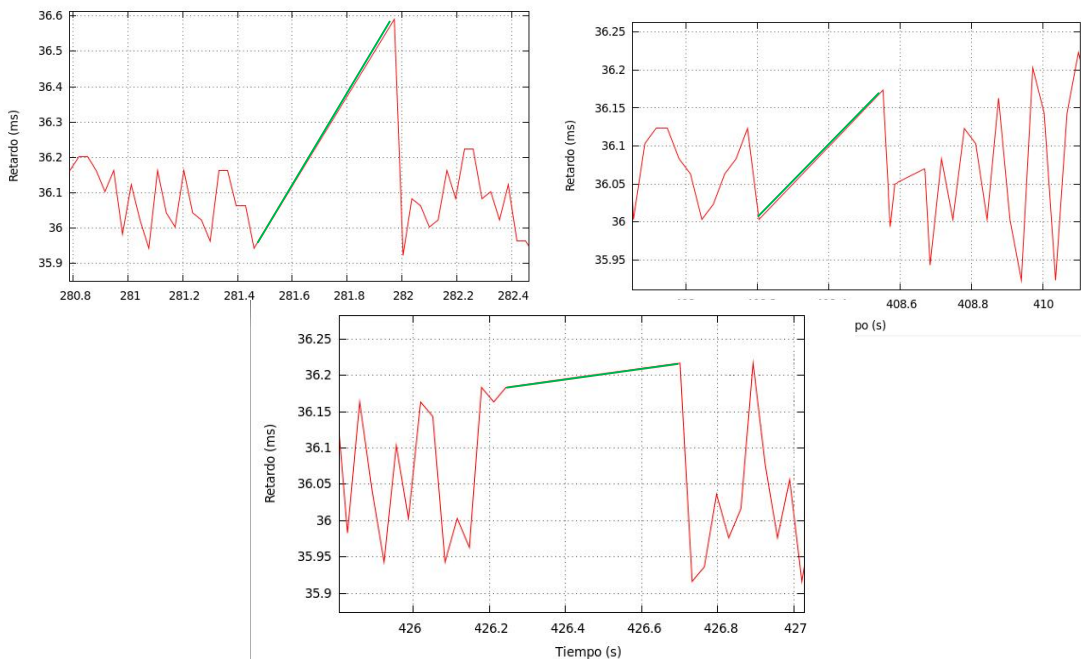
**Figura D.5. Tasa de paquetes perdidos en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio).**

La figura D.5 muestra con mayor detalle los paquetes perdidos durante la ocurrencia de cada *Handover*; el análisis de estas gráficas concuerda con lo expresado en el caso 2-a.

Las figuras D.6 y D.7 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del retardo extremo a extremo durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura D.6. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio*).**



**Figura D.7. Comportamiento del retardo en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio*).**

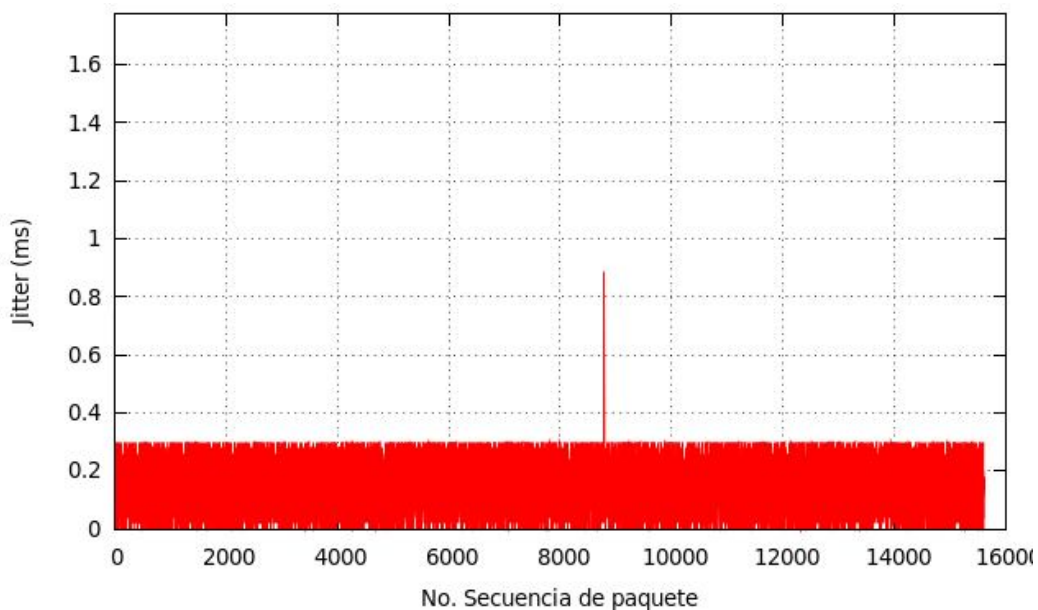
En la figura D.6 se aprecia que antes y después de cada *Handover*, el retardo es relativamente constante, este valor varía entre 35.91 ms y 36.25 ms (36,08 ms en promedio), cumpliendo con el requerimiento de calidad definido por la recomendación G.1010 de la ITU-T.

El valor promedio de retardo se mantiene igual en comparación con el caso 2-a, evidenciando que este tipo de establecimiento de LSP funciona de forma estable y presenta una leve mejoría de 1,01 ms con respecto al caso 1-b.

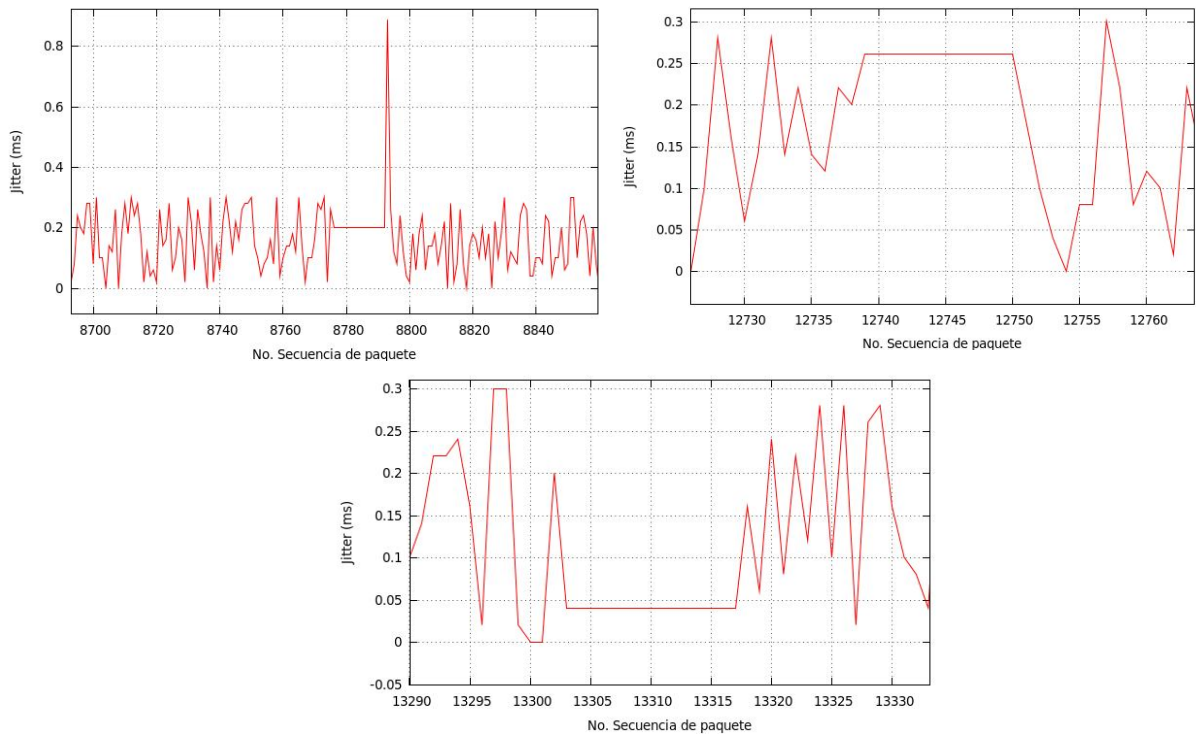
Por otra parte los picos que se ven en la gráfica se deben a un incremento en el retardo, este incremento es esta asociado a los mensajes que mantienen el establecimiento del LSP, el cual es procesado con mayor prioridad que un paquete de datos.

El comportamiento que experimenta la línea del retardo en la figura D.7, se debe a las mismas razones expresadas en los escenarios anteriores.

La figura D.8 y la figura D.9 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *jitter* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.



**Figura D.8. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio*).**



**Figura D.9. Comportamiento del *Jitter* en PMIPv6/MPLS (HO1, HO2, HO3 respectivamente) (LSP-Control-Driven - Movimiento aleatorio).**

A partir del comportamiento observado en la figura D.8 se puede afirmar que se da cumplimiento al valor de *jitter* requerido para garantizar una buena calidad del servicio; cada uno de los picos presentados en la gráfica y que están por debajo de 0,9 ms, son producto del procesamiento prioritario que requiere el mensaje que mantiene el establecimiento del LSP, como se mencionó en el *LSP-Control-Driven* con movimiento controlado.

La figura D.9 se observa que la variación del retardo permanece casi constante durante la simulación, tomando valores entre 0 y 0,3 ms, viéndose afectada en los instantes en los que se presentan los *Handover*, debido a la pérdida de paquetes. El análisis para estas gráficas concuerda con lo expresado para el caso 2-a.

La figura D.10 y la figura D.11 presentan las gráficas respectivas del comportamiento del *throughput* durante la simulación y durante cada *Handover*, respectivamente.

El análisis para estas dos figuras concuerda con el análisis de *throughput* realizado en *LSP-Data-Driven* con movimiento controlado, debido a la similitud en su comportamiento.

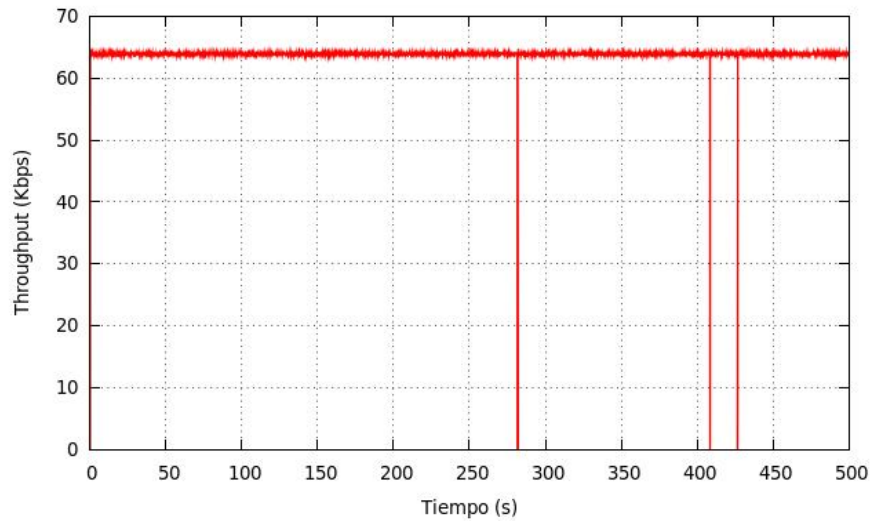


Figura D.10. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).

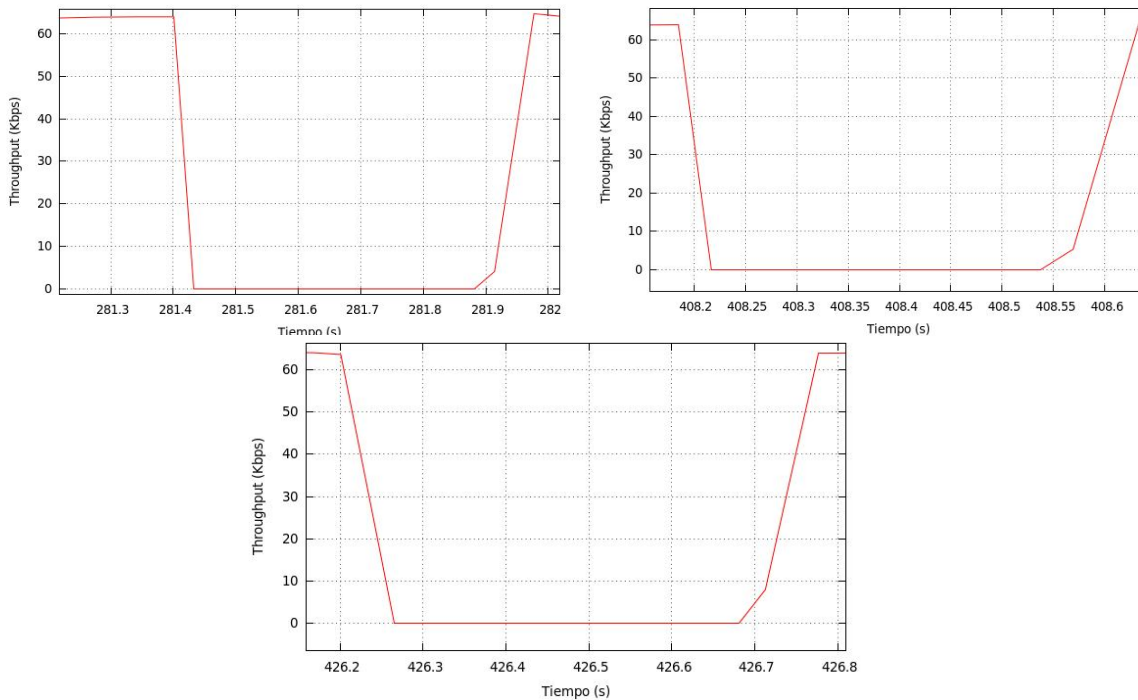


Figura D.11. Comportamiento del *Throughput* en PMIPv6/MPLS (*HO1, HO2, HO3* respectivamente) (*LSP-Control-Driven* - Movimiento aleatorio).