

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN PARA LOS
PARAMETROS DE CALIDAD DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN Y MEDIDAS
DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA DE BAJA TENSIÓN**

DANIEL ALEXANDER VELAZCO CAPACHO

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2010**

Trabajo de investigación de maestría:

**EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN PARA LOS
PARAMETROS DE CALIDAD DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN Y MEDIDAS
DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA DE BAJA TENSIÓN**

Autor:

DANIEL ALEXANDER VELAZCO CAPACHO, Ing.

Trabajo de investigación presentado para optar por el título de:
Magister en Ingeniería Electrónica

Director:

Oscar Gualdrón González, PhD

Codirector:

José de Jesús Rugeles Uribe, MIE

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
ESCUELA DE INGENIERÍAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
2010

DEDICATORIA

A mis padres y hermanos, por su eterno apoyo,
A Jessica por su comprensión y motivación,
A mis amigos, por sus valiosos aportes.
Gracias por acompañarme en esta etapa de mi vida.

*¡Cuando quieras construir un barco,
no convoques hombres para que traigan madera,
para asignarles tareas ni para dividir el trabajo entre ellos,
sino enséñales la nostalgia del extenso e inagotable mar!*

Antoine de Saint Exupéry.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Industrial de Santander (UIS).

A la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones (E3T).

Al grupo de investigación en Conectividad y Procesamiento de Señal (CPS).

A la Electrificadora de Santander S.A. E.S.P.

Al profesor Oscar Gualdrón González, director del trabajo de investigación, por su valiosa colaboración y su confianza depositada en mí.

A los profesores Jorge Hernando Ramón, Cesar Antonio Duarte, Gabriel Ordoñez y José de Jesús Rugeles, por su acompañamiento.

A los ingenieros Jairo Iván Flórez, Mauricio Erazo, William Salamanca, Sergio Abreo, Carlos Fajardo, Carlos Angulo, Luis Alejandro Osorio, Julián Rolón, Ricardo Díaz, Miguel Mejía Uribe, José del Carmen Motta; por su apoyo y amistad.

A Laura Liliana Agudelo, Ovidio Alfonso Flórez, Cesar Iván Forero, Álvaro Enrique Reslen y Cristian Higuera por su colaboración en el aporte para consecución de los objetivos del trabajo de investigación.

A todas aquellas personas que brindaron su ayuda para llevar a buen término el trabajo de investigación.

TABLA DE CONTENIDO

OBJETIVO GENERAL.....	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
1. GENERALIDADES Y ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.....	24
1.1 PARÁMETROS DE RENDIMIENTO EN LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.....	24
1.1.1 Ancho de banda.....	24
1.1.2 Throughput: tasa real efectiva.....	24
1.1.3 Latencia.....	25
1.1.4 Jitter: variación de retardo.....	25
1.1.5 RTT: Round Trip delay Time.....	25
1.1.6 BER: tasa de error de bits.....	25
1.2 ADSL: LÍNEA DE SUBSCRIPCIÓN ASIMÉTRICA DIGITAL.....	26
1.2.1 Descripción y características de la tecnología ADSL.....	26
1.2.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para ADSL	28
1.3 CIA: CABLE INTERNET ACCESS.....	29
1.3.1 Descripción y características de la tecnología CIA.....	30
1.3.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para CIA	31
1.4 GPRS: SERVICIO GENERAL DE PAQUETES VIA RADIO.....	32
1.4.1 Descripción y características de GPRS.....	33
1.4.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para GPRS	35
1.5 PLC: COMUNICACIÓN POR LÍNEA DE PODER.....	36
1.5.1 Descripción y características de PLC.....	36
1.5.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para PLC	37
1.6 WIMAX: INTEROPERABILIDAD MUNDIAL PARA ACCESO POR MICROONDAS.....	39
1.6.1 Descripción y características de WiMAX.....	39
1.6.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para WiMAX	41

1.7	WIRELESS LAN.....	42
1.7.1	Descripción y características de Wireless LAN	42
1.7.2	Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para Wireless LAN	43
1.8	COMPARACIONES DE ALGUNAS CARACTERISTICAS ENTRE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.....	44
1.8.1	Comparación de las características técnicas.....	44
1.8.2	Experiencias sobre comparaciones de las tecnologías de comunicación.....	44
2.	METODOS PARA EL DISEÑO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE ENLACES PILOTO DE DATOS PARA LAS TECNOLOGIAS ADSL, CIA, GPRS, PLC, WiMAX Y WIRELESS LAN.	49
2.1	METODOLOGIA DE PRUEBAS	49
2.1.1	Definición del escenario de pruebas.....	49
2.1.2	Selección de las herramientas de medición de desempeño	50
2.1.3	Implementación del enlace de datos.	53
2.1.4	Pruebas de ajuste de parámetros de medida.....	53
2.1.5	Serie de mediciones	54
2.1.6	Generación de reportes.....	55
2.1.7	Ajustes de mediciones.....	55
2.1.8	Caracterización del enlace.....	55
2.2	ESQUEMAS DE ENLACES DE DATOS PUNTO A PUNTO.	56
2.2.1	Esquema ADSL.....	56
2.2.2	Esquema CIA	56
2.2.3	Esquema GPRS.....	56
2.2.4	Esquema WiMAX.....	58
2.2.5	Esquemas Wireless LAN.....	59
2.2.6	Esquemas PLC	60
2.3	HERRAMIENTAS DE DESEMPEÑO.....	61
2.3.1	Iperf	61
2.3.2	D-ITG.....	62
2.3.3	Netio	62
2.3.4	Ping	63
2.3.5	Jperf.....	63

2.3.6	Netperf	64
2.3.7	Comparación de las herramientas de desempeño	64
2.3.8	Selección de las herramientas de desempeño	64
2.4	CAMPAÑAS DE MEDICIONES.....	66
2.4.1	Descripción de las mediciones desarrolladas para ADSL, CIA, GPRS y WiMAX.....	66
2.4.2	Descripción de las mediciones desarrolladas para Wireless LAN.....	70
2.4.3	Descripción de las mediciones desarrolladas para PLC.....	71
2.4.4	Generación de reportes.....	74
3.	CARACTERIZACIÓN DE LOS ENLACES DE DATOS.....	75
3.1	RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE DESEMPEÑO	75
3.1.1	Tecnologías ADSL y CIA.....	75
3.1.2	Tecnología GPRS	75
3.1.3	Tecnología WiMAX.....	75
3.1.4	Tecnología Wireless LAN y PLC	76
3.2	COMPARACIONES ENTRE LAS TECNOLOGÍAS ADSL, CIA, GPRS, WIMAX, Wireless LAN y PLC	76
3.2.1	Ancho de banda y retardos para las configuraciones por defecto de las herramientas.....	76
3.2.2	Ancho de banda y retardos para la determinación del MTU	79
3.2.3	Ancho de banda para la determinación del tamaño de la ventana TCP 80	
3.2.4	Ancho de banda de las pruebas extendidas	81
3.2.5	Throughput de las pruebas extendidas	83
3.2.6	Retardos de las pruebas extendidas.....	83
3.2.7	Descargas de archivos.....	85
3.3	DISPONIBILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN BUCARAMANGA	86
3.3.1	Cobertura para ADSL	87
3.3.2	Cobertura para CIA.....	87
3.3.3	Cobertura para GPRS	88
3.3.4	Cobertura para WiMAX	88
3.3.5	Cobertura para Wireless LAN.....	88
3.3.6	Cobertura para PLC.....	89

4.	METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGIA DE COMUNICACIÓN.	90
4.1	TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.....	90
4.1.1	Conceptos sobre decisión [47].	91
4.1.2	Fases de un proceso de decisión [47].	92
4.1.3	Principales métodos de decisión Multicriterio	93
4.2	PROPUESTA DE METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGIA DE COMUNICACIÓN.	109
4.2.1	Definición del objetivo de selección.	111
4.2.2	Establecimiento de los criterios de selección, atributos y alternativas.	111
4.2.3	Modelización de la estructura jerárquica.	111
4.2.4	Cálculo y consistencia de las prioridades de los atributos técnicos.	111
4.2.5	Cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios de selección.	112
4.2.6	Ingreso y normalización de los valores para los atributos	112
4.2.7	Ingreso y normalización de los valores para los criterios de selección.	112
4.2.8	Análisis de sensibilidad	112
4.2.9	Ranking de alternativas de comunicación.	112
4.3	VALIDACIÓN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PARA SITELRED.	113
4.3.1	Definición del objetivo de selección.	113
4.3.2	Establecimiento de los criterios de selección, atributos y alternativas.	113
4.3.3	Modelización de la estructura jerárquica.	114
4.3.4	Cálculo y consistencia de las prioridades de los atributos técnicos.	115
4.3.5	Cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios de selección.	115
4.3.6	Ingreso y normalización de los valores para los atributos	116
4.3.7	Ingreso y normalización de los valores para los criterios de selección.	116
4.3.8	Análisis de sensibilidad	116
4.3.9	Ranking de alternativas de comunicación.	118
4.3.10	Ejemplo de validación de los cálculos y ranking de tecnologías.	118

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	125
5.1 CONCLUSIONES	125
5.2 TRABAJO FUTURO	127
REFERENCIAS.....	129
ANEXOS	135

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Estándares de la tecnología ADSL.	27
Tabla 2 Comparación de estándares para WiMAX.	40
Tabla 3. Comparación de la división del estándar IEEE802.11	42
Tabla 4. Comparativo de las características de las tecnologías de comunicación.	45
Tabla 5. Valores típicos para WiFi y WiMAX.....	46
Tabla 6. Comparación de velocidades entre tecnologías cableadas e inalámbricas	47
Tabla 7. Comparación de tecnologías inalámbricas móviles	48
Tabla 8. Comparativo de las herramientas de medición.	52
Tabla 9. Escalas de asignación directa.....	101
Tabla 10. Escala fundamental de Saaty.	102
Tabla 11. Índice de consistencia aleatoria IA.....	106
Tabla 12. Etapas para el cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios y atributos.	115
Tabla 13. Ejemplo de selección de tecnología aplicando AHP.	119

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Enlace de datos ADSL.....	27
Figura 2. Metodología propuesta para caracterizar enlaces de datos.	51
Figura 3. Esquema general del enlace de datos.....	52
Figura 4. Esquema de implementación para ADSL.	57
Figura 5. Esquema de implementación para CIA.....	57
Figura 6. Esquema de implementación para GPRS	58
Figura 7. Esquema de implementación para WiMAX.....	59
Figura 8. Esquema de implementación Wireless LAN.	60
Figura 9. Esquema de implementación PLC para ajustes de parámetros	60
Figura 10. Procedimiento de ejecución de las herramientas.....	65
Figura 11. Comparación de mediciones de ancho de banda por defecto.	77
Figura 12. Rendimiento de las tecnologías de acuerdo a la tasa nominal	78
Figura 13. Comparación de los retardos por defecto (RTT).....	78
Figura 14. Comparación del ancho de banda variando la MTU	79
Figura 15. Comparación de los retardos variando la MTU.....	80
Figura 16. Comparativo de la variación de la ventana TCP.....	81
Figura 17. Ancho de banda de las pruebas extendidas y por defecto	82
Figura 18. Efectividad del ancho de banda para las mediciones realizadas en larga duración.....	83
Figura 19. Comparativo del throughput y el ancho de banda medido para las pruebas extendidas.....	84
Figura 20. Comparativo de la latencia medida para las pruebas extendidas.....	84
Figura 21. Comparativo del jitter medido para las pruebas extendidas.	85
Figura 22. Comparativo del tiempo de descarga de archivo.....	86
Figura 23. División de los métodos de decisión.....	95
Figura 24. Forma general de la jerarquización del AHP.....	100
Figura 25. Metodología propuesta para la selección de tecnologías de comunicación.....	110
Figura 26. Jerarquización del proceso de selección.....	114

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. Resultados de mediciones para la tecnología ADSL.	135
ANEXO B. Resultados de mediciones para la tecnología CIA.	144
ANEXO C. Resultados de mediciones para la tecnología GPRS.	154
ANEXO D. Resultados de mediciones para la tecnología WiMAX.	162
ANEXO E. Resultados de mediciones para la tecnología Wireless LAN.	171
ANEXO F. Resultados de mediciones para la tecnología PLC.	178
ANEXO G. Análisis de sensibilidad del método AHP para SITELRED.	185

RESUMEN

TITULO:

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN PARA LOS PARAMETROS DE CALIDAD DE POTENCIA DE MEDIA TENSIÓN Y MEDIDAS DE LOS CONSUMOS DE ENERGÍA DE BAJA TENSIÓN¹

AUTOR:

DANIEL ALEXANDER VELAZCO CAPACHO²

PALABRAS CLAVES: ADSL, CIA, PLC, GPRS, WiMAX, Wireless LAN, AHP, throughput, latencia.

DESCRIPCIÓN: El desarrollo del trabajo de investigación ayuda a seleccionar una tecnología entre las existente en un área determinada; esta evaluación se realiza aplicando el Proceso Analítico Jerárquico, para determinar, mediante la asignación de ponderaciones empleando escalas como la fundamental de Saaty y asignadas por un decisor, el orden descendente de desempeño de las alternativas evaluadas. Los criterios de selección con los cuales se aplica el método AHP son los aspectos técnicos, la disponibilidad de la tecnología en el entorno local y el valor económico de instalación de la tecnología en un nodo.

Para evaluar alternativas de comunicación, se desarrolló una metodología de pruebas de rendimiento a partir de parámetros como ancho de banda, throughput, retardos, tasas de error de bit y duración de descarga de archivos. Esta contiene aspectos tales como determinación de las duraciones de los registros, variación de la MTU para determinar la de mejor rendimiento, variación de la ventana TCP para escoger la más apropiada en la transmisión de datos, medición de la estabilidad de los enlaces de datos, pruebas de larga duración, con pruebas desde 4 horas en adelante y descarga de archivos para determinar la duración de transferencia de los mismos.

La metodología de pruebas de rendimiento se desarrolló tomando como referencia trabajos realizados por otros autores y ajustados a las condiciones del entorno local. Las pruebas desarrolladas fueron realizadas empleando enlaces de datos entre puntos finales para las tecnologías y midiendo el rendimiento de los aspectos técnicos mencionados previamente, para lo cual se emplearon herramientas de medición de desempeño tales como D-ITG, iperf, netio y el comando ping.

Por último, se obtienen resultados de mediciones que pueden ser empleadas en trabajos de proyección o escalamiento para sistemas de telemetría, como el desarrollado entre la UIS, Colciencias y la ESSA en el proyecto SITELRED.

¹ Trabajo de investigación de maestría.

² Facultad de Ciencias fisico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Oscar Gualdrón González Ph.D. Codirector: José de Jesús Rugeles MIE.

SUMMARY

TITLE: EVALUATION OF COMMUNICATION ALTERNATIVES FOR POWER QUALITY PARAMETERS OF MEDIUM VOLTAGE LINES AND MEASURES OF THE POWER CONSUMPTION OF LOW VOLTAGE LINES³.

AUTHOR: DANIEL ALEXANDER VELAZCO CAPACHO**⁴

KEY WORDS: ADSL, CIA, PLC, GPRS, WiMAX, Wireless LAN, AHP, throughput, latency.

DESCRIPTION: The development of the research helps to select among the existing technology in a given area; this evaluation is done by applying the Analytic Hierarchy Process to determine, by assigning weights using scales such as the Saaty fundamental and assigned by a decision maker, the descending order of performance of the evaluated alternatives. The selection criteria applying AHP method are the technical aspects, the availability of a particular technology in the local environment and the economic value of installing the technology in a node.

To evaluate the communication alternatives, it is also required a technical performance test methodology, which is proposed and developed, based on technical aspects as bandwidth, throughput, delay, bit error rates and duration of downloading files. This includes aspects such as determining the duration of the records, the change of MTU to determine the best performance one, the change of TCP window in order to choose the most appropriate one for the transmission of data, measurement of stability of data links, long-term tests, with tests from 4 hours ahead and file download to determine the file transfer duration.

The performance assessment methodology was developed with reference to previous work done by other authors and adapted to local environmental conditions. Tests were performed using data links between endpoints measuring the performance of the technical aspects mentioned above, using performance measurement tools such as D-ITG, iperf, Netio and ping command.

Finally, results of measurements that can be employed in scaling or projection labors for telemetry systems are obtained, such as the one developed by UIS, Colciencias and ESSA in the SITELRED project.

³ Trabajo de investigación de maestría

⁴ Facultad de Ciencias físico-mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Oscar Gualdrón González Ph.D. Codirector: José de Jesús Rugeles MIE.

OBJETIVOS DEL TRABAJO DE LA INVESTIGACIÓN

OBJETIVO GENERAL

Evaluar las alternativas de comunicación sustentadas en las tecnologías ADSL, PLC, GPRS, CABLEMODEM, WIMAX y RADIOENLACES para el “Prototipo de Sistema Metropolitano de Telemetría para los Parámetros Eléctricos en las Redes de Distribución de Media y Baja Tensión”, que permitan las transmisiones de los datos de los parámetros de calidad de los transformadores de distribución y la recolección de mediciones de energía de los usuarios en la red de baja tensión, hacia el Centro de Gestión de la ESSA.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcanzar el desarrollo del objetivo general y de acuerdo con los pasos que se necesitan para dicho desarrollo, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Analizar el estado del arte de las tecnologías ADSL, PLC, GPRS, CABLEMODEM, WIMAX y RADIOENLACES que involucre estudios relacionados con parámetros tales como throughput, las tasas de error, retardos y el ancho de banda.
- Diseñar, implementar y caracterizar, en función de los parámetros seleccionados, los enlaces piloto de comunicación individuales con las tecnologías ADSL, PLC, GPRS, CABLEMODEM, WIMAX y RADIOENLACES.
- Elaborar una metodología de selección de tecnología de comunicación relacionada con los parámetros throughput, tasas de error (BER, PER), ancho de banda, retardos (RTT y JITTER) y disponibilidad para prototipos de sistemas metropolitanos de medidas automáticas.

- Presentar el informe de la evaluación técnica de las tecnologías de comunicaciones basado en la disponibilidad de los sistemas de comunicación en el municipio de Bucaramanga y de los resultados de desempeño obtenidos en el modelo comparativo.

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Identificar parámetros que caractericen un enlace implementado a partir de una tecnología particular de comunicaciones, constituye un insumo clave para la simulación de sistemas de comunicación que utilicen dicha tecnología. Tales simulaciones permiten realizar el análisis de escenarios y responder interrogantes como la estabilidad, confiabilidad, rendimiento o escalamiento de la arquitectura planteada. Este trabajo de maestría contribuye al proyecto de investigación que desarrolla una arquitectura para lectura remota de medidores de energía eléctrica, mediante la caracterización en campo de enlaces de datos metropolitanos sustentados en diferentes tecnologías, resultados que serán utilizados por otro trabajo que abordará el escalamiento del sistema que el proyecto propone.

En este trabajo se propone evaluar el desempeño de las alternativas de comunicación disponibles en Bucaramanga, es decir, se realizarán enlaces individuales de las tecnologías de comunicación ADSL, PLC, CABLEMODEM, GPRS, WiFi y WiMAX, para así, en conjunto con las mediciones reales, evaluar los mencionados enlaces de comunicación y de esta forma, desarrollar una metodología de selección de tecnología. Cabe resaltar que los equipos que se instalen, estarán expuestos a condiciones ambientales de trabajo en campo, por ello, los dispositivos que se requieren deben satisfacer estas. Además, algunas de las tecnologías de comunicación, que se pretenden evaluar, no están comercializadas por las empresas prestadoras de servicios de comunicación y en otros casos no se conoce claramente las coberturas de las mismas, por ello, también se hace necesario conocer la disponibilidad de las alternativas de comunicación en el municipio de Bucaramanga

La Comisión de Regulación de Energía y Gas, en el cumplimiento de su obligación de controlar la calidad de la energía eléctrica que distribuyen los operadores de red hacia los usuarios, ha dispuesto la resolución 016 de 2007, en la cual

establece los parámetros mínimos requeridos para evaluar la calidad de la energía que distribuyen dichos operadores de red (distribuidores y/o comercializadores de energía eléctrica). Operadores de red, como la Electrificadora de Santander S.A., han realizado procesos de licitación para la adquisición de unidades constructivas (equipos medidores de calidad de energía eléctrica) con el fin de dar cumplimiento a la resolución mencionada; las convocatorias de los procesos de licitación han resultado desiertas por inconsistencias en las normativas de las mediciones de la calidad de energía; debido a lo anterior se vio la necesidad de presentarle a Colciencias una propuesta de investigación entre la UIS y la ESSA para la investigación y desarrollo de un “Prototipo de sistema metropolitano de telemetría para la monitorización de parámetros eléctricos en las redes de distribución de media y baja tensión”, en el cual se desarrollará un prototipo de unidad constructiva y un prototipo de sistema de comunicación que satisfaga las necesidades de la ESSA evaluando diferentes alternativas de comunicación de datos.

En el marco de referencia del proyecto titulado “Prototipo de sistema metropolitano de telemetría para la monitorización de parámetros eléctricos en las redes de distribución de media y baja tensión” cofinanciado por COLCIENCIAS, la Electrificadora de Santander S.A. y la Universidad Industrial de Santander se plantean objetivos relacionados con el tema de comunicaciones, estos son: “Evaluar las tecnologías y protocolos de comunicación disponibles para la transmisión y recepción de datos capturados en la red de distribución y el centro de gestión de la ESSA” y “Diseñar e implementar un prototipo de comunicación utilizando la tecnología que mejor se ajuste a las necesidades técnicas y operativas del proyecto”.

Para el logro de dichos objetivos se han identificado tecnologías de comunicación como ADSL, PLC, CABLEMODEM, GPRS WIFI y WIMAX, las cuales merecen y necesitan ser analizadas en detalle, teniendo en cuenta los parámetros de la

calidad de la comunicación. Entre ellas se incluyen las medidas del throughput, latencia, RTT (*Round Trip Time*), ancho de banda, tasas de error (BER y PER) y la variación de retardo (JITTER). Dado que el piloto del sistema de telemetría incluye un número bastante limitado de multicontadores, será necesario inyectar tráfico adicional a los enlaces para valorar adecuadamente su desempeño.

Por lo tanto se plantea diseñar un procedimiento de pruebas referente a los parámetros de desempeño del enlace (Throughput, latencia, RTT (*Round Trip Time*), ancho de banda, tasas de error (BER y PER) y la variación de retardo (JITTER)); para su implementación se vincularán estudiantes de ingeniería electrónica en trabajos de grado quienes deberán realizar las campañas de medidas de acuerdo al procedimiento de pruebas antes mencionado. Las condiciones de operación para los enlaces de cada tecnología deben ser equivalentes y considerar los lugares establecidos en el proyecto COLCIENCIAS-ESSA-UIS. Después de lo anterior, se recopilarán los datos obtenidos y se evaluarán los enlaces de comunicación implementados individualmente, para después realizar la metodología de selección de tecnología de comunicación, de tal forma que se diseñen alternativas para la transmisión de datos de calidad de potencia y medida de energía dentro del área propuesta en el proyecto “Prototipo de sistema metropolitano de telemetría para la monitorización de parámetros eléctricos en las redes de distribución de media y baja tensión”.

Este trabajo permitirá comparar objetivamente el desempeño en campo de las tecnologías implementadas y de esta forma con un trabajo de maestría complementario, valorar las posibles arquitecturas y el escalamiento del sistema de comunicación que sirve de soporte al sistema de telemetría propuesto en el proyecto COLCIENCIAS-UIS-ESSA.

INTRODUCCIÓN

Realizar la evaluación de sistemas de comunicación con lleva un conjunto de actividades que se deben desarrollar secuencialmente para obtener resultados satisfactorios. Evaluar sistemas de comunicación basados en enlaces de de datos desde un nodo final a otro es una forma particular de obtener resultados, teniendo en cuenta que los sistemas de comunicación involucran parámetros de difícil caracterización, es por esto que el trabajo de investigación se particulariza para obtener mediciones de ciertos parámetros entre el enlace de datos.

Para evaluar los enlaces de datos se requiere aplicar una metodología de pruebas, aplicarla a cada uno de los enlaces de datos y obtener los resultados individuales de las mediciones de cada parámetro, los parámetros escogidos para realizarles las mediciones corresponde al ancho de banda, throughput, latencia, jitter, tasas de error de bit y duración de descarga de archivos. Inicialmente se requiere caracterizar los tamaños máximos de transferencia y el tamaño de la ventana TCP más adecuado para cada tecnología de comunicación.

Medir los parámetros de desempeño requiere conocer las herramientas de medición existentes para tal fin, las más empleadas son iperf, D-ITG, netio y el comando ping; empleando estas herramientas, se diseñan los scripts necesarios para realizar las mediciones.

Por otro lado, al obtener los resultados de las mediciones de los parámetros de rendimiento, se requiere conocer cuál de las tecnologías de comunicación presenta el mejor desempeño para aplicaciones de telemetría, para ello se aplica el método AHP, el cual se basa en la satisfacción de un objetivo a partir de etapas jerárquicas compuestas por criterios y atributos de selección. El proceso analítico jerárquico organiza en forma descendente, los cálculos obtenidos mediante la

asignación de ponderaciones dadas por un decisor, los resultados desde la mejor tecnología hasta la menor viable.

La organización del trabajo de investigación está dada de la siguiente forma: En el primer capítulo se definen los parámetros más representativos para evaluar enlaces de datos punto a punto, así mismo, conocer las principales características y los trabajos de mediciones representativos de las tecnologías de comunicación ADSL, CIA, GPRS, PLC, WIMAX y *Wireless LAN*. Además, se presentan las comparaciones técnicas y los trabajos representativos de mediciones que involucran comparaciones entre las tecnologías mencionadas. En el capítulo dos se presenta la metodología de pruebas necesaria para realizar la caracterización de los enlaces de datos; en ella se presentan los esquemas de implementación de los enlaces de datos, la descripción de los dispositivos involucrados en la implementación y la descripción de las campañas de mediciones para las diversas tecnologías de comunicación. El tercer capítulo contiene los resultados más representativos sobre las mediciones de las tecnologías de comunicación ADSL, CIA, GPRS, WIMAX; *Wireless LAN* y PLC basados en las comparaciones de las mediciones realizadas, además, se presenta la disponibilidad de cada tecnología en el municipio de Bucaramanga. Los resultados de cada tecnología se pueden observar en los anexos A, B, C, D, E y F. En el cuarto capítulo se dan a conocer los conceptos básicos para las técnicas multicriterios y se definen los principales métodos de decisión multicriterio existentes, además, se realiza una breve descripción sobre el método analítico jerárquico, el cual fue escogido para realizar la metodología de selección de tecnología de comunicaciones, también, se presenta la validación de la metodología para la selección de alternativas de comunicación en SITELRED. Por último, en el capítulo cinco se presentan las principales conclusiones arrojadas durante el desarrollo de la investigación así como las recomendaciones para trabajos futuros que involucren mediciones y evaluaciones de tecnologías de comunicación.

1. GENERALIDADES Y ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.

En este capítulo se definen los parámetros más representativos para evaluar enlaces de datos punto a punto, así mismo, se dan a conocer las principales características y los trabajos de mediciones representativos de las tecnologías de comunicación ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*), CIA (*Cable Internet Access*), GPRS (*General Packet Radio Service*), PLC (*Power Line Communication*), WIMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) y *Wireless LAN*. Por último, se presentan las comparaciones técnicas y los trabajos representativos de mediciones que involucran comparaciones entre las tecnologías mencionadas.

1.1 PARÁMETROS DE RENDIMIENTO EN LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.

1.1.1 Ancho de banda.

Definición: es la cantidad de bits que pueden viajar por un medio físico (cable coaxial, par trenzado, fibra óptica, etc.) de forma que mientras mayor sea el ancho de banda más rápido se obtendrá la información. Se mide en bits por segundo (bps). La forma de medir el ancho de banda está relacionada con la capacidad de enviar bits por un medio en relación con el tiempo que los bits demoran en llegar al otro extremo.

1.1.2 Throughput: tasa real efectiva.

Definición: Throughput, tasa efectiva o rendimiento de una red de datos está dado por el número de bits que se pueden transmitir entre dos nodos de una red en un determinado periodo de tiempo, pero a diferencia del ancho de banda, el número de bits es el efectivo, es decir, los bits que corresponden a datos. Las unidades del throughput son, al igual que el ancho de banda, bits por segundo o

bytes por segundo [1]. Además, existen trabajos de investigación en donde se desarrollan modelos para el cálculo de la tasa efectiva como los presentados en [2] y [3].

1.1.3 Latencia.

Definición: este parámetro hace referencia al tiempo que le toma a los datos (paquetes) en viajar de un extremo a otro en una red o enlace de datos. Esta medida se da en unidades de tiempo. De esta forma se define la latencia como el intervalo de tiempo transcurrido desde que los datos son enviados por un nodo hasta que son recibidos correctamente por otro [4].

1.1.4 Jitter: variación de retardo

Definición: El Jitter es un efecto de las redes de datos no orientadas a conexión y basadas en conmutación de paquetes. Como la información se organiza en paquetes, cada uno de los paquetes puede seguir una ruta distinta para llegar al destino. El Jitter se define técnicamente como “la variación en el tiempo en la llegada de los paquetes causada por la congestión de red, pérdida de sincronización o por diferentes rutas seguidas por los paquetes para la llegar al destino” [5].

1.1.5 RTT: Round Trip delay Time

Definición: es el tiempo que tarda un paquete en ir desde el emisor y regresar, pasando por el receptor de destino. Sus medidas se dan en unidades de tiempo.

1.1.6 BER: tasa de error de bits

Definición: Es la relación entre el número de bits errados al ser recibidos por el receptor y el número de bits transmitidos, en un intervalo de tiempo determinado mientras se realiza una comunicación. También existe el PER, tasa de error de paquetes, el cual consiste en el número de paquetes que contienen error por

unidad de tiempo, este parámetro puede estar directamente relacionado con el BER.

1.2 ADSL: LÍNEA DE SUBSCRIPCIÓN ASIMÉTRICA DIGITAL.

A continuación se describe la tecnología de comunicación ADSL, se describe su funcionamiento y se dan a conocer los principales trabajos desarrollados con ella.

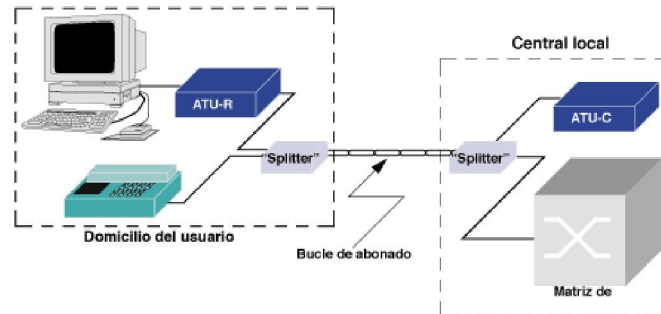
1.2.1 Descripción y características de la tecnología ADSL.

ADSL es una tecnología de transmisión de señal que permite el uso de la línea telefónica para la transmisión de datos a alta velocidad, y simultáneamente, el servicio de voz. La asimetría que caracteriza al ADSL permite una mayor tasa de transmisión de datos en el sentido descendente que en ascendente. Esta variación es la más popular entre la familia xDSL.

Una de las diferencias entre esta técnica y las usadas por los módems en banda de voz es que éstos últimos solo transmiten en la banda de frecuencias usada en telefonía (300 a 3400 Hz), mientras que los módems ADSL operan en un margen más amplio (124 KHz a 1,104 MHz). Las velocidades de transmisión máximas alcanzadas con los módems convencionales era de 56 Kbps empleando una línea RDSI (Red Digital de Servicios Integrados), con la llegada de los módems ADSL, las velocidades ascendentes superan los 512 Kbps y las descendentes los 2 Mbps.

En la figura 1 se ilustra un enlace de datos ADSL entre un usuario y la central local. En ella se observan los equipos ATU-R y ATU-C, los cuales corresponden al equipamiento necesario; además, es necesario instalar un dispositivo discriminador de señal; denominado *splitter*, en el cual se conecta el equipo telefónico y el equipo terminal. El *splitter* es un equipo que contiene dos filtros, uno pasa bajos para la señal telefónica (voz) y otro pasa altos para la señal de datos.

Figura 1. Enlace de datos ADSL



Fuente: <http://www.upv.es/sta/Manuales/MADSL/>

ADSL es una tecnología de comunicación que emplea las técnicas de modulación DMT (*Discrete Multitone*) y CAP (*Carrierless Amplitude Phase Modulation*). La primera está estandarizada por la ANSI en T1.413 [6] y es la de mayor aceptación. Emplea las frecuencias entre 26 y 134 KHz para los subcanales ascendentes y entre 138 KHz y 1,104 MHz para los subcanales descendentes. Por su parte CAP es una técnica que utiliza 3 rangos de frecuencia, 900 KHz para el canal descendente, 75 KHz para el canal ascendente y 4 KHz para el servicio telefónico.

Tabla 1. Estándares de la tecnología ADSL.

Nombre del estándar	Nombre común	Velocidad descendente	Velocidad Ascendente
ITU G.992.1	ADSL (G.DMT)	8 Mbps	1,0 Mbps
ITU G.992.2	ADSL Lite	1,5 Mbps	0,5 Mbps
ITU G.992.3/4	ADSL2	12 Mbps	1,0 Mbps
ITU G.992.3/4 Anexo J	ADLS2	12 Mbps	3,5 Mbps
ITU G.992.3/4 Anexo L	RE-ADSL2	5 Mbps	0,8 Mbps
ITU G.992.5	ADLS2+	24 Mbps	1,0 Mbps
ITU G.992.5 Anexo L	RE-ADSL2+	24 Mbps	1,0 Mbps
ITU G.992.5 Anexo M	ADSL2+	28 Mbps	3,5 Mbps

Fuente: Long et al 2005. [6]

La estandarización e interoperabilidad de la tecnología está dada por la ITU-T (Unión Internacional de Telecomunicaciones- Sector de Normalización de las Telecomunicaciones) y se resume en la tabla 1 [7].

El medio de transmisión utilizado es el par de cobre, por ello, la atenuación por unidad de longitud aumenta a medida que se incrementa la frecuencia de las señales transmitidas, a mayor longitud del enlace de datos, mayor es la atenuación total que sufre la señal transmitida; de esta forma, el ancho de banda máximo varía en función de la longitud del enlace de datos [8].

1.2.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para ADSL

“*Characterizing Residential Broadband Network*” [9] es uno de los artículos más representativos como fundamentación y ejemplo de la investigación sobre mediciones de parámetros de desempeño. El objetivo de este trabajo es el de caracterizar ciertas propiedades de las redes de banda ancha para DSL y *Cable Internet Access* tales como la capacidad del enlace, retardos y tasas de pérdidas para 1892 equipos finales escogidos aleatoriamente de 11 proveedores de servicios de Internet de Norte América y Europa. Las mediciones de rendimiento se realizan para carga y descarga de datos empleando TCP e ICMP, variando los tamaños de los paquetes. La metodología empleada se puede resumir así:

- a. Selección de equipos finales residenciales de banda ancha.
- b. Determinación del tamaño de paquete par enviar los datos. Se emplean cinco tamaños diferentes como flujo asimétrico de grandes paquetes TCP, flujo simétrico de grandes paquetes para ICMP, flujo simétrico de pequeños paquetes TCP, bajo flujo simétrico de grandes paquetes ICMP y bajo flujo simétrico de pequeños paquetes TCP.

- c. Definición de los parámetros de rendimiento: ancho de banda del enlace, latencia y jitter de los paquetes y tasa de pérdidas.
- d. Validación de las suposiciones: ajuste de parámetros para validar la velocidad ofrecida por el ISP, comparación de los factores de embotellamiento y tramas inferiores a 10 segundos.

Para la caracterización de las tasas de pérdidas se realizan mediciones durante una semana, con ello, se predice el máximo throughput en cualquier protocolo de transporte.

En “The impact and implications of the growth in residential user” [10] se analiza el aumento de usuarios de DSL y fibra óptica empleando las herramientas de desempeño MRTG (Multi Router Traffic Grapher) y RRDtool (*Round Robin Database tool*) para monitorizar el desempeño de las redes desde los routers. Las mediciones se realizaron empleando cinco tipos de tráfico diferentes: residenciales, centro de datos, seis enlaces de empresas a nivel interno e intercambio de datos entre empresas y enlaces internacionales.

Los autores prestan su atención al escenario residencial, realizando mediciones durante una semana y realizan la proyección de los resultados a un mes, además, son analizadas en detalle las horas críticas realizando mediciones particulares en estos lapsos de tiempo que generalmente no superan las dos horas.

1.3 CIA: CABLE INTERNET ACCESS

En esta sección se presenta el funcionamiento de la tecnología Cable Internet Access, sus características, estándares y trabajos representativos de mediciones de desempeño.

1.3.1 Descripción y características de la tecnología CIA

El funcionamiento de *Cable Internet Access* radica en la utilización de red existente de televisión por cable, debido a que el medio de transmisión fundamental es el cable coaxial. Para la implementación de la tecnología, se requiere de dos equipos, el CM (Cable Modem) en el extremo del usuario y el CMTS (*Cable Modem Termination System*) en el extremo del operador de cable, los cuales son los encargados de filtrar las señales de televisión y datos. Un dispositivo cable módem típico presenta los siguientes componentes: sintonizador, recibe la señal modulada y la entrega al demodulador; demodulador, convierte la señal modulada QAM (Quadrature Amplitude Modulation) en una señal simple digital; modulador, convierte señales digitales en señales de radiofrecuencia y control de acceso al medio (MAC), responsable del acceso al medio [11].

El *dowstream* se refiere a la señal recibida por el cable modem y el *upstream* se refiere a los datos ascendentes hacia la red. Las características de estos términos dependen del tipo de modulación, las tasas de transferencia y los estándares aplicados. De esta forma, las características del *dowstream* son: frecuencia entre 42 y 850 MHz para USA y 65 y 850 MHz para Europa, ancho de banda de 6 MHz para USA y 8 MHz para Europa y modulación de 64QAM empleando 6 bits/símbolo y 256 QAM con 8 bits/símbolo. Con lo anterior, se obtienen ancho las tasas de transferencia relacionando el tipo de modulación y el ancho de banda, de esta forma se obtienen 31,2 Mbps y 41,6 Mbps para 64QAM y 256QAM con 6 MHz respectivamente, de forma similar, para 8 MHz se obtienen 41,4 Mbps y 55,2 Mbps para 64QAM y 256QAM respectivamente. Por otro lado, el *upstream* es siempre en ráfagas, debido a esto, muchos módems pueden transmitir a la misma frecuencia, los rangos de frecuencias a los cuales opera el *upstream* son 5-65/5-42 MHz USA/Europa; por lo anterior, el ancho de banda podría ser de 2 MHz para un canal QPSK de 3 Mbps. Además, los tipos de modulación empleados por cable modem son QPSK (2 bits por símbolo) y 16 QAM (4 bits por símbolo) [12] [13].

Los estándares para CIA aparecieron debido a las incompatibilidades presentadas entre los dispositivos de diferentes fabricantes, de esta forma se crearon los protocolos DOCSIS, EURODOCSIS y DVB. En la actualidad el estándar oficial es el DOCSIS 3.0 el cual suministra servicios de datos, video y telefonía, proporcionando velocidades de hasta 152 Mbps, downstream independiente de la distancia y suministro de servicios *tripleplay* (televisión, datos y telefonía sobre HFC (*Hybrid Fibre Coaxial*))

Hasta principios de la década de los 90, las redes de televisión operaban netamente con cable coaxial como medio de transmisión. Después de los 90, las redes evolucionaron a redes HFC, las cuales aumentan la velocidad de transmisión. Las redes HFC emplean fibra óptica como medio fundamental de comunicación, sin embargo, en el último tramo (o última milla) se emplea cable coaxial; la razón por la cual se emplea el cable coaxial es su mayor inmunidad frente al ruido electromagnético comparado con otros medios de transmisión; además, el cable coaxial se puede clasificar en banda base (RG-58 con impedancia de 50 ohmios y velocidades de hasta 10 Mbps) y banda ancha (RG-59 con impedancia de 75 ohmios y para velocidades superiores a 10 Mbps).

1.3.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para CIA

Nguyen y Armitage [14] caracterizan un enlace de datos empleando la tecnología CIA, basados en el ancho de banda, tamaños MTU y tasas de transferencia para TCP. Se da a conocer el MTU máximo de 1600 bytes de la tecnología, además, utilizan la herramienta nttcp, antigua versión del iperf, y el ping para realizar las mediciones de desempeño. Estas mediciones se realizan teniendo en cuenta las configuraciones por defecto, la variación del MTU para los tamaños 1500, 1250, 576 y 512 bytes, la variación de la ventana TCP entre 2 y 62 Kbytes, captura de datos antes, durante y después de ejecutar la herramienta nttcp, el cálculo del

throughput teniendo en cuenta las cabeceras de TPC/IP, Ethernet, DOCSIS y MPEG.

Por lo anterior, los autores concluyen que para analizar el desempeño de un enlace de datos empleando la tecnología CIA, se deben realizar campañas de mediciones que involucren la variación en los tamaños de ventana y en los valores del MTU, con el fin de calcular los retardos, el ancho de banda y el throughput.

López, Abdalla y Ramos [15] muestran la necesidad de realizar trabajos de mediciones para la tecnología CIA. Para ello, en el caso particular de las videoconferencias, dan a conocer que se requiere de un flujo en tiempo real continuo y bidireccional con tasas de transferencia de datos simétrica. Desafortunadamente, esta tecnología transfiere datos en ráfagas, los cuales depende del tráfico en la red. Los niveles en los cuales se realizaron las pruebas fueron: red local (para mediciones de latencia, throughput y jitter), transceptor (potencia, constelación QAM y tasas MER y BER) y radiofrecuencias (aspectos relacionados con la propagación como multitrayecto y ruido impulsivo).

Las videoconferencias se realizaron empleando tasas de 128, 256, 384, 512 y 786 Kbps en horarios comercial, nocturno y fines de semana. El jitter fue medido en el horario comercial para tasas de 128, 256 y 384Kbps, la latencia fue medida empleando el comando ping, observándose que para ciertos lapsos de tiempo del transcurso de la videoconferencia, esta medida era superior y se veía reflejada en la calidad de la imagen.

1.4 GPRS: SERVICIO GENERAL DE PAQUETES VIA RADIO

Es presentado a continuación el funcionamiento de la tecnología celular GPRS, se describen los principales conceptos y características de la tecnología, al igual que

se presentan algunos de los trabajos más importantes de mediciones de desempeño.

1.4.1 Descripción y características de GPRS

La tecnología GPRS es una evolución de la red GSM (Sistema Global para las comunicaciones Móviles), la gran diferencia entre las dos es que GSM realiza conmutación de circuitos mientras que GPRS lo hace conmutando paquetes, mejorando la eficiencia en la utilización del espectro de radio frecuencia. Para el funcionamiento de la conmutación de paquetes y en si mismo, de la tecnología GPRS, se requiere de ciertos dispositivos que soporten el tráfico de paquetes de datos entra red GRPS e Internet, estos son:

- ✓ Estación Base Transceptora (BTS): encargada del protocolo de enlace de radio con la estación celular, además, está compuesta por codificadores, multiplicadores, moduladores y amplificadores de RF.
- ✓ Controlador de Estación Base (BSC): su función es la de concentrar todas las BTS para realizar el conmutado y control, además, cumple funciones de control de salto de frecuencia, reasignación de frecuencias entre BTS, asignar el tiempo y la frecuencia de sincronización entre otras.
- ✓ Unidad de Control de Paquetes (PCU): encargada de la conversión de paquetes a datos, segmentación de la unidad de protocolo de datos, detección de errores de transmisión y retransmisión automática selectiva.
- ✓ Nodo de Soporte de Servicio (SGSN): encargado de la gestión de la movilidad, la cual es la asignación de la ruta dentro de la red de radio, cumple con el encaminamiento y transferencia de paquetes de radio, la gestión de movilidad, la autenticación de usuarios y la tarificación.
- ✓ Nodo de Soporte al GPRS Gateway (GGSN): encargado de traducir los paquetes recibidos del SGSN hacia otras redes. Traduce los paquetes al formato de la red externa, traduce las direcciones IP en la dirección del móvil destino y realiza autenticación.

La ruta que siguen los datos a través de la red GPRS es: la información generada por los celulares es recibida por las BTS, luego es concentrada en la BDC, direccionada hacia el SGSN, el cual encapsula los paquetes transmitidos por el MS y los encamina al GGSN para redirigirlos al destino. EL destino puede ser otra GGSN (perteneciente a la red interna celular) o hacia Internet.

Una BTS puede contener alrededor de quince transceptores, cada uno de ellos se le asigna un radio canal de manera tal que una celda tendrá mayor capacidad de tráfico de acuerdo al número de transceptores instalados. Cada canal tiene asignado un ancho de banda de 200 KHz, la máxima tasa de bits por radio canal que se puede alcanzar es de 271 Kbps empleando GMSK, la máxima tasa de voz es de 13 Kbps y la máxima tasa de datos es de 22,8 Kbps. Los canales asignados para las diferentes bandas de frecuencia son: 124 radiocanales en GSM900, 374 para GSM1800 y 299 para PCS1900. La organización del espectro en los países europeos se rige por el estándar GSM900 y GSM1800 y en USA se rige por el estándar PCS1900.

En Colombia se han implementado los tres estándares. El espectro está dividido para tres operadores, ya que este es el número de operadores existentes en el territorio colombiano. Debido a que se debe transmitir información bidireccional, GPRS utiliza la duplexación de frecuencia (FDD), el cual asigna un rango de frecuencias para transmitir de forma ascendente y otro para transmitir de forma descendente. Por otro lado, la longitud máxima de paquete que emplea la tecnología es de 1520 bytes, cuenta con cuatro esquemas de codificación y dependiendo de ellos se obtienen tasas de transmisión de datos que varían entre 9,05 Kbps para CS1 hasta 21,4 Kbps para CS4 por cada ranura de tiempo (time slot); sin embargo, cada conexión a la red GPRS puede utilizar hasta 8 ranuras, por lo cual la máxima velocidad de transferencia se estima en 171,3 Kbps [17].

1.4.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para GPRS

Stuckmann, Ehlers y Wouters presentan en su artículo titulado “*GPRS traffic performance measurements*” [18] un estudio de mediciones basado en la recolección de datos de los parámetros RTT (*Round Trip Time*) y tasa efectiva (throughput). Las mediciones las realizaron para aplicaciones TCP, realizaron además, transferencia de archivos (FTP), aplicaciones WWW (*World Wide Web*) y email. Para realizar las mediciones emplearon el comando ping y contrastadas empleando la herramienta WinPCap, la cual se utiliza para la captura, filtrado y transmisión de paquetes para analizar el tráfico de redes.

La pruebas realizadas tuvieron las siguientes consideraciones: descarga de archivos remotamente con tamaño de 2,7 Mbytes, conexión de laptop a un modem GPRS, conexión de un servidor a Internet, medición de throughput cada 5 segundos, duración de la captura de mediciones de hasta 2 horas. La primera serie de mediciones se realizó entre una laptop y el GGSN, obteniendo mediciones del RTT variando el tamaño del paquete hasta 1000 bytes. Para la segunda serie de mediciones se realizaron descargas de archivos de hasta 2,7 Mbytes empleando FTP.

Magnor y Reizer [19] realizaron pruebas de desempeño empleando el comando ping y las herramientas de medición de desempeño iperf y jperf; las mediciones realizadas corresponden al ancho de banda y los retardos, para ello, realizaron transferencia de archivos utilizando FTP, carga y descarga de páginas (HTTP) y descarga de WAP (*Wireless Application Protocol*).

Para la mediciones realizadas se tuvieron en cuenta: la modificación del tamaño del paquete (12, 200, 468 y 1472 bytes), tamaño del archivo de descarga (*.zip y *.txt) mediante FTP de 199 KB, tamaño del archivo de carga (*.zip y *.txt) mediante

FTP de 49 KB, descarga HTTP de 15 archivos con un tamaño total de 172,5 KB y tamaño del archivo WAP de 4,7 KB.

Por último, los autores realizaron un análisis de throughput variando el tamaño de la ventana TCP para 8, 12, 25, 50 y 130 KB (por defecto el tamaño de la ventana para iperf es de 8 KB).

1.5 PLC: COMUNICACIÓN POR LÍNEA DE PODER

Se describe el funcionamiento y las principales características de la tecnología PLC, además, se dan a conocer los principales trabajos sobre mediciones de desempeño para esta tecnología de comunicación.

1.5.1 Descripción y características de PLC

Esta tecnología emplea la red eléctrica existente para transmitir datos, lo cual se traduce en una ventaja económica debido a la reducción de costos de instalación ya que cuenta con la infraestructura de la red de distribución eléctrica, llegando a lugares en los cuales las redes de acceso inalámbrico no pueden llegar. PLC es semejante a ADSL al emplear diferentes frecuencias de operación para el servicio eléctrico y de datos. Inicialmente se empleó para transmitir datos entre subestaciones, pero en la actualidad brinda conexiones para servicios como acceso a Internet y lectura remota en sistemas de telemetría.

Para su funcionamiento, se requiere de ciertos dispositivos especiales entre los cuales se encuentran los modem PLC, estos brindan la interfaz para la comunicación de datos; además, están diseñados de acuerdo con los parámetros de la red eléctrica de distribución. Cabe resaltar que la red eléctrica no fue diseñada para la transmisión de datos sino de energía eléctrica, causa por la cual no es un medio de transmisión favorable y por ello existen inconvenientes tales

como pérdidas por atenuación inherentes al cable eléctrico e interferencias por los diversos tipos de ruido (ruido de fondo y ruido impulsivo).

Las frecuencias que utiliza la tecnología van desde 1,6 hasta 30 MHz, empleando técnicas de modulación tales como GMSK con velocidades de transmisión entre 1 y 4 Mbps, esta técnica fue empleada en la primera generación de equipos PLC; para la segunda y tercera generación se utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) con velocidades de hasta 200 Mbps.

PLC presenta dos modalidades. PLC de acceso que ofrece servicio a través de las líneas de media y baja tensión, desde las subestaciones eléctricas, en donde es inyectada la señal a la red de distribución hasta el usuario; las frecuencias de esta modalidad van desde 1,6 hasta 10 MHz. La segunda modalidad de PLC es la domiciliaria, usada en el control de dispositivos domiciliarios y prestar conectividad al usuario final. Utiliza el tendido eléctrico de un domicilio para conducir la señal eléctrica de 60 Hz y la señal de datos, la cual va desde los 20 hasta los 30 MHz.

Para el desarrollo de la tecnología se actúa bajo un marco regulatorio, el cual determina rangos de operación, niveles de transmisión, bandas de operación y normas de compatibilidad electromagnética [20]. Existen grupos regulatorios europeos y americanos, entre estos organismos se encuentran: IEEE P1675, IEEE P1775, IEEE P1901, Homeplug, OPERA (*Open PLC Research Alliance for New Generation PLC Integrated System*), ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), UPA (*Universal Powerline Association*) y FCC (*Federal Communications Commission*).

1.5.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para PLC

“*Power line communications using low and medium voltage networks*” [21] presenta la caracterización de un enlace de datos para las capas físicas y de

aplicación de la tecnología PLC. Las mediciones son realizadas en cinco subestaciones eléctricas de medio y bajo voltaje con la siguiente configuración de dispositivos: equipo de cómputo a modem de baja tensión, equipos de baja tensión a puente de media tensión, línea de media tensión, puente de media tensión a modem de baja tensión y modem de baja tensión a equipo de cómputo.

Para la caracterización de la capa física se empleó un analizador de espectro en cada subestación, obteniendo las atenuaciones con respecto al barrido de frecuencias realizado. Para la caracterización de la capa de aplicación, se emplearon equipos con modulación OFDM realizando mediciones de throughput en baja y media tensión, se empleó la herramienta iperf estimando tasas de datos para un tamaño del buffer de 512 Kbytes. Las mediciones se realizaron para TCP y UDP pero no definen las características de las mediciones, por último, se empleó el comando ping para calcular los retardos y pérdidas de paquetes del enlaces.

Lin y Latchman [22] realizan mediciones empleando una herramienta desarrollada por ellos llamada Gatorbytes para medir el desempeño de un enlace de esta tecnología. Las mediciones son contrastadas con la herramienta wsttcp. Las mediciones están orientadas a reportar las tasas de transferencia al realizar descargas de archivo. El análisis de las mediciones indica que para obtener resultados óptimos, el enlace debe comportarse con latencias y jitter bajo y throughput alto. Los parámetros que configuran son el tamaño del mensaje, el MTU y la distancia entre subestaciones; definen el tamaño del mensaje en 8192 bytes, realizando las mediciones de 100 segundos y repitiendo 10 veces el proceso. Realizan otra serie de mediciones variando el MTU entre 200 y 1500 bytes, observando que para 1472 bytes se obtienen los mejores resultados. Las variaciones de distancia están entre 4 y 40 metros, realizando comparaciones de las mediciones tomadas para dos ubicaciones diferentes.

1.6 WiMAX: INTEROPERABILIDAD MUNDIAL PARA ACCESO POR MICROONDAS

WiMAX es una tecnología de comunicaciones inalámbrica, a continuación se describe su forma de operar, las características y los principales trabajos relacionados con mediciones de desempeño.

1.6.1 Descripción y características de WiMAX

Conocida por su funcionamiento inalámbrico en la última milla en sistemas de comunicación de datos. Permite la recepción de datos por microondas y retransmisión por ondas de radio; ofrece velocidades de transferencia teóricas de hasta 70 Mbps a distancias que alcanzan los 50 Km sin exigencia de línea de vista, soporta voz y video; dependiendo del ancho de banda del canal utilizado, una estación base puede soportar miles de usuarios en una red WLAN.

Las principales características de la tecnología se observan en la tabla 2, donde se presentan los estándares que la rigen, así como sus frecuencias de operación, velocidades de transferencia, modulaciones, distancias de operación y ancho de banda [23].

El sistema incluye una torre, la cual ofrece una cobertura determinada por el tipo de señal transmitida. Existen dos escenarios a considerarse; el primero, cuando no se cuenta con línea de vista directa entre la antena y el receptor; para este escenario el funcionamiento se realiza a bajas frecuencias, entre 2 y 11 GHz, evitando interferencias de los objetos que intervienen en la línea de vista entre los dispositivos [24], El segundo escenario corresponde al que cuenta con línea de vista entre los dispositivos (antena y receptor), su funcionamiento se encuentra en las altas frecuencias, aproximadamente 66 GHz, ofreciendo un gran ancho de banda.

En la actualidad, la tecnología es ofrecida a los usuarios empleando el primer escenario, a bajas frecuencias, con velocidades de transferencia de hasta 70 Mbps para distancias de hasta 50 Km bajo condiciones atmosféricas favorables. En Colombia, la asignación de bandas se encuentra reglamentada por el ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones mediante la resolución 1449 del 23 de junio de 2006. En dicha resolución se encuentran dispuestas las bandas de de frecuencias del espectro electromagnético D (3421MHz a 3435MHz), D' (3521MHz a 3535MHz), E (3435MHz q 3449MHz) y E' (3535MHz a 3549MHz) para el otorgamiento de permisos a empresas prestadoras del servicio de datos WiMAX.

Tabla 2 Comparación de estándares para WiMAX.

	802.16	802.16a	802.16e
Frecuencias de operación	10-66 GHz	Menor a 11 GHz	Menor a 6 GHz
Funcionamiento	Solo con línea de vista	Sin línea de vista	Sin línea de vista
Velocidades de transferencia	32-134 Mbps con canales de 28 MHz	Hasta 75 Mbps con canales de 20 MHz	Hasta 15 Mbps con canales de 5 MHz
Modulación	QPSK, 16QAM y 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM con 256 subportadoras, QPSK, 16QAM, 64QAM
Movilidad	Sistema fijo	Sistema fijo	Movilidad pedestre
Ancho de banda	20, 25 y 28 MHz	Entre 1,25 y 20 MHz	Entre 1,25 y 20 MHz
Radio de celda típico	2 a 5 Km aproximadamente	5 a 10 km, máximo 50 Km	2 a 5 Km aproximadamente

Fuente: Vaughan. IEEE computer society. [23]

1.6.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para WiMAX

Durantini, Petracca y Ananasso [25] muestran los resultados obtenidos para mediciones de desempeño en un escenario fijo y móvil de un sistema que opera en los 2,5 GHz (banda licenciada y con frecuencia de portadora de 1675 MHz). Las mediciones para el ambiente fijo se realizaron desde un punto central (BS) a dos puntos ubicados a 640 metros, uno en el techo y otro en el interior de una edificación. Para las mediciones móviles, se ubican los puntos a 5000 y 8000 metros con altitudes de 90 y 160 metros respectivamente.

Los parámetros medidos fueron ancho de banda, retardos y pérdidas de paquetes para direccionamiento ascendente y descendente, empleando la herramienta iperf. Para las mediciones, emplean un flujo de paquetes de tamaño variable, enviándolos periódicamente; emplean datagramas de 1470 Kbytes, sin embargo, para TCP no especifican los tamaños de paquete ni ventana.

Por otro lado, Grondalen *et al* [26], realizaron mediciones para UDP y TCP empleando un sistema WiMAX con frecuencia de operación en la banda 3,5 GHz. Las mediciones se realizaron en 15 ubicaciones, la más lejana se encontraba a 11,4 Km, algunas de ellas presentan línea de vista con la estación base; las mediciones realizadas en la capa física fueron RSSI y SNR y se analizó el desempeño realizando mediciones de throughput empleando FTP.

El análisis se centra en las tasas de bits versus la distancia, para los canales ascendentes y descendentes, de forma consecutiva, ya que la tasa de bits depende las condiciones del canal en las dos direcciones.

1.7 WIRELESS LAN

Tecnología inalámbrica basada principalmente en la banda de frecuencias de 2,4 GHz, conocida popularmente como WiFi. A continuación se describe su funcionamiento y las principales características.

1.7.1 Descripción y características de Wireless LAN

La tecnología de comunicaciones conocida popularmente como WiFi obtuvo su nombre después de que algunas compañías como Nokia y Symbol Technologies crearan la asociación WECA para la interoperabilidad y compatibilidad de equipos inalámbricos bajo el marco del estándar IEEE802.11.

El estándar se encuentra dividido de acuerdo a las velocidades de operación y frecuencias de trabajo, lo que indica la división dentro del IEEE802.11 como se observa en la tabla 3.

Las comunicaciones inalámbricas emplean las ondas electromagnéticas para transmitir señales de datos a grandes distancias, Wireless LAN emplea generalmente la banda de frecuencias ISM (industrial, Scientific and Medical) ubicada en los 2,4 GHz del espectro. Las principales ventajas de esta tecnología con respecto a las cableadas son: flexibilidad, robustez frente a eventos inesperados, baja planificación sobre la distribución física del equipamiento; sin embargo, presenta ciertas desventajas como: baja calidad del servicio, mayor costo de instalación y restricción en la utilización del espectro radioeléctrico.

Tabla 3. Comparación de la división del estándar IEEE802.11

	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n
Banda de frecuencia	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz	2,4 y 5 GHz
Velocidades	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps	144 Mbps

Modulación	OFDM	BPSK QPSK	OFDM	OFDM
Canal	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 o 40 MHz

Fuente: El autor.

Uno de los procesos más relevantes realizados por los radios enrutadores es la modulación, el cual es un conjunto de técnicas para transportar información a través de una onda portadora; en el caso de Wireless LAN, se usa la modulación de amplitud en cuadratura (QAM). Es un tipo de modulación digital en la que el mensaje está contenido en la amplitud y fase de la señal transmitida o modulada. Básicamente esta técnica se sustenta en la transmisión de dos mensajes independientes por el mismo camino. Esto se consigue modulando una misma portadora desfasada 90° entre uno y otro mensaje, lo que genera la formación de dos canales ortogonales en un mismo ancho de banda, con lo cual se mejora la eficiencia del ancho de banda. QAM es de gran importancia debido a la gran cantidad de aplicaciones asociadas a ella, es empleada por módems para velocidades superiores a 2400 bps, es la modulación empleada en gran cantidad de sistemas de transmisión de televisión, microondas y satélite.[27] [28].

1.7.2 Experiencias de mediciones de los parámetros de desempeño para Wireless LAN

El rendimiento de un enlace de datos puede estar limitado por varios factores, entre ellos se pueden mencionar la distancia entre dispositivos de acceso, niveles de potencia de transmisión, efectos de la guía de onda, interferencia de radiofrecuencia, propagación de la señal y tipo y localización de las antenas [29]. El desarrollo de las pruebas fue conducido a lo largo de 15 km, empleando dos estación, una fija y la otra distanciándose progresivamente de la otra. El experimento fue llevado a cabo en un área alejada de la ciudad, sin interferencias de ningún tipo y con una línea de vista aproximada de 10 km. Las mediciones que

se realizaron fueron, potencia de la señal, pérdida por espacio abierto, Jitter y RTT variando la distancia entre los dos AP's.

El-Sayed, Zeadally y Boulmall [29] varían la distancia entre la estación fija y la móvil entre 1 y 9 km, usan ping, un navegador y FTP de pequeños archivos (hasta 10 MBytes) para cada distancia. Sin embargo, para distancias superiores a 7 km, la transferencia de archivos no se logra. Además, al aumentar el nivel de potencia, no afecta el throughput, RTT, Jitter o pérdidas por espacio abierto sobre distancia. Las mediciones de trayectoria de pérdidas son comparadas con los cálculos realizados empleando el modelo Hata/Okumura. El Jitter y los RTT aumentan significativamente con la distancia.

1.8 COMPARACIONES DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS ENTRE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN.

1.8.1 Comparación de las características técnicas.

En la tabla 4, se observan algunas de las características de ellas. Se además, se puede observar si el tipo de tecnología es implementada completamente por el usuario o requiere de contratación con algún proveedor, el cual se menciona. Así mismo se relaciona la velocidad que ofrecen los proveedores y se pueden comparar con las velocidades teóricas. Cabe mencionar que los valores contratados con los proveedores corresponden a los mínimos ofrecidos por ellos.

1.8.2 Experiencias sobre comparaciones de las tecnologías de comunicación.

La tabla 5 presenta un resumen de la mostrada por Dhawan en su trabajo comparativo de las tecnologías bluetooth, WiFi y WiMAX [30]. En ese trabajo se realiza una descripción de cada tecnología y sus principales características. La

comparación se realiza teniendo en cuenta que las tres tecnologías ofrecen servicios de acceso de diferente nivel, es decir, bluetooth se utiliza para redes de acceso personal, WiFi para redes de acceso local y WiMAX para redes de área metropolitana; sin embargo, la comparación es válida, ya que se están revisando los aspectos técnicos de las tres tecnologías.

Tabla 4. Comparativo de las características de las tecnologías de comunicación.

		TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN					
		ADSL	CIA	GPRS	PLC	WiMAX	Wireless LAN
Características	Medio de transmisión	Par	Coaxial (HFC)	Espacio libre	Cobre/Aluminio	Espacio libre	Espacio libre
	Frecuencia de operación	124 a 1104 KHz	42 a 850 MHz	900, 1800 y 1900 MHz	1.6 a 30 MHz	6 a 66 GHz	2,4 y 5 GHz
	Distancia de operación	hasta 6 Km	Decenas de Km	< 4 Km	aprox. 2 km	50 Km	< decenas Kms
	Modulación (es)	DMT/QAM/CA P	64 y 256 QAM	MGSK	OFDM	OFDM	QAM
	Empresa de suministro	TeleB/ga	UNE	Comcel	Propietario	UNE	Propietario
	Velocidad contratada	600 Kbps	1050 Kbps	256 Kbps	200 Mbps	1050 Kbps	54 Mbps
	Tasa de transferencia teórica	hasta 8 Mbps	Aprox. 55 Mbps	Aprox. 7 Mbps	200Mbps	Hasta 134 Mbps	108 Mbps

Fuente: El autor.

Tabla 5. Valores típicos para WiFi y WiMAX

Tecnología	WiFi	WiMAX
Aplicación	LAN inalámbrica, Internet	Conectividad Internet Banda-ancha
Rango típico	100 metros (interior) 300 metros (exterior)	50 Km.
Rango de frecuencia	2,4GHz	2-11GHz
Tasa de datos	54Mbps	75Mbps
Modulación	DSSS	QAM
Protocolo de acceso	CSMA/CA	Request/Grant

Fuente: Dhawan. IEEE Computer Society. [30]

Los valores de los parámetros mencionados en la tabla 5 muestran algunas de las características técnicas más relevantes al comparar las tecnologías Wireless LAN y WiMAX. Además, se puede mencionar los estándares que rigen a cada tecnología. Para WiFi se tiene IEEE 802.11g con tasas de hasta 11Mbps, IEEE 802.11a y IEEE 802.11b para velocidades de hasta 54Mbps; WiMAX sigue el estándar IEEE 802.16 con velocidades de hasta 100Mbps. Para la tecnología WiMAX, se emplean bandas de frecuencia licenciadas en el espectro de 3,5GHz y bandas ISM (en el espectro de 2,4GHz y 5,8GHz) y tecnología MIMO (Múltiple entrada Múltiple salida).

Otros estudios como el presentado por Webb en [31], comparan las tasas de transmisión de datos de algunas de las tecnologías que se están utilizando en el mundo. En el artículo, se muestra la evolución que ha tenido la tecnología xDSL en función de las tasas de transferencia y a la simetría. Ejemplo de ello son HDSL, ADSL y VDSL; se destaca que para HDSL se propaga en unos cuantos kilómetros con tasas de transmisión de datos simétricas alrededor de los 2Mbps; después aparece ADSL con, técnica asimétrica, descargas de 2Mbps y cargas a 128Kbps,

apropiado para conexiones residenciales y finalmente se encuentra VDSL, con distancias inferiores a 500 metros con tasas de transferencia cercanas a los 50Mbps. Por otro lado, las redes inalámbricas ofrecen tasas de transferencia entre 32Kbps y 128 Kbps para sistemas de banda angosta y de 25 Mbps para usuarios de banda ancha, estas tecnologías se recomiendan para ciudades que se están desarrollando. Con las redes que emplean tecnología CIA, se presentan anchos de banda alrededor de 750Kbps. Sin embargo, existen inconvenientes con las tasas de transferencia ya que el medio es compartido entre los usuarios finales y por ello las tasas disminuyen en la medida que se incrementa el número de usuarios concurrentes. Para redes celulares (GSM y UMTS), se ofrecen tasas de transferencia de 96-150Kbps y 2Mbps respectivamente. Sin embargo, esta tecnología aunque ofrece mayor cobertura y movilidad, presenta problemas de calidad. Por ejemplo para el servicio de voz presenta algunos retardos, los cuales no generan confianza para implementaciones de telemetría. Ver tabla 6.

Tabla 6. Comparación de velocidades entre tecnologías cableadas e inalámbricas

Tecnologías	xDSL			WLL	Cable módem	Celular	
	HDSL	ADSL	VDSL			GSM	UMTS
Velocidades (Kbps)	2000	2000/128	32000	128/25000	750	150	2000
Medio de transmisión	cobre	Cobre	Cobre	aire	coaxial	Aire	aire

Fuente: Webb. IEEE. Electronics & Communication Engineering Journal. [31]

Una comparación técnica es descrita en el trabajo de Steven Vaugham [32], en el cual se presenta una tabla comparativa de tasa de transferencia de datos máxima

teórica y distancia de operación máxima teórica entre WiMAX, 3G celular y WiFi, como se resume en la tabla 7.

Tabla 7. Comparación de tecnologías inalámbricas móviles

Tecnología inalámbrica	Tasa máxima de datos (teórica)	Rango máximo de transmisión (teórico)
WiMAX Móvil	70 Mbps	56 kilómetros
3G Celular	3Mbps	4,8 kilómetros
WiFi (802.11g)	54Mbps	100 metros

Fuente: Vaughan. IEEE Computer Society. [31]

Por último, en [33] se observan comparaciones entre WiMAX y 3G (EDGE) en donde se indica que mientras WiMAX descarga datos a 100Mbps EDGE lo hace entre 1 y 2Mbps. De forma similar indican que para la carga de datos WiMAX lo hace en el orden de los 50Mbps y EDGE entre 300 y 400Kbps. Estos resultados se presentan después de realizar una descripción de las dos tecnologías, en cuanto a sus características y funcionamiento.

2. METODOS PARA EL DISEÑO Y LA IMPLEMENTACIÓN DE ENLACES PILOTO DE DATOS PARA LAS TECNOLOGIAS ADSL, CIA, GPRS, PLC, WiMAX Y WIRELESS LAN.

Para realizar la caracterización de los enlaces de datos, se requiere una metodología de pruebas, esquemas de implementación para las mismas, identificación y descripción de los dispositivos involucrados en la implementación y descripción de las campañas de mediciones para las diversas tecnologías de comunicación.

2.1 METODOLOGIA DE PRUEBAS

En un escenario urbano, es usual encontrar una amplia oferta de tecnologías de comunicación para acceso a Internet (xDSL, CIA, GPRS, Wireless LAN, WiMAX y PLC), situación que en el caso de usos particulares como la telemetría, plantea el interrogante sobre cuál de ellas ofrece las mejores prestaciones. Este tipo de situaciones hacen necesaria una comparación entre las tecnologías de comunicación que involucre medición de parámetros tales como throughput, ancho de banda, retardos, jitter y tasa de pérdida de paquetes. La medición de dichos parámetros debe obedecer unas etapas similares o equivalentes con el fin de que los resultados finales sean comparables, situación que no se observa en los trabajos revisados en el capítulo anterior, en los cuales a lo sumo se comparan dos tecnologías y no se observa uniformidad entre los diferentes trabajos. En la figura 2 se observa el diagrama de la metodología, y a continuación se describe cada etapa con sus funciones.

2.1.1 Definición del escenario de pruebas.

Es la etapa inicial de la metodología, contiene la información sobre la configuración de los dispositivos involucrados en el enlace de datos; además, en

esta etapa se encuentra el esquema del enlace de datos, su ubicación y los requerimientos necesarios para su implementación. En la figura 3 se aprecia el esquema general de un enlace de datos punto a punto, en el cual se observa la ubicación del cliente (datos remotos), del servidor (base de datos) y los diferentes dispositivos requeridos para el enlace; el modem es conectado a Internet mediante una de las tecnologías cableadas o inalámbricas (xDSL, CIA, PLC, GPRS, Wireless LAN y/o WiMAX); los datos se reciben en el servidor que se encuentra conectado a Internet a través de una intranet o directamente a la red pública.

2.1.2 Selección de las herramientas de medición de desempeño

Es indispensable conocer las diferentes alternativas existentes para realizar las campañas de medidas. Dentro de ellas, se deben considerar aspectos tales como: los parámetros que mide (throughput, ancho de banda, RTT, jitter, latencia entre otros), los protocolos que emplean para las mediciones, la variación de los tamaños de paquetes y de ventana, la respuesta en tiempo de la toma de medición, los sistemas operativos en los cuales funciona y el tipo de licenciamiento del software (distribución libre o comercial).

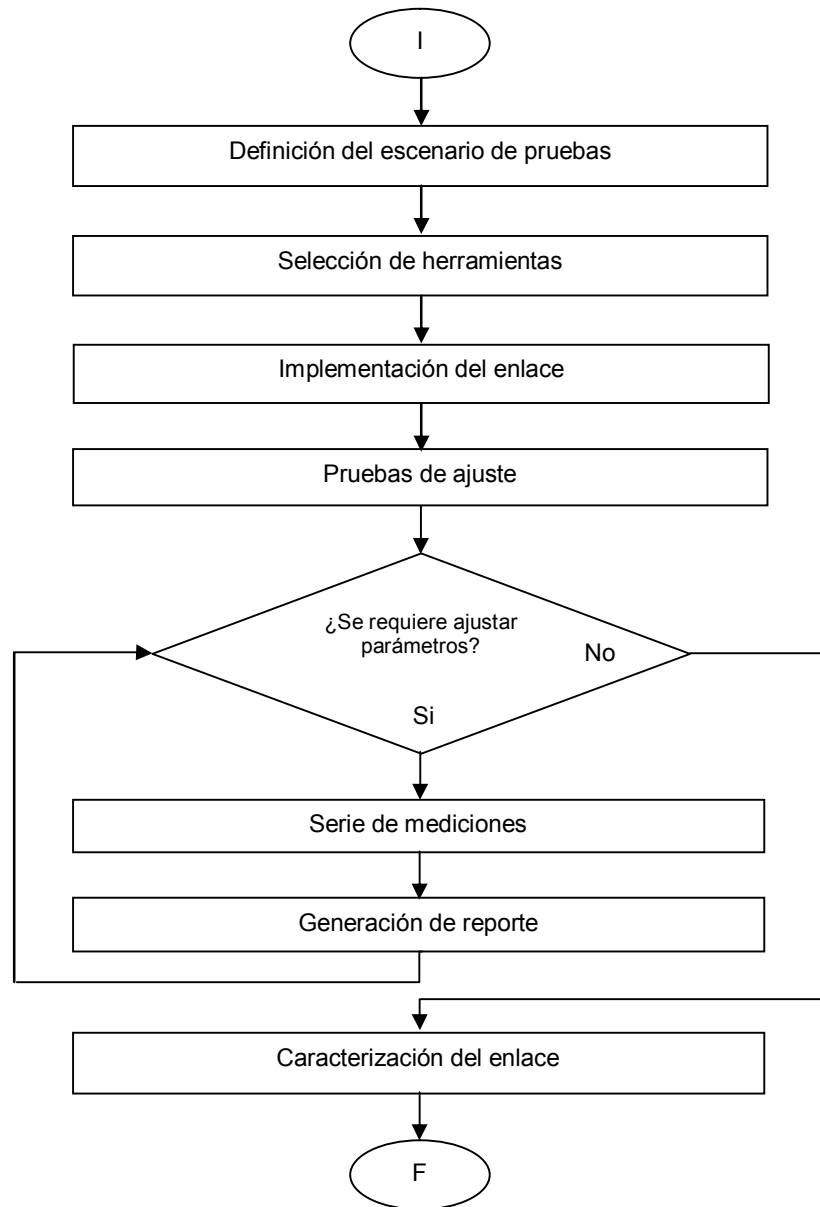
Escoger una herramienta correctamente depende de las mediciones que se deseen realizar; en el mercado existen diferentes alternativas para realizar mediciones, por ejemplo, iperf es una herramienta de distribución libre, funciona bajo Windows y Linux, toma mediciones de ancho de banda, jitter y BER (Bit Error Rate) sobre TCP y UDP. En la tabla 8 se muestran algunas de las herramientas más utilizadas en la toma de mediciones de los parámetros mencionados previamente.

La gran mayoría de las herramientas mencionadas en la tabla 8 se encuentran vigentes, como es el caso de iperf, jperf⁵, netperf⁶, netio⁷ y D-ITG. Sin embargo, tcptrace⁸ es una herramienta que desde el 2003 no presenta una actualización.

⁵ <http://code.google.com/p/xjperf/>

⁶ <http://www.netperf.org/netperf/>

Figura 2. Metodología propuesta para caracterizar enlaces de datos.



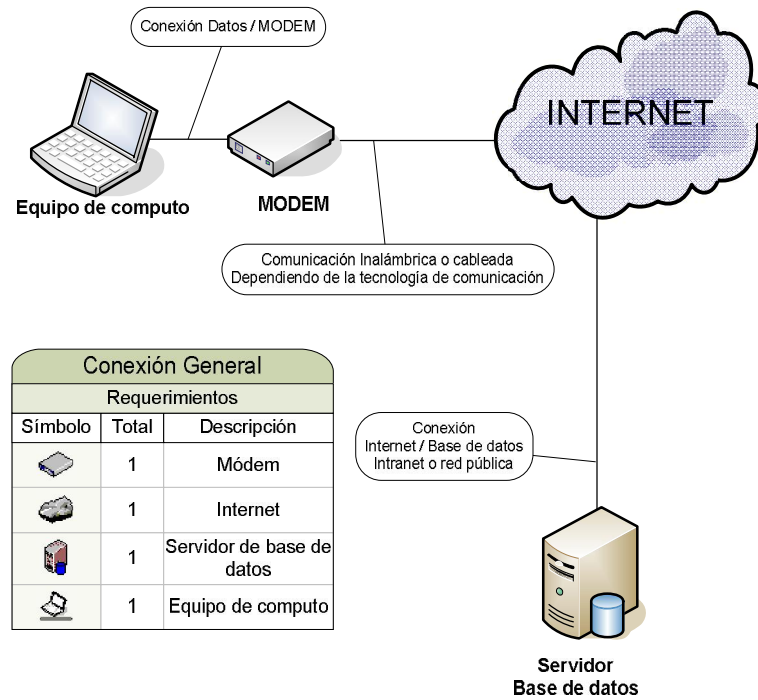
Fuente: El autor.

⁷ <http://www.ars.de/ars/ars.nsf/docs/netio>

⁸ <http://jarok.cs.ohiou.edu/software/tcptrace/news.html>

Las páginas fueron visitadas por última vez el 30 de septiembre de 2009.

Figura 3. Esquema general del enlace de datos.



Fuente: El autor.

Tabla 8. Comparativo de las herramientas de medición.

	BW	Thr	RTT	Jitter	BER	S.O.		Protocolo			Modificar	
						Win	Lin	ICMP	TCP	UDP	MTU	Buffer
IPER	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
JPERF	✓			✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓
NETPERF		✓	✓			✓	✓		✓	✓	✓	✓
NETIO		✓				✓	✓		✓		✓	
PING			✓		✓	✓	✓	✓				✓
TCPTTRACE		✓	✓		✓		✓		✓	✓	✓	✓
D-ITG		✓	✓	✓	✓	✓	✓		✓	✓	✓	✓

Fuente: El autor.

2.1.3 Implementación del enlace de datos.

Una vez establecido la arquitectura del enlace de datos, las configuraciones de los equipos, la ubicación de cada dispositivo, las herramientas de medición a utilizar, se procede a realizar la implementación del mismo; ésta hace referencia a ubicar los equipos necesarios y realizar pruebas de conectividad a Internet. Dentro de esta etapa están contemplados todos los requerimientos logísticos y personal necesario para la puesta en marcha del enlace de datos.

2.1.4 Pruebas de ajuste de parámetros de medida.

Se denominan pruebas de ajuste a las mediciones que se realizan para ajustar ciertos parámetros de las herramientas de desempeño y optimizar las medidas realizadas con ellas. Los parámetros a configurar se han escogido considerando trabajos previos en relación con el tiempo de medición, Cho, Esaki y Kato [10] y Stuckmann, Ehlers y Wouters [18]; con la MTU (unidad máxima de trasmisión), Lin y Latchman [22], Dischinger et al. [9], Nguyen y Armitage [14] y Magnor y Reizer en [19]; y el tamaño de la ventana TCP, Magnor y Reizer [19]; en los cuales se realizan mediciones de ancho de banda, throughput y retardos.

Por lo anterior, se recomienda inicialmente realizar mediciones de anchos de banda, throughput y retardos con las configuraciones por defecto de las herramientas de desempeño involucradas en las mediciones. En seguida, realizar mediciones variando el tiempo de medición, la MTU y de ventana TCP. A continuación se describe cada una de estas pruebas de ajuste:

Determinación de la duración del registro: se entiende como el tiempo mínimo necesario para obtener una medida; para determinar esta duración se realizan mediciones de ancho de banda y retardos con la configuración por defecto de las herramientas empezando desde 10 segundos y aumentando la toma de la medición en pasos de 5 s hasta alcanzar los 90 s. El motivo de iniciar a los 10 s

obedece a que algunas herramientas, como iperf, requieren al menos este tiempo para estabilizar el resultado de la medición, siendo este parámetro una de las características opcionales que afectan potencialmente el desempeño. Se determina la duración del registro como aquella que presenta el mayor ancho de banda y el menor retardo de los promedios de las mediciones realizadas.

Determinación del tamaño MTU: naturalmente el desempeño del enlace se ve fuertemente afectado por el valor que se fije para la MTU como lo han evidenciado trabajos previos; [9], [14], [19] y [22]. Por ello, se realizan mediciones de ancho de banda y retardos variando el MTU desde 16 bytes hasta el máximo ofrecido por la tecnología que se esté caracterizando. Las mediciones que se realicen variando el MTU deben tener la duración determinada en el ítem anterior. Se establece el tamaño del MTU como aquel que presente el mayor ancho de banda y el menor retardo de las mediciones realizadas.

Determinación del tamaño de la ventana TCP: la ventana TCP está definida como la cantidad de datos que pueden ser recibidos en el buffer durante una conexión. Este tamaño se encuentra configurado por defecto y en trabajos como el presentado por Nguyen y Armitage [14], se realizan mediciones de ancho de banda y retardos variando este parámetro; por lo anterior, se recomienda realizar mediciones variando el tamaño de la ventana desde 1 KB hasta 64 KB o superiores dependiendo de la tecnología de comunicación que se esté caracterizando. Estas mediciones deben tener configurada la duración del registro y el MTU previamente establecidos.

2.1.5 Serie de mediciones

En esta etapa, se deben realizar las mediciones de los parámetros que se estén registrando. Se recomienda elaborar un script donde se utilice interfaz de línea de comando de las herramientas que se han escogido previamente, conforme a las condiciones mencionadas en las pruebas de ajustes y configuradas para que

realicen las mediciones de los parámetros tales como ancho de banda, throughput, RTT, jitter y latencia.

2.1.6 Generación de reportes

La generación de reportes hace alusión a las gráficas y tablas organizadas estadísticamente que evidencien el comportamiento de los datos obtenidos en las campañas de medición; para organizar los datos se deben obtener repeticiones de las mediciones bajo los mismos parámetros y en condiciones similares. Los reportes deben reflejar el comportamiento del enlace de datos que se evalúa para que de esta forma se pueda caracterizar el enlace de datos en función de los parámetros medidos.

2.1.7 Ajustes de mediciones

Después de realizar cada serie de mediciones, es recomendable ajustar las condiciones de las herramientas o realizar mediciones de otros parámetros con el fin de obtener información consistente y completa sobre el desempeño del enlace. Cuando se presentan anomalías localizadas en periodos de tiempo particulares, las mediciones adicionales pueden limitarse a dichas franjas horarias.

2.1.8 Caracterización del enlace

Esta es la última parte de la metodología de pruebas propuesta. En ella se debe consolidar el análisis de todos los resultados obtenidos en las series de mediciones para emitir un concepto relacionado con el desempeño real del enlace. Este punto servirá de partida para el desarrollo de trabajos de investigación posteriores en temas como telemetría y lectura remota. Además, en esta parte de la metodología, se deben generar los reportes finales que reflejen las conclusiones de la caracterización del enlace.

2.2 ESQUEMAS DE ENLACES DE DATOS PUNTO A PUNTO.

A continuación se presentan los esquemas de los enlaces de datos empleando las tecnologías de comunicación ADSL, CIA, GPRS, WiMAX, PLC y Wireless LAN.

2.2.1 Esquema ADSL

En la figura 4 se observa el esquema para la tecnología ADSL y presenta las siguientes características:

- ✓ Equipo servidor ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Equipo cliente ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Modem D-Link DSL-524B [34] suministrado por la ISP Telebucaramanga ESP.
- ✓ Ancho de banda contratado de 600 Kbps.

2.2.2 Esquema CIA

La figura 5 muestra el esquema del enlace para la tecnología CIA, presenta las siguientes características:

- ✓ Equipo servidor ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Equipo cliente ubicado en la sede del grupo de investigación ERA.
- ✓ Cable modem Scientific Atlanta DPC2100 [35] suministrado por UNE EPM.
- ✓ Ancho de banda contratado de 1050 Kbps.

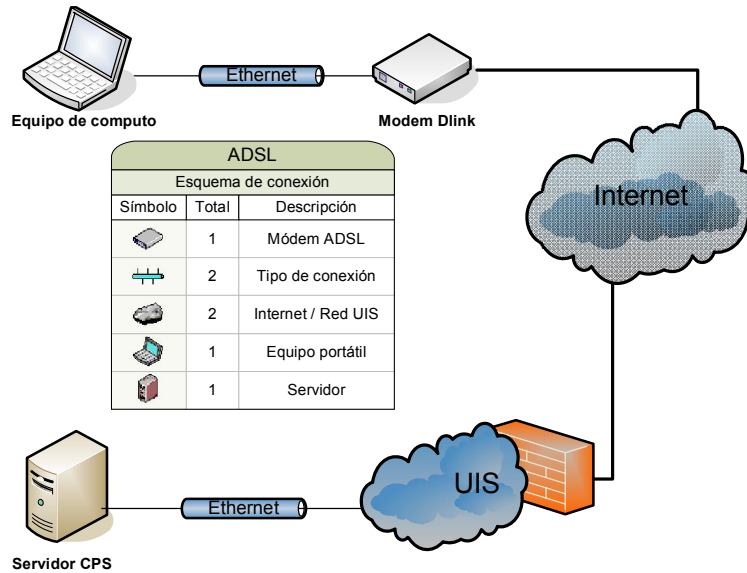
2.2.3 Esquema GPRS

En la figura 6 se observa el esquema para la tecnología GPRS, presenta las siguientes características:

- ✓ Equipo servidor ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Equipo cliente ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.

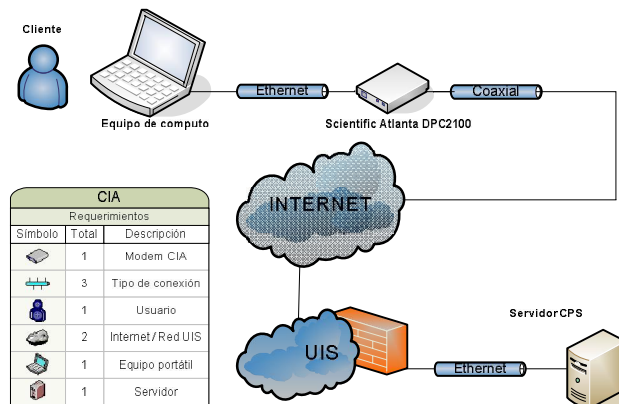
- ✓ Modem Arctic EDGE Gateway [36] adquirido por SITELRED.
- ✓ Ancho de banda contratado de 600 Kbps.

Figura 4. Esquema de implementación para ADSL.



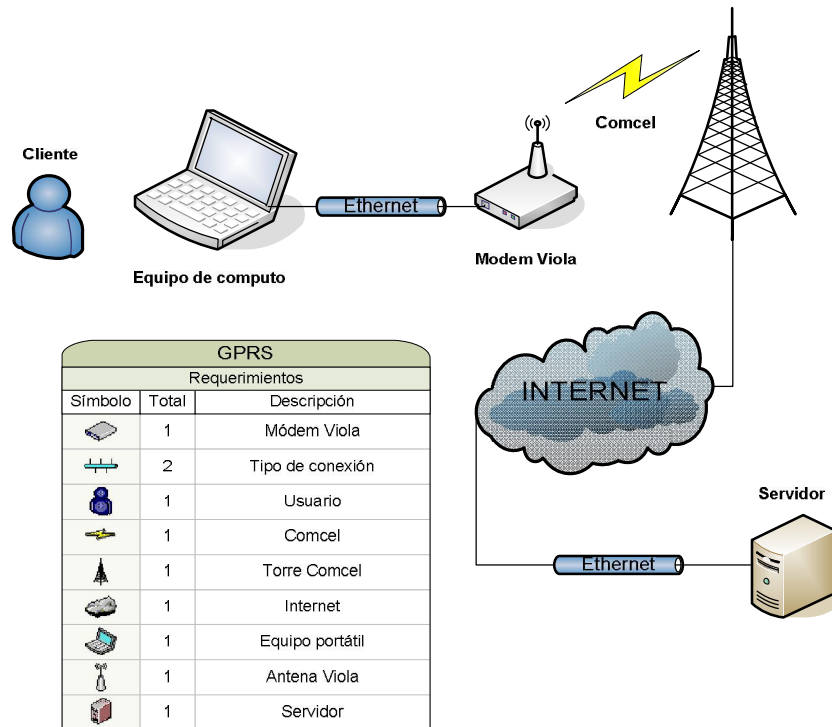
Fuente: El autor.

Figura 5. Esquema de implementación para CIA



Fuente: El autor.

Figura 6. Esquema de implementación para GPRS



Fuente: El autor.

2.2.4 Esquema WiMAX

La figura 7 muestra el esquema del enlace para la tecnología WiMAX, presenta las siguientes características:

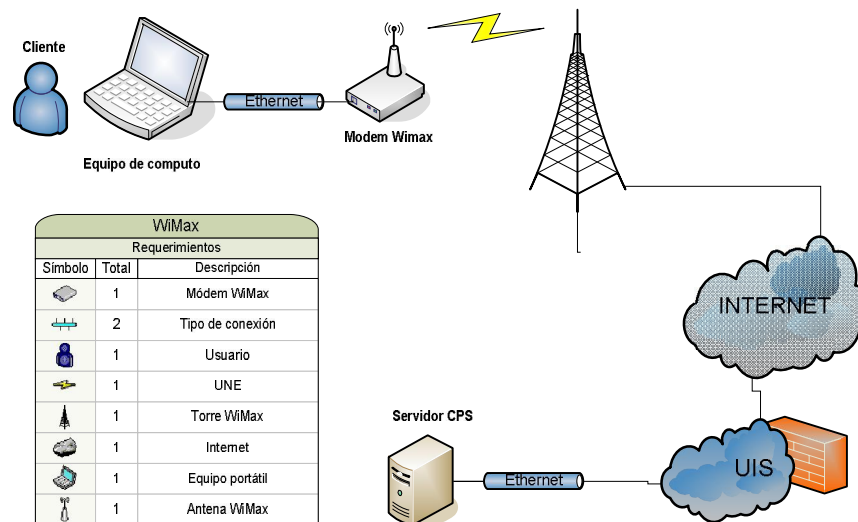
- ✓ Equipo servidor ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Equipo cliente ubicado en la sede del grupo de investigación CPS.
- ✓ Modem Gigaset SE471 [37] suministrado por la ISP UNE EPM.
- ✓ Ancho de banda contratado de 1050 Kbps.

2.2.5 Esquemas Wireless LAN

En la figura 8 se muestra el esquema de implementación para esta tecnología, además, presenta las siguientes características:

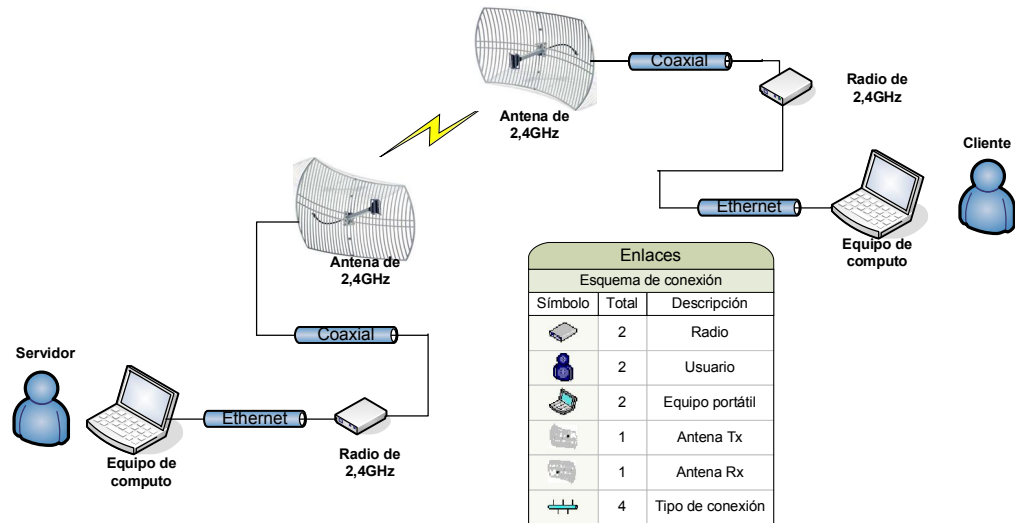
- ✓ Para evaluar el desempeño del enlace se debe considerar el esquema mostrado en la figura 8.
- ✓ Equipo de comunicación inalámbrico TEW-410APBplus [38].
- ✓ Equipo de comunicación inalámbrico Xpress Ethernet Bridge Multipoint XEB09-BIS [39].
- ✓ Equipo de comunicación inalámbrico Linksys WRT54G [40].
- ✓ Velocidades de hasta 54 Mbps.
- ✓ Equipos servidor y cliente en interiores y exteriores.
- ✓ Antenas direccionales de 24 dbi.

Figura 7. Esquema de implementación para WiMAX



Fuente: El autor.

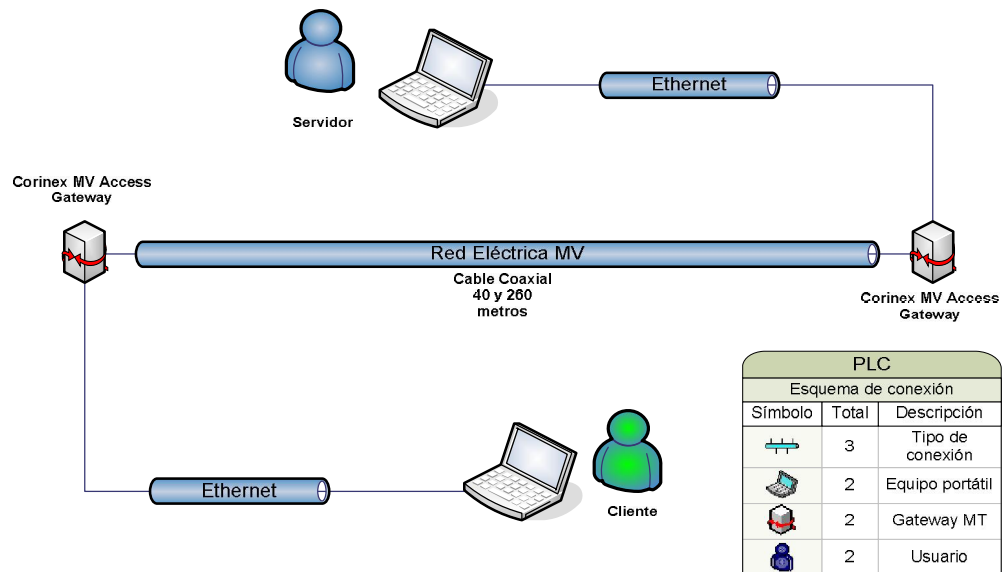
Figura 8. Esquema de implementación Wireless LAN.



Fuente: El autor.

2.2.6 Esquemas PLC

Figura 9. Esquema de implementación PLC para ajustes de parámetros



Fuente: El autor.

La figura 9 muestra el esquema de implementación de la tecnología PLC, con las siguientes características:

- ✓ Para evaluar el desempeño del enlace se debe considerar el esquema mostrado en la figura 10.
- ✓ Equipo de comunicación de media tensión Medium Voltage Access Gateway [41] adquirido por la ESSA.
- ✓ Equipo de comunicación de baja tensión [42] adquirido por la ESSA.
- ✓ Equipo acoplador de media tensión Overcap 17 [43].
- ✓ Velocidades de hasta 200 Mbps.

2.3 HERRAMIENTAS DE DESEMPEÑO

Para la caracterización de enlaces de datos, las herramientas de desempeño son un factor importante ya que con ellas es que se toman las mediciones para el análisis de los mismos. Existen trabajos en los cuales desarrollan herramientas de mediciones, como por ejemplo Gatorbytes [22], pero estos desarrollos no son de uso libre. Sin embargo, existen otras herramientas de uso libre, que funcionan bajo cualquier sistema de operativo y que han sido ampliamente utilizadas en trabajos de investigación que tiene por objetivo analizar el desempeño de redes como las presentadas en [19], [21] y [25].

A continuación se describen las algunas de las características de las principales herramientas de desempeño existentes:

2.3.1 Iperf

Es una herramienta de análisis punto a punto que permite medir retardos, jitter, ancho de banda y tasa de error de bit (dado en porcentaje). Permite la realización

de pruebas entre dos extremos, su utilización se realiza mediante la línea de comandos del sistema operativo, soporta TCP y UDP y el establecimiento de conexión de cliente y servidor.

En su configuración se pueden modificar algunos parámetros como el formato de los datos, el tamaño de la ventana TCP, el puerto de comunicación, la división de intervalos de tiempo, el periodo de medición, el protocolo a emplear en las mediciones, mediciones de ancho de banda bidireccional entre otras. Algunos trabajos en los cuales se ha empleado esta herramienta son [14], [19], [21] y [25].

2.3.2 D-ITG

Distributed Internet Traffic Generator es una herramienta para el análisis y evaluación de desempeño de redes, que permite realizar mediciones de throughput, paquetes perdidos, retardos y jitter para redes LAN cableadas, inalámbricas, GPRS entre otras. Existen versiones para Linux y Windows; presenta la siguiente arquitectura de funcionamiento: envío (ITGSend), recepción (OTGRecv, almacenamiento (ITGLog), administración remota (ITGManager) y análisis de resultados (ITGDec e ITGplot).

Al emplear diversas entidades (comandos) se pueden realizar ajustes de tamaño del paquete, intervalo de generación de paquetes, nombre de archivos donde se almacenan los datos, puerto de envío y recepción de datos; su entorno de trabajo se realiza en modo gráfico o comandos; soporta los protocolos TCP, UDP, ICMP, Telnet y DNS.

2.3.3 Netio

Es una herramienta que mide el throughput de una red para el protocolo TCP/IP utilizando seis tamaños de paquetes diferentes. Además, esta herramienta opera en sistemas operativos como Linux y Windows. Permite configurar el puerto de conexión TCP.

2.3.4 Ping

Más que una herramienta, ping es un comando que se utiliza para enviar paquetes ICMP ECHO REQUEST a equipos finales, modem, enrutadores, servidores y otros; para solicitar una ICMP ECHO RESPONSE de parte del equipo. Se puede utilizar este comando hacia: un equipo para determinar si TC/IP está en funcionamiento, un enrutador local para determinar se está en ejecución y más allá del enrutador para verificar conectividad.

Este comando mide el tiempo que tardan los paquetes, el tamaño y las estadísticas, las cuales muestran los paquetes enviados, recibidos y perdidos, además de los RTT máximo, mínimo y promedio. Algunos trabajos en los que se emplea este comando son los desarrollados por Dischinger et al [9], Nguyen y Armitage [14], López y Ramos [15], Stuckmann et al [18], Magnor y Reizer [19], Issa, Goldberg y Marthe [21] y El-Sayed et al [29].

2.3.5 Jperf

Al igual que iperf, esta es una herramienta de análisis de punto a punto que permite medir retardos, Jitter y ancho de banda. Opera con una interfaz de usuario gráfica, soporta UDP y TCP, el establecimiento de conexión se realiza en modos cliente y servidor en dos estaciones diferentes y los reportes se observan en la visualización de gráficas mostradas en el entorno de trabajo de la herramienta.

En su entorno gráfico se pueden configurar aspectos tales como la IP del cliente o servidor, el protocolo a emplear (TCP o UDP), el tamaño del buffer y el tamaño del paquete. Un ejemplo de su utilización se describe en [19].

2.3.6 Netperf

Es una herramienta de referencia usada para medir el desempeño de diferentes tipos de red. Realiza mediciones de throughput unidireccional y latencia punto a punto. Las mediciones de estos parámetros se pueden realizar bajo los protocolos TCP y UDP. Es de uso libre y funciona en sistemas operativos como Linux y Windows.

2.3.7 Comparación de las herramientas de desempeño

Dentro de la selección de las herramientas de desempeño, es indispensable conocer las diferentes alternativas existentes para realizar las campañas de medidas. Se deben considerar aspectos tales como: los parámetros que mide (throughput, ancho de banda, RTT, jitter, latencia entre otros), los protocolos que emplean para las mediciones, la variación de los tamaños de paquetes y de ventana, la respuesta en tiempo de la toma de medición, los sistemas operativos en los cuales funciona y el tipo de software (distribución libre o comercial).

Escoger una herramienta correctamente depende de las mediciones que se deseen realizar; en el mercado existen diferentes alternativas para realizar mediciones, por ejemplo, iperf es una herramienta de distribución libre, funciona bajo Windows y Linux, toma mediciones de ancho de banda, jitter y BER (Bit Error Rate) sobre TCP y UDP. En la tabla 8 se muestra la comparación de las herramientas de desempeño más utilizadas en las investigaciones revisadas.

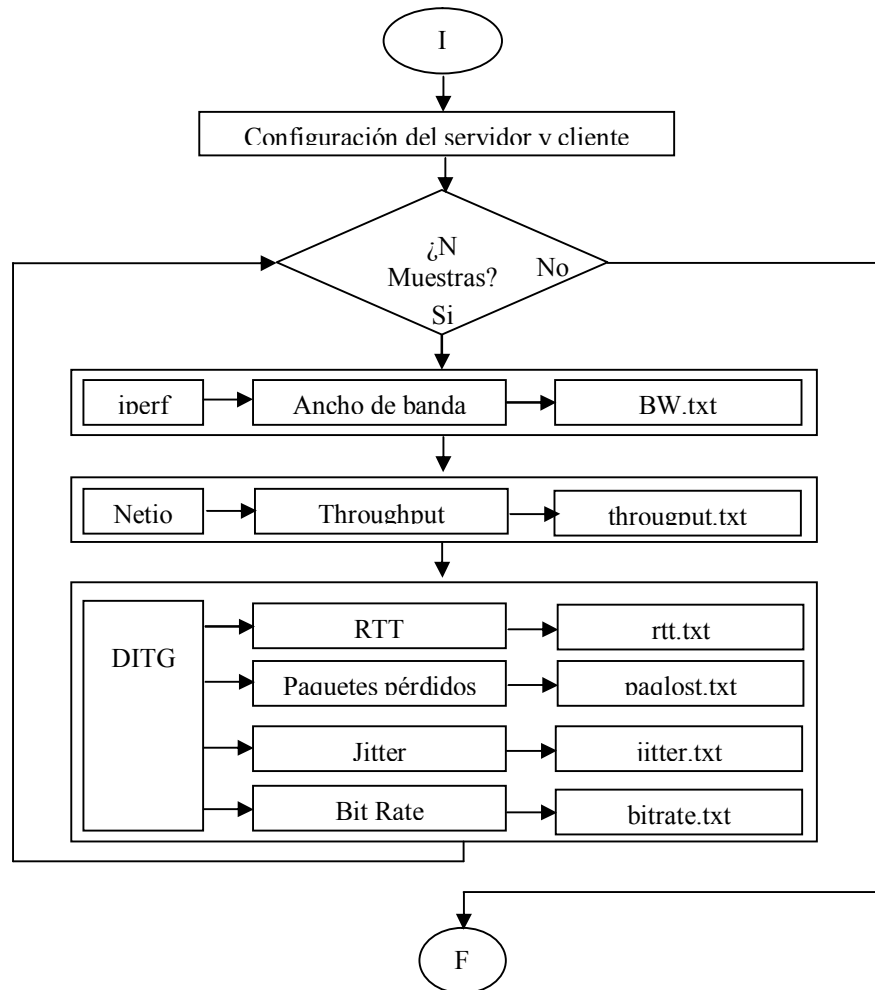
2.3.8 Selección de las herramientas de desempeño

Después de realizar la revisión individual de las herramientas mencionadas, se determinó que D-ITG, iperf y netio cumplen con los requerimientos para realizar las mediciones de desempeño de los enlaces de datos.

Con estas herramientas, bajo el entorno de Ubuntu 8.10, se diseñó un script de pruebas el cual mide y almacena cada parámetro de rendimiento en un archivo para su posterior análisis.

En la figura 12 se observa el procedimiento para el desarrollo de las mediciones empleando las herramientas escogidas. Para cada tecnología de comunicación involucrada en la investigación, se realizó el ajuste del procedimiento mostrado en la figura 8, esto se puede observar en detalle en los trabajos realizados por Higuera y Reslen [44], Forero [45] y, Flórez y Agudelo [46].

Figura 10. Procedimiento de ejecución de las herramientas.



Fuente: El autor.

2.4 CAMPAÑAS DE MEDICIONES

El último paso para realizar la caracterización de los enlaces de datos corresponde a describir las mediciones que se deben realizar con cada una de las tecnologías involucradas. A continuación se describen las campañas de mediciones que se deben aplicar a las tecnologías. Para ADSL, CIA, GPRS y WiMAX, las campañas de mediciones se realizan de forma similar, por esto se describen en la misma sesión, pero para Wireless LAN y PLC, se describen por separado, debido a que estas dos tecnologías presentan esquemas de implementación diferentes.

2.4.1 Descripción de las mediciones desarrolladas para ADSL, CIA, GPRS y WiMAX

Cada campaña de mediciones está dividida en cuatro tipos de pruebas: la primera corresponde a las pruebas de ajustes de los parámetros de las herramientas, la segunda es una prueba de estabilidad del enlace de datos, la tercera obedece a las mediciones de larga duración y la cuarta es la prueba de descarga de archivos entre los puntos finales del enlace de datos. Los esquemas empleados son los mostrados desde la figura 4 a la 9.

2.4.1.1 Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Son las mediciones que se realizan para ajustar ciertos parámetros de las herramientas de desempeño y optimizar las mediciones realizadas con ellas. Los parámetros a configurar se han escogido de acuerdo a trabajos revisados previamente en relación con el tiempo de medición, Cho, Esaki y Kato [19] y Stuckmann, Ehlers y Wouters [23]; con la MTU (unidad máxima de transmisión), Lin y Latchman [10], Dischinger et al. [18], Nguyen y Armitage [21] y Magnor y Reizer en [24]; y el tamaño de la ventana TCP, Magnor y Reizer en [24]; en los cuales se realizan mediciones de ancho de banda, throughput y retardos.

Por lo anterior, se recomienda iniciar realizando mediciones de anchos de banda, y retardos con las configuraciones por defecto de las herramientas de desempeño involucradas en las mediciones. En seguida, realizar mediciones variando el tiempo de registro de medición, la MTU y de ventana TCP. De acuerdo a lo anterior, las pruebas de ajuste a realizar son:

- ✓ Determinación de la duración del registro: se entiende como el tiempo mínimo necesario para obtener una medida. Para determinar esta duración se recomienda realizar mediciones de ancho de banda y retardos con la configuración de las herramientas por defecto, empezando desde 10 segundos y aumentando la toma de la medición cada 5 segundos hasta alcanzar los 90 segundos. El motivo de iniciar a los 10 segundos obedece a que algunas herramientas, como iperf, requieren de este tiempo para realizar la medición.
- ✓ Determinación de la MTU: la unidad máxima de transmisión, definido como el tamaño máximo que puede ocupar un paquete en TCP, se encuentra determinada para cada tecnología de comunicación; por ejemplo para ADSL la MTU es de 1472 bytes, pero el comportamiento de este tamaño varía con respecto a las mediciones que se realicen, esto se puede observar en [10], [18], [21] y [24]. Por ello, se recomienda realizar mediciones de ancho de banda y retardos variando la MTU desde 16 bytes hasta el máximo de la tecnología que se esté caracterizando. Las mediciones que se realicen variando la MTU deben tener la duración de registro determinada previamente.
- ✓ Determinación del tamaño de la ventana TCP: la ventana TCP está definida como la cantidad de datos que pueden ser recibidos en el buffer durante una conexión. Este tamaño se encuentra configurado por defecto y en

trabajos como el presentado por Nguyen y Armitage [21] se realizan mediciones de ancho de banda y retardos variando este parámetro; por lo anterior, se recomienda realizar mediciones variando el tamaño de la ventana desde 1 Kbyte hasta 64 Kbytes o superiores dependiendo de la tecnología de comunicación que se esté caracterizando. Estas mediciones deben tener configurada la duración del registro y la MTU previamente establecidos.

2.4.1.2 Prueba de estabilidad del enlace de datos.

Con esta prueba se pretende obtener mediciones de los parámetros: ancho de banda y RTT. Las pruebas a realizar deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Duración del registro determinado en las pruebas de ajustes de los parámetros de medida.
- ✓ Duración de la prueba: entre 12 y 24 horas.
- ✓ Se deben promediar los datos obtenidos cada hora, de tal forma que por cada hora se obtenga un dato estadístico.

2.4.1.3 Prueba extendida de medición de parámetros.

Con esta prueba se pretende obtener mediciones de los parámetros: ancho de banda, throughput, latencia, Jitter y RTT. Las pruebas a realizar deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Duración del registro determinado en las pruebas de ajustes de los parámetros de medida.
- ✓ Duración de la prueba: 14 días.
- ✓ Se deben promediar los datos obtenidos cada hora, de tal forma que por cada hora se obtenga un dato.
- ✓ Se deben correlacionar los datos del mismo día (por ejemplo, de los dos lunes que están involucrados en las mediciones).

2.4.1.4 Prueba de descarga de archivos entre puntos finales.

Con estas mediciones se desea analizar el comportamiento del enlace al realizar descargas de archivos, los parámetros a medir son ancho de banda y duración de descarga. Las consideraciones para esta serie de mediciones son:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Medición con el tiempo de duración del registro determinado en las pruebas de ajuste de parámetros de medida.
- ✓ Iniciar la toma de medidas antes de iniciar la descarga.
- ✓ Variar el tamaño del archivo de descarga entre 1KB y 100MB, dependiendo de la tecnología que se esté caracterizando.
- ✓ Realizar cada descarga como mínimo 3 veces.

2.4.2 Descripción de las mediciones desarrolladas para Wireless LAN.

A continuación se presentan las series de mediciones requeridas para caracterizar el enlace punto a punto empleando la tecnología Wireless LAN; las mediciones se dividen en tres tipos: la primera obedece a las pruebas de ajuste de parámetros de medida, la segunda a la medición de los parámetros de desempeño para cierta distancia y la tercera a la descarga de archivos entre los extremos del enlace de datos.

2.4.2.1 Prueba de ajuste de los parámetros del enlace de datos.

Esta serie de mediciones presenta la misma configuración de la prueba de ajustes para las tecnologías ADSL, CIA, GPRS y WiMAX. Se ajustan los parámetros para la determinación de:

- ✓ La duración del tiempo de registro.
- ✓ La MTU.
- ✓ El tamaño de la ventana TCP.

Las características de la prueba se puede observar en sección 2.4.1.1

2.4.2.2 Prueba de medición de desempeño

Después de obtener los parámetros de ajuste de las herramientas para la tecnología Wireless LAN, se requiere realizar pruebas de medición de desempeño de los parámetros: ancho de banda, throughput, latencia, RTT y jitter con las siguientes características:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.

- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Duración del registro determinado en las pruebas de ajustes de los parámetros de medida.
- ✓ Duración de la prueba: 30 minutos a una distancia de varios kilómetros entre los equipos del enlace de datos.

2.4.2.3 Prueba de descarga de archivos.

Luego de realizar las mediciones de los parámetros para caracterizar el enlace de datos, se requiere realizar mediciones de ancho de banda y duración al realizar descargas de archivos. Para ello se deben considerar las siguientes características:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Medición con el tiempo de duración del registro determinado en las pruebas de ajuste de parámetros de medida.
- ✓ Iniciar la toma de medidas antes de iniciar la descarga.
- ✓ Variar el tamaño del archivo de descarga entre 16 KB hasta 100MB.
- ✓ Generar promedios de datos de acuerdo al tiempo de descarga de los archivos.
- ✓ Realizar cada descarga como mínimo 3 veces.

2.4.3 Descripción de las mediciones desarrolladas para PLC.

A continuación se presenta la descripción de las series de mediciones requeridas para caracterizar el enlace de la tecnología PLC; se dividen en cuatro series de medición de la siguiente forma: la primera obedece a las pruebas de ajuste de parámetros de medida de las herramientas; la segunda corresponde a la variación

de la distancia del enlace de datos empleando cable coaxial; la tercera se refiere a la medición de los parámetros entre subestaciones de media tensión y la cuarta corresponde a la descarga de archivos entre subestaciones.

2.4.3.1 Prueba de ajuste de los parámetros del enlace de datos.

Esta serie de mediciones presenta la misma configuración de la prueba de ajustes de las tecnologías antes mencionadas, siguiendo la configuración del esquema presentado en la figura 9. Los parámetros para ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación el tamaño de la ventana TCP.

Las características de la prueba se puede observar en la sección 2.4.1.1

2.4.3.2 Prueba de desempeño empleando cable coaxial.

Para ejecutar esta prueba se debe implementar el esquema presentado en la figura 9 teniendo en cuenta que para este esquema, las mediciones se realizan con cable coaxial de 40 y 260 metros, la razón de utilizar este cable radica en que los fabricantes de los equipos lo emplean como canal alternativo para realizar pruebas de laboratorio. Se deben medir los parámetros: ancho de banda, throughput, latencia, RTT y jitter con las siguientes características:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Duración del registro determinado en las pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

- ✓ Duración de la prueba: sesiones de 1 hora.
- ✓ Variación de la distancia: 40 metros y 150 metros.

2.4.3.3 Prueba de desempeño empleando subestaciones.

Después de realizar las mediciones con el cable coaxial, se requiere realizar las mediciones de los mismos parámetros empleando la línea de media tensión de la Universidad Industrial de Santander entre dos subestaciones, como se puede observar en la figura 9 y con las siguientes características:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Duración del registro determinado en las pruebas de ajustes de los parámetros de medida.
- ✓ Duración de la prueba: sesiones de 1 hora variando la hora de la medición.

2.4.3.4 Prueba de descarga de archivos.

Luego de realizar las mediciones de los parámetros para caracterizar el enlace de datos, se requiere realizar mediciones de ancho de banda, throughput y retardos realizando descargas de archivos, para ello se deben considerar las siguientes características:

- ✓ Tamaño MTU estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Tamaño de ventana TCP estable determinado en las pruebas de ajuste de los parámetros de medida.
- ✓ Medición con el tiempo de duración del registro determinado en las pruebas de ajuste de parámetros de medida.
- ✓ Iniciar la toma de medidas antes de iniciar la descarga.

- ✓ Variar el tamaño del archivo de descarga entre 16KB y 1GB.
- ✓ Generar promedios de datos de acuerdo al tiempo de descarga de los archivos.
- ✓ Realizar cada descarga como mínimo 3 veces.

2.4.4 Generación de reportes.

El último paso para la caracterización de un enlace de datos corresponde a la generación de los reportes de cada una de las series de mediciones realizadas para cada tecnología de comunicación. En cada reporte se deben tener en cuenta los procesos estadísticos que ayuden a relacionar los datos obtenidos, de esta forma, se recomienda realizar promedios de datos obtenidos dependiendo de la cantidad de muestras, calcular las varianzas, medianas, medias entre otros.

Después de realizar los procesos estadísticos, se deben generar las gráficas que reflejen el comportamiento del enlace de datos para su posterior análisis.

3. CARACTERIZACIÓN DE LOS ENLACES DE DATOS

En este capítulo se referencian los resultados más significativos sobre las mediciones realizadas para cada tecnología de comunicación evaluadas. Inicialmente se mencionan los resultados individuales, los cuales se describen en los anexos del trabajo de investigación, luego se describen las comparaciones más relevantes de las mediciones realizadas y por último se presenta la disponibilidad de cada tecnología en el municipio de Bucaramanga.

3.1 RESULTADOS DE LAS MEDICIONES DE DESEMPEÑO

A continuación se presentan los resultados de las mediciones de desempeño de las tecnologías de comunicación ADSL, CIA, GPRS, WiMAX, Wireless LAN y PLC.

3.1.1 Tecnologías ADSL y CIA

Los resultados de las mediciones para las tecnologías ADSL y CIA pueden ser observados detalladamente en el trabajo desarrollado por Higuera y Reslen [43]. Los resultados más representativos se observan en los anexos A y B.

3.1.2 Tecnología GPRS

Los resultados para la tecnología GPRS se pueden observar en detalle en el trabajo desarrollado por Forero [44]. Algunos de los resultados más significativos se pueden observar en el anexo C.

3.1.3 Tecnología WiMAX

En el anexo D se observan los resultados de las mediciones desarrolladas para la tecnología WiMAX.

3.1.4 Tecnología Wireless LAN y PLC

Las tecnologías Wireless LAN y PLC fueron evaluadas por Agudelo y Flórez [45], en dicho trabajo se pueden observar en detalle los resultados de la evaluación, sin embargo, en los anexos E y F se observan los resultados más representativos de las mediciones realizados por ellos.

3.2 COMPARACIONES ENTRE LAS TECNOLOGÍAS ADSL, CIA, GPRS, WIMAX, Wireless LAN y PLC

A continuación se presentan los resultados comparativos de las mediciones realizadas con las tecnologías de comunicación, estos resultados están orientados a comparar las mediciones de ancho de banda, retardos, throughput y tiempo de descarga de archivos.

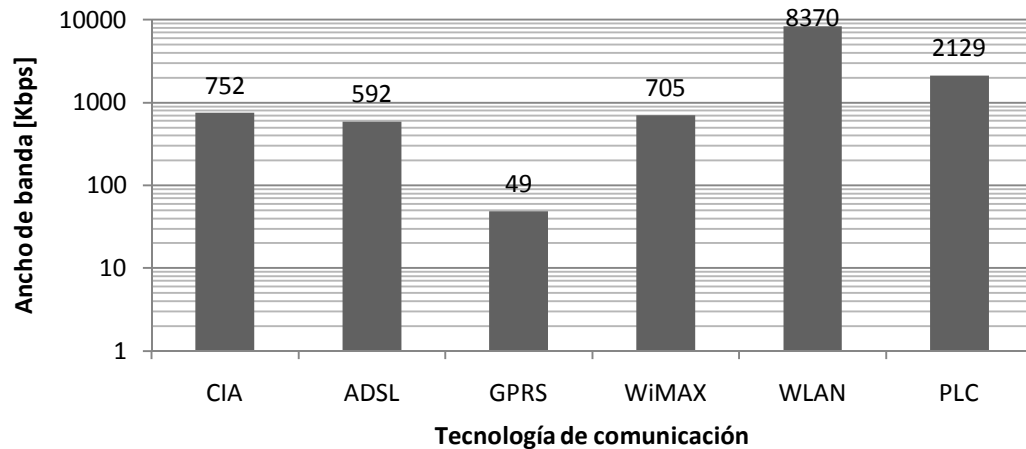
3.2.1 Ancho de banda y retardos para las configuraciones por defecto de las herramientas.

En la figura 11 se muestra la comparación de ancho de banda medidas con las herramientas de desempeño configuradas por defecto. Se observan los siguientes resultados: CIA con 752 Kbps, ADSL con 592 Kbps, GPRS con 49 Kbps, WiMAX con 705 Kbps, Wireless LAN con 8370 Kbps y PLC con 2129 Kbps.

Teniendo en cuenta que las tecnologías de comunicación cuentan con servicios contratados (o en su defecto valores determinados como el caso de PLC y Wireless LAN) en la figura 12 se presentan los resultados sobre el rendimiento de cada tecnología tomando como referencia dichos valores. Para estos se emplean los siguientes datos contratados con operadores de red: CIA con 1050 Kbps, ADSL con 600 Kbps, WiMAX con 1050 Kbps y GPRS con 256 Kbps; para PLC se adquirieron equipos de 200 Mbps y para Wireless LAN de 11 Mbps. El cálculo se

realizó dividiendo la medición entre el valor de referencia, de tal forma que los valores obtenidos estén normalizados.

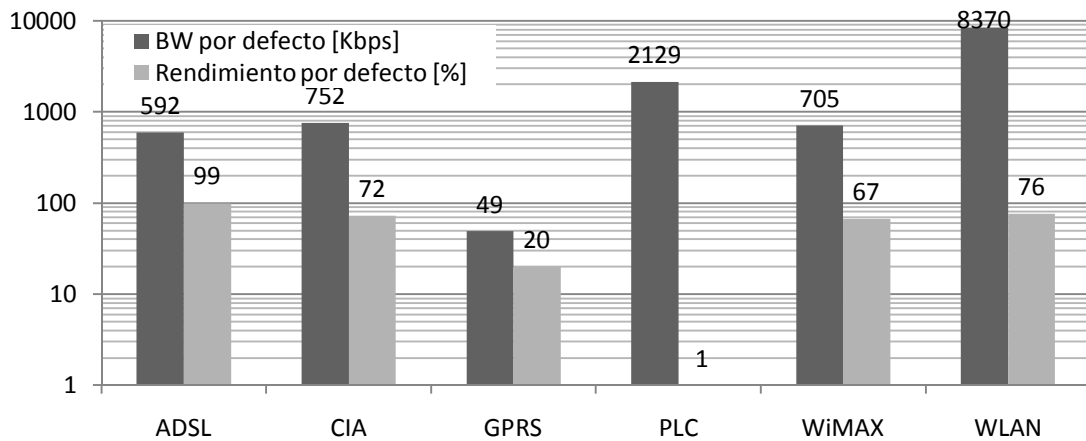
Figura 11. Comparación de mediciones de ancho de banda por defecto.



Fuente: El autor.

Los rendimientos de cada tecnología son: CIA presenta un 72%; ADSL un 98%, siendo esta tecnología la de mejor desempeño en cuanto a las mediciones de ancho de banda por defecto; GPRS presenta 20%; WiMAX con un 67%, Wireless LAN con 76%, siendo esta la segunda mejor y PLC con 1% siendo ésta tecnología la de menor rendimiento, teniendo en cuenta que los equipos adquiridos son para 200 Mbps. Cabe resaltar que los excelentes resultados que mostrados por la tecnología ADSL pueden ser debido a que el usuario no comparte el medio con ningún otro usuario; por otro lado, la tecnología PLC que en teoría debería presentar los mejores resultados, no se encuentra cerca de ellos, debido a que es una tecnología relativamente nueva al trabajar en las líneas de media tensión y más aún, esta implementación es una de las primeras que se ha desarrollado en Bucaramanga; sin embargo, PLC está madura en baja tensión, pruebas realizadas en la sede del grupo de investigación CPS mostraron resultados de hasta 70 Mbps, lo que indica que PLC en baja tensión (tensiones inferiores a 1000 voltios) funciona adecuadamente.

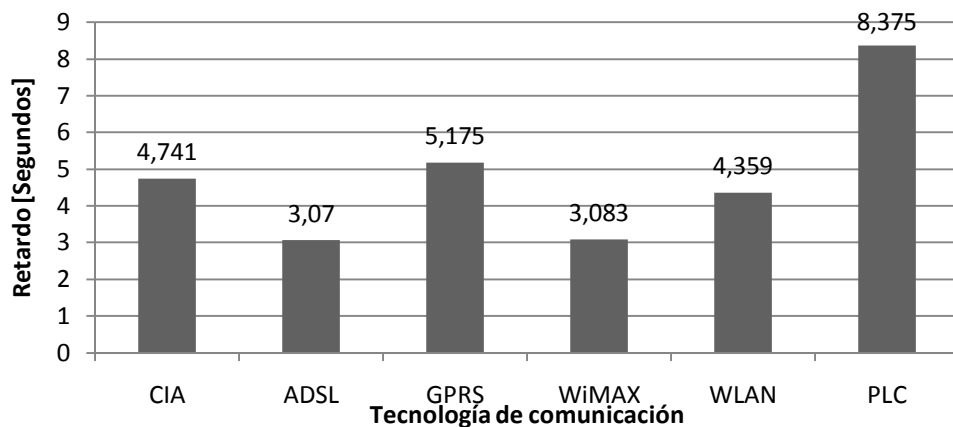
Figura 12. Rendimiento de las tecnologías de acuerdo a la tasa nominal



Fuente: El autor.

Por otro lado, se encuentran los resultados de los retardos para las tecnologías evaluadas, los cuales se pueden ver en la figura 13. En ninguna de las tecnologías los retardos superan los 9 segundos, sin embargo, ADSL y WiMAX presentan los mejores desempeños con promedios de retardos inferiores a 4 segundos; Wireless LAN presenta retardos inferiores a los 5 segundos, al igual que CIA; GPRS sobrepasa los 5 segundos y en la tecnología de mayor retardo medido es PLC, con mediciones que superan los 8 segundos. Los datos presentados en la figura 13 son los promedios de los retardos obtenidos en las mediciones realizadas al medir el ancho de banda de la figura 11.

Figura 13. Comparación de los retardos por defecto (RTT)



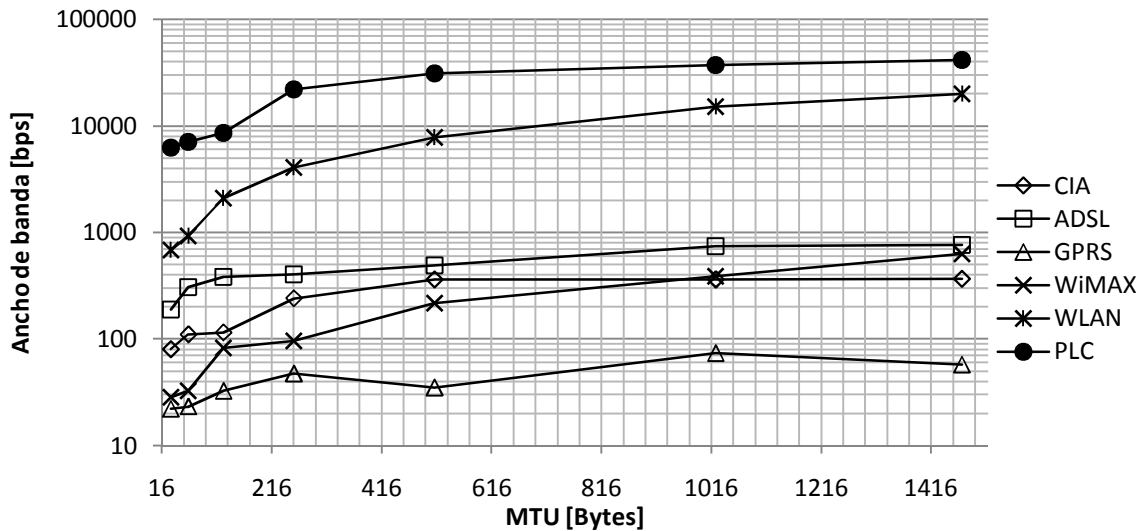
Fuente: El autor.

3.2.2 Ancho de banda y retardos para la determinación del MTU

Se realizaron mediciones variando el tamaño MTU para determinar cuál de los posibles valores presentaba un mejor desempeño. En los anexos del A al F se encuentran en detalle las mediciones realizadas. A continuación se presenta el comparativo de los resultados obtenidos al variar este parámetro.

En la figura 14 se aprecian los resultados de la variación de la MTU contra el ancho de banda. Se observa un comportamiento similar entre las tecnologías de comunicación, a menor MTU menor ancho de banda; al alcanzar el máximo, el comportamiento del ancho de banda fue el mejor (máximo medido), razón por la cual se escogió el máximo de cada tecnología como el apropiado para las siguientes series de mediciones (el MTU máximo para todas las tecnologías corresponde a 1472 bytes, excepto para PLC que es 1520 bytes).

Figura 14. Comparación del ancho de banda variando la MTU



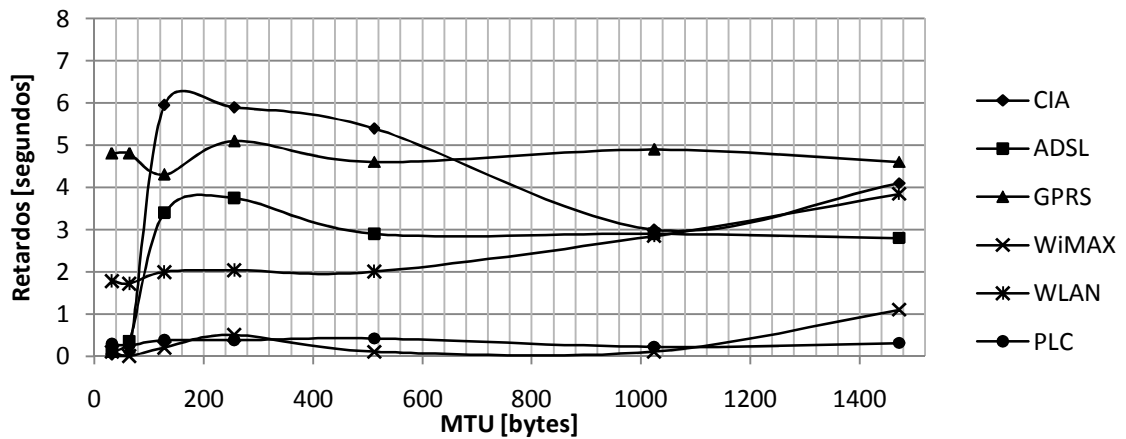
Fuente: El autor.

En la figura 15 se presenta la comparación de los retardos obtenidos al realizar la variación en la MTU. Los resultados obtenidos muestran que en todas las

tecnologías los retardos son inferiores a 7 segundos y que no superan este valor para ninguno de los tamaños de la MTU medidos. Los resultados indican que las tecnologías con menor retardo (RTT) empleando el comando ping son PLC y WiMAX, seguidas de WLAN y ADSL, en el último lugar se encuentran CIA y GPRS.

Las mediciones para determinar el MTU de la tecnología PLC se realizaron utilizando cable coaxial RG6, debido a la alta complejidad de realizar estas pruebas empleando la línea de media tensión.

Figura 15. Comparación de los retardos variando la MTU



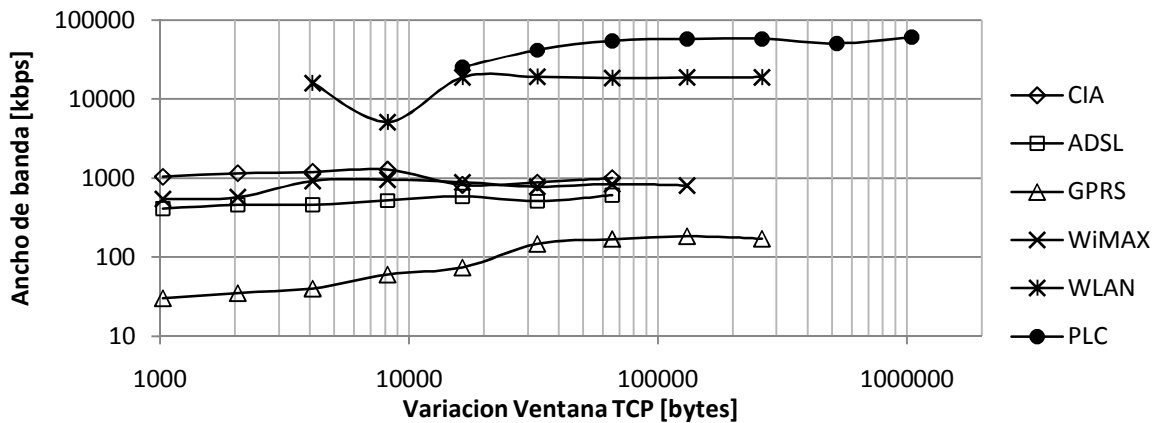
Fuente: El autor.

3.2.3 Ancho de banda para la determinación del tamaño de la ventana TCP

En la figura 16 se observan los resultados de las mediciones al variar el tamaño de la ventana TCP. Se aprecia un comportamiento similar para las tecnologías ADSL, CIA y WiMAX, en donde la variación de la ventana TCP no es notoria en la medición del ancho de banda, por ello se escogieron 8Kbytes, 16 Kbytes y 8 Kbytes para ADSL, CIA y WiMAX respectivamente. El comportamiento para GPRS es diferente, mejora la medición del ancho de banda al aumentar el tamaño de la ventana TCP, por esto es que se escoge 128 Kbytes. Para Wireless LAN el

comportamiento es estable a partir de los 16 Kbytes hasta los 256 Kbytes, se escoge la ventana TCP de 256 Kbytes para esta tecnología. Por último, PLC presenta un leve aumento al aumentar la ventana TCP, se escoge 1024 Kbytes como el tamaño de ventana para la tecnología, es de resaltar que estos resultados fueron obtenidos con cable coaxial y que además, se emplearon equipos de uso exclusivo para las mediciones.

Figura 16. Comparativo de la variación de la ventana TCP



Fuente: El autor.

3.2.4 Ancho de banda de las pruebas extendidas

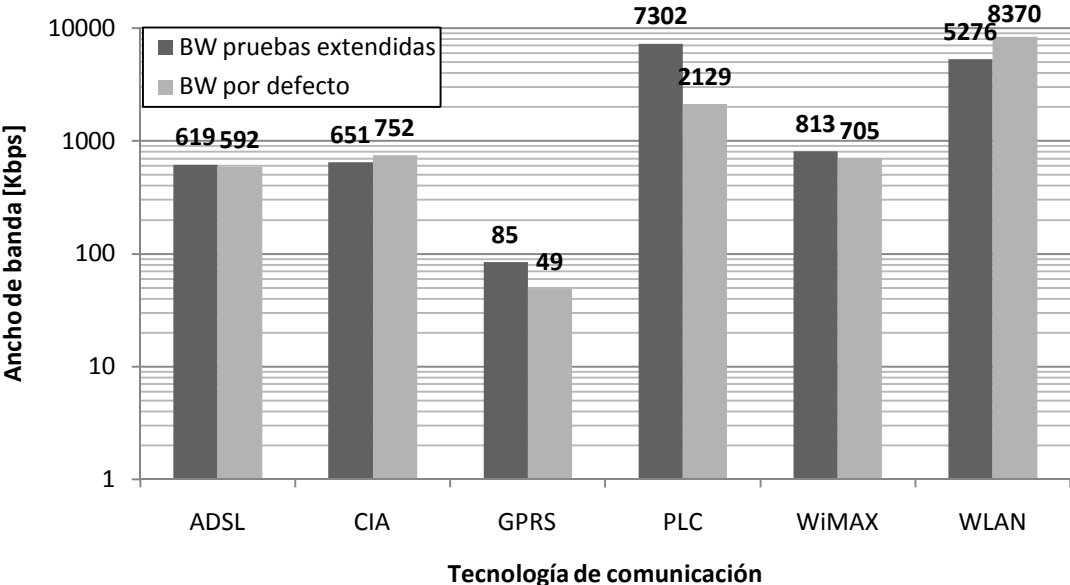
A continuación se presentan los resultados obtenidos para el ancho de banda, los datos mostrados en la figura 17 obedecen a los promedios de las pruebas realizadas para cada una de las tecnologías involucradas en las mediciones. Se observa un ancho de banda para ADSL de 619 Kbps, CIA con 651 Kbps, GPRS con 85 Kbps, WiMAX con 813 Kbps, Wireless LAN con 5276 Kbps y PLC con 7302 Kbps.

Los resultados de la figura 17 muestran que para la tecnología ADSL se logro un mejor rendimiento comparado con las mediciones realizadas por defecto, con valores por defecto de 592 kbps contra 619 kbps para las pruebas extendidas; de

forma similar ocurre con la tecnología GPRS que pasa de 49 kbps a 85 kbps; WiMAX mejora de 705 kbps a 813; PLC aumenta de 2129 kbps a 7301 kbps; por otro lado, las tecnologías CIA y WLAN disminuyen de 752 kbps a 651 kbps y de 8370 kbps a 5276 kbps respectivamente.

Además, la figura 17 muestra la comparación de las tecnologías de comunicación con las pruebas realizadas en mediciones de ancho de banda. Cabe resaltar que las tecnologías ADSL, GPRS, PLC y WiMAX mejoraron su desempeño en este parámetro de medición; y que las tecnologías CIA y WLAN disminuyeron el levemente.

Figura 17. Ancho de banda de las pruebas extendidas y por defecto

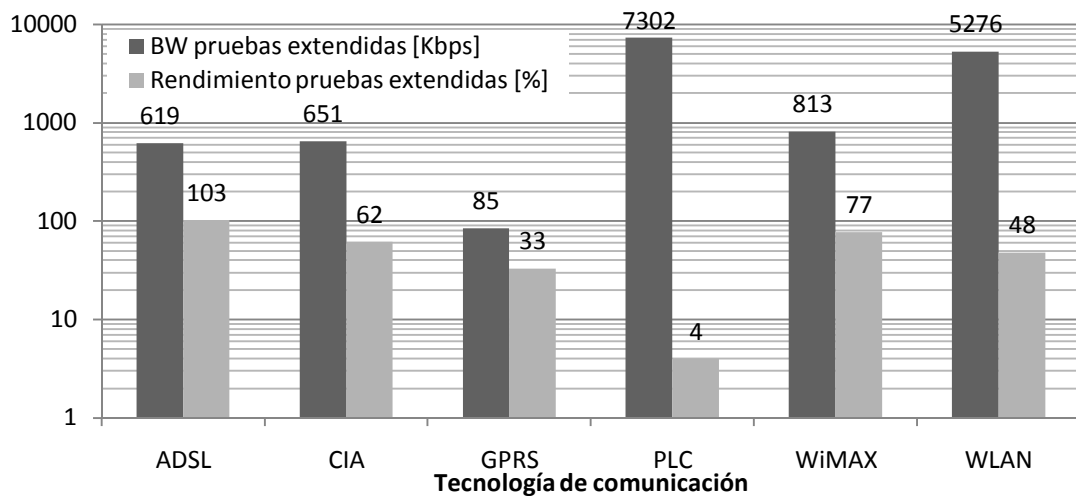


Fuente: El autor.

Cada una de las tecnologías presenta un ancho de banda nominal (teórico o contratado dependiendo de la tecnología), en la figura 18 se presenta la efectividad calcula como la división entre el ancho de banda medido y el nominal;

para ADSL se consigue una efectividad que supera el 100% de lo ofrecido, por el contrario, PLC es el más bajo con un 4%. Sin embargo, si se comparan con los resultados obtenidos en la figura 12, se observará un mejor desempeño de las tecnologías ADSL, GPRS, WiMAX y PLC y por el contrario, CIA y WLAN disminuyeron su desempeño.

Figura 18. Efectividad del ancho de banda para las mediciones realizadas en larga duración.



Fuente: El autor.

3.2.5 Throughput de las pruebas extendidas

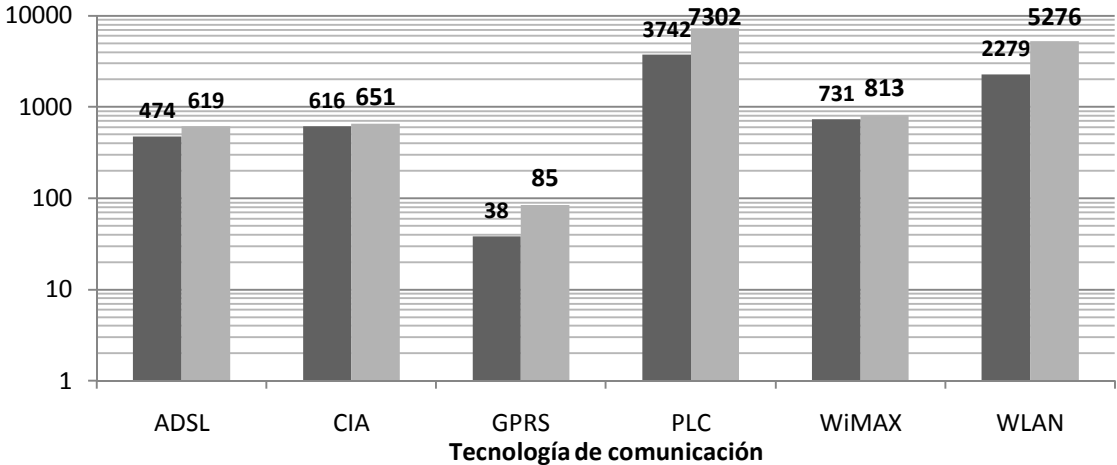
La figura 19 muestra el desempeño de los promedios del throughput medido en las pruebas de larga duración y comparado con el ancho de banda medido.

3.2.6 Retardos de las pruebas extendidas

La figura 20 muestra los resultados de los promedios de las latencias obtenidas durante las mediciones realizadas a las tecnologías evaluadas. En los resultados de PLC se observa un alto valor de latencia, si es cierto que las mediciones son

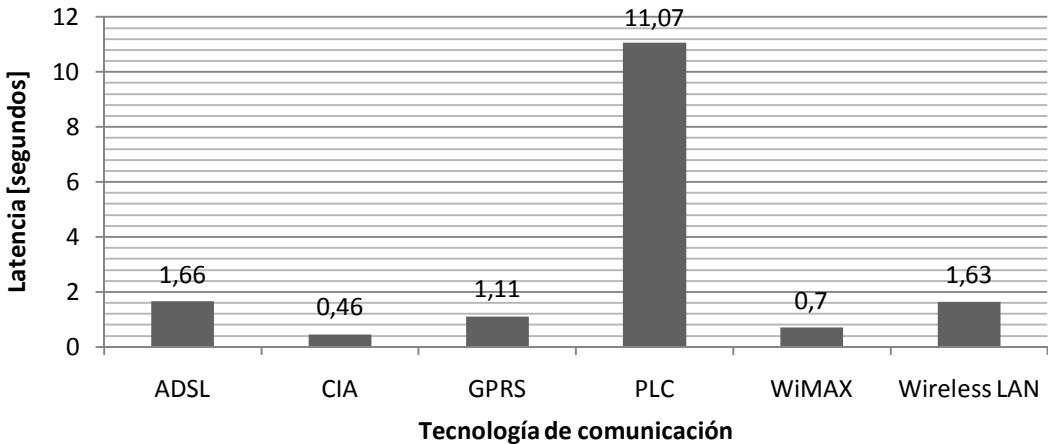
con el canal exclusivo, también es de puntualizar que las pruebas se realizaron en un sector cercano a las conexiones eléctricas de una subestación de media y alta tensión.

Figura 19. Comparativo del throughput y el ancho de banda medido para las pruebas extendidas.



Fuente: El autor.

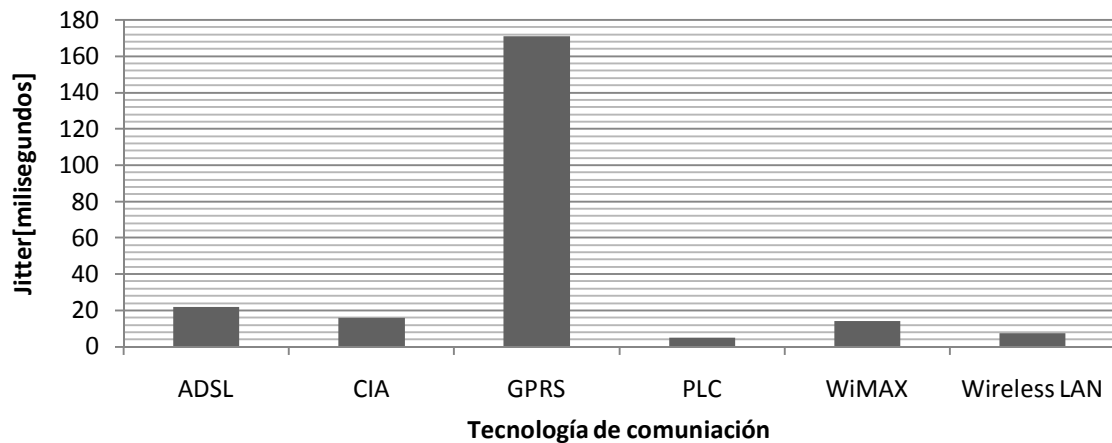
Figura 20. Comparativo de la latencia medida para las pruebas extendidas.



Fuente: El autor.

La figura 21 muestra los resultados de los promedios del jitter medido en las pruebas de larga duración para las tecnologías involucradas en la evaluación. La única tecnología que presenta un alto jitter es GPRS, una explicación podría estar relacionada con el medio compartido que experimenta en el día por los servicios de voz que presta.

Figura 21. Comparativo del jitter medido para las pruebas extendidas.



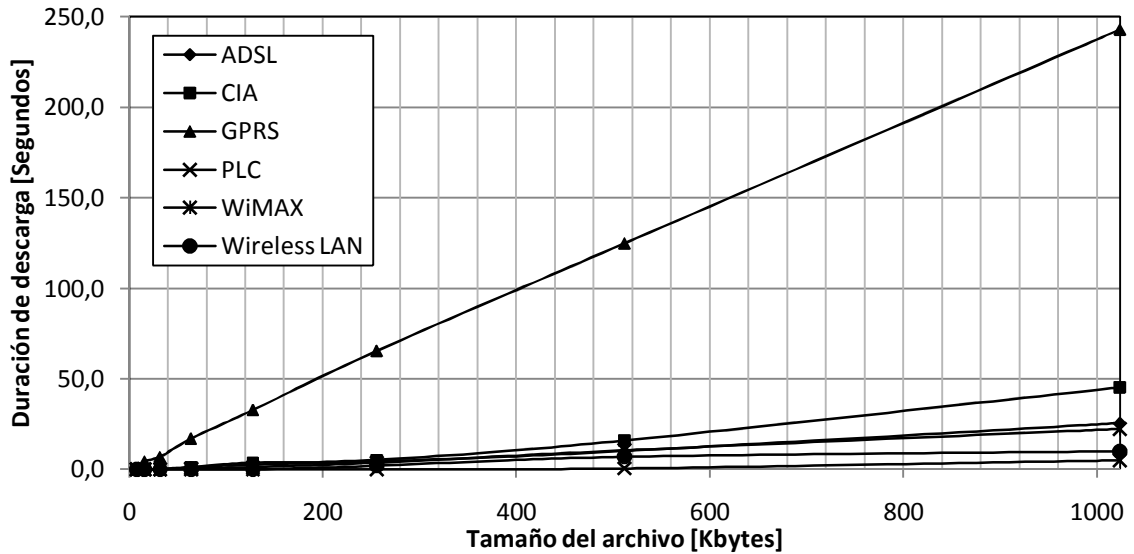
Fuente: El autor.

Por otro lado, en la figura 21 se muestra un elevado valor medido de jitter para la tecnología GPRS, una de las posibles razones de este comportamiento es que en el horario comprendido entre las 9 am y las 9 pm se registran altos valores del parámetro debido a que comparte el medio con el servicio de voz de la tecnología, en el horario de 9 pm a 9 am, las mediciones obtenidas mejoran pero al realizar el promedio de datos, el valor obtenido es el que se observa en la mencionada figura.

3.2.7 Descargas de archivos

En la figura 22 se presentan los resultados de la duración de descarga de archivos para tamaños de 8, 16, 32, 64, 128, 512 y 1024 Kbytes.

Figura 22. Comparativo del tiempo de descarga de archivo.



Fuente: El autor.

3.3 DISPONIBILIDAD DE LAS TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN EN BUCARAMANGA

A continuación se presentan las disponibilidades de las tecnologías ADSL, CIA, GPRS, WiMAX, Wireless LAN y PLC para el municipio de Bucaramanga, la razón primordial por la cual se presenta la disponibilidad obedece a que para sistemas de lectura remota se requiere de esta información. En el caso particular de la proyección del proyecto SITELRED, el número de transformadores a los cuales se les instalaría los equipos de calidad y comunicaciones están en el orden de los 4200 para el municipio de Bucaramanga, por ello se define el posible alcance de la cobertura para cada una de las tecnologías de comunicación de la investigación.

3.3.1 Cobertura para ADSL

La empresa que lidera esta tecnología en el área metropolitana de Bucaramanga es Telebucaramanga, esta empresa presta Internet conmutado, Internet inalámbrico y banda ancha; con velocidades que van desde los 350 kbps hasta los 4 Mbps.

Para el caso particular del proyecto SITELRED, se realizó la consulta sobre 3585 puntos aproximados (total de transformadores en el municipio de Bucaramanga) dando como cobertura un 97% de ellos. Cada punto (transformador) tiene asignado un código, dirección, barrio y municipio, la empresa informa si en ese punto existe o no cobertura. Esta información se puede observar en detalle en el trabajo de grado de Higuera y Reslen [43].

3.3.2 Cobertura para CIA

UNE EPM Telecomunicaciones es la empresa que lidera el servicio de Internet sobre cable en el área metropolitana de Bucaramanga, además de otros servicios como Internet banda ancha, telefonía larga distancia y WiMAX. Sus servicios van desde los 500 kbps hasta los 4 Mbps en ciudades como Medellín, Bogotá, Cali, Popayán, Barranquilla, Cartagena, Pereira, Cúcuta, Bucaramanga, Armenia y Manizales.

Al igual que ADSL, para esta tecnología se realizó la solicitud de información sobre la cobertura del servicio en el municipio de Bucaramanga, la empresa suministró la información de los 77 nodos que concentran el servicio. Cada nodo especifica su identificación, el barrio de ubicación, el tipo de servicio y la cobertura. Para mayor información se puede consultar el trabajo de grado de Higuera y Reslen [43].

3.3.3 Cobertura para GPRS

Tigo, Movistar y Comcel son los operadores de red celular y que cuentan con servicio de planes de datos GPRS en el área metropolitana de Bucaramanga y a su vez de Colombia; debido a lo anterior, se realizaron las solicitudes de información a los tres operadores obteniendo como respuesta: Tigo ofrece tecnología HSDPA, UMTS 3.5G y GPRS EDGE 2.5G con cobertura del 100% sobre el área metropolitana de Bucaramanga; Movistar y Comcel emplean tecnologías UMTS 3.5G y GPRS EDGE y no emitieron concepto sobre la disponibilidad de la cobertura en el área metropolitana de Bucaramanga. La ampliación de esta información se puede observar en [44].

3.3.4 Cobertura para WiMAX

Al igual que CIA, la empresa proveedora del servicio de datos de la tecnología WiMAX es UNE EPM Telecomunicaciones, ofrece este servicio con velocidades que van desde los 500 kbps hasta los 8 Mbps. Al realizar la solicitud de información sobre la cobertura, la empresa informa que tiene instalados siete nodos identificados como Guane, Cabecera, UDES, Florida, La puente, Ruitoque y Cabecera alta. UNE EPM Telecomunicaciones suministró las configuraciones de los nodos, así como la potencia y frecuencias de trabajo de cada uno de ellos; la cobertura de estos nodos es del 90% para el municipio de Bucaramanga.

3.3.5 Cobertura para Wireless LAN

La tecnología de comunicación inalámbrica permite obtener una cobertura del 100% en el municipio, debido a que si se desea implementar, solo se requiere la adquisición e instalación del equipamiento en los lugares dispuestos para tal fin. Teniendo en cuenta que la topología geográfica del municipio es una meseta y que alrededor de está el terreno es quebrado, facilita la dirección de las antenas para la transmisión de los datos. En el trabajo de grado de Flórez y Agudelo [45] se

observan además, algunos de los equipamientos existentes en el mercado local y nacional.

3.3.6 Cobertura para PLC

De forma similar a Wireless LAN, PLC es una tecnología que se define como propietaria, lo que implica que para una aplicación, se debe adquirir e instalar el equipamiento necesario por parte de la entidad interesada en el sistema de comunicación. En este caso, se emplearía la infraestructura de la ESSA S.A. E.S.P. para obtener una cobertura del 100% en el municipio de Bucaramanga. Los principales equipamientos de esta tecnología a nivel nacional son presentados por Flórez y Agudelo [45].

4. METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGIA DE COMUNICACIÓN.

En este capítulo, se dan a conocer los conceptos básicos para las técnicas multicriterios y se definen los principales métodos de decisión multicriterio existentes, además, se realiza una breve descripción sobre el método analítico jerárquico, el cual fue el escogido para realizar la metodología de selección de tecnología de comunicaciones, y por último, se aplicará la metodología propuesta para la selección de alternativas de comunicación en SITELRED.

4.1 TÉCNICAS DE DECISIÓN MULTICRITERIO.

Tomar decisiones es un proceso que resulta de las diversas alternativas con las que diariamente un decisor debe enfrentarse en su entorno. Sin embargo, tomar la decisión puede convertirse en un proceso complejo dependiendo del entorno en el cual se requiera realizar el trabajo. En un entorno empresarial, como es el caso de la ESSA, en donde las decisiones que se toman repercuten en factores económicos, capacitación de personal, infraestructura, entre otros; realizar la decisión conlleva a una metodología elaborada para evitar decisiones equivocadas frente a las alternativas que se están evaluando.

El hecho de tomar una decisión se plantea cuando existe un conjunto definido de alternativas, las cuales pueden resolver un mismo problema, sin embargo, tomar una buena decisión consiste en que trascurrido el tiempo, las consecuencias de la decisión son favorables frente a la misma decisión y solución del problema que se resolvió. Un proceso de decisión no necesariamente debe llevar a la eliminación de todas las alternativas, si no que por el contrario, debe conducir a un *ranking* de alternativas, las cuales pueden ser útiles para la implementación de sistemas híbridos dependiendo de la decisión que se esté realizando.

4.1.1 Conceptos sobre decisión [47].

A continuación se definen los principales conceptos que se contemplan para tomar decisiones:

Decisor: Su función es la de tomar una decisión a partir de la información que obtiene del análisis de las alternativas existentes, o de los analistas (si existieran) en el proceso de toma de decisión.

Analistas: persona(s) encargada(s) del tratamiento, análisis y validación de la información, además, hace las recomendaciones relativas a la selección final. No debe expresar opiniones personales, solo se limita a la información que se le suministra objetivamente.

Entorno de la situación de decisión: contexto en donde transcurre el proceso de decisión. Está compuesto por las características que definen la situación decisora.

Criterios: constituyen los puntos de vista o parámetros que se utilizan para manifestar las preferencias del decisor, son los elementos de referencia con los cuales se realiza la decisión. Éstos son un paso primordial en los procesos de decisión.

Objetivo: indica la meta a la cual se debe llegar, el decisor debe apuntar en esa dirección para encontrar la mejor solución de la situación planteada.

Atributos: son las características que se definen a las alternativas y miden el cumplimiento de un objetivo. Cada alternativa tiene definidos unos atributos los cuales permiten definir la consecuencia de la decisión en relación con el sistema de preferencias del decisor.

Pesos: son las ponderaciones que miden la importancia relativa que los criterios tienen para el decisor. Los pesos están asociados a un vector de pesos dependiendo del número de criterios. Es importante mencionar que frecuentemente los criterios pueden tener una importancia diferente para el decisor, estas diferencias justifican los pesos asociados a los criterios.

Alternativas: corresponde al conjunto de soluciones posibles que se deben analizar durante el proceso de decisión y solución del problema planteado en el objetivo. También se puede definir como el conjunto de posibles opciones definidas sobre las que el decisor realiza una decisión.

4.1.2 Fases de un proceso de decisión [47].

Los procesos de toma de decisiones se dividen generalmente en cuatro partes:

1. Estructuración del problema: En esta fase se realizan los siguientes pasos:
 - a. Definición del problema.
 - b. Identificación de las alternativas.
 - c. Determinación de los criterios

2. Análisis del problema de decisión: Es la fase en la cual el proceso de toma de decisiones tiene lugar e incluye los siguientes pasos:
 - a. Evaluación de alternativas.
 - b. Elección de una opción o ranking de alternativas.

3. Implementación de la decisión: Corresponde a la ejecución de la alternativa más favorable.

4. Evaluación de los resultados: Consiste en evaluar los resultados que genera la alternativa seleccionada.

4.1.3 Principales métodos de decisión Multicriterio

Los métodos de evaluación y decisión multicriterio comprenden la selección de una alternativa entre un conjunto factible de ellas, la optimización de las funciones bajo el objetivo que se desea alcanzar, las decisiones del decisor y los procedimientos de evaluación. Además, los métodos de evaluación y decisión multicriterio sirven para llegar a una solución en función de las preferencias del decisor y del objetivo definido previamente de tal forma que el problema central de los métodos de decisión multicriterio consisten en:

- ✓ Seleccionar la mejor alternativa, o en su defecto, las mejores alternativas.
- ✓ Aceptar alternativas consideradas como posibles soluciones y posibles no soluciones.
- ✓ Generar un ranking de las alternativas consideradas desde la mejor alternativa a la peor.

Por lo anterior, cuando el objetivo toma un número indefinido o indeterminado de valores que conducen a un número infinito de alternativas solución del problema, el proceso se denomina decisión multiobjetivo. Aquellos objetivos que presentan un número determinado y finito de alternativas se denominan problemas de decisión multicriterio discreta. Los últimos, son los más frecuentes en la solución de problemas de decisión, ya que por su naturaleza o diseño, presentan un número finito de alternativas solución del objetivo perseguido a través de:

1. Conjunto de alternativas estable finito identificado.
2. Criterios de evaluación, ya sean atributos, objetivos o subcriterios que permiten evaluar las alternativas en función de los pesos asignados por el decisor.
3. Una matriz de decisión que resume la evaluación de cada alternativa respecto a los criterios de evaluación.

4. Una metodología de agregación de preferencias que permite determinar la solución que recibe las mejores evaluaciones.
5. Un proceso de decisión.

Los principales métodos de evaluación y decisión multicriterio discretos son: ponderación lineal (*scoring*), utilidad multiatributo (MAUT), relaciones de superación y el proceso analítico jerárquico (AHP).

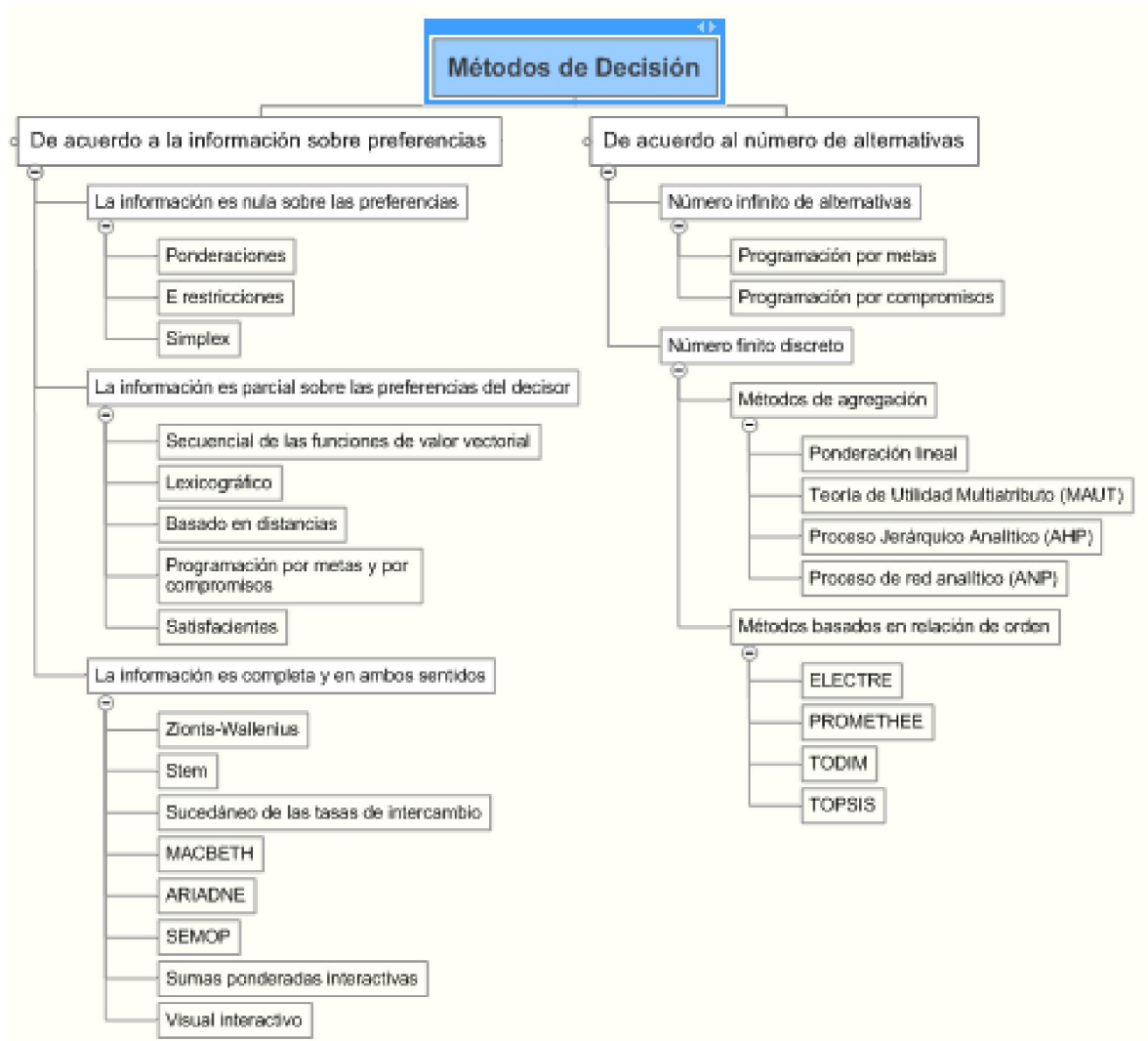
En la figura 25 se presenta un resumen detallado de la división de los métodos de decisión en general, en ella se presentan dos divisiones, los métodos de acuerdo a la información sobre las preferencias y de acuerdo al número de alternativas; este último se divide de acuerdo al número de alternativas existentes para tomar la decisión, infinito o finito discreto. Por su parte, las alternativas con un número finito se dividen en los métodos de agregación (Ponderación lineal, MUAT, AHP y ANP). La explicación detallada sobre estos métodos de decisión se observa en el trabajo desarrollado por Alarón [48].

A continuación se describen algunos de los métodos que corresponden a un número finito de alternativas; se hará énfasis en el método AHP utilizado en el desarrollo de la metodología de selección de tecnología de comunicación.

4.1.3.1 Ponderación lineal.

Este método permite abordar situaciones de incertidumbre, en donde los niveles de información son muy pocos, en él se construye una función de valor para cada una de las alternativas, supone transitividad de preferencias; es un método que puede resultar dependiente y manipulable en la asignación de las ponderaciones (pesos) de los criterios o de la escala de medida que se esté utilizando. Es un método fácil y ampliamente utilizado.

Figura 23. División de los métodos de decisión.



Fuente: El autor.

Los datos de partida del método son las valoraciones expresadas en la matriz de valoración, estos valores deben ser normalizados, de forma que los valores de los criterios, generalmente expresados en escalas diferentes, se pueden comparar sin producir sesgos. Una vez conocidos los valores normalizados y los pesos asociados a cada criterio, se realiza la suma ponderada como el cociente de los valores normalizados por el peso de cada criterio sobre los pesos de todos los

criterios. De forma tal que se obtienen las valoraciones de las alternativas y al organizarlas de mayor a menor, se obtiene la ordenación de ellas, desde la mejor alternativa hasta la menos favorable.

4.1.3.2 Utilidad Multiatributo (MAUT)

Este método considera que para cada atributo se determina una función de utilidad parcial y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada alternativa, se consigue una ordenación del conjunto de alternativas, sin embargo, no refleja la estructura de preferencia del decisor, por lo que suelen utilizarse supuestos teóricos que obliga a relajar el proceso de decisión permitiendo abordar cuestionamientos de incertidumbre y riesgos, es un método poco utilizado debido a las dificultades en su utilización y a las condiciones de incertidumbre bajo las cuales se realizan los supuestos teóricos.

Este método requiere de un interrogatorio acerca de las preferencias del decisor, las preguntas son realizadas por un analista, lo que implica personal calificado en el tema sobre el cual se esté realizando la decisión.

4.1.3.3 Relaciones de superación.

Conocidos como métodos de sobreclasificación o de superación, estos métodos intentan construir una relación de sobreclasificación intentando modelizar las mismas preferencias que posee el decisor. El concepto de sobreclasificación se concibe como la idea de aceptar un resultado menos exacto si con ello se evita introducir hipótesis matemáticas demasiado fuertes y abrumar al decisor con cuestiones demasiado difíciles. Existen dos métodos que derivan de este grupo: ELECTRE y PROMETHEE.

ELECTRE determina la alternativa dominante empleando los índices de concordancia y de discordancia en forma similar para decidir si la determinación

de una solución, que sin ser óptima puede considerarse satisfactoria y obtener una jerarquización de las alternativas bajo análisis.

PROMETHEE hace uso del concepto de pseudocriterio, el cual es la diferencia de puntaje de dos acciones respecto a algún criterio, produciendo un umbral de indiferencia. Teniendo en cuenta esta diferencia entre las alternativas, se construyen los umbrales de indiferencia y de preferencia asociados a los pseudocriterios. Estos métodos presentan inconvenientes como:

- ✓ No ofrecen la posibilidad de estructurar el problema.
- ✓ No existe una guía para determinar los pesos de los criterios o atributos.
- ✓ Requieren alto conocimiento del tema para definir los criterios.
- ✓ No asocia una sola función de utilidad a cada alternativa, ni global ni por criterio.

4.1.3.4 Proceso analítico jerárquico (AHP).

El proceso Analítico Jerárquico es un método propuesto por Saaty [49] en 1980, para tomar la decisión bajo múltiples criterios que se sustenta en la jerarquización de los criterios y alternativas del problema.

Este método se puede considerar como una técnica que permite la resolución de problemas multicriterio, multientorno y multiactores, incorporando aspectos tangibles e intangibles inherentes en el proceso de toma de decisiones; como una teoría matemática aplicada a la influencia entre alternativas respecto a un criterio o atributo; y como una filosofía para la toma de decisiones.

Las principales características del Proceso Analítico Jerárquico son:

1. Modelizar el problema mediante una jerarquía en cuyo vértice superior está el principal objetivo del problema (la meta a alcanzar) y en la base se encuentran

las alternativas a evaluar. En los niveles intermedios, se representan los criterios de evaluación; los cuales a su vez se pueden estructurar en jerarquías.

2. En cada nivel de la jerarquía se realizan comparaciones entre pares de elementos de ese nivel teniendo en cuenta la importancia de cada uno de ellos al elemento de nivel superior al que están ligados. Este proceso de comparación conduce a una escala de medida relativa de prioridades o pesos de dichos elementos. Las comparaciones se realizan por medio de ratios de preferencia, para las alternativas, o por ratios de importancia, para los criterios, que se evalúan según una escala propuesta. Se debe tener en cuenta que los pesos o prioridades relativas deben sumar la unidad.
3. La información obtenida es generalmente redundante y con cierta inconsistencia. Las matrices de comparaciones por pares contienen juicios redundantes en el sentido que en una matriz $n \times n$ se emiten $n \times (n-1)$ juicios, cuando solo se necesitan $n-1$ juicios. Sin embargo, esta redundancia resulta útil para mejorar la exactitud de los juicios y se aprovecha para reducir los errores y mejorar la consistencia de la matriz.

Después de ser evaluada la contribución de cada elemento a los elementos del nivel de la jerarquía inmediatamente superior, se calcula la contribución global de cada alternativa al objetivo principal mediante una agregación de tipo aditivo. De esta forma, el método se resume como un modelo de decisión que interpreta datos mediante la realización de juicios en una escala de razón dentro de una estructura jerárquica establecida, en función de una serie de criterios y variables.

Las etapas propuestas y explicadas por Saaty en su modelo son las siguientes:

1. Modelización: Encargada de la construcción de una estructura jerárquica en la que se representen todos los aspectos relevantes en el proceso de resolución

del problema planteado. La jerarquía debe ser completa, representativa, no redundante y minimalista.

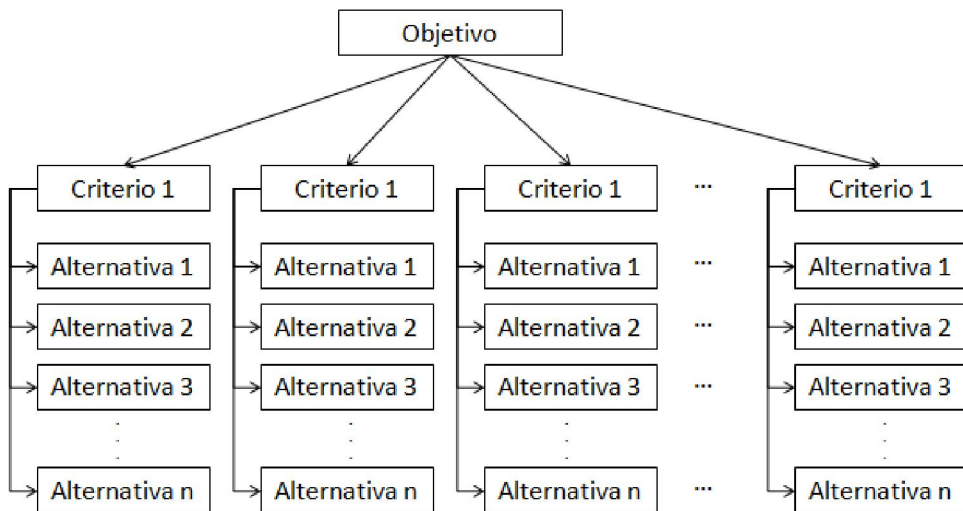
2. Valoración: En esta etapa se incorporan las preferencias mediante los juicios en las matrices de comparación. Estas matrices cuadradas reflejan la dominación relativa de un elemento sobre otro, respecto a un atributo o propiedad en común.
3. Priorización y síntesis: Esta etapa proporciona las diferentes prioridades consideradas en la resolución del problema. Una entidad es una unidad abstracta válida para cualquier escala en la que se integran las preferencias que el decisor tiene al compara aspectos tangibles o intangibles. Se deben considerar tres tipos de prioridades, las locales, las cuales son las prioridades que los elementos de un nodo común; las globales, que son la importancia de esos elementos respecto a la meta global; y la final, el método empleado generalmente en el proceso analítico jerárquico para la agregación es el equivalente a la suma ponderada.
4. Análisis de sensibilidad: La última etapa consiste en examinar el grado de sensibilidad del resultado obtenido en una decisión al realizar cambios en las prioridades de los criterios principales de un problema. Se realiza un cambio en la prioridad de un determinado criterio manteniendo las proporciones de las prioridades de los otros criterios, de tal forma que todos los criterios, incluido el criterio modificado, siga manteniendo la unidad en la suma ponderada.

Para desarrollar las etapas descritas anteriormente se deben realizar los siguientes pasos:

Estructuración del problema como una jerarquía: Consiste en modelar el problema de decisión que se pretende resolver como una jerarquía. En la figura 24 se presenta la forma general de la estructura de una jerarquía.

En el vértice superior se encuentra el objetivo que se desea alcanzar, el problema de decisión consiste en elegir la alternativa que mejor contribuya a la consecución del objetivo superior de la jerarquía. En el nivel inmediatamente inferior al del objetivo, se encuentran situados los criterios, los cuales corresponden a los atributos, objetivos secundarios o parámetros que constituyen el eje fundamental del método.

Figura 24. Forma general de la jerarquización del AHP



Fuente: Adaptado de Nataraj. Issues in Information System. [50]

Después de definir los criterios, puede que estos se descompongan en otros subcriterios, formando de esta forma otra jerarquía en otro nivel de la principal. En

el último escalón de la jerarquía se ubican las alternativas, las cuales son el conjunto de posibilidades con las cuales el decisor cuenta para realizar la decisión.

Establecimiento de las prioridades entre los criterios: En este paso se construye un vector de prioridades o pesos que evalúa la importancia relativa que el decisor otorga a cada criterio; la clave de este paso es asignar un valor numérico a cada criterio que represente la preferencia del decisor de un criterio frente a otro. Para ello, existen dos estrategias, asignación directa o asignación indirecta.

a. Asignación directa: El decisor debe realizar una valoración sobre la importancia del criterio en términos cualitativos y después remitirse a una escala para obtener los valores numéricos que se corresponden con su valoración. Por ello, antes de realizar la valoración, se debe determinar la escala o valoración cuantitativa que se desea utilizar. Ejemplos de escalas de asignación directa se pueden observar en la tabla 9. Obtenidas las valoraciones, se deben normalizar.

Tabla 9. Escalas de asignación directa.

Valoración cualitativa	Valoración cuantitativa	
	Escala simple	Escala de Saaty
Muy débil	1	1
Débil	2	3
Moderada	3	5
Fuerte	4	7
Muy fuerte	5	9

Fuente: García. Tesis Doctoral. [47]

- b. Asignación indirecta:** Como segunda alternativa de asignación de valores para la ponderación de los pesos de los criterios, se emplea la asignación indirecta, en esta, el decisor debe realizar una valoración sobre la importancia del criterio verbalizada en términos cualitativos y después acudir a una escala para obtener los valores numéricos que corresponden con su valoración. La escala sugerida es la propuesta por Saaty y es la siguiente:

Tabla 10. Escala fundamental de Saaty.

Escala numérica	Escala verbal	Explicación
1	Igual importancia	Dos actividades contribuyen por igual al objetivo
3	Importancia moderada de un elemento sobre el otro.	La experiencia y el juicio están a favor de un elemento sobre el otro
5	Importancia fuerte de un elemento sobre el otro.	Un elemento es fuertemente favorecido
7	Importancia muy fuerte de un elemento sobre el otro.	Un elemento es muy dominante
9	Extrema importancia de un elemento sobre el otro	Un elemento es favorecido por al menos un orden de magnitud de diferencia
2,4,6,8	Valores intermedios entre dos juicios adyacentes	Se usan como compromiso entre dos juicios
Incrementos 0, 1	Valores intermedios en incrementos	Utilización para graduación más fina de juicios.

Fuente: García. Tesis Doctoral. [47]

El decisor debe establecer las prioridades mediante comparaciones entre pares, para determinar los pesos relativos de los criterios; los números de la escala

fundamental representan la proporción en la que uno de los elementos domina al otro con respecto a una propiedad o criterio que tienen en común. El elemento menor tiene el recíproco o inverso respecto al mayor.

Para determinar los pesos de los criterios, se debe construir una matriz R , de tal modo que el término r_{ij} representa la prioridad relativa entre el criterio C_i y el criterio C_j respecto de la meta del problema. Este término será mayor, igual o menor a la unidad dependiendo de cuál de los dos criterios sea más importante para el logro de la meta. La matriz obtenida tendrá la forma:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & \cdots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde $r_{ij} \cdot r_{ji} = 1$. Una matriz con esta propiedad se denomina matriz recíproca. Después de obtener la matriz recíproca, se deben establecer las prioridades de los criterios, w_i , empleando los conceptos matemáticos de valor propio (autovalor) y vector propio (autovector). De tal forma que si los pesos w_i , $i = 1, 2, \dots, n$; fueran conocidos, la matriz de comparaciones pareadas sería la siguiente:

$$W = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \cdots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \cdots & w_n/w_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Para obtener el vector de pesos a partir de la matriz anterior, se debe resolver el siguiente sistema de ecuaciones:

$$W \cdot w = \lambda w \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde λ es un valor propio de W y w el vector propio asociado. Como la suma de los valores propios de una matriz es igual a su traza (suma de los elementos de la diagonal principal) y todos los elementos de la diagonal principal son iguales a la unidad, puede decirse que el único valor propio distinto de cero de W es igual a la dimensión de la matriz, es decir, a n ($\lambda = n$).

Se puede observar que la suma de los elementos de la matriz de cualquier columna j es igual a:

$$\frac{1}{w_j} \sum_{i=1}^n w_i = \frac{1}{w_j} \quad (5)$$

Si se normaliza la matriz W mediante la suma de las columnas, en cada una de ellas, se obtiene el vector w , por lo que el promedio de cualquier fila i será igual a w_i .

Como los pesos no son conocidos y la matriz de comparaciones R se construye a partir de los juicios del decisor, los que no son totalmente consistentes, la matriz R puede tomarse como una perturbación de la matriz W . De ahí que puede poseer más de un valor propio distinto de cero. El máximo valor propio está asociado a un vector propio z y se considera como una buena aproximación del vector de prioridades o pesos w , de tal forma que se puede escribir como:

$$R \cdot w = \lambda_{max} w \quad (6)$$

Basado en los conceptos presentados previamente, Saaty propuso estimar el vector de pesos aplicando el siguiente procedimiento:

Obtener la matriz normalizada R_{Norm} , dividiendo cada elemento de la columna j -ésima por la suma de todos los elementos de dicha columna.

$$R_{Norm} = \left[r_{ijNorm} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \right] \quad (7)$$

Estimar el vector de pesos w calculando el promedio de cada fila de la matriz normalizada. El vector de pesos será igual a:

$$w = \left[w_1 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{1jNorm}, w_{12} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{2jNorm}, \dots, w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{ijNorm}, \dots, w_n = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n r_{njNorm} \right] \quad (8)$$

Comprobación de la consistencia de los juicios: Si la matriz R fuera completamente consistente entonces el λ_{max} sería igual a n . Teniendo en cuenta que el decisor cometerá ciertas inconsistencias en sus juicios y por ello resulta conveniente medir el grado de inconsistencia dado que si no se ha sido cuidadoso con las valoraciones, el vector de pesos obtenido puede ser poco representativo. La consistencia se mide mediante el índice de consistencia IC que se expresa como:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

La medida obtenida puede emplearse para mejorar la consistencia de los juicios si se compara con el número apropiado de la tabla 11, que recoge el índice de consistencia aleatorio IA , el cual está definido como el índice de consistencia aleatorio medio obtenido mediante la simulación de 100.000 matrices reciprocas generadas aleatoriamente utilizando la escala de Saaty.

Tabla 11. Índice de consistencia aleatoria IA

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0.525	0.882	1.115	1.252	1.341	1.404
n	9	10	11	12	13	14	15	16
RI	1.452	1.484	1.513	1.535	1.555	1.570	1.583	1.595

Fuente: García. Tesis Doctoral. [47]

Al calcular el cociente entre el índice de consistencia IC y el índice de consistencia aleatorio IA, se obtiene el denominado ratio de consistencia RC; teniendo en cuenta que si RC igual a cero entonces la matriz es consistente; si RC es menor o igual a 0,10 entonces la matriz R presenta una inconsistencia admisible lo que implica que se le considera consistente y el vector de pesos obtenido se admite como válido; pero para el caso en donde RC es mayor a 0,10 la inconsistencia es inadmisibles y se aconseja revisar los juicios emitidos por el decisor.

Para calcular el índice de consistencia, el valor de λ_{max} se obtiene de la ecuación $R \cdot w = \lambda_{max} w$, se multiplica la matriz R por el vector w y se obtiene un vector columna, luego, cada componente del vector columna obtenido se divide por las del vector w y se genera otro vector columna formado por los valores propios de la matriz R, se promedian los valores obtenidos y se obtiene λ_{max} .

Establecimiento de las prioridades locales entre los subcriterios: Si en la modelización del problema de decisión como una jerarquía se ha considerado la descomposición de algunos de los criterios en subcriterios, antes de continuar, se debe calcular el vector de pesos asociados a dichos subcriterios. El procedimiento es el mismo que se ha descrito previamente, realizando las comparaciones

pareadas entre los subcriterios para determinar su importancia relativa respecto del criterio superior en la jerarquía.

Establecimiento de las prioridades locales entre las alternativas: Después de obtener la ponderación de los criterios y subcriterios en los pasos anteriores, se procede a la valoración de las alternativas para así poder calcular las prioridades locales correspondientes. Para ello, con cada criterio o subcriterios se plantea la matriz R de juicios por comparación pareada entre alternativas. El procedimiento es el mismo descrito en el paso 2 y la escala es la misma mostrada en la tabla 11.

Planteada la matriz R de comparaciones entre alternativas, se procede a calcular el vector de pesos y el índice de consistencia de los juicios. Una vez realizadas las operaciones, si el índice de consistencia es aceptable, se obtiene un vector de pesos locales de las alternativas.

Establecimiento de las prioridades totales asociadas a cada alternativa: Al obtener los vectores de prioridad de todas las alternativas respecto de cada subcriterio, se obtiene una matriz, que se multiplica por el vector de prioridades de los subcriterios respecto al criterio del cual se desprenden. De forma tal que se obtiene el vector de preferencias de cada alternativa con respecto a ese criterio, repitiendo el procedimiento para cada criterio.

Luego se obtienen tantos vectores de prioridad de las alternativas respecto de los criterios como criterios existan y con ellos se construye una matriz que se multiplica por el vector de prioridades de cada alternativa respecto del objetivo principal. Esto permite determinar cuál alternativa es la más conveniente para la solución del problema planteado.

Análisis de sensibilidad: El último paso de la metodología consiste en realizar un análisis de sensibilidad que confirme que realmente los resultados obtenidos son

robustos. Este análisis consiste en realizar variaciones en el valor de un peso y observar numérica como afecta al resto de pesos del problema y a la priorización de las alternativas.

Los anteriores pasos se han emplean en diversas aplicaciones, son ejemplo los siguientes trabajos:

Nataraj [50] propone un proceso analítico jerárquico para la fabricación de ductos en la industria petrolera. Su matriz de comparación presenta criterios de longitud, operatividad, mantenimiento, accesibilidad, forma de construcción, medio ambiente; su jerarquía contiene un solo nivel antes de evaluar las alternativas. Su principal peso (prioridad) radica en la longitud del ducto a construir, obteniendo un 0.28.

Martínez [51] presenta la “Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME”, los criterios que el autor maneja son el coste, la visibilidad, los clientes y la competencia y las alternativas que emplea son Centro comercial Centro, Centro Comercial Fuera, Calle y Comercial. Para realizar los cálculos de los pesos (prioridades) emplea el software Expert Choice.

Mei et al [52] presentan la aplicación del proceso jerárquico para la administración y políticas de los recursos hídricos de Beijing. La estructura de la jerarquía está compuesta por el objetivo: resolver las reservas de agua en la ciudad; ocho objetivos secundarios para garantizar diversos usos del agua, este es el segundo nivel; ocho criterios y veinticuatro políticas de ahorro (alternativas).

Cortés, García y Aragonés [53] proponen una alternativa para la selección de banda ancha en la Universidad Nacional de Colombia, ellos emplean el proceso analítico jerárquico para escoger entre LMDS, ADSL, Cable Modem y fibra óptica, la mejor para soportar las conexiones de red de la universidad. Definen tres

criterios: tecnológico, financiero y de calidad y subcriterios para cada uno, ancho de banda, número de equipos, disponibilidad y tiempo de instalación; costo de instalación y costo de suscripción mensual; y seguridad y mantenimiento; respectivamente. Realizan el método de ponderación para cada criterio y con base en esto clasifican el ranking de alternativas.

Existen múltiples ejemplos en donde se emplea el proceso analítico jerárquico, los anteriores son algunos de ellos, sin embargo en [54], [55], [56] y [57] se pueden observar otros ejemplos de la aplicación del proceso.

4.2 PROPUESTA DE METODOLOGIA DE SELECCIÓN DE TECNOLOGIA DE COMUNICACIÓN.

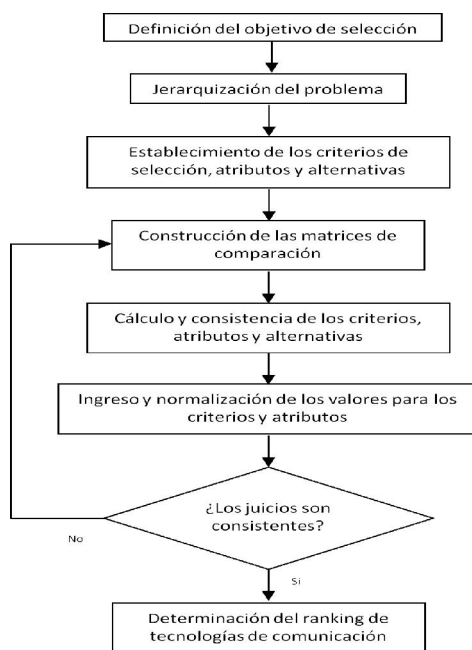
En la figura 23 se muestra la división que se podría considerar a la hora de clasificar los tipos de métodos de decisión que existen (se debe tener en cuenta que no todos los métodos podrían estar incluidos en la figura 23), sin embargo, esta división conlleva a la eliminación de los métodos teniendo en cuenta el proceso de selección que se requiere para el trabajo de investigación.

Uno de las características que se tuvo en cuenta fue el tipo de información que se requiere para realizar la selección, como lo indica la figura, las posibilidades eran dos, de acuerdo a la información sobre las preferencias o de acuerdo al número de posibilidades que existieran; para esta investigación, la información sobre las preferencias depende del tipo de decisor que la empresa designe, por ello no es viable que se escoja estos tipos de métodos y además, se conoce el número exacto de posibilidades de comunicación que existe en el entorno (correspondiente a seis tecnologías de comunicación, 4 como prestación de servicios de empresas de servicios públicos y dos de carácter privado).

Teniendo en cuenta lo anterior, y de acuerdo a la figura, solo quedan los 4 métodos que se describen en la sección 4.1.3 y en donde se presentan las principales características de cada uno de los métodos, siendo el método analítico jerárquico el que presenta una estructura más favorable para realizar la propuesta de selección de tecnología. Uno de los factores más importantes es la jerarquía, la cual permite que se dividan los niveles en subniveles y se estructure el método de acuerdo al esquema presentado en la figura 25. Además, este método permite medir el nivel de consistencia mediante ecuaciones que relacionan las ponderaciones dadas por los decisores y las mediciones obtenidas de los parámetros medidos en las pruebas de campo.

A continuación se describe la metodología propuesta para la selección de tecnología de comunicación.

Figura 25. Metodología propuesta para la selección de tecnologías de comunicación.



Fuente: El autor.

4.2.1 Definición del objetivo de selección.

Para aplicar el proceso analítico jerárquico, inicialmente se debe definir el objetivo a alcanzar, por ello, inicialmente se debe definir la meta que se pretende lograr con el proceso de selección de tecnología de comunicación.

4.2.2 Establecimiento de los criterios de selección, atributos y alternativas.

En esta parte de la metodología es necesario definir los criterios de selección, estos son aquellos aspectos de primer nivel (mayor importancia) para tomar la decisión sobre la selección. Sin embargo, existe la posibilidad de tener en cada criterio definido, una división, que corresponde a los atributos del criterio, por lo cual es necesario definir cuales atributos son relevantes para cada criterio. Por último, en la capa inferior de la jerarquía, se deben definir las alternativas de comunicación con las que se cuentan y con las cuales se realizará el *ranking* de opciones para la selección.

4.2.3 Modelización de la estructura jerárquica.

En esta etapa se estructura el esquema jerárquico del problema mediante la organización de los niveles que componen la jerarquía compuesta por los criterios de selección, atributos y alternativas.

4.2.4 Cálculo y consistencia de las prioridades de los atributos técnicos.

Este paso indica que se deben calcular las prioridades (o pesos) de cada uno de los atributos y compararlos con los teóricos para comprobar su consistencia. Estos cálculos se deben realizar de acuerdo a las asignaciones dadas por el decisor con las ecuaciones 1, 6, 7 y 8; y comprobar su consistencia con los valores presentados en la tabla 11, la cual contiene el índice de consistencia aleatorio.

4.2.5 Cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios de selección.

De forma similar al punto anterior, se deben realizar los cálculos para conocer las prioridades de los criterios de selección, realizando la comparación con el índice de consistencia de la tabla 11.

4.2.6 Ingreso y normalización de los valores para los atributos

Inicialmente se requiere conocer los valores de los atributos a evaluar, después de ingresados, se debe dividir sobre el máximo (o mínimo) teniendo en cuenta la normalización que se desee realizar; esto es, si el valor de entrada se desempeña mejor cuando es mayor, la división se realiza sobre el mayor; por el contrario, si el menor valor es el de mejor desempeño, entonces el cociente se realiza sobre el mínimo valor de entrada.

4.2.7 Ingreso y normalización de los valores para los criterios de selección.

De forma parecida a la normalización de los valores para los atributos, la normalización de los criterios de selección se realiza teniendo en cuenta el máximo (o mínimo) valor de entrada para realizar el cociente y determinar la normalización de los valores de entrada.

4.2.8 Análisis de sensibilidad

Como se describió anteriormente, se debe variar las prioridades y observar el comportamiento de los resultados obtenidos, de tal forma que se analice la robustez del proceso de selección, determinando cuales valores son los más apropiados para realizar las valoraciones de las prioridades.

4.2.9 Ranking de alternativas de comunicación.

Después de haber realizado las normalizaciones, de determinar las prioridades y de analizar el proceso, se realiza la suma de los productos de las prioridades con los valores normalizados y se ordenan de mayor a menor, obteniendo el ranking

de las alternativas. Cabe resaltar que en ningún caso deben sobrepasar la unidad, debido a la normalización aplicada y a las ecuaciones referenciadas previamente.

4.3 VALIDACIÓN DE LA METODOLOGIA PROPUESTA PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE COMUNICACIÓN PARA SITELRED.

A continuación se presenta la validación de la metodología propuesta para evaluar las tecnologías de comunicación existentes en Bucaramanga y clasificar el orden de estas para escoger la de mejor desempeño en el proyecto SITELRED.

4.3.1 Definición del objetivo de selección.

El objetivo para la propuesta de selección es: Escoger la tecnología de comunicación para la transmisión de los datos obtenidos en el prototipo de sistema de telemetría de la ESSA E.S.P. basado en los atributos técnicos (ancho de banda, throughput, latencia y tiempo de descarga), la disponibilidad de las tecnologías de comunicación en el área del municipio de Bucaramanga y el precio de instalación de la tecnología en el nodo a evaluar.

4.3.2 Establecimiento de los criterios de selección, atributos y alternativas.

Se han definido tres criterios de selección, estos son: criterio técnico el cual corresponde a los resultados obtenidos de las mediciones realizadas en las campañas de pruebas desarrolladas; la disponibilidad de la tecnología en el municipio de Bucaramanga y el valor de instalación de un nodo correspondiente a cada alternativa de comunicación.

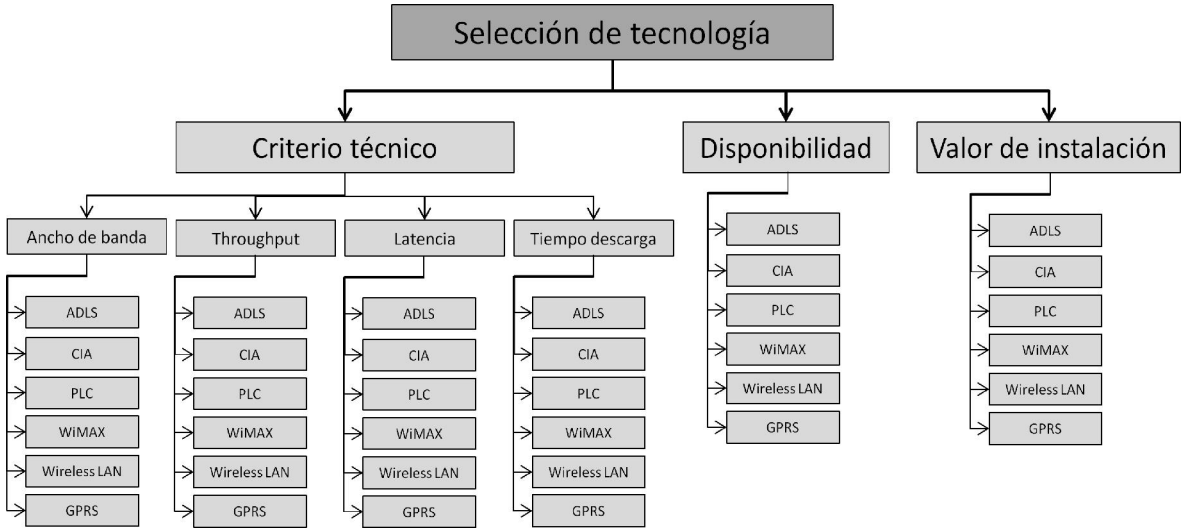
Existe una ramificación en el criterio técnico, el cual da lugar a los atributos técnicos, siendo estos los resultados obtenidos en las campañas de mediciones; estos corresponden a las mediciones de ancho de banda, throughput, latencia y tiempo de descarga de archivos.

Por último, las alternativas de comunicación existentes en Bucaramanga son ADLS, contratada con la empresa Telebucaramanga; CIA y WiMAX, contratadas con la empresa UNE EPM; GPRS, contratada con la empresa COMCEL; Wireless LAN y PLC, el equipamiento de estas dos tecnologías es de propiedad de la ESSA.

4.3.3 Modelización de la estructura jerárquica.

En la figura 26 se presenta la estructura jerárquica para la aplicación de la metodología de selección de tecnología de comunicación. En ella se observa la ramificación existente para el criterio técnico mencionado previamente.

Figura 26. Jerarquización del proceso de selección.



Fuente: El autor.

4.3.4 Cálculo y consistencia de las prioridades de los atributos técnicos.

Tomando como referencia el análisis descrito en la sección 4.1.3.4, en la tabla 12 se describen los pasos para calcular los valores de las prioridades de los atributos técnicos y su consistencia.

Tabla 12. Etapas para el cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios y atributos.

Tópico	Descripción
Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor.	Realizar la asignación de los valores de acuerdo a la preferencia del decisor, tomando como referencia la escala fundamental de Saaty (Tabla 10).
Normalización de la matriz asignada por el decisor.	Tomar cada elemento de la matriz elaborada previamente y calcular el cociente entre el elemento y la suma de los componentes de la columna a la cual pertenece.
Cálculo del vector de pesos.	Calcular el promedio de las filas que componen la matriz normalizada.
Obtención de los valores propios individuales de la matriz.	Hallar el producto de cada componente del vector columna de pesos con cada término fila de la matriz no normalizada, luego sumar cada multiplicación obteniendo los valores propios de la matriz. Después dividir la suma de multiplicaciones entre el vector de pesos.
Obtención del valor propio único.	Calcular el promedio de valores propios individuales.
Cálculo del índice de consistencia.	Aplicar la ecuación 9.
Determinación del índice de consistencia aleatorio.	Observar la dimensión de la matriz y obtener el índice de consistencia aleatorio mediante la tabla 11.
Cálculo del ratio de consistencia.	Dividir el índice de consistencia calculado entre el índice de consistencia aleatorio.

Fuente: El autor.

4.3.5 Cálculo y consistencia de las prioridades de los criterios de selección.

Se debe aplicar el procedimiento descrito en la tabla 12 para realizar el cálculo y consistencia de los criterios de selección de tecnología de comunicación.

4.3.6 Ingreso y normalización de los valores para los atributos

Teniendo en cuenta que los atributos técnicos escogidos para realizar la evaluación de los sistemas de comunicación son ancho de banda, throughput, latencia y duración de descarga de archivos, se deben ingresar los valores obtenidos en las campañas de medición y normalizar con respecto al de mejor desempeño, esto es, para ancho de banda y throughput las mayores mediciones son las de mejor desempeño, por ello, la división se realiza con respecto a la mayor medida obtenida entre las seis alternativas de comunicación. Por el contrario, para realizar la normalización de la latencia y de la duración de descarga de archivos, el mejor desempeño cuando la medida obtenida es la menor, en este caso, la división se realiza entre el mínimo obtenido de las seis sobre el dato que se está normalizando.

4.3.7 Ingreso y normalización de los valores para los criterios de selección.

Los criterios de selección escogidos para la evaluación de los sistemas de comunicación son los atributos técnicos, la disponibilidad de la tecnología en el municipio de Bucaramanga y el valor de instalación de un nodo. De acuerdo al paso anterior, los atributos técnicos no requieren normalización debido a que los valores obtenidos son los resultados de la capa inferior de la jerarquía; por otro lado, los valores de la disponibilidad no requieren ser normalizados debido a que estos son datos binarios, es decir, uno (1) si existe disponibilidad de la tecnología evaluada y cero (0) si no existe; por último, el valor de instalación si requiere ser normalizado y se obtiene calculando el cociente entre el menor valor de instalación de las seis tecnologías y el valor de la tecnología que se está normalizando.

4.3.8 Análisis de sensibilidad

Previamente se definió el análisis de sensibilidad como la variación de las prioridades dadas por el decisor para observar el comportamiento de la consistencia de las evaluaciones obtenidas en la aplicación del proceso analítico

jerárquico. Los resultados del análisis de sensibilidad se presentan en el anexo G, a continuación se presentan las ecuaciones que se definieron para realizar la evaluación de los sistemas de comunicación.

Tomando como referencia la jerarquía presentada en la figura 28, se diseña la ecuación de evaluación de alternativas de comunicación, con ella se organizan las evaluaciones individuales de las tecnologías de comunicación para obtener el orden de desempeño de ellas. La ecuación de evaluación es:

$$A_i = P_1 T e_i + P_2 p_i + P_3 D_i \quad (10)$$

En donde A_i hace referencia al resultado obtenido de la evaluación individual de cada alternativa de comunicación, el rango de valores de este resultado oscila entre 0 y 1, siendo 0 el de más bajo rendimiento y 1 el de mejor desempeño; P_1 es el valor de la prioridad asignado por el decisor para valorar la importancia de los atributos técnicos; P_2 hace referencia al valor de la prioridad del precio de instalación de un nodo, este se calcula tomando como referencia la asignación dada por el decisor; y P_3 corresponde a la ponderación de la disponibilidad asignada por el decisor.

El término p_i representa el precio normalizado de cada una de las alternativas, D_i es la disponibilidad de la tecnología asignada de forma binaria, esto indica que si la tecnología está presente en Bucaramanga entonces se representa con un uno (1) y si no se encuentra se asigna un cero (0) y $T e_i$ representa la valoración de los atributos técnicos; donde $i=1, \dots, 6$, donde 1 es la primera alternativa y 6 la última. EL término $T e_i$ se explica a continuación:

$$T e_i = P_{tr} T r_i + P_{Bw} B w_i + P_L L_i + P_T T_i \quad (11)$$

T_{e_i} hace referencia a los cálculos individuales de los atributos técnicos, como ya se había explicado. P_{Tr} es la ponderación asignada por el decisor para el throughput de cada tecnología de comunicaciones; P_{BW} corresponde a la asignación dada por el decisor para la valoración del ancho de banda de cada una de las alternativas, P_L es la valoración para la latencia y P_T es la valoración del decisor para la duración de la descarga de archivos.

Por último, Tr_i , Bw_i , L_i y T_i corresponden a los valores medidos y normalizados del throughput, ancho de banda, latencia y duración de descarga de archivos respectivamente.

4.3.9 Ranking de alternativas de comunicación.

Para finalizar con la evaluación de las tecnologías, se ordenan descendientemente los valores obtenidos de la variable A_i . De esta forma se obtiene el orden para seleccionar la tecnología de comunicación que mejor se desempeñe teniendo en cuenta los aspectos técnicos, la disponibilidad y el precio de instalación de un nodo.

4.3.10 Ejemplo de validación de los cálculos y ranking de tecnologías.

A continuación se presenta un ejemplo para el desarrollo de la selección de tecnología de comunicación, para los atributos técnicos se toman valores medidos, los precios de los servicios de datos son los actuales o los valores de implementación, además, se considerará que existe la disponibilidad de todas las tecnologías. Al realizar los cálculos de las prioridades, se considerará preferencia máxima del throughput y del tiempo de descarga frente al ancho de banda y a la latencia, estas preferencias se pueden observar en el tópico “Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los atributos técnicos”.

Por otro lado, se considerará una importancia leve de los aspectos técnicos frente a la disponibilidad, y una importancia fuerte del valor de instalación frente a la disponibilidad. Estos datos se pueden observar en la tabla 13 en el tópico “Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los criterios de selección”

Tabla 13. Ejemplo de selección de tecnología aplicando AHP.

Tópico	Representación				
Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los atributos técnicos.	Asignación de las ponderaciones dadas por el decisor				
		Throughput	A. de banda	Latencia	D. descarga
	Throughput	1	9	9	1
	A. de banda	1/9	1	1	1/9
	Latencia	1/9	1	1	1/9
	D. descarga	1	9	9	1
Normalización de la matriz asignada para los atributos técnicos por el decisor.	Matriz normalizada				
		Throughput	A. de banda	Latencia	D. descarga
	Throughput	0,45	0,45	0,45	0,45
	A. de banda	0,05	0,05	0,05	0,05
	Latencia	0,05	0,05	0,05	0,05

	<table border="1"> <tr> <td>D. descarga</td> <td>0,45</td> <td>0,45</td> <td>0,45</td> <td>0,45</td> </tr> </table> <p>La normalización se calcula tomando el elemento a normalizar y dividiéndolo entre la suma de la columna a la cual pertenece.</p>	D. descarga	0,45	0,45	0,45	0,45															
D. descarga	0,45	0,45	0,45	0,45																	
Cálculo del vector de pesos de los atributos técnicos.	Al realizar el cálculo de cada peso, se obtienen los resultados para P_{tr} , P_{Bw} , P_L y P_T . Este valor se calcula promediando las filas de la matriz anterior.																				
Obtención de los valores propios individuales de la matriz de los atributos técnicos.	Los cuatro valores propios dan como resultado 4.																				
Obtención del valor propio único de los atributos técnicos.	El valor propio único calculado mediante el promedio del vector anterior da como resultado 4																				
Cálculo del índice de consistencia de los atributos técnicos.	Al aplicar la ecuación 9, se obtiene el índice de consistencia, dando como resultado 0.																				
Determinación del índice de consistencia aleatorio de los atributos técnicos.	La dimensión de la matriz es cuatro, por lo que el índice de consistencia aleatorio para esta dimensión corresponde a 0,882																				
Cálculo del ratio de consistencia de los atributos técnicos.	EL cálculo del ratio de consistencia corresponde a 0, debido a que es la división entre el índice de consistencia calculado y el índice de consistencia aleatorio. Si el ratio de consistencia es mayor a 0,10 entonces las asignaciones del decisor son inconsistentes.																				
Elaboración de la matriz de valores asignados por el decisor para los criterios de selección.	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="4">Asignación de las ponderaciones dadas por el decisor</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Técnicos</th> <th>Precio</th> <th>Disponibilidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Técnicos</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>2</td> </tr> <tr> <th>Precio</th> <td>1</td> <td>1</td> <td>4</td> </tr> <tr> <th>Disponibilidad</th> <td>1/2</td> <td>1/4</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>	Asignación de las ponderaciones dadas por el decisor					Técnicos	Precio	Disponibilidad	Técnicos	1	1	2	Precio	1	1	4	Disponibilidad	1/2	1/4	1
Asignación de las ponderaciones dadas por el decisor																					
	Técnicos	Precio	Disponibilidad																		
Técnicos	1	1	2																		
Precio	1	1	4																		
Disponibilidad	1/2	1/4	1																		

	En los recuadros sombreados se deben asignar las preferencias por parte del decisor, teniendo en cuenta que se toma el nivel de importancia del elemento fila sobre el elemento columna. Los criterios de la diagonal principal tienen definido el valor 1. Las preferencias de los elementos columna sobre las filas es el recíproco del asignado por el decisor.																				
Normalización de la matriz asignada para los criterios de selección por el decisor.	<table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th colspan="4" style="text-align: center;">Matriz normalizada</th> </tr> <tr> <th></th> <th>Técnicos</th> <th>Precio</th> <th>Disponibilidad</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Técnicos</th> <td style="text-align: center;">0,400</td> <td style="text-align: center;">0,444</td> <td style="text-align: center;">0,286</td> </tr> <tr> <th>Precio</th> <td style="text-align: center;">0,400</td> <td style="text-align: center;">0,444</td> <td style="text-align: center;">0,571</td> </tr> <tr> <th>Disponibilidad</th> <td style="text-align: center;">0,200</td> <td style="text-align: center;">0,111</td> <td style="text-align: center;">0,143</td> </tr> </tbody> </table> <p>La normalización se calcula tomando el elemento a normalizar y dividiéndolo entre la suma de la columna a la cual pertenece.</p>	Matriz normalizada					Técnicos	Precio	Disponibilidad	Técnicos	0,400	0,444	0,286	Precio	0,400	0,444	0,571	Disponibilidad	0,200	0,111	0,143
Matriz normalizada																					
	Técnicos	Precio	Disponibilidad																		
Técnicos	0,400	0,444	0,286																		
Precio	0,400	0,444	0,571																		
Disponibilidad	0,200	0,111	0,143																		
Cálculo del vector de pesos de los criterios de selección.	Al realizar el cálculo de cada peso, se obtienen los resultados para P_1 , P_2 y P_3 . Este valor se calcula promediando las filas de la matriz anterior.																				
Obtención de los valores propios individuales de la matriz de los criterios de selección.	Los cuatro valores propios dan como resultado 3,075; 3,078 y 3,02																				
Obtención del valor propio único de los criterios de selección.	El valor propio único calculado mediante el promedio del vector anterior da como resultado 3,051																				
Cálculo del índice de consistencia de los criterios de selección.	Al aplicar la ecuación 9, se obtiene el índice de consistencia, dando como resultado 0,026																				
Determinación del índice de consistencia aleatorio de los criterios de selección.	La dimensión de la matriz es tres, por lo que el índice de consistencia aleatorio para esta dimensión corresponde a 0,525																				
Cálculo del ratio de																					

consistencia de los criterios de selección.	El cálculo del ratio de consistencia corresponde a 0,05, debido a que es la división entre el índice de consistencia calculado y el índice de consistencia aleatorio. Si el ratio de consistencia es mayor a 0,10 entonces las asignaciones del decisor son inconsistentes.																																																																														
Ingreso de los valores de los atributos técnicos throughput, ancho de banda, latencia y duración de descarga	<table border="1" data-bbox="594 499 1468 1117"> <thead> <tr> <th colspan="6">Atributos técnicos</th> </tr> <tr> <th colspan="6">Throughput [Kbps]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ADSL</td> <td>474</td> <td>CIA</td> <td>616</td> <td>PLC</td> <td>3742</td> </tr> <tr> <td>GPRS</td> <td>38</td> <td>WiMAX</td> <td>731</td> <td>Wireless</td> <td>2279</td> </tr> <tr> <th colspan="6">Ancho de banda [Kbps]</th> </tr> <tr> <td>ADSL</td> <td>619</td> <td>CIA</td> <td>651</td> <td>PLC</td> <td>7302</td> </tr> <tr> <td>GPRS</td> <td>85</td> <td>WiMAX</td> <td>813</td> <td>Wireless</td> <td>5276</td> </tr> <tr> <th colspan="6">Latencia [segundos]</th> </tr> <tr> <td>ADSL</td> <td>1,66</td> <td>CIA</td> <td>0,46</td> <td>PLC</td> <td>11,07</td> </tr> <tr> <td>GPRS</td> <td>1,1</td> <td>WiMAX</td> <td>0,7</td> <td>Wireless</td> <td>1,63</td> </tr> <tr> <th colspan="6">Duración de descarga [segundos]</th> </tr> <tr> <td>ADSL</td> <td>4,2</td> <td>CIA</td> <td>5,1</td> <td>PLC</td> <td>0,05</td> </tr> <tr> <td>GPRS</td> <td>65,4</td> <td>WiMAX</td> <td>3,6</td> <td>Wireless</td> <td>2,0</td> </tr> </tbody> </table> <p data-bbox="594 1159 1468 1285">Los datos ingresados en la tabla (sombreados) son los promedios obtenidos durante las campañas de medidas realizadas para cada tecnología de comunicación. El archivo descargado es de 256 Kbytes.</p>	Atributos técnicos						Throughput [Kbps]						ADSL	474	CIA	616	PLC	3742	GPRS	38	WiMAX	731	Wireless	2279	Ancho de banda [Kbps]						ADSL	619	CIA	651	PLC	7302	GPRS	85	WiMAX	813	Wireless	5276	Latencia [segundos]						ADSL	1,66	CIA	0,46	PLC	11,07	GPRS	1,1	WiMAX	0,7	Wireless	1,63	Duración de descarga [segundos]						ADSL	4,2	CIA	5,1	PLC	0,05	GPRS	65,4	WiMAX	3,6	Wireless	2,0
Atributos técnicos																																																																															
Throughput [Kbps]																																																																															
ADSL	474	CIA	616	PLC	3742																																																																										
GPRS	38	WiMAX	731	Wireless	2279																																																																										
Ancho de banda [Kbps]																																																																															
ADSL	619	CIA	651	PLC	7302																																																																										
GPRS	85	WiMAX	813	Wireless	5276																																																																										
Latencia [segundos]																																																																															
ADSL	1,66	CIA	0,46	PLC	11,07																																																																										
GPRS	1,1	WiMAX	0,7	Wireless	1,63																																																																										
Duración de descarga [segundos]																																																																															
ADSL	4,2	CIA	5,1	PLC	0,05																																																																										
GPRS	65,4	WiMAX	3,6	Wireless	2,0																																																																										
Normalización de los valores de los atributos técnicos.	<table border="1" data-bbox="594 1436 1468 1856"> <thead> <tr> <th colspan="6">Normalización de las mediciones ingresadas</th> </tr> <tr> <th colspan="3">Throughput</th> <th colspan="3">Ancho de banda</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ADSL</td> <td>Tr_1</td> <td>0,126</td> <td>ADSL</td> <td>Bw_1</td> <td>0,084</td> </tr> <tr> <td>GPRS</td> <td>Tr_2</td> <td>0,010</td> <td>GPRS</td> <td>Bw_2</td> <td>0,011</td> </tr> <tr> <td>CIA</td> <td>Tr_3</td> <td>0,164</td> <td>CIA</td> <td>Bw_3</td> <td>0,089</td> </tr> <tr> <td>WiMAX</td> <td>Tr_4</td> <td>0,195</td> <td>WiMAX</td> <td>Bw_4</td> <td>0,111</td> </tr> <tr> <td>PLC</td> <td>Tr_5</td> <td>1,000</td> <td>PLC</td> <td>Bw_5</td> <td>1,000</td> </tr> <tr> <td>Wireless</td> <td>Tr_6</td> <td>0,609</td> <td>Wireless</td> <td>Bw_6</td> <td>0,722</td> </tr> <tr> <th colspan="3">Latencia</th> <th colspan="3">Duración de descarga</th> </tr> </tbody> </table>	Normalización de las mediciones ingresadas						Throughput			Ancho de banda			ADSL	Tr_1	0,126	ADSL	Bw_1	0,084	GPRS	Tr_2	0,010	GPRS	Bw_2	0,011	CIA	Tr_3	0,164	CIA	Bw_3	0,089	WiMAX	Tr_4	0,195	WiMAX	Bw_4	0,111	PLC	Tr_5	1,000	PLC	Bw_5	1,000	Wireless	Tr_6	0,609	Wireless	Bw_6	0,722	Latencia			Duración de descarga																										
Normalización de las mediciones ingresadas																																																																															
Throughput			Ancho de banda																																																																												
ADSL	Tr_1	0,126	ADSL	Bw_1	0,084																																																																										
GPRS	Tr_2	0,010	GPRS	Bw_2	0,011																																																																										
CIA	Tr_3	0,164	CIA	Bw_3	0,089																																																																										
WiMAX	Tr_4	0,195	WiMAX	Bw_4	0,111																																																																										
PLC	Tr_5	1,000	PLC	Bw_5	1,000																																																																										
Wireless	Tr_6	0,609	Wireless	Bw_6	0,722																																																																										
Latencia			Duración de descarga																																																																												

	<table border="1"> <tr><td>ADSL</td><td>L₁</td><td>0,277</td><td>ADSL</td><td>T₁</td><td>0,011</td></tr> <tr><td>GPRS</td><td>L₂</td><td>0,418</td><td>GPRS</td><td>T₂</td><td>0,000</td></tr> <tr><td>CIA</td><td>L₃</td><td>1,000</td><td>CIA</td><td>T₃</td><td>0,009</td></tr> <tr><td>WiMAX</td><td>L₄</td><td>0,657</td><td>WiMAX</td><td>T₄</td><td>0,013</td></tr> <tr><td>PLC</td><td>L₅</td><td>0,041</td><td>PLC</td><td>T₅</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>Wireless</td><td>L₆</td><td>0,282</td><td>Wireless</td><td>T₆</td><td>0,025</td></tr> </table> <p>La normalización es realizada de acuerdo a lo explicado en la tabla 12.</p>	ADSL	L ₁	0,277	ADSL	T ₁	0,011	GPRS	L ₂	0,418	GPRS	T ₂	0,000	CIA	L ₃	1,000	CIA	T ₃	0,009	WiMAX	L ₄	0,657	WiMAX	T ₄	0,013	PLC	L ₅	0,041	PLC	T ₅	1,000	Wireless	L ₆	0,282	Wireless	T ₆	0,025						
ADSL	L ₁	0,277	ADSL	T ₁	0,011																																						
GPRS	L ₂	0,418	GPRS	T ₂	0,000																																						
CIA	L ₃	1,000	CIA	T ₃	0,009																																						
WiMAX	L ₄	0,657	WiMAX	T ₄	0,013																																						
PLC	L ₅	0,041	PLC	T ₅	1,000																																						
Wireless	L ₆	0,282	Wireless	T ₆	0,025																																						
Ingreso de los valores de los criterios para el precio y la disponibilidad	<table border="1"> <tr><th colspan="6">Criterios de selección</th></tr> <tr><th colspan="6">Disponibilidad</th></tr> <tr><td>ADSL</td><td>1</td><td>CIA</td><td>1</td><td>PLC</td><td>1</td></tr> <tr><td>GPRS</td><td>1</td><td>WiMAX</td><td>1</td><td>Wireless</td><td>1</td></tr> <tr><th colspan="6">Precio</th></tr> <tr><td>ADSL</td><td>90000</td><td>CIA</td><td>80000</td><td>PLC</td><td>500000</td></tr> <tr><td>GPRS</td><td>100000</td><td>WiMAX</td><td>100000</td><td>Wireless</td><td>100000</td></tr> </table> <p>Para la disponibilidad, se representa con 1 si existe en el área evaluada. Los precios son los valores que se deben cancelar mensualmente por el servicio de datos, para PLC y Wireless se toma el valor de los equipos y se divide en el número de meses de la garantía.</p>	Criterios de selección						Disponibilidad						ADSL	1	CIA	1	PLC	1	GPRS	1	WiMAX	1	Wireless	1	Precio						ADSL	90000	CIA	80000	PLC	500000	GPRS	100000	WiMAX	100000	Wireless	100000
Criterios de selección																																											
Disponibilidad																																											
ADSL	1	CIA	1	PLC	1																																						
GPRS	1	WiMAX	1	Wireless	1																																						
Precio																																											
ADSL	90000	CIA	80000	PLC	500000																																						
GPRS	100000	WiMAX	100000	Wireless	100000																																						
Normalización de los valores de los criterios	<table border="1"> <tr><th colspan="6">Normalización de los precios</th></tr> <tr><td>ADSL</td><td>p₁</td><td>0,888</td><td>WiMAX</td><td>p₄</td><td>0,800</td></tr> <tr><td>GPRS</td><td>p₂</td><td>0,800</td><td>PLC</td><td>p₅</td><td>0,160</td></tr> <tr><td>CIA</td><td>p₃</td><td>1,000</td><td>Wireless</td><td>p₆</td><td>0,800</td></tr> </table> <p>La normalización se realiza de acuerdo a lo explicado en la tabla 12.</p>	Normalización de los precios						ADSL	p ₁	0,888	WiMAX	p ₄	0,800	GPRS	p ₂	0,800	PLC	p ₅	0,160	CIA	p ₃	1,000	Wireless	p ₆	0,800																		
Normalización de los precios																																											
ADSL	p ₁	0,888	WiMAX	p ₄	0,800																																						
GPRS	p ₂	0,800	PLC	p ₅	0,160																																						
CIA	p ₃	1,000	Wireless	p ₆	0,800																																						
Aplicación de la ecuación para calcular el valor individual de los atributos técnicos	$Te_i = P_{tr}Tr_i + P_{Bw}Bw_i + P_L L_i + P_T T_i$ <table border="1"> <tr><th colspan="3">Atributos técnicos</th></tr> <tr><td>Te₁</td><td>ADSL</td><td>0,079</td></tr> <tr><td>Te₂</td><td>GPRS</td><td>0,025</td></tr> </table>	Atributos técnicos			Te₁	ADSL	0,079	Te₂	GPRS	0,025																																	
Atributos técnicos																																											
Te₁	ADSL	0,079																																									
Te₂	GPRS	0,025																																									

	Te₃	CIA	0,132
	Te₄	WiMAX	0,132
	Te₅	PLC	0,952
	Te₆	Wireless	0,335
Aplicación de la ecuación para calcular el orden de selección de tecnología de comunicación.	$A_i = P_1Te_i + P_2p_i + P_3D_i$		
	Atributos técnicos		
	A₁	ADSL	0,600
	A₂	GPRS	0,386
	A₃	CIA	0,521
	A₄	WiMAX	0,427
	A₅	PLC	0,434
	A₆	Wireless	0,503
Ranking de alternativas	Se deben organizar descendientemente para obtener el orden arrojado por el método AHP, el primero en la lista es la alternativa más aconsejable.		
	RANKING DE ALTERNATIVAS DE COMUNICACIÓN		
	1	ADSL	0,600
	2	CIA	0,521
	3	Wireless	0,503
	4	PLC	0,434
	5	WiMAX	0,427
	6	GPRS	0,386

Fuente: El autor.

En la tabla 13 se realizó un ejemplo detallado sobre el desarrollo del proceso analítico jerárquico, en la última parte se muestra el ranking de alternativas para un caso en particular, considerando las ponderaciones dadas por el decisor; en el anexo G se realiza el análisis de sensibilidad para verificar la consistencia variando las ponderaciones.

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

A continuación se presentan las conclusiones más importantes del trabajo de investigación, así como las recomendaciones para trabajos futuros de la temática planteada.

5.1 CONCLUSIONES

Caracterizar enlaces de datos empleando cualquier tecnología de comunicación requiere el diseño de una metodología de mediciones en donde involucre la configuración de parámetros de herramientas de medición de desempeño en redes de datos. Esto se puede observar en el capítulo 2 en donde se describen los pasos necesarios para realizar campañas de mediciones: definición del escenario de pruebas, selección de las herramientas de medición, pruebas de ajuste de parámetros, campañas de mediciones, análisis de datos y caracterización del enlace de datos. Cabe resaltar, según los resultados obtenidos, que al variar el tamaño MTU y el tamaño de la ventana TCP, los rendimientos de los enlaces de comunicación aumentaron con respecto a las mismas mediciones sin configurar las herramientas con estos parámetros.

Por otro lado, el diseño de los enlaces de datos está íntimamente relacionado con las necesidades particulares del trabajo de investigación que se esté desarrollando; en el caso particular del presente proyecto, los enlaces de datos fueron diseñados visualizando el escenario real de instalación, esto es, realizando mediciones desde los nodos instalados en entornos reales y dirigidos hacia una red privada como lo es la Intranet de la UIS, esto para los enlaces de datos de las tecnologías ADLS, CIA, WiMAX y GPRS; para PLC se realizaron mediciones empleando cable coaxial RG6, recomendado por el fabricante de los equipos, y luego pruebas de rendimiento en un entorno real, línea de media tensión, en las instalaciones de la subestación de Minas perteneciente a las ESSA ESP. De forma similar, para Wireless LAN se desarrollaron pruebas controladas en el grupo de

instalación y luego se realizó un enlace de datos a una distancia aproximada de 8 kilómetros. Los resultados de las mediciones se pueden observar en los anexos, así como en los trabajos de grado de Higuera y Reslen [43], Forero [44] y Flórez y Agudelo [45].

Existen diversos procesos de selección, los cuales cuentan con unas características específicas para su utilización; una de ellas es el número de alternativas con las cuales se va a seleccionar la de mejor rendimiento, o con las cuales se desea conocer el orden de selección en una situación en particular. Para el trabajo de investigación, se desarrolló una metodología de selección de alternativas de comunicación, en la cual se conoce el número de alternativas de comunicación existentes en el municipio de Bucaramanga, ADSL, CIA, GPRS, PLC, WiMAX y Wireless LAN. Uno de los métodos de selección es conocido como el Proceso Analítico Jerárquico (AHP por sus siglas en inglés), el cual requiere del conocimiento exacto de alternativas y que además, presenta la posibilidad de analizar, mediante cálculos matriciales, la consistencia de los cálculos mediante las ponderaciones dadas por el decisor para conocer el orden de las alternativas de comunicación. El procedimiento de los cálculos se puede observar en el capítulo 4, así como el análisis de sensibilidad para determinar la consistencia se puede observar en el anexo G.

Dentro del análisis desarrollado para el cálculo de las ponderaciones de los aspectos técnicos se determinó la siguiente ecuación:

$$Te_i = P_{tr}Tr_i + P_{Bw}Bw_i + P_L L_i + P_T T_i$$

La cual resuelve el valor de la ponderación de los aspectos técnicos de cada alternativa de comunicación, empleando los resultados de las mediciones realizadas para el throughput, ancho de banda, latencias y tiempos de descarga de archivos; de forma análoga, la ecuación:

$$A_i = P_1 T e_i + P_2 p_i + P_3 D_i$$

Determina el valor de satisfacción de cada alternativa de comunicación, empleando las ponderaciones dadas por el decisor, junto con los valores normalizados de los aspectos técnicos, valor de instalación de un nodo y disponibilidad de la tecnología en el municipio de Bucaramanga.

Por último, con el presente trabajo de investigación se consigue caracterizar, mediante una metodología de mediciones, cualquier enlace de datos entre nodos finales, así como determinar el orden de preferencia de un número determinado de alternativas de comunicación empleando el método AHP desarrollado para el proyecto SITELRED. Esta metodología de selección puede modificarse para aumentar el número de alternativas y realizar el ordenamiento de las mismas, teniendo en cuenta el índice de consistencia y las posibles combinaciones de preferencia del decisor a cargo.

5.2 TRABAJO FUTURO

Desarrollar metodologías de pruebas de rendimiento requiere un amplio conocimiento de los parámetros que se deseen verificar, por ello se recomienda para trabajo de grado o de investigación, validar la metodología de mediciones incluyendo otros factores que afecten el rendimiento de los enlaces de datos, en el presente trabajo se tuvieron en cuenta el throughput, ancho de banda, latencia, RTT, jitter y porcentaje de paquetes perdidos.

Así mismo, se recomienda revalidar la metodología de selección de tecnologías de comunicación, ampliando las matrices de ponderaciones de aspectos técnicos y de selección, para lo cual se requiere incluir otros factores que puedan ser relevantes en el rendimiento de las tecnologías de comunicación.

Por otra parte, se recomienda realizar mediciones en donde se varíe la distancia en el enlace de datos de la tecnología PLC, ya que estas mediciones requieren de implementaciones con personal capacitado y solo se pudieron realizar mediciones con una distancia fija de aproximadamente 250 metros.

REFERENCIAS

- [1] Pinzón Barrios Samuel Gonzalo. "Predicción De La Tasa De Throughput En Una Red Inalámbrica (WLAN 802.11b)". Tesis de maestría. Universidad Industrial de Santander. 2005.
- [2] Jun J., Peddabachagari P. and Sichitiu M. "Theoretical Maximum throughput of IEEE 802.11 and its Applications". Proceedings of second IEEE International Symposium on Network Computing and Applications. Pages 249-256. 2003.
- [3] J. Yoo, J. Kim. "Maximum End to end throughput of Chain topology Wireless Multi hop Networks". Wireless Communications and Networking Conference. Pages 4279-4283. 2007
- [4] Chávez, C.O. "Influencia de la radiación solar sobre el desempeño de las redes WIFI en la banda de los 5 GHz." Telematique: Revista Electrónica de Estudios Telemáticos. Vol. 6, número 001. Universidad Rafael Bellosos Chacin. Zulia, Venezuela. Páginas 32-52. 2007.
- [5] Oskari P., Soini M., Sydanheimo L., Kivikoski M. "Considerations of Using Power Line Communications in the AMR System" Tampere University of Technology. Finland. 2006.
- [6] Kessler, T., and Henkel W. "Simulation of ADSL over ISDN on German Subscriber Lines" IEEE communications letters. Vol 1. N°5. Pages 124-126. 1997
- [7] Long, G., Kamali, J., Fazlollahi, A. and Rao, V. "Competition Stimulates Technology Advances Experiences from ADSL Development in Japan". IEEE Communication Magazine. Pages 110-115. 2005.
- [8] Yen, D., Cho, D. and Wang, J. "DSL: the promising standard for new Internet era". Computer Standards & Interfaces Volume 23, Issue 1. Elsevier Science. Pages 29-37. 2001.
- [9] Dischinger M., Haeberlen A., Gummandi K. and Saroiu S. "Characterizing Residential Broadband Networks". Proceedings of the 7th ACM SIGCOMM

- conference on Internet measurement. San Diego, California, USA. Pages 43-56. 2007
- [10] Cho K., Fukuda K., Esaki H. and Kato A. "The Impact and Implications of the Growth in Residential User to user traffic". Proceedings of the 2006 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications. Pisa, Italy. Pages 207-218. 2006
- [11] Kiniry J. and Metz C. "Cable modems Cable TV delivers the Internet" IEEE Internet Computing. Volume 2, Issue 3. Pages 12-15. 1998.
- [12] Sadiku, M.N.O and Aduba, C. "Cable modem technology" Potenciales IEEE. Volume 19, Issue 4. Pages 26-27. 2001.
- [13] Fellows D. and jones D. "DOCSIS cablemodem technology". IEEE Communications Magazine. Volume 39, Issue 3. Pages 202-209. 2001.
- [14] Nguyen T. and Armitage G. "Experimentally derived interactions between TCP traffic and service quality over DOCSIS cable links". Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM '04. IEEE . Pages 1314-1318 Vol. 3. 2004
- [15] López E.T, Abdalla H y Ramos L. "Evaluación de la tecnología Cable Modem DOCSIS 1.0 en redes de acceso MMDS para servicios de Videoconferencia". IEEE Latin America transactions. Volume 1, Issue 1. 2003.
- [16] Sanchez J. A y Rey P. "Análisis y estudio de redes GPRS". Universidad Austral de Chile. Trabajo de titulación en Ingeniería Electrónica. Valdivia, Chile. 2005.
- [17] Arenas M, Bettancourt R, Grote A, Soto M y Grote W. "Análisis de tasa efectiva de servicio y retardo de GPRS y EDGE". Universidad Técnica Federico Santa María. Senacitel. Valparaíso, Chile. 2004.
- [18] Stuckmann P, Ehlers N and Wouters B. "GPRS Traffic Performance Measurements". Proceedings Vehicular Technology Conference. Pages 1289-1293 Vol. 2. 2002.
- [19] Magnor B. and Reizer E. "End to end key performance indicators in cellular networks". Master's thesis, Information and Communication Technology, Agder

University College, Faculty of Engineering and Science, Grimstad, Norway, 2006.

- [20] Porras A. "Análisis de viabilidad para brindar servicios de Internet en RACSA a través de las redes eléctricas de Costa Rica, utilizando la tecnología PLC". Trabajo para optar a la titulación Bachiller en Ingeniería Eléctrica. Universidad de Costa Rica. Costa Rica. Diciembre, 2007.
- [21] Issa F., Goldberg M. and Marthe E. "Power Line Communications using low And Medium Voltage Network" IEEE. Research and Development Department, Eletricite de France. Clamart, France. 2003.
- [22] Lin Y. and Latchman H. "On the Effects of Maximum Transmission Unit in Power Line Communication Networks". IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications. Pages 511-516. 2007.
- [23] Garber, L. "Mobile WiMax: The Next Wireless Battle Ground?". IEEE computer society. Volume 41, Issue 6. Pages 16-18. 2008
- [24] Abichar Z., Peng Y. and Chang, J. "WiMAX The Emergence of Wireless Broadband" IEEE IT Professional. Volume 8, Issue 4. Pages 44-48. 2006.
- [25] Durantini A., Petracca M. and Ananasso F. "Experimental Evaluation of 802.16 WiMAX Performances at 2,5 GHz Band". Wireless Communications and mobile computing conference, 2008. IWCMC'08. International. Pages 338-343. 2008.
- [26] Grondalen O., Gronsund P., Breivik T. and Engelstad. "Fixed WiMAX Field Trial Measurements and Analyses". Mobile and Wireless Communications Summit, 16th IST. Pages 1-5, 2007.
- [27] IEEE 802.11b Wireless LANs. Technical Paper. 3COM 2003.
- [28] Paul S. Henry, Hui Luo. "WiFi: What's Next?" IEEE communications Magazine. Volume 40, Issue 12. Pages 66-72. 2002.
- [29] El-Sayed H., Zeadally S. and Boulmalf M. "Experimental Evaluation and Characterization of Long-Distance 802.11g Links". Seventh International Conference on Networking. Pages 511-516. 2008.
- [30] Dhawan Sanjeev. "Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi and WiMAX". The 2nd International Conference

- on wireless broadband and ultra wideband communications. Pages 14-14. 2007.
- [31] Webb, W. "A comparison of wireless local loop with competing access technologies". Electronics & Communication Engineering Journal. IEEE. Volume 10, Issue 5. Pages 205-212. 1998.
- [32] Garber, L. "Mobile WiMax: The Next Wireless Battle Ground?". IEEE computer society. Volume 41, Issue 6. Pages 16-18. 2008
- [33] Hoo, T. Tao, Z and Zhang J. "The Mobile Broadband WiMax Standard". IEEE Signal Processing Magazine. Volume 24, Issue 5. Pages 144-148. 2007.
- [34] D-Link DSL-524B ADSL2/2+ 4 port Ethernet Router. User Manual. Version 1.0. ftp://www.dlinkla.com/pub/drivers/DSL-524B/DATASHEET_DSL-524B_C1_01.pdf
- [35] WebSTAR Model DPC2100 and EPC2100. Cable Modem User's Guide. Scientific Atlanta. http://www.cosmostv.com/docs/instructions/scientificatlanta_dpc2100.pdf
- [36] Arctic GPRS Gateway. Arctic User's Manual. Version 1.5. February 2007. http://www.violasystems.com/products/assets/documentation/arctic_gprs_gateway_datasheet.pdf
- [37] Gigaset SE471 WiMAX Datasheet. SIEMENS. November. 2007. http://api.ning.com/files/AEpNkrUnqoW*ZE2WNZMJi6DjY*FvdPKaU5NQehT1f9w9b98M5dSRLItvL4IHypbidmhmKGL4fO*FDOtZ2o-ML0RRhLg0jO60/Gigaset_SE471_WiMAX.pdf
- [38] TEW-410APBplus Datasheet. TRENDnet. USA. 2005. www.trendnet.com/download_manager/default.asp?iFile=3117
- [39] XPress Ethernet Bridge Multipoint User Guide. Digi International Inc. 2007. http://www.bb-elec.com/bb-elec/literature/manuals/XEB09-BxSA_manual.pdf
- [40] Linksys WRT54G User Guide. LINKSYS: a division of Cisco Systems, Inc. <http://www.linksysbycisco.com/EU/es/support/WRT54G>
- [41] Medium Voltage Access Gateway. Corinex User Guide. Vancouver, Canada. October. 2008. www.corinex.com/product/999.html

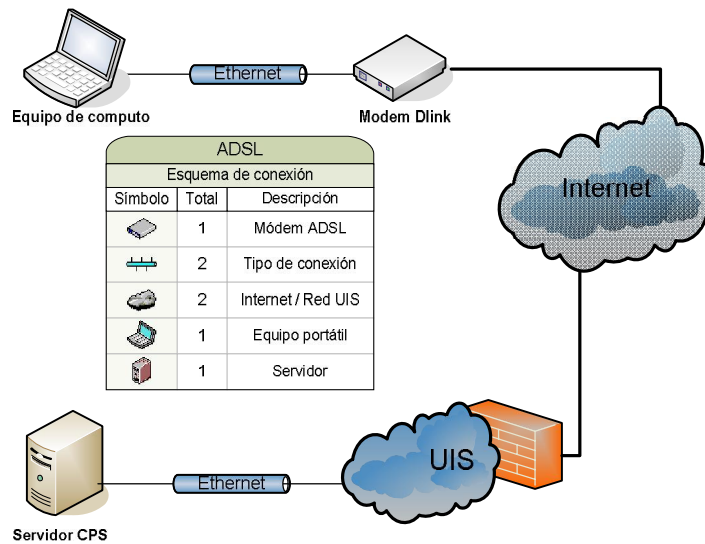
- [42] AV200 Powerline Ethernet Adapter. Corinex. Manual de Usuario. Vancouver, Canada. 2005. <http://www.corinex.com/product/1575.html>
- [43] Overcap 17 Datasheet. Artech. 2007. <http://www.ecbco.com/images/Mv-Coupler-Overhead.pdf>
- [44] Higuera C y Reslen A. "Evaluación de desempeño de las tecnologías ADSL y CIA para la implementación del SITELRED". Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2009
- [45] Forero. "Evaluación de desempeño de la tecnología GPRS para la implementación al SITELRED". Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2010
- [46] Flórez O y Agudelo L. "Evaluación de desempeño de las tecnologías PLC y WLAN para la implementación a SITELRED". Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. 2010
- [47] García C. M. S. "Métodos para la comparación de alternativas mediante un sistema de ayuda a la decisión S.A.D y Soft Computing" Tesis Doctoral. Departamento de Electrónica, Tecnología de computadoras y proyectos. Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena-Colombia. 2009
- [48] Alarón N. D. B. "Modelo Integrado de Valor para Estructuras Sostenibles", Tesis Doctoral. Escola Tecnica Superior D'enginyers de Camins, Canals I Ports. Universitat Politecnica de Catalunya. Barcelona-España. 2005.
- [49] Saaty, Thomas (1980). The Analytic Hierarchy Process. Ed. McGrawHill.
- [50] Nataraj S. "Analytic Hierarchy Process as a Decision Support System in the Petroleum Pipeline Industry". Issues in Information System. Volume VI. N° 2, pages 16-21. 2005.
- [51] Martínez, R. E. "Aplicación del proceso jerárquico de análisis en la selección de la localización de una PYME". Anuario jurídico y económico escurialense. Número 40, Paginas 523-542. España. 2007.
- [52] Mei X., Rosso R., Huang G. y Nie G. "Application of analytical hierarchy process to wáter resources policy and management in Beijing, China". Proceedings of the Baltimore Symposium. May. 1989.

- [53] Cortés F., García M. y Aragonés P. "Selección de una tecnología de banda ancha para la Universidad Nacional de Colombia – Sede Bogotá, usando una técnica de decisión multicriterio". Revista ingeniería e Investigación Vol 27 N°1. Colombia. Abril. 2007.
- [54] Vahidnia M., Alesheikh A., Alimohammadi A. y Bassiri A. "Fuzzy Analytical Hierarchy Process in GIS Application". The international archives of the photogrammetry, remote sensing and spatial information sciences. Vol XXXVII. Beijing. 2008.
- [55] Rama A., Naidu M. y Govindarajulu P. "An Integrated approach of Analytical Hierarchy Process model and Goal Model (AHP GP Model) for Selection of Software Architecture". IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security. Vol 7. N°10. Pages 108-117. 2007.
- [56] Kablan M. M. "Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach". Elsevier Science, Energy Policy. Volume 32, Issue 10. 2004
- [57] Yang J. y Shi P. "Applying Analytic Hierarchy Process in Firm's Overall Performance Evaluation: A Case Study in China". International Journal of Business 7(1), Pages 29-46. 2002.

ANEXO A: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA ADSL

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas a la tecnología de comunicación ADSL. El enlace de datos es el mostrado en la figura A.1, además, las campañas de mediciones fueron realizadas por Higuera y Reslen [43].

Figura A.1 Esquema de implementación para la tecnología ADSL



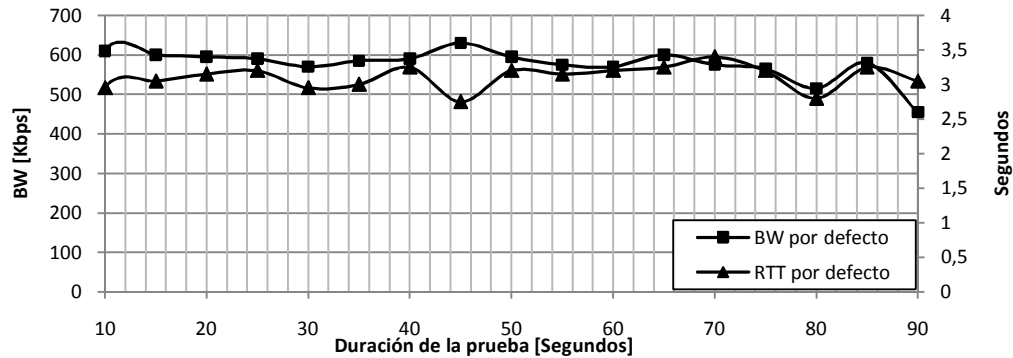
Fuente: El autor.

1. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación del tamaño de la ventana TCP.

Figura A.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para ADSL.

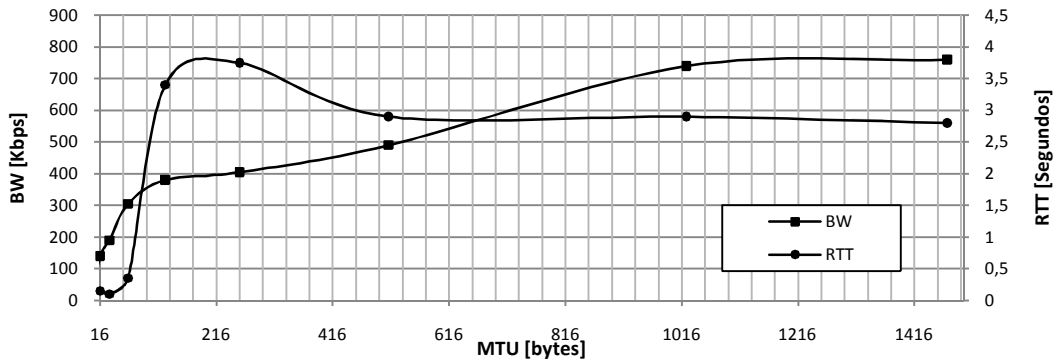


Fuente: El autor.

En la figura A.2 se observa la variación del retardo (eje vertical derecho) y la variación del ancho de banda (eje vertical izquierdo) contra la variación del tiempo de prueba, el cual afecta el rendimiento del enlace; el ancho de banda decae al superar los 45 segundos, razón por la cual no se deben tomar mediciones en intervalos que sobrepasen este valor, además, los retardos presentes en el rango inferior a 45 segundos son los más bajos; para valores por debajo de los 10 segundos, el ancho de banda es muy bajo; por lo tanto, se ha determinado que para las siguientes mediciones se emplee un tiempo de 15 segundos entre toma de mediciones.

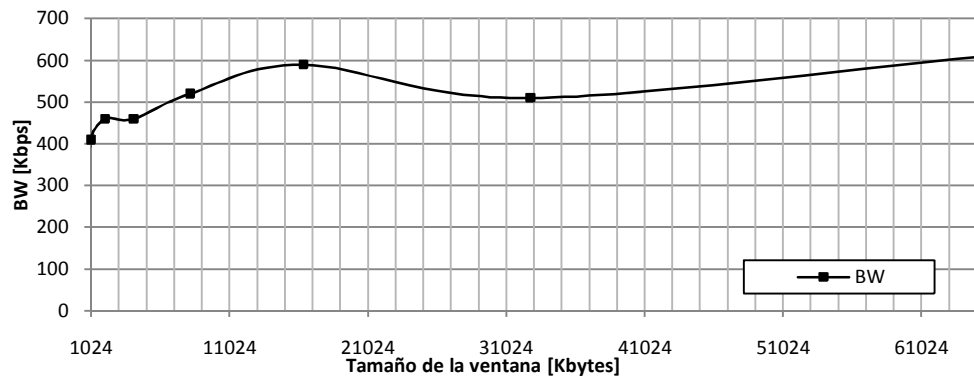
Para determinar la MTU, se pueden observar las curvas de la figura A.3. En ellas se presentan los retardos (eje vertical izquierdo) y anchos de banda (eje vertical derecho) medidos al variar la MTU. Se visualizan retardos mayores para MTU inferiores a 500 bytes y el retardo se estabiliza progresivamente al aumentar la MTU; también se aprecia que al aumentar la MTU, el ancho de banda aumenta hasta el punto máximo teórico de la tecnología, el cual es de 1472 bytes; razón por la cual se escoge este tamaño como el apropiado para las siguientes mediciones.

Figura A.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para ADSL



Fuente: El autor.

Figura A.4 Ancho de banda variando la ventana TCP para ADSL



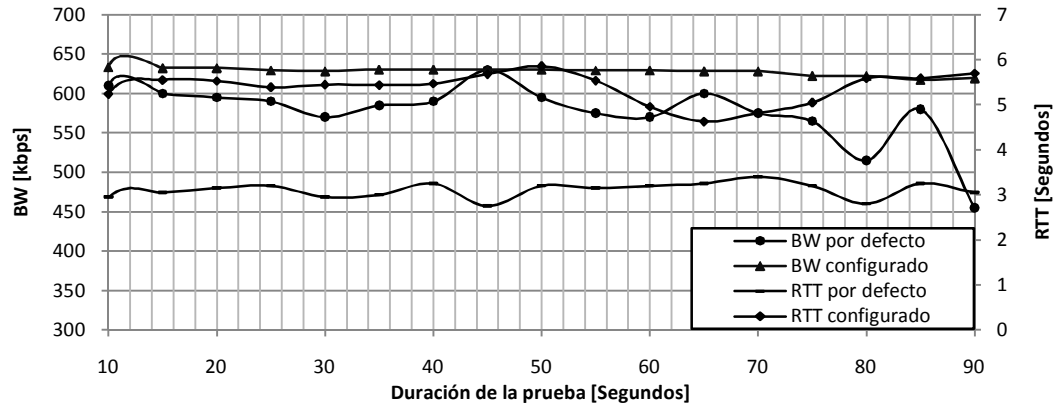
Fuente: El autor

En la figura A.4 se muestra la variación del ancho de banda al variar el tamaño de la ventana TCP. Teniendo en cuenta que los dispositivos tienen configurada la ventana máxima en 256Kbytes, condición que se observó al analizar la configuración del modem D-Link, y observando el comportamiento para 16Kbytes, el cual presenta la mayor tasa de transferencia, se determina éste último como el valor apropiado de tamaño de la ventana TCP para las siguientes mediciones.

Antes de realizar las mediciones de desempeño de larga duración (mediciones superiores a dos horas), se realizó la comparación entre las mediciones obtenidas antes y después de configurar las condiciones de las herramientas. En la figura

A.5 se observan los resultados de esta comparación, en donde se aprecia una estabilidad y mejoría en el ancho de banda.

Figura A.5. Comparación de parámetros por defecto y configurados para ADSL.



Fuente: El autor.

2. Prueba de estabilidad del enlace de datos.

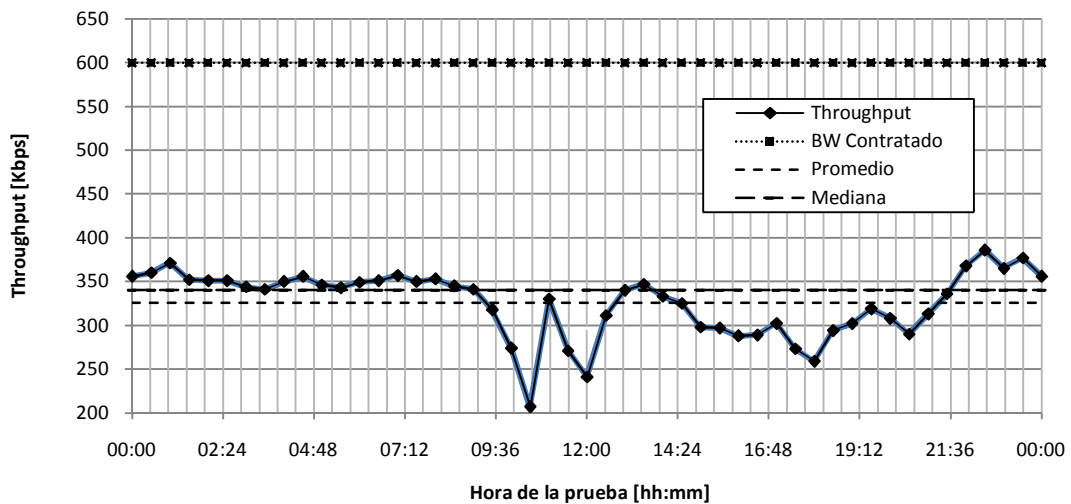
Las pruebas realizadas tienen definidos los siguientes parámetros para las herramientas:

- ✓ MTU: 1472 Bytes.
- ✓ Tamaño de la ventana TCP: 16 Kbytes
- ✓ Duración del registro de 15 segundos.

Los resultados de las pruebas de 24 horas se realizaron el jueves 16 de julio de 2009, midiendo throughput y RTT para TCP; se aplicaron métodos estadísticos para asociar los datos obtenidos en las mediciones, realizando agregaciones cada hora (esto indica que se promediaron las muestras obtenidas cada hora, dando como resultado la obtención de una muestra en ese intervalo de tiempo).

En la figura A.6 se observa el comportamiento del throughput, en esta gráfica se observa que el parámetro medido es inferior al ofrecido por el proveedor, alrededor de 53%; sin embargo se aprecia que entre las 12 p.m. y las 9 a.m., el comportamiento es estable, después de esta hora, se producen mínimos que se presumen corresponden a la congestión debido a la entrada en operación de los clientes empresariales.

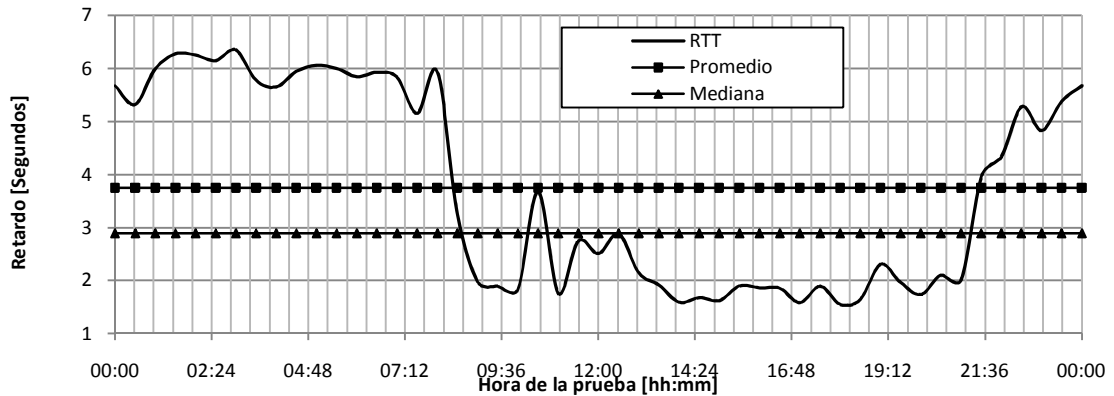
Figura A.6. Throughput para ADSL.



Fuente: El autor.

En la figura A.7 se observan los retardos para la prueba de 24 horas, los retardos se encuentran entre 5,5 segundos y 6,4 segundos para las horas comprendidas entre las 12 p.m. y 9 a.m., franja en la cual se presenta la mayor tasa de transferencia efectiva de datos. De forma similar al throughput, los menores retardos se presentan en la franja de operación empresarial. Cabe resaltar que estos retardos son medidos para el protocolo TCP, empleando la herramienta de desempeño D-ITG.

Figura A.7 Retardos TCP para ADSL.

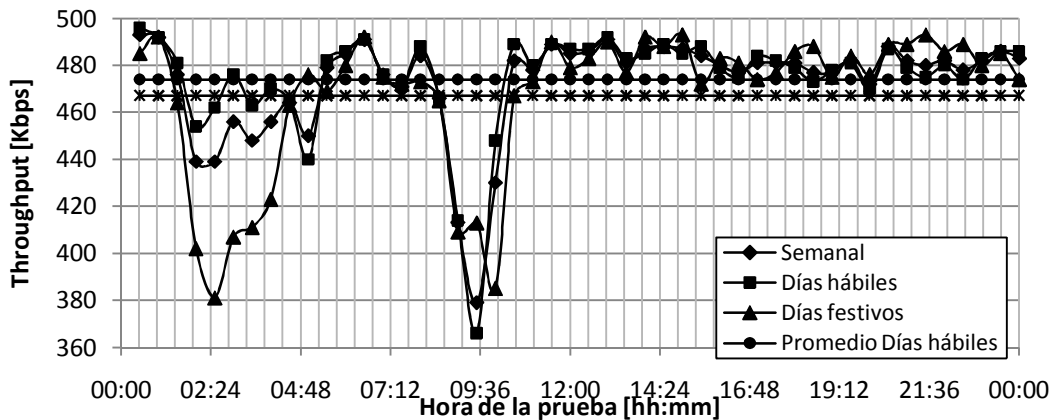


Fuente: El autor.

3. Prueba extendida de medición de parámetros.

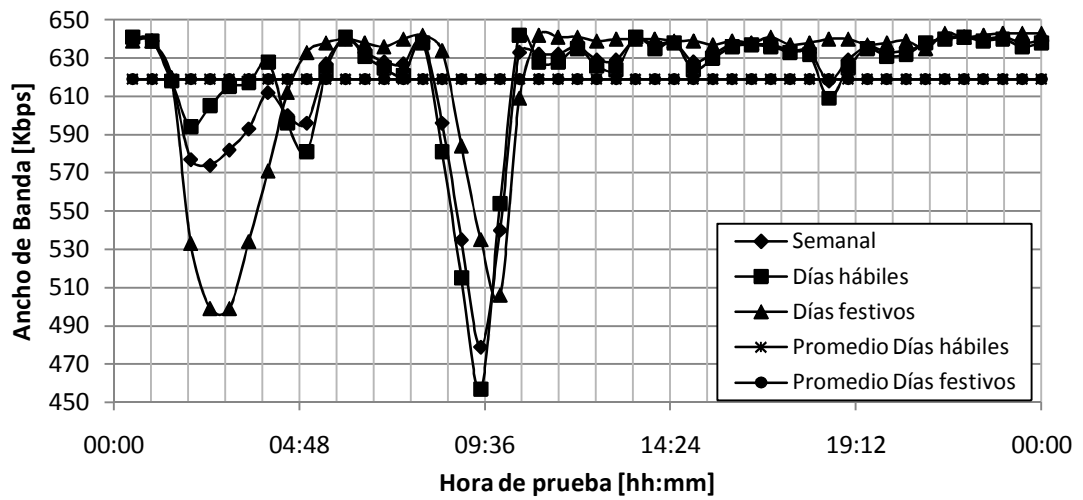
Después de comprobar la estabilidad del enlace de datos, se realizan las mediciones de los parámetros ancho de banda, throughput, RTT, latencia, jitter y BER, empleando la herramientas de medición iperf, D-ITG y netio configuradas con duración del registro de 15 segundos, tamaño de la ventana TCP de 16 Kbytes y MTU de 1472 bytes. Las pruebas se realizaron durante 14 días consecutivos, además, se realizaron procesos estadísticos para el tratamiento de los datos obtenidos. A continuación se presentan los resultados de estas mediciones:

Figura A.8 Throughput de los 14 días de pruebas para ADSL.



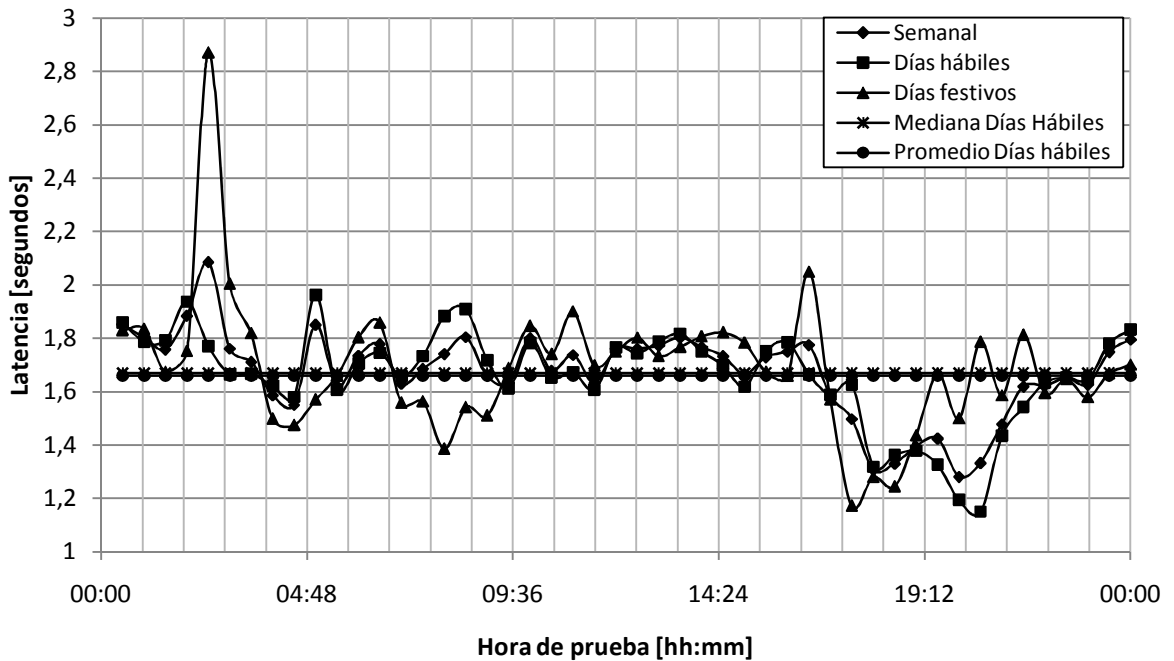
Fuente: El autor.

Figura A.9 Ancho de banda de los 14 días de pruebas para ADSL.



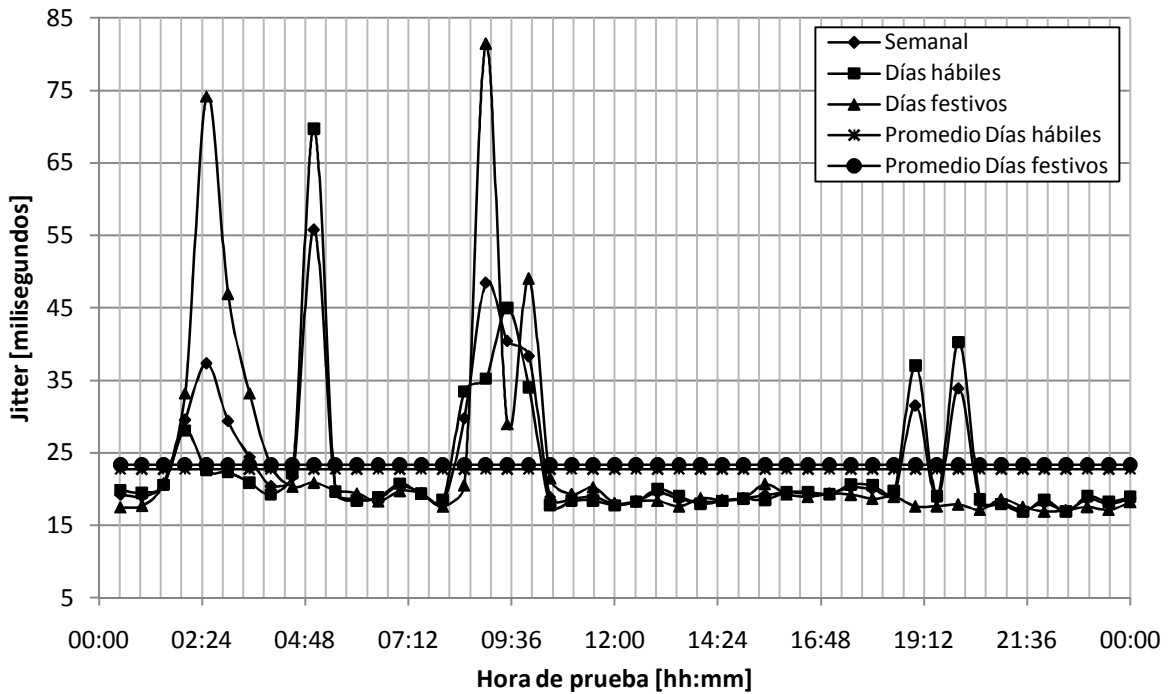
Fuente: El autor.

Figura A.10 Latencia de los 14 días de pruebas para ADSL.



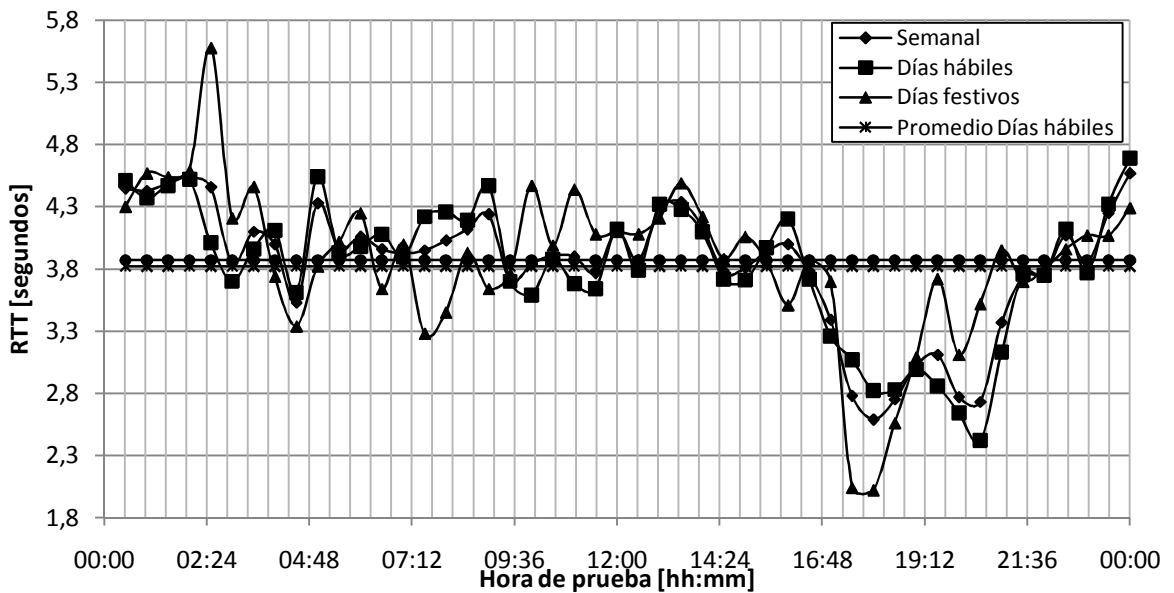
Fuente: EL autor.

Figura A.11 Jitter de los 14 días de pruebas para ADSL.



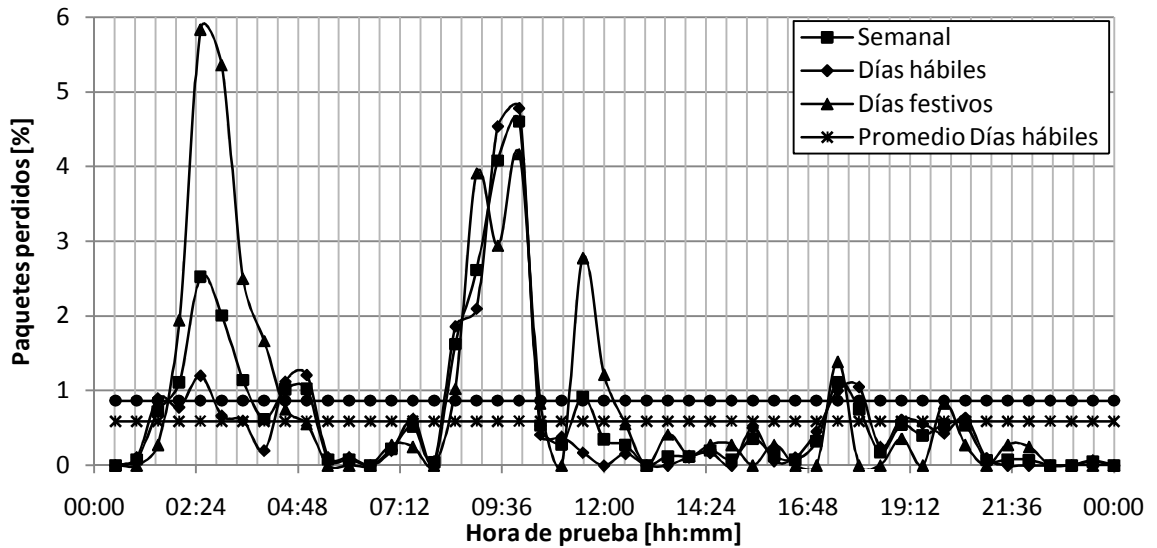
Fuente: EL autor.

Figura A.12 RTT de los 14 días de pruebas para ADSL.



Fuente: El autor.

Figura A.13 BER de los 14 días de pruebas para ADSL.

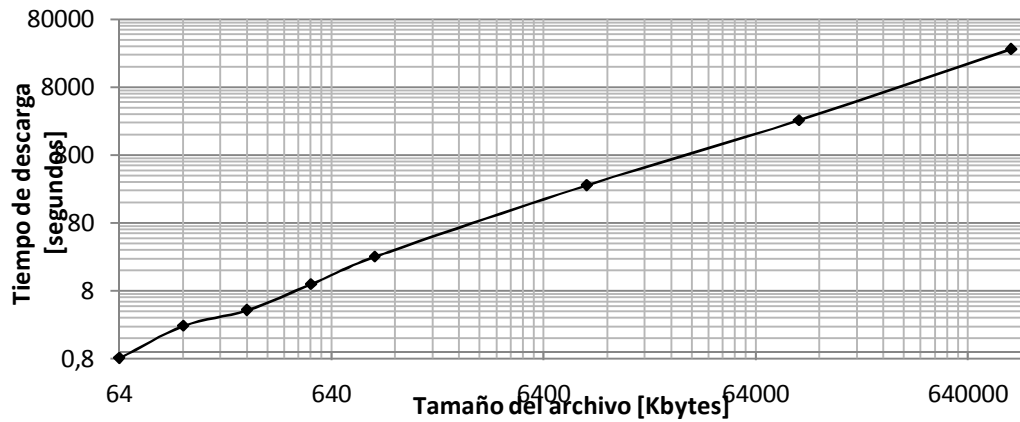


Fuente: El autor.

4. Prueba de descarga de archivos.

En la figura A.14 se observan los resultados para la descarga de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 64 Kbytes hasta 1Gbytes.

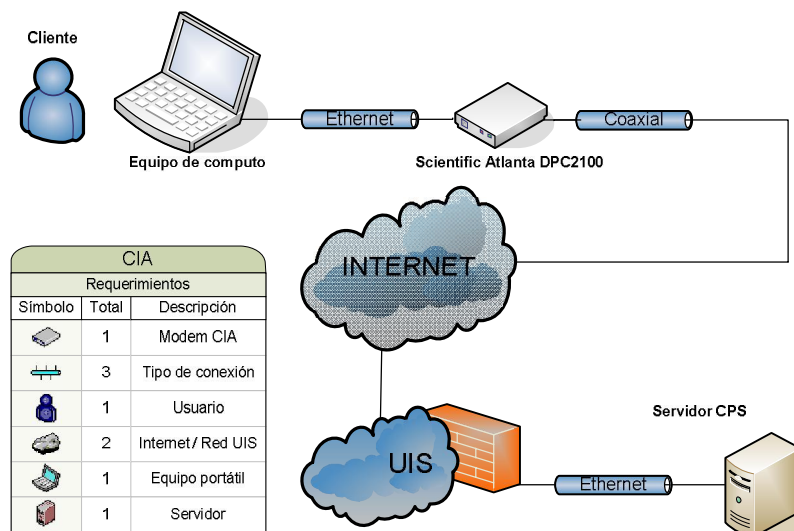
Figura A.14 Duración registrada durante la descarga de archivos para ADSL



ANEXO B: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA CIA

A continuación se presentan los resultados más significativos de la tecnología CIA. El esquema de implementación se muestra en la figura B.1. Las campañas de medidas fueron realizadas por Higuera y Reslen [43].

Figura B.1 Esquema de implementación para la tecnología CIA



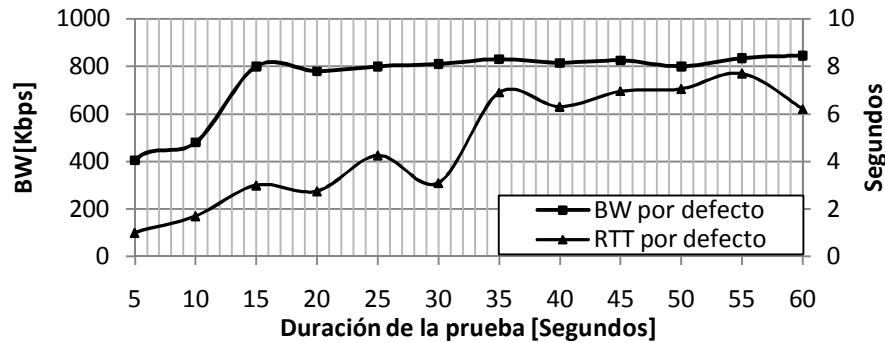
Fuente: El autor.

1. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación del tamaño de la ventana TCP.

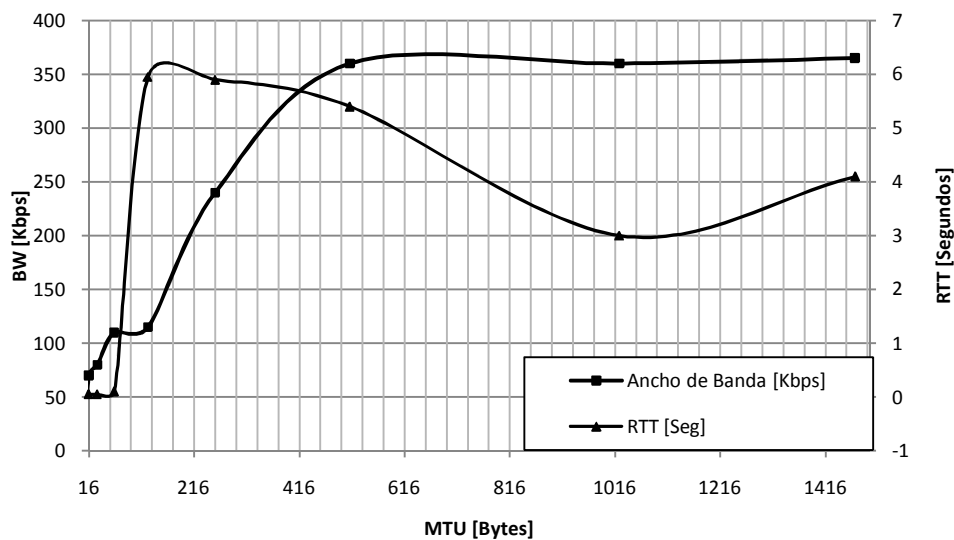
Figura B.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para CIA.



Fuente: El autor.

La variación del ancho de banda y de los retardos con respecto a los intervalos del registro se pueden observar en la figura B.2; para el ancho de banda (eje vertical izquierdo), se aprecia que al superar los 15 segundos su comportamiento es estable hasta finalizar la prueba; por otro lado, los retardos aumentan con respecto al incremento en el tiempo entre toma de mediciones y al superar los 30 segundos se incrementa considerable; por ello, se determina que los registros de mediciones pueden realizarse cada 15 segundos

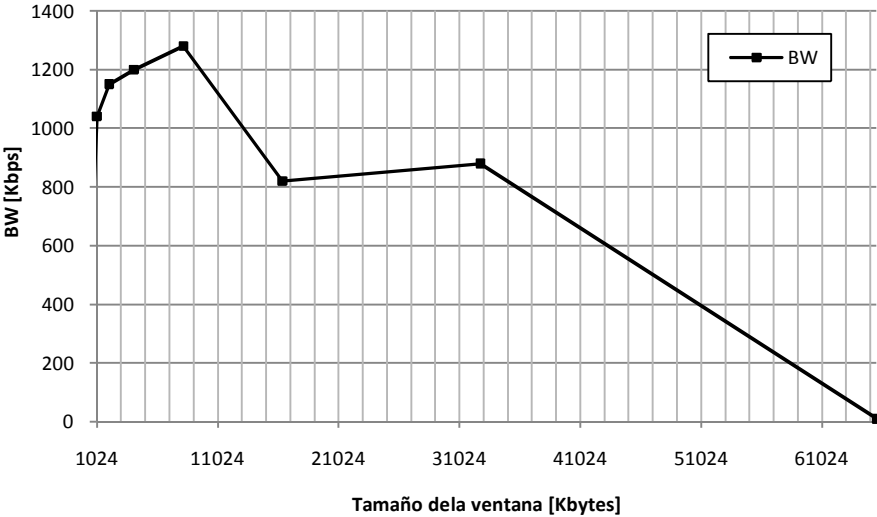
Figura B.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para CIA



Fuente: El autor.

Para analizar el comportamiento de la variación de la MTU se puede observar la figura B.3; nuevamente, se presentan el ancho de banda y los retardos de las mediciones realizadas con respecto a la variación de la MTU. El ancho de banda empieza a comportarse estable a partir del los 512 Bytes y los retardos disminuyen desde los 256 Bytes, por ello, se determina que el valor apropiado para ajustar las herramientas es de 512 Bytes como tamaño MTU para esta tecnología.

Figura B.4. Ancho de banda variando la ventana TPC para CIA



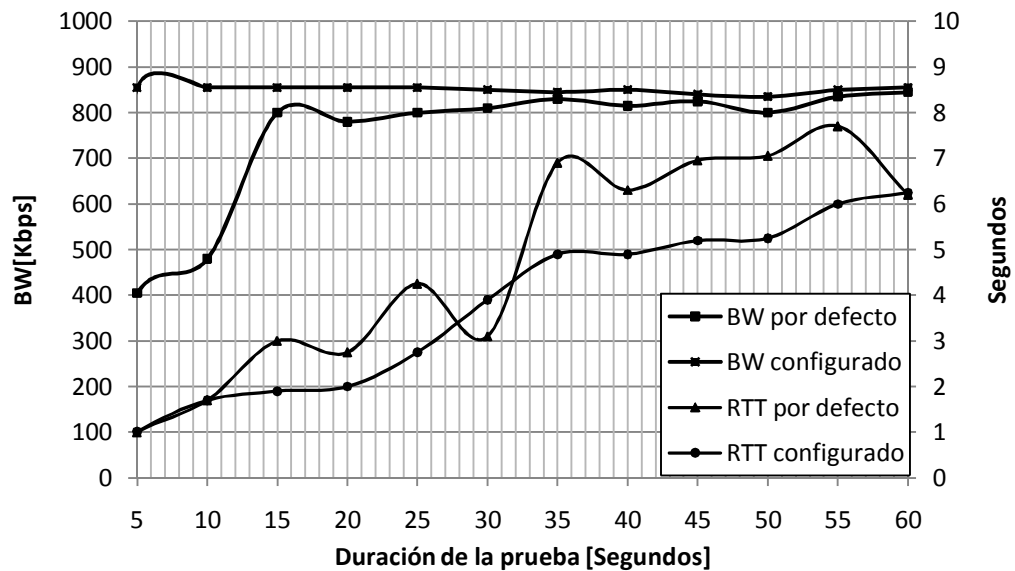
Fuente: El autor.

En la figura B.4 se observa el comportamiento del ancho de banda al variar el tamaño de la ventana TCP. Para ventanas entre 8Kbytes y 32 Kbytes el ancho de banda permanece estable, siendo el máximo en 8 Kbps, por esta razón se escoge el último como el indicado para configurar las herramientas de medición de desempeño.

Después de realizar los ajustes a los parámetros de las herramientas, se comparan las mediciones tomadas por defecto con las realizadas con los parámetros ajustados. Esta comparación se puede observar en la figura B.5. En ella se aprecia que el ancho de banda aumenta levemente, pero se estabiliza

antes del medido por defecto, razón por la cual se concluye que al ajustar los parámetros se logra un mejoramiento en dicha medición; de forma similar, se puede observar que los retardos disminuyen dos segundos entre cada medición realizada por defecto y con los ajustes.

Figura B.5. Comparación de parámetros por defecto y configurados para CIA.



Fuente: El autor.

2. Prueba de estabilidad del enlace de datos.

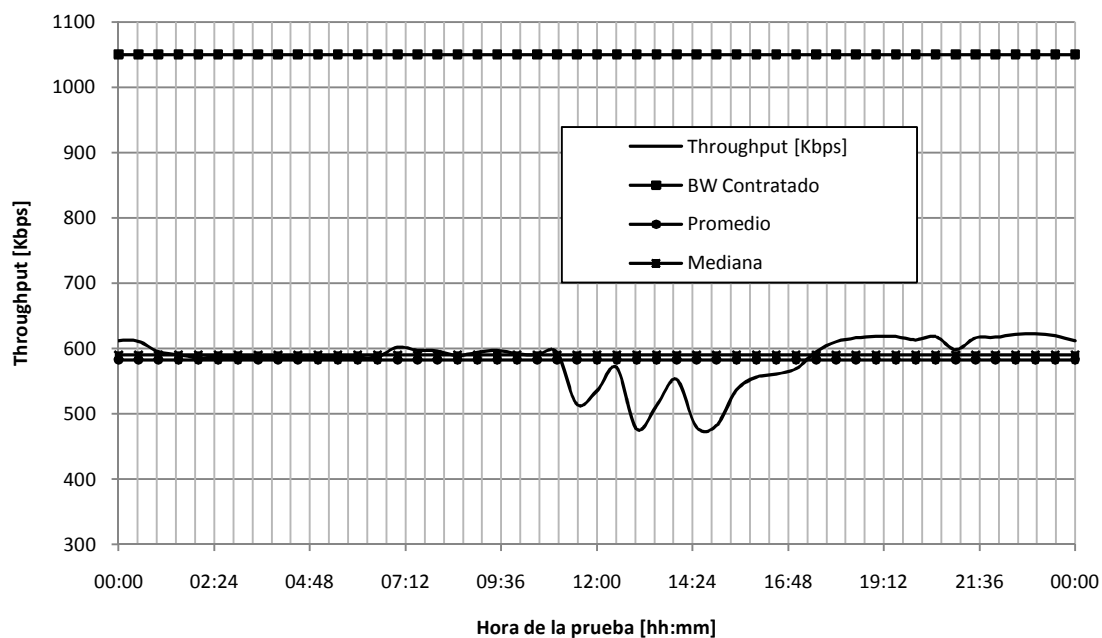
Las pruebas realizadas tienen definidos los siguientes parámetros para las herramientas:

- ✓ MTU: 512 Bytes.
- ✓ Tamaño de la ventana TCP: 8 Kbytes
- ✓ Duración del registro de 15 segundos.

La prueba de estabilidad del enlace de datos con una duración de 24 horas, el día jueves 16 de julio de 2009 realizando los ajustes mencionados previamente a las herramientas de medición de desempeño; los parámetros de rendimiento medidos son: throughput y RTT para TCP; los datos que se graficaron tienen un tratamiento estadístico para asociar los datos obtenidos en las campañas de medición realizadas.

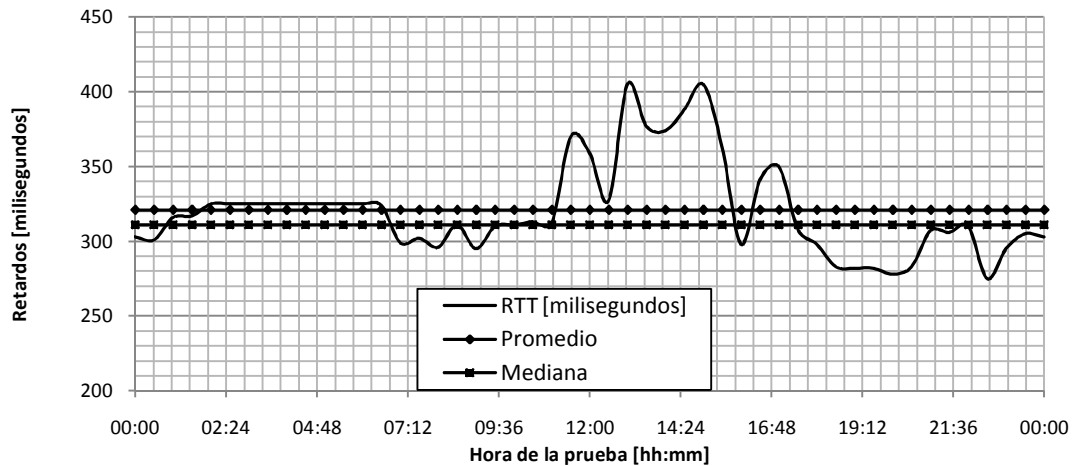
Al observar la figura B.6 se aprecia el comportamiento del throughput; este parámetro tiene un comportamiento estable entre la 1:00 am hasta las 11:00 am con mediciones de alrededor de los 600 Kbps, presenta una inestabilidad en su comportamiento entre las 11:00 am y las 5:00 pm y para la franja restante existe un pequeño incremento que no supera los 630 Kbps.

Figura B.6. Throughput para CIA.



Fuente: El autor.

Figura B.7 Retardos TCP para CIA.



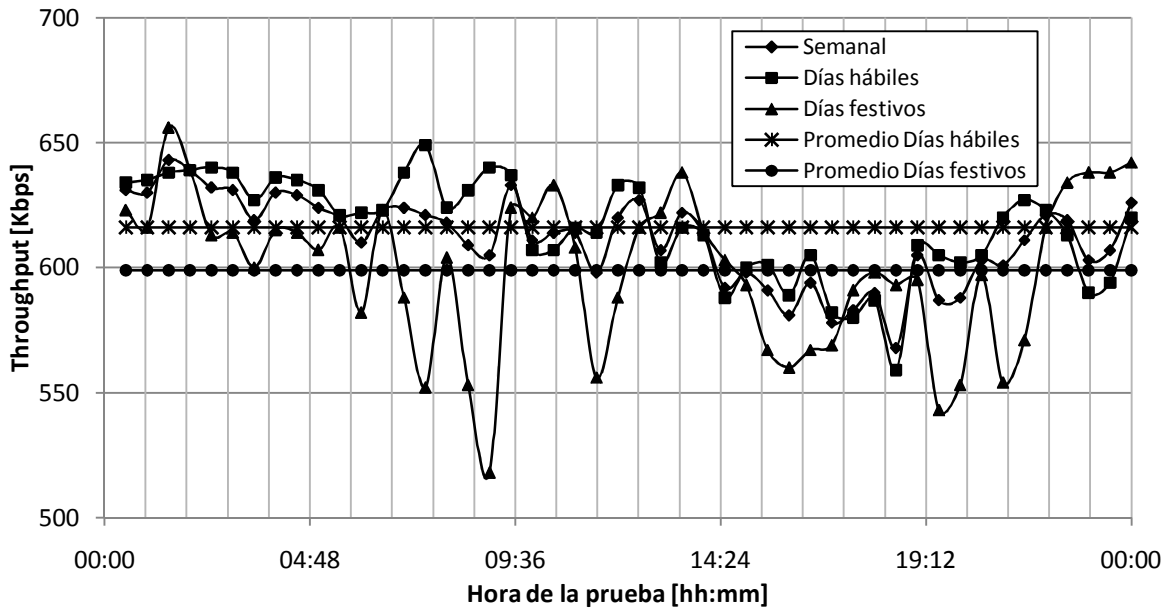
Fuente: El autor.

El comportamiento de los retardos del enlace de datos se observa en la figura B.7; se aprecia que entre la 1:00 am y las 8:00 am, el comportamiento se mantiene estable con retardos entre los 310 milisegundos y para el resto del día, el comportamiento varia sin superar los 400 milisegundos; de lo anterior se puede decir que el enlace de datos se comporta estable con respecto a los retardos medidos para TCP.

3. Prueba extendida de medición de parámetros.

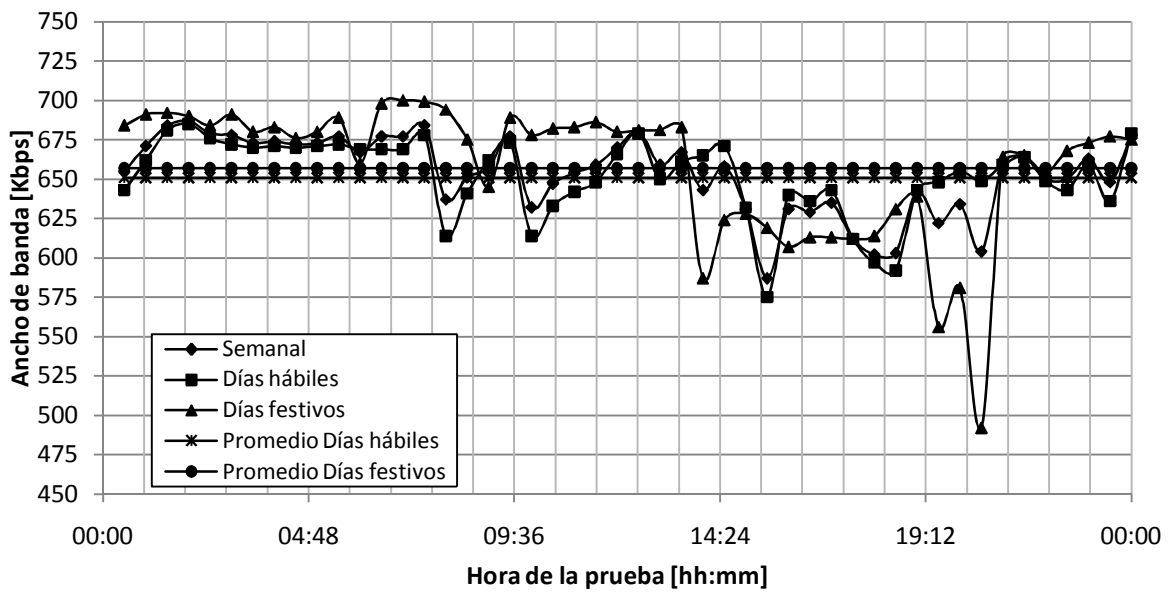
Después de comprobar la estabilidad del enlace de datos, se realizan las mediciones de los parámetros ancho de banda, throughput, RTT, latencia, jitter y BER, empleando la herramientas de medición iperf, D-ITG y netio configuradas con duración del registro de 15 segundos, tamaño de la ventana TCP de 8 Kbytes y MTU de 512 bytes. Las pruebas se realizaron durante 14 días consecutivos, además, se realizaron procesos estadísticos para el tratamiento de los datos obtenidos. A continuación se presentan los resultados de estas mediciones:

Figura B.8 Throughput de los 14 días de pruebas para CIA.



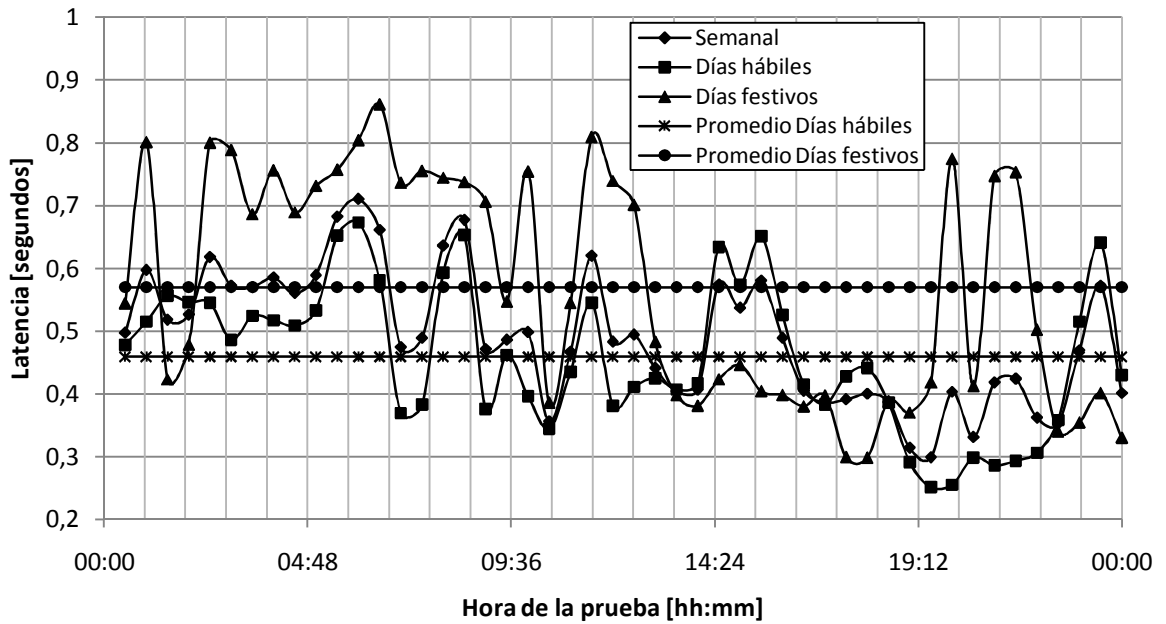
Fuente: El autor.

Figura B.9 Ancho de banda de los 14 días de pruebas para CIA.



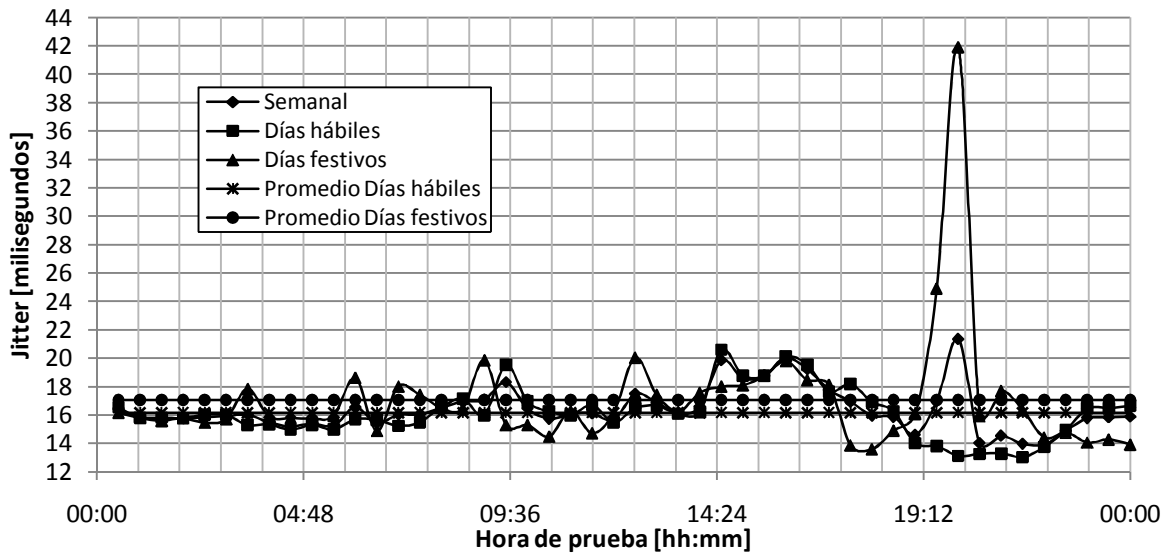
Fuente: El autor.

Figura B.10 Latencia de los 14 días de pruebas para CIA.



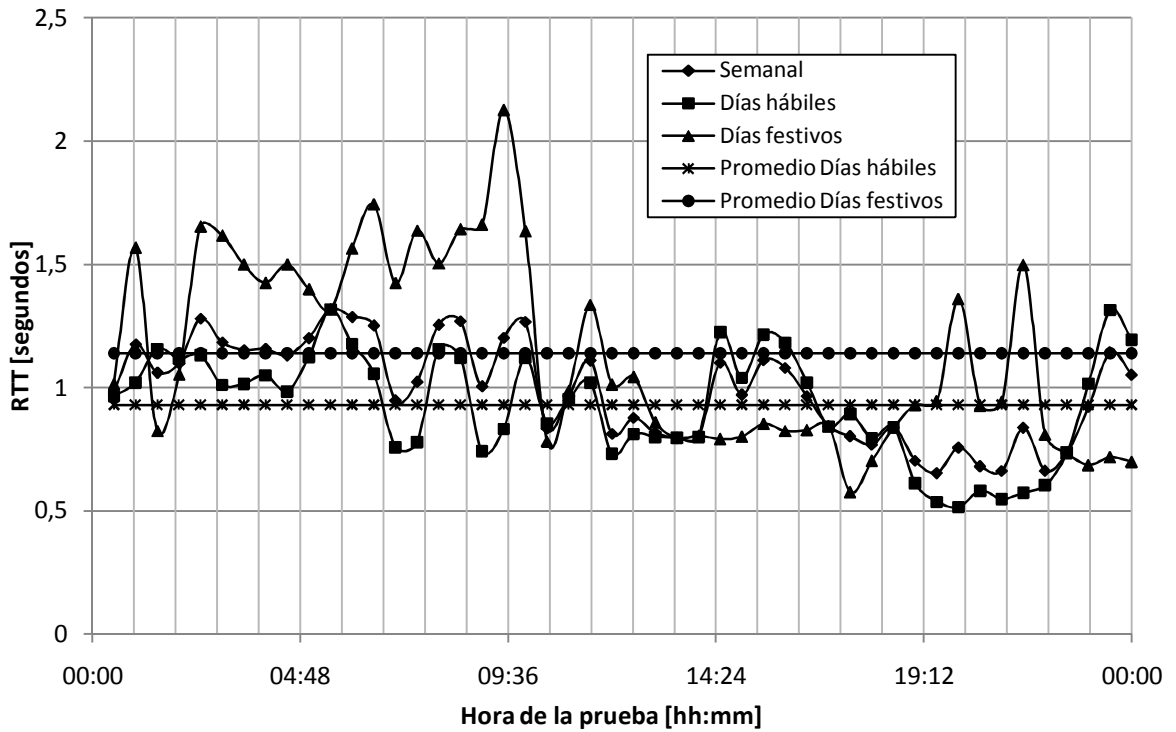
Fuente: El autor.

Figura B.11 Jitter de los 14 días de pruebas para CIA.



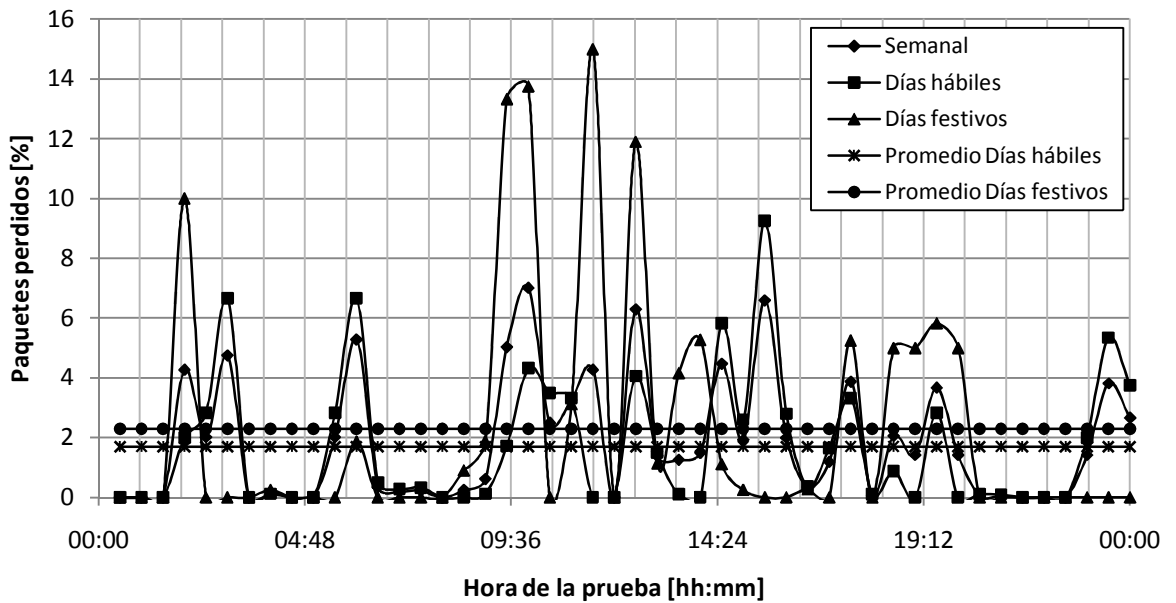
Fuente: El autor.

Figura B.12 RTT de los 14 días de pruebas para CIA.



Fuente: El autor.

Figura B.13 BER de los 14 días de pruebas para CIA.

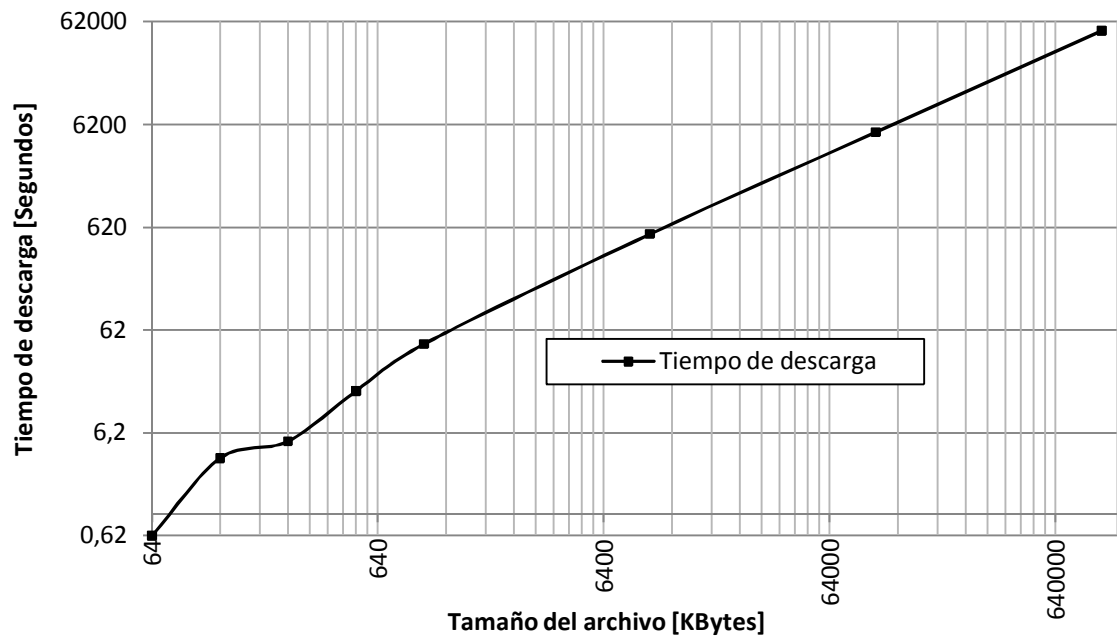


Fuente: El autor.

4. Prueba de descarga de archivos.

En la figura B.14 y B.15 se observan los resultados para la descarga de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 64 Kbytes hasta 100Mbytes.

Figura A.14 Duración registrada durante la descarga de archivos para CIA

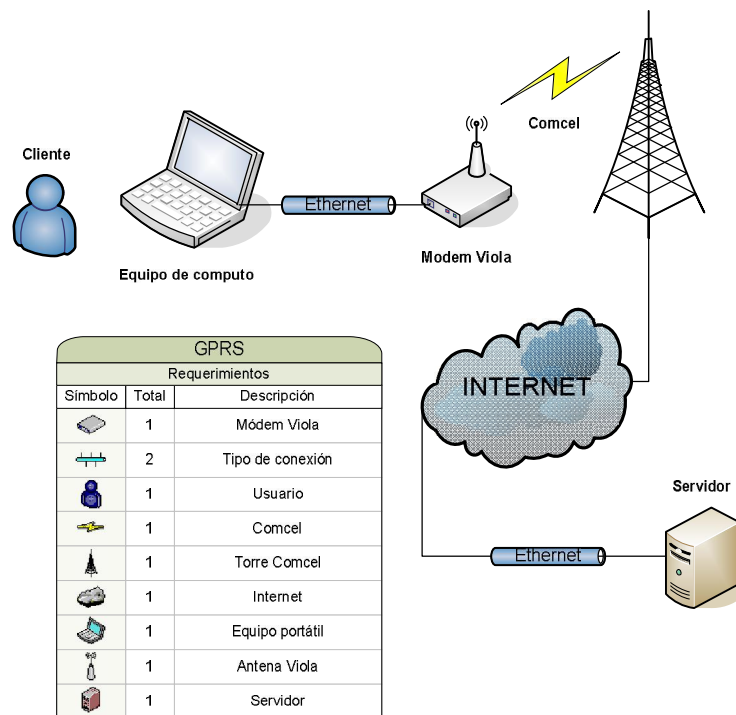


Fuente: El autor.

ANEXO C: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA GPRS

En este anexo se presentan los resultados obtenidos para la caracterización de un enlace de datos empleando la tecnología GPRS, como el mostrado en la figura C.1. El conjunto de pruebas desarrolladas se puede observar en el trabajo de Forero [44].

C.1 Esquemas de implementación para la tecnología GPRS



Fuente: El autor.

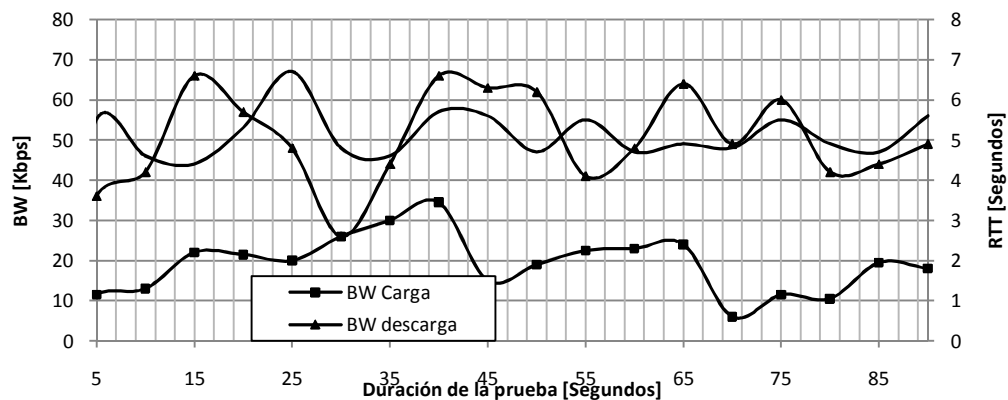
1. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar para optimizar las mediciones que se realicen con las herramientas de medición de desempeño son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación el tamaño de la ventana TCP.

En la figura C.1 se observa la variación del retardo y la variación del ancho de banda para carga y descarga del enlace de datos con respecto a la duración de la toma de mediciones. El ancho de banda de carga es notoriamente inferior al de descarga; las variaciones que se observan en la figura no presentan una tendencia a estabilidad, esto obedece a que el sistema es compartido con los servicios de voz y a la disponibilidad en la radio base de los ranuras de tiempo que se utilicen, factor que no se puede ajustar ni modificar. Sin embargo, el ancho de banda promedio de descarga se mide en el orden de los 50 Kbps y de carga en el orden de los 20 Kbps con retardos inferiores a los 7 segundos.

Figura C.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para GPRS.

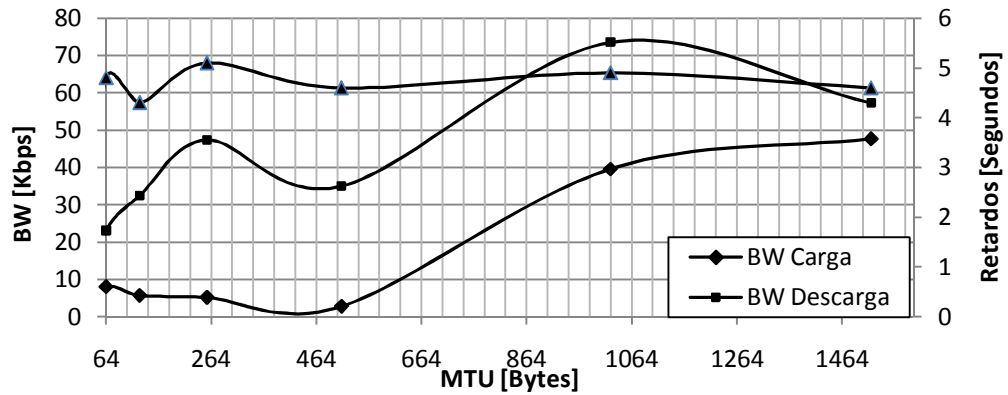


Fuente: El autor.

El comportamiento de los anchos de banda de carga y descarga variando la MTU se puede observar en la figura C.3, se aprecia una variación similar en las mediciones, se observa que al aumentar la MTU aumenta el ancho de banda (carga y descarga); los retardos no varían significativamente, manteniendo su

valor cerca a los 5 segundos; se escoge el valor para la MTU de 1024 bytes para no sobre pasar el valor máximo que equivale a 1472 bytes y debido a que el ancho de banda de descarga empieza a decaer en ese valor.

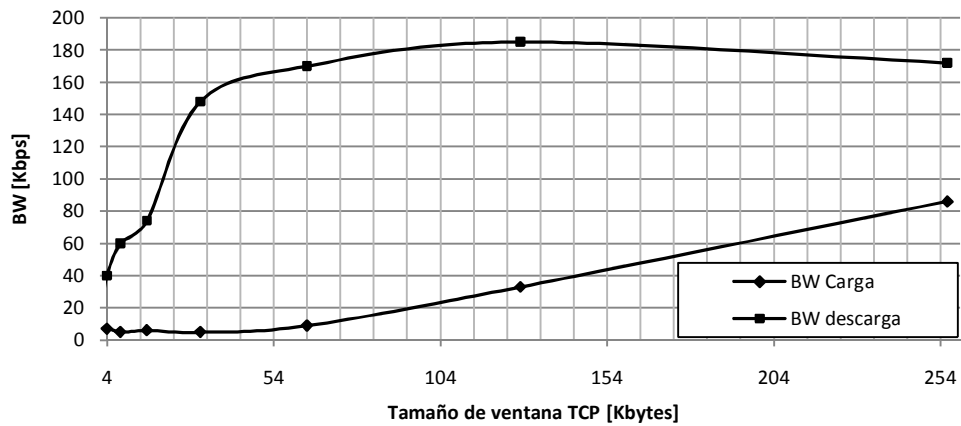
Figura C.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para GPRS



Fuente: El autor.

Para escoger el tamaño de la ventana TCP se tuvo en cuenta la variación del ancho de banda a diferentes tamaños, el comportamiento de la variación de la ventana TCP se muestra en la figura C.4. Se escogió 128 Kbytes como el tamaño de ventana adecuado para las siguientes mediciones debido a que este presenta el mayor ancho de banda de descarga antes de decaer lentamente.

Figura C.4. Ancho de banda variando la ventana TPC para GPRS

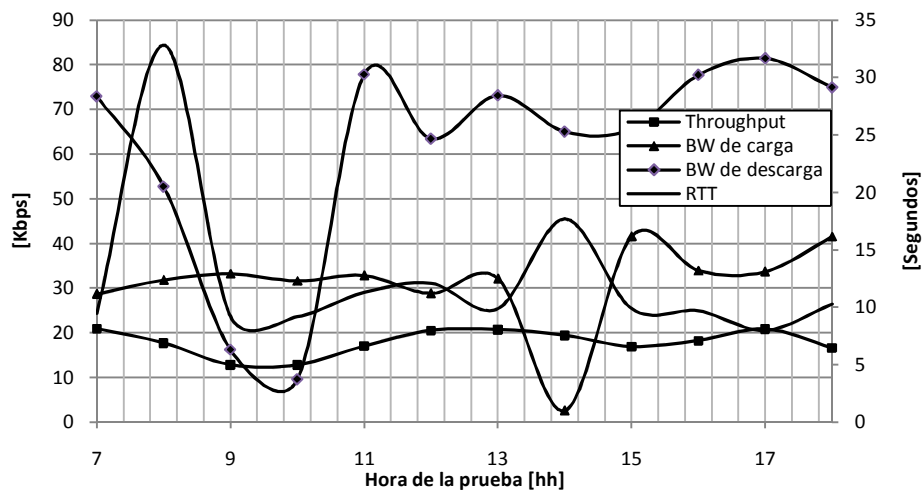


Fuente: El autor.

2. Prueba de estabilidad del enlace de datos.

Para comprobar la estabilidad del enlace de datos, se realizaron mediciones durante 12 horas, midiendo ancho de banda, throughput y retardos, el comportamiento de la prueba se observa en la figura C.5. Los parámetros ajustados de las herramientas son: MTU de 1024 Bytes, tamaño de la ventana TCP de 128 Kbytes y duración del registro de 15 segundos.

Fig. C.5. Comportamiento del enlace de datos GPRS durante 12 horas.



Fuente: El autor.

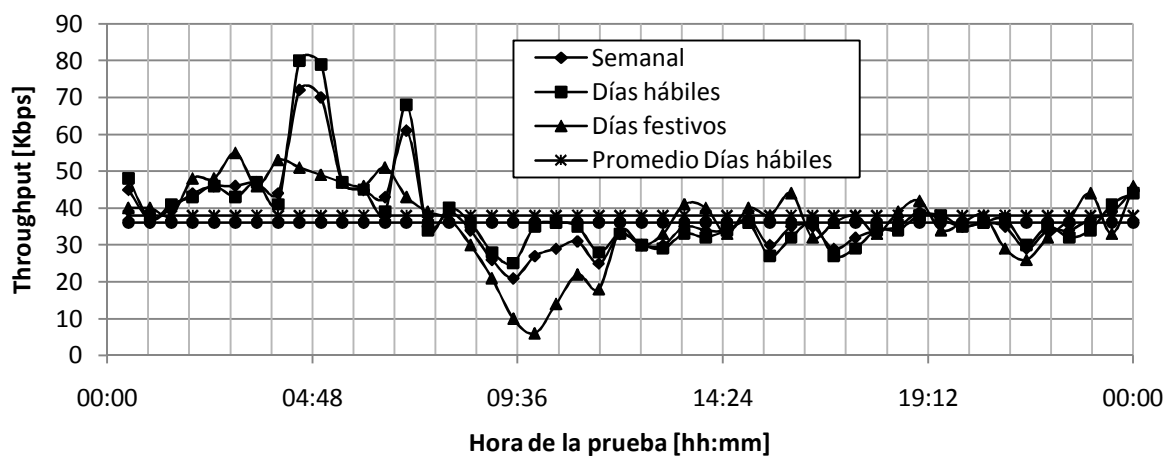
El horario de pruebas estuvo comprendido entre las 7 am y las 7 pm del 9 de septiembre de 2009. A los datos obtenidos se les realizó un tratamiento estadístico para agrupar las muestras y presentar los promedios por horas. Al observar la figura C.5 el throughput presenta un comportamiento estable durante el desarrollo de las mediciones, se mantiene alrededor de los 18 Kbps sin presentar máximos o mínimos considerables; con respecto al ancho de banda de carga, el cual es el que merece mayor atención, su comportamiento se mantiene estable en las horas de la mañana con mediciones cercanas a los 30 Kbps, pero cerca a la 1:00 pm decae considerablemente hasta las 3:00 pm en donde se estabiliza hasta finalizar la prueba. El ancho de banda de descarga inicialmente se mide en 72 Kbps, decae

significativamente durante cuatro horas, después de ello, aumenta y se mantiene cerca de los 70 Kbps hasta finalizar las mediciones. Por último, los retardos obtenidos muestran una gran variación durante el día, a las 8:00 am, se observan retardos cercanos a los 30 segundos y a las 2:00 pm retardos inferiores a los 3 segundos, además, presentan un promedio de 12,5 segundos para el total de la prueba realizada. Es recomendable analizar con detalle las mediciones que se realicen en la prueba extendida para caracterizar el comportamiento del enlace de datos.

3. Prueba extendida de medición de parámetros.

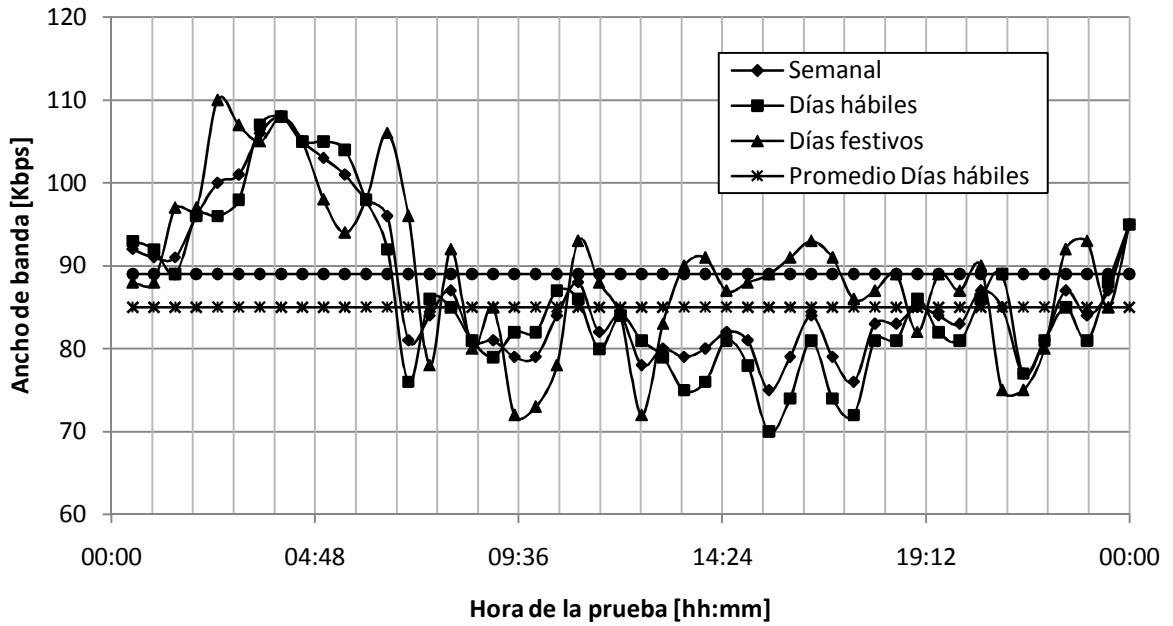
Después de comprobar la estabilidad del enlace de datos, se realizan las mediciones de los parámetros ancho de banda, throughput, RTT, latencia, jitter y BER, empleando la herramientas de medición iperf, D-ITG y netio configuradas con duración del registro de 15 segundos, tamaño de la ventana TCP de 128 Kbytes y MTU de 1024 bytes. Las pruebas se realizaron durante 14 días consecutivos, además, se realizaron procesos estadísticos para el tratamiento de los datos obtenidos. A continuación se presentan los resultados de estas mediciones.

Figura C.6 Throughput de los 14 días de pruebas para GPRS.



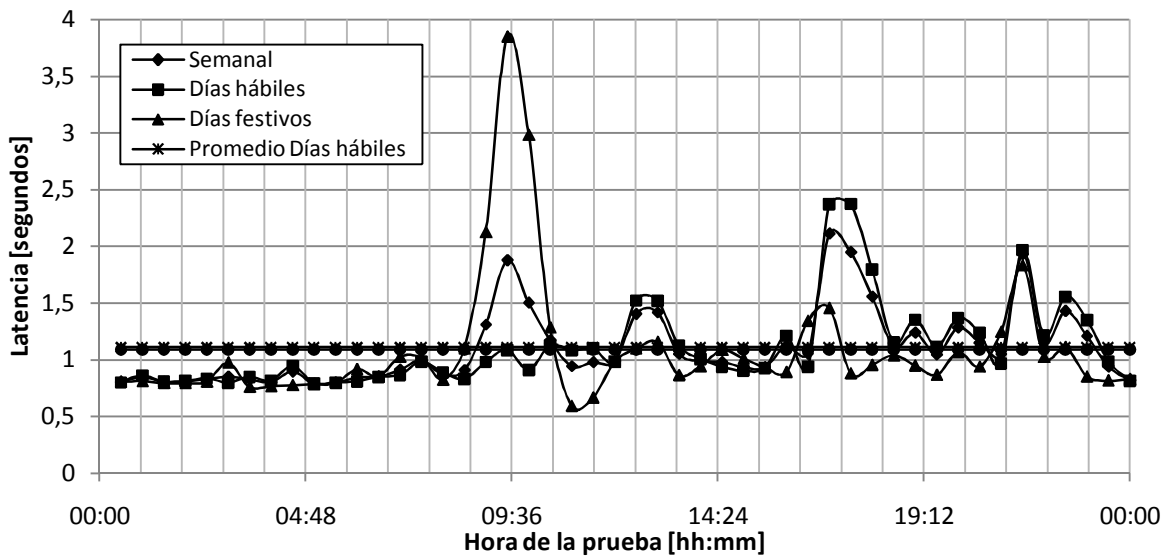
Fuente: El autor.

Figura C.7 Ancho de banda de los 14 días de pruebas para GPRS.



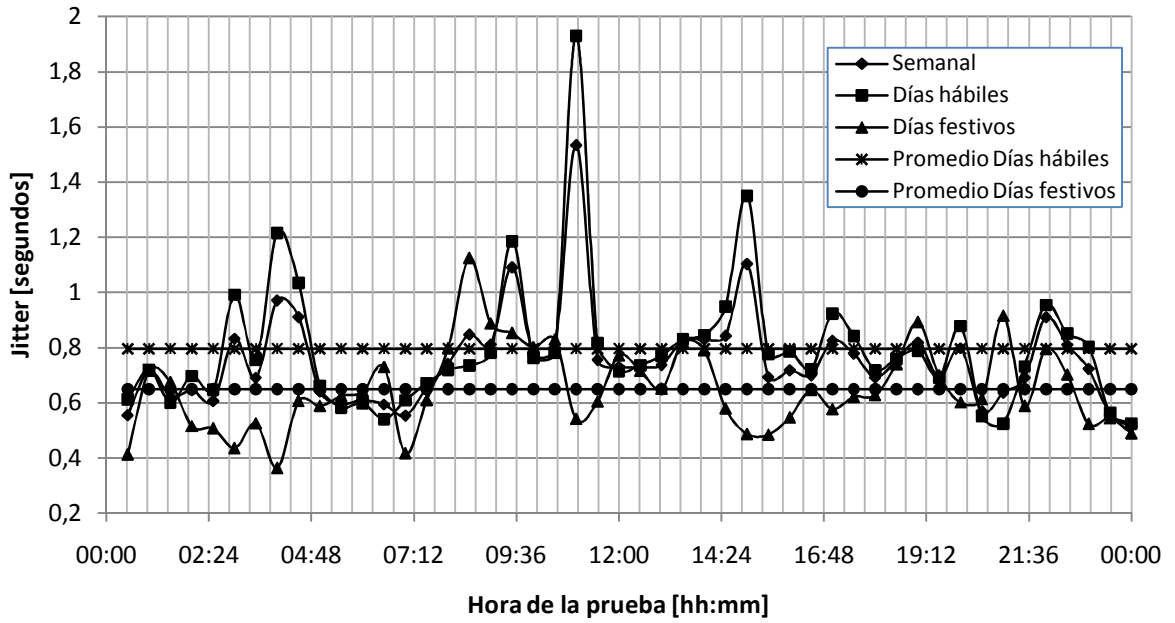
Fuente: EL autor.

Figura C.8 Latencia de los 14 días de pruebas para GPRS.



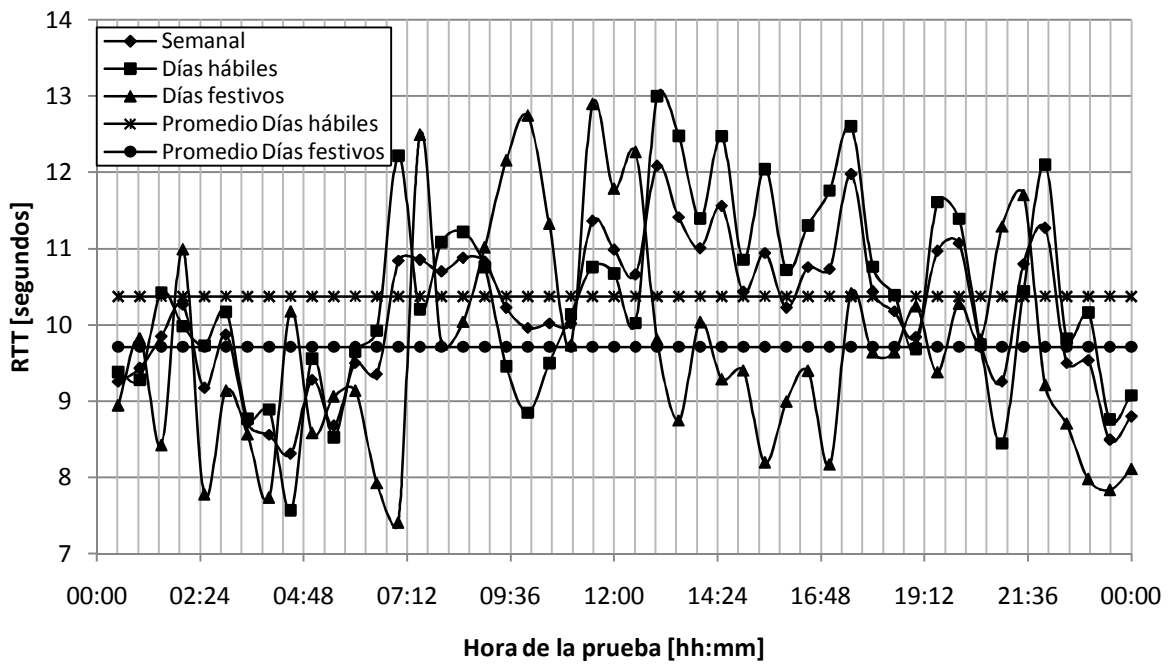
Fuente: El autor

Figura C.9 Jitter de los 14 días de pruebas para GPRS.



Fuente: El autor.

Figura C.10 RTT de los 14 días de pruebas para GPRS.

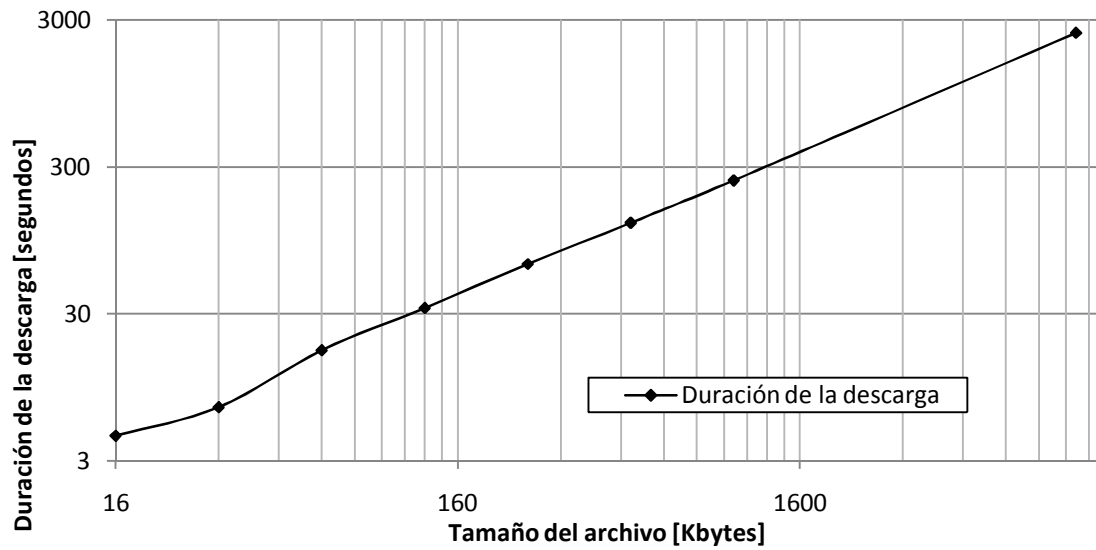


Fuente: El autor.

4. Prueba de descarga de archivos.

En la figura C.11 se observan los resultados para la descarga de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 16 Kbytes hasta 10 Mbytes.

Figura C.11 Duración registrada durante la descarga de archivos para GPRS

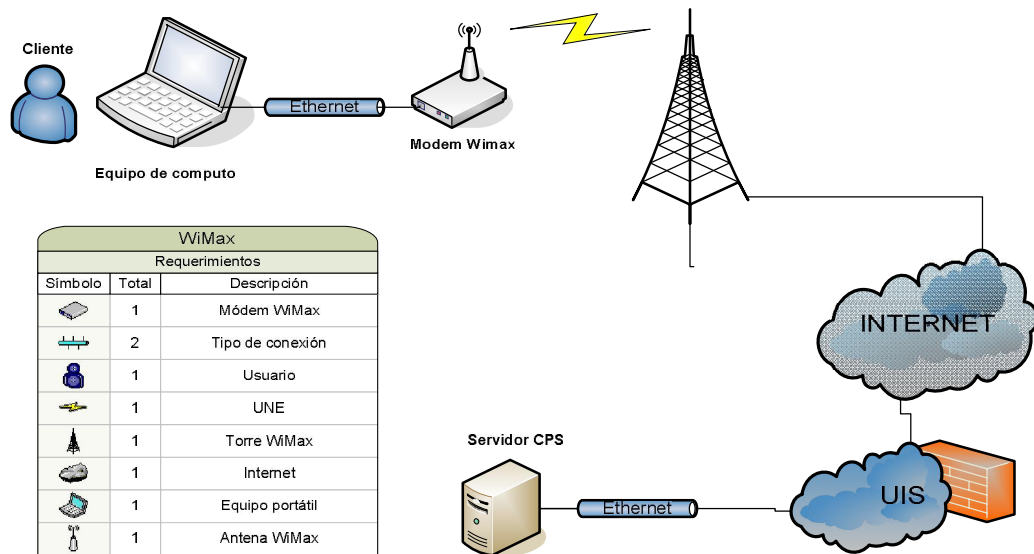


Fuente: El autor.

ANEXO D: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA WiMAX

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas a la tecnología de comunicación WiMAX. El enlace de datos es el mostrado en la figura D.1

Figura D.1 Esquema de implementación para la tecnología WiMAX



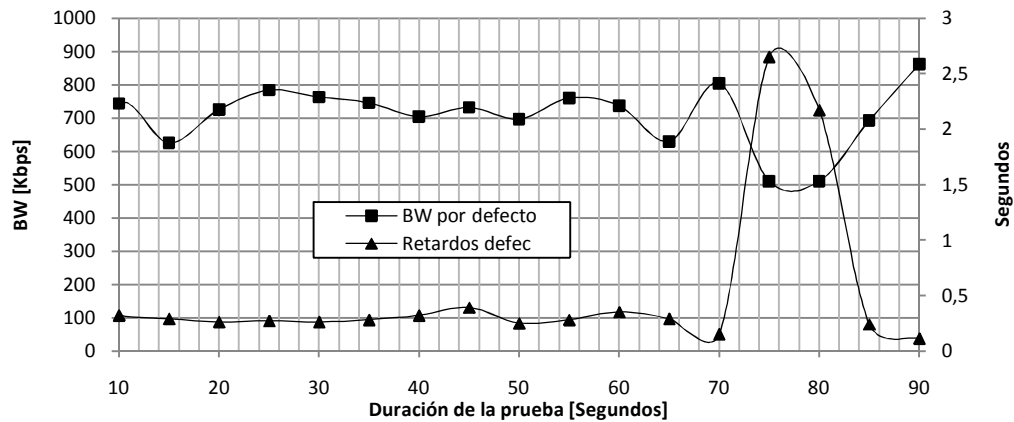
Fuente: El autor.

1. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación el tamaño de la ventana TCP.

Figura D.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para WiMAX.

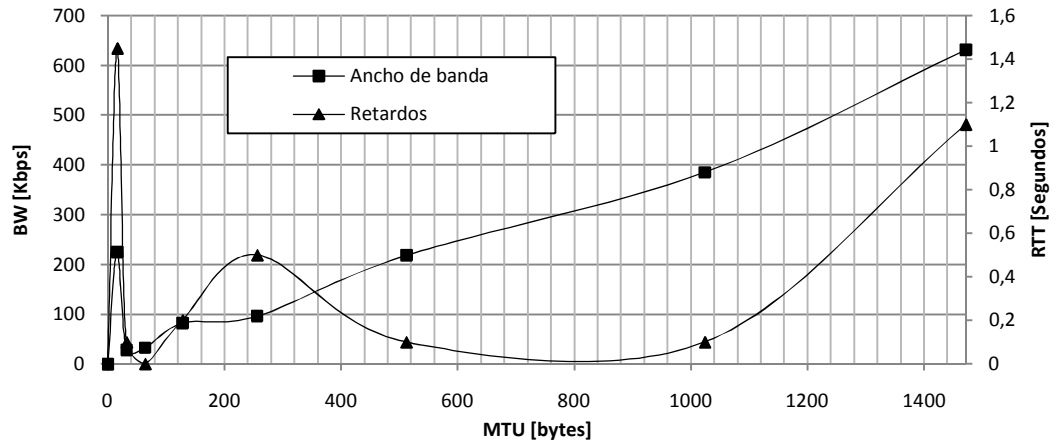


Fuente: El autor.

En la figura D.2 se observa la variación del retardo (eje vertical derecho) y la variación del ancho de banda (eje vertical izquierdo); en las dos curvas, se muestra la variación del tiempo de toma del registro, el cual afecta el rendimiento del enlace; el ancho de banda presenta un comportamiento estable entre los 20 y los 60 segundos y su máximo en los 25 segundos, el retardo se mantiene estable desde los 5 hasta los 65 segundos, por lo anterior, se determina que el tiempo del registro es de 25 segundos para las siguientes pruebas de desempeño.

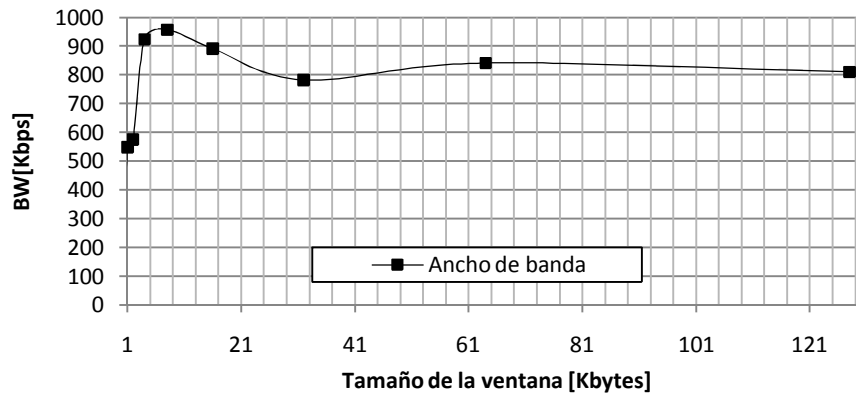
Los resultados para determinar el MTU adecuado se pueden observar en la figura D.3. En ellas se presentan los retardos (eje vertical izquierdo) y anchos de banda (eje vertical derecho) medidos al variar la MTU. Se visualizan retardos inferiores para todos los valores de la MTU, sin embargo, para las mediciones de ancho de banda se observan resultados crecientes con el aumento de la MTU hasta alcanzar el mayor, el máximo ancho de banda se obtiene para el MTU máximo, el cual corresponde a 1472 bytes. Por lo anterior, se define 1472 bytes como la MTU apropiada para las mediciones de desempeño.

Figura D.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para WiMAX



Fuente: EL autor.

Figura D.4 Ancho de banda variando la ventana TCP para WiMAX



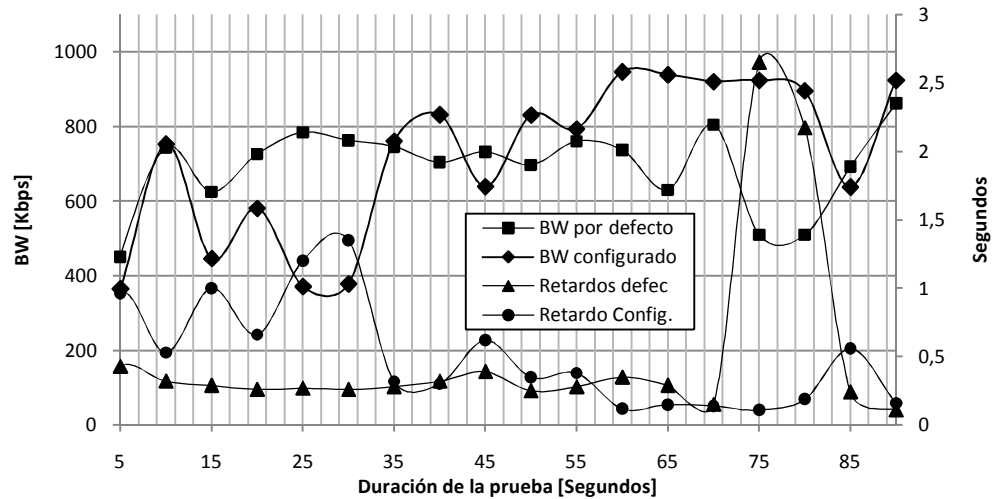
Fuente: EL autor.

En la figura D.4 se muestra la variación del ancho de banda al variar el tamaño de la ventana TCP. El mayor ancho de banda se presenta para la ventana de TCP de 8 Kbytes por ello, se escoge esta como la más apropiada para configurar las herramientas de desempeño.

Antes de realizar las mediciones de desempeño de larga duración (mediciones superiores a dos horas), se realizó la comparación entre las mediciones obtenidas antes y después de configurar las condiciones de las herramientas. En la figura

D.5 se observan los resultados de esta comparación, en los resultados se observa un mejor desempeño para el ancho de banda registrado y una estabilidad en los retardos registrados.

Figura D.5 Comparación de parámetros por defecto y configurados para WiMAX.



Fuente: El autor.

2. Prueba de estabilidad del enlace de datos.

Las pruebas realizadas tienen definidos los siguientes parámetros para las herramientas:

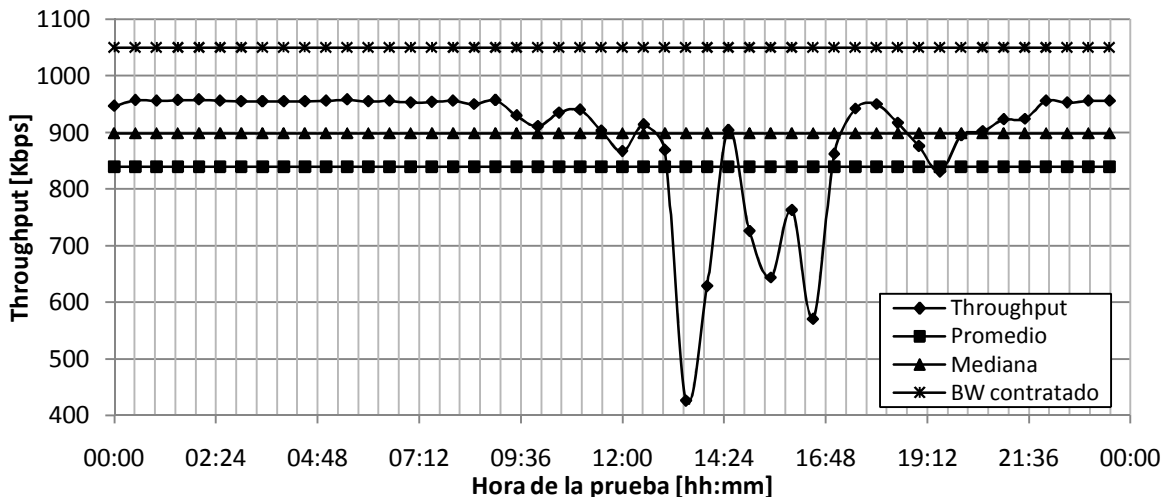
- ✓ MTU: 1472 Bytes.
- ✓ Tamaño de la ventana TCP: 8 Kbytes
- ✓ Duración del registro de 25 segundos.

Por consiguiente, los resultados de las pruebas de 24 horas se realizaron el martes 25 de febrero de 2010, midiendo throughput y RTT para TCP; se aplicaron

métodos estadísticos para asociar los datos obtenidos en las mediciones, realizando agregaciones cada treinta minutos.

En la figura D.6 se observa el comportamiento del throughput, en esta gráfica se observa la tasa efectiva de transferencia con un 80% respecto al ancho de banda ofrecido por el proveedor del servicio de datos; las horas en donde se presenta mayor tasa están situadas entre la media noche y las 9 de la mañana, para el resto se observa una disminución en la tasa efectiva.

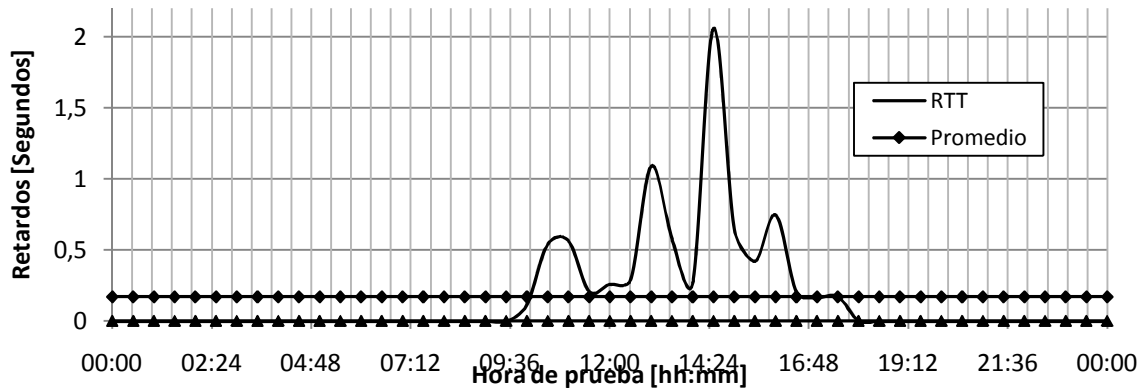
Figura D.6 Throughput para WiMAX.



Fuente: El autor.

En la figura D.7 se observan los retardos para la prueba de 24 horas, el retardo máximo se encuentra a las 14:30 con un valor de 2,1 segundos; la franja comprendida entre las 00:00 y las 9:00 presenta retardos despreciables, por debajo de los 50 milisegundos, de igual forma ocurre en la franja entre las 19:00 y las 24:00. Los retardos presentes se encuentran en la franja de operación empresarial, es de anotar que las mediciones se realizaron con la herramienta D-ITG para el protocolo TCP

Figura D.7 Retardos TCP para WiMAX.

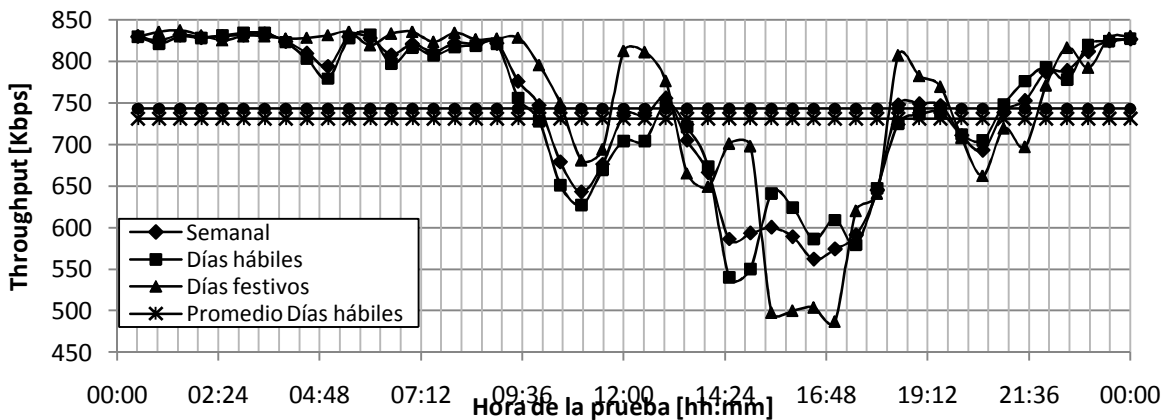


Fuente: El autor.

3. Prueba extendida de medición de parámetros.

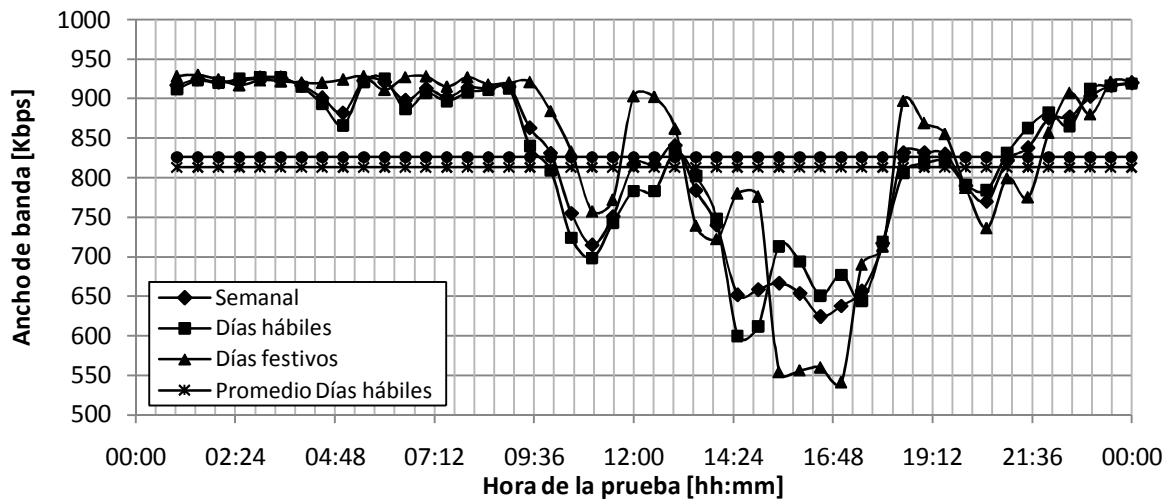
Después de comprobar la estabilidad del enlace de datos, se realizan las mediciones de los parámetros ancho de banda, throughput, latencia, jitter y BER, empleando la herramientas de medición iperf y D-ITG configuradas con duración del registro de 25 segundos, tamaño de la ventana TCP de 8 Kbytes y MTU de 1472 bytes. Las pruebas se realizaron durante 14 días consecutivos, además, se realizaron procesos estadísticos para el tratamiento de los datos obtenidos. A continuación se presentan los resultados de estas mediciones:

Figura D.8 Throughput de los 14 días de pruebas para WiMAX.



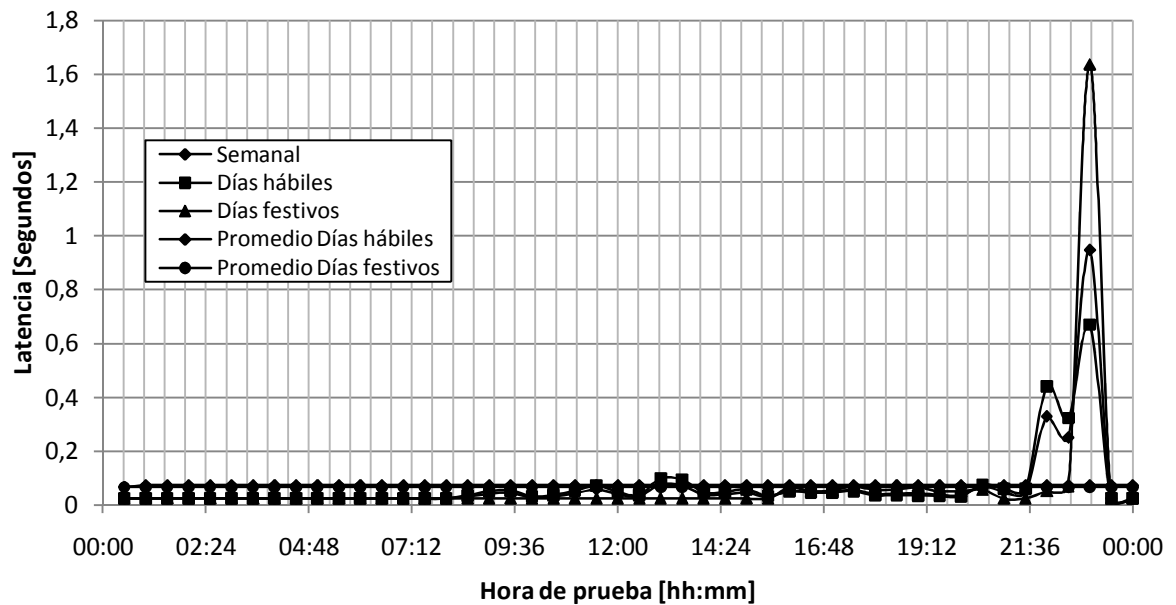
Fuente: El autor

Figura D.9 Ancho de banda de los 14 días de pruebas para WiMAX.



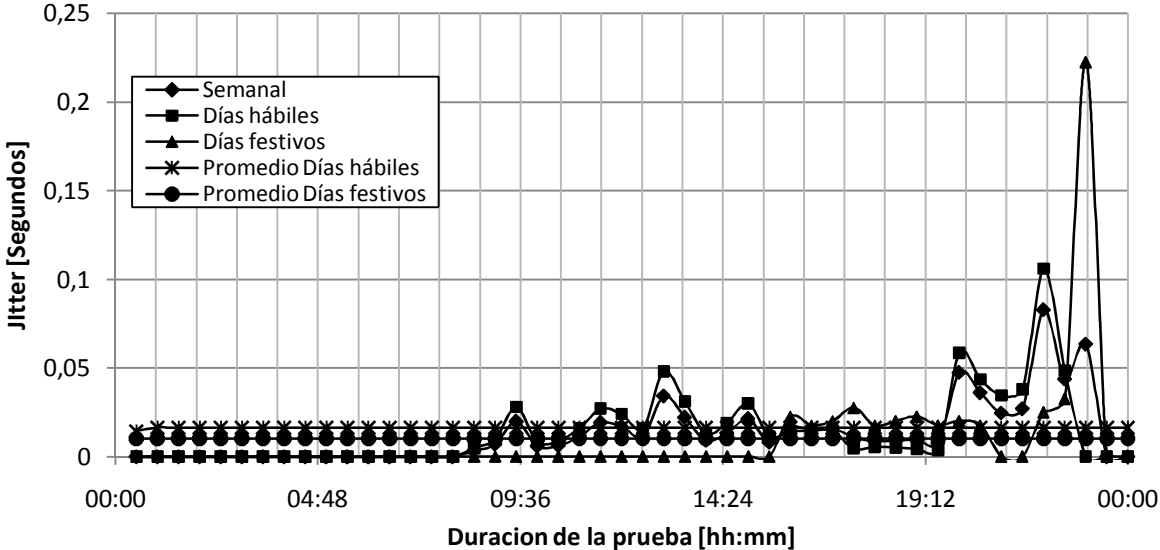
Fuente: El autor

Figura D.10 Latencia de los 14 días de pruebas para WiMAX.



Fuente: El autor

Figura D.11 Jitter de los 14 días de pruebas para WiMAX.



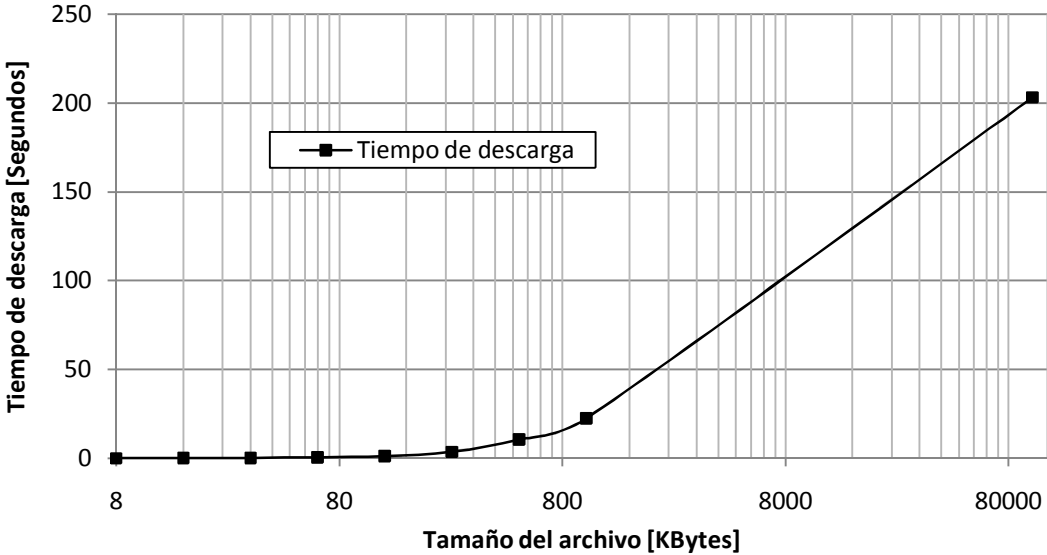
Fuente: El autor.

No se realiza gráfica de paquetes perdidos ya que no se presentó ninguna pérdida en las pruebas realizadas.

4. Prueba de descarga de archivos.

En la figura D.12 se observan los resultados para la descarga de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 8 Kbytes y 10 Mbytes.

Figura D.12 Duración registrada durante la descarga de archivos para WiMAX

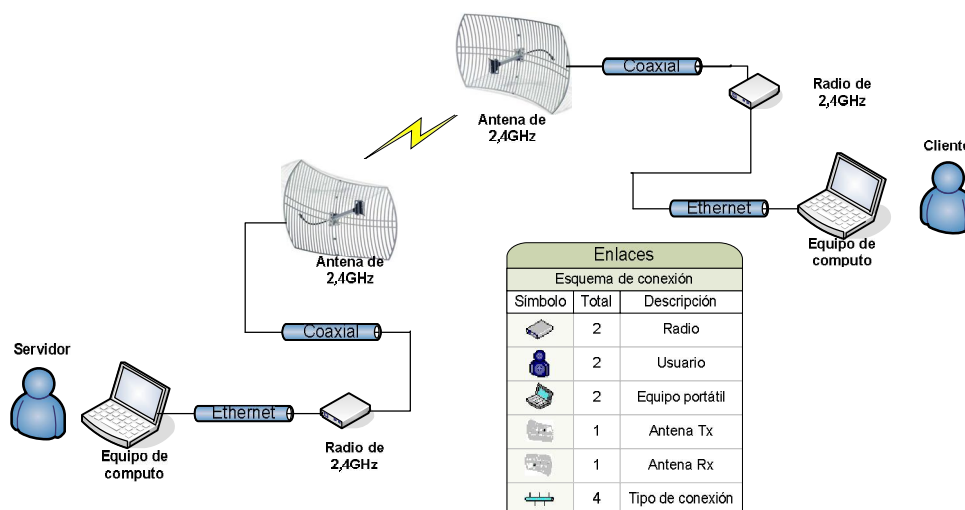


ANEXO E: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA Wireless LAN

LAN

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas a la tecnología de comunicación Wireless LAN. El enlace de datos es el mostrado en la figura E.1

Figura E.1 Esquema de implementación para la tecnología Wireless LAN



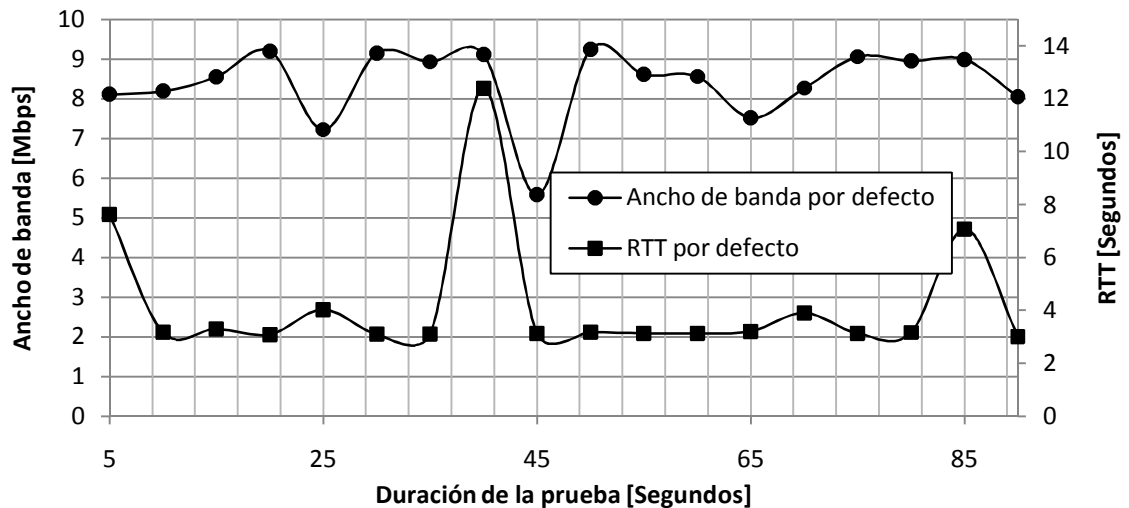
Fuente: El autor.

1. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación el tamaño de la ventana TCP.

Figura E.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para Wireless LAN.

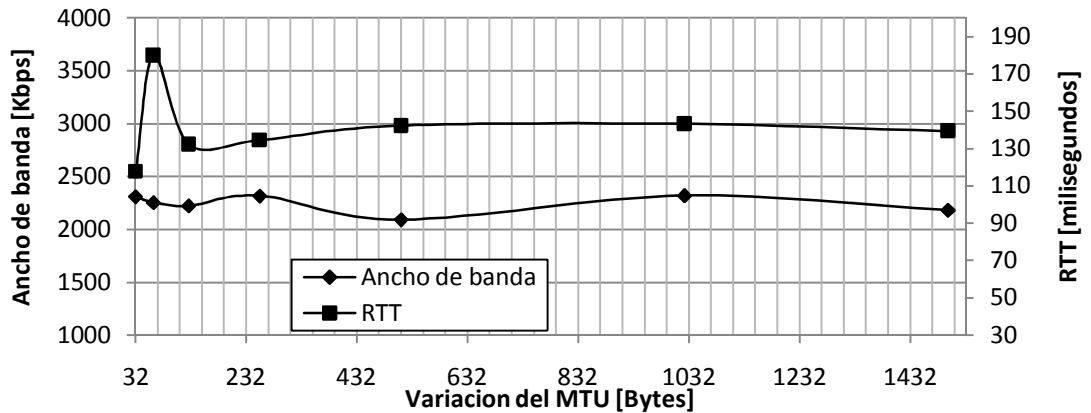


Fuente: El autor.

En la figura E.2 se observa la variación del retardo (eje vertical derecho) y la variación del ancho de banda (eje vertical izquierdo); el comportamiento del ancho de banda presenta su máximo valor a los 20 segundos con medición de 10,5 Mbps, mientras que los retardos se encuentran por debajo de los 12 milisegundos. Se determinó 20 segundos como duración del registro debido a que presenta un ancho de banda elevado y un retardo en el punto estable de las mediciones, 2 milisegundos.

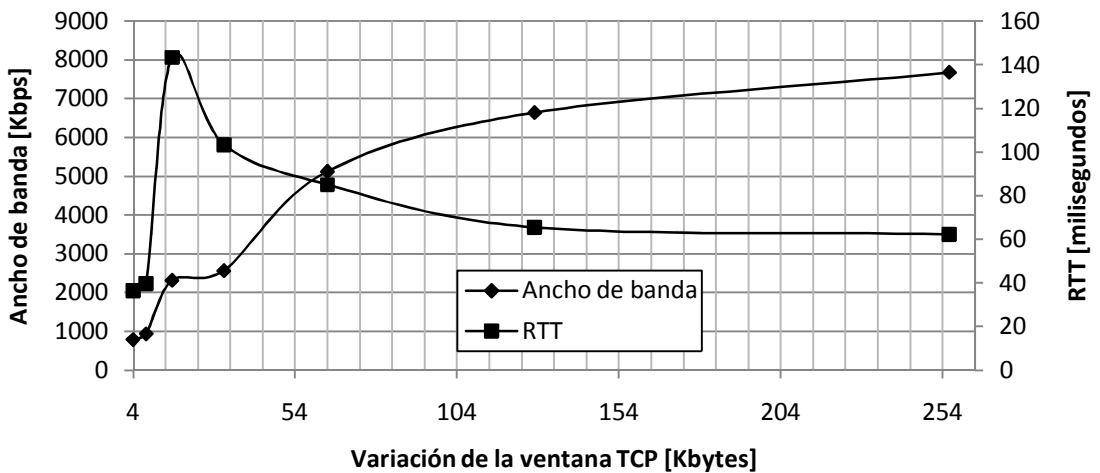
En la figura E.3 se observa el ancho de banda y los retardos con respecto a la variación de la MTU. La característica de las medidas es que al aumentar el tamaño MTU aumenta el ancho de banda se mantiene estable sin sobrepasar los 2,5 Mbps y sin decaer por debajo de los 2 Mbps. Por otro lado, los retardos para MTU inferiores a 512 bytes presentan inestabilidad, por lo cual se escoge el MTU de 1024 para realizar las pruebas de larga distancia.

Figura E.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para Wireless LAN



Fuente: EL autor.

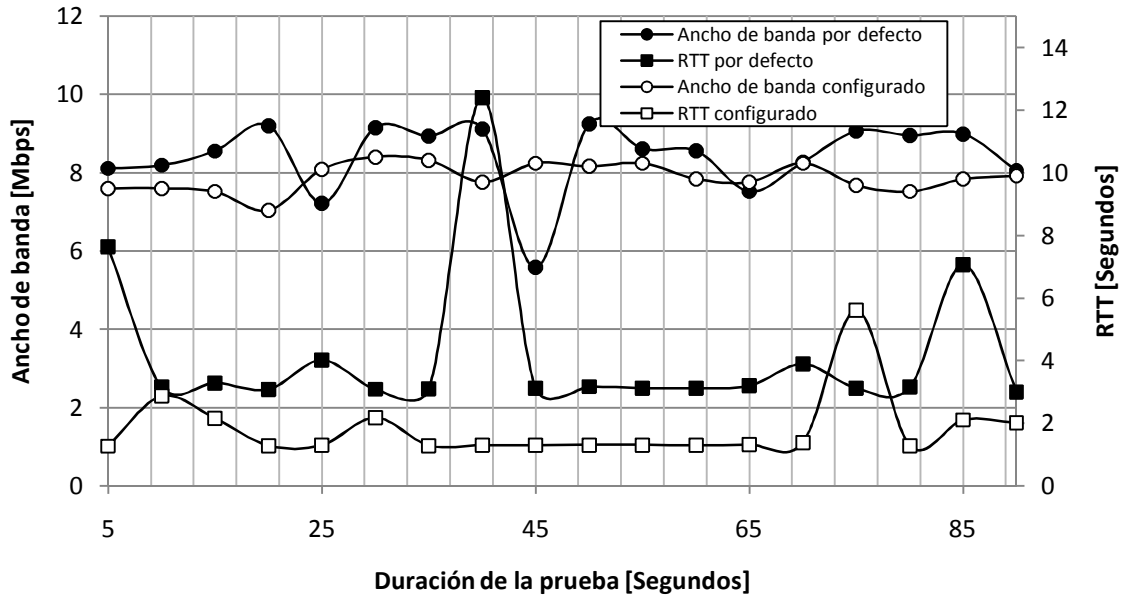
Figura E.4 Ancho de banda variando la ventana TPC para Wireless LAN



Fuente: EL autor.

La figura E.4 muestra los resultados obtenidos durante las mediciones de ancho de banda y retardos al variar el tamaño de la ventana TCP. El ancho de banda es creciente conforme el tamaño de la ventana TCP aumenta, por otro lado, los retardos aumentan inicialmente y luego decaen estabilizándose cerca a los 70 milisegundos para la ultima ventana TCP medida. Debido a lo anterior, se escoge 256 Kbytes como el tamaño de la ventana TCP más apropiado.

Figura E.5 Comparación de parámetros por defecto y configurados para WiMAX.



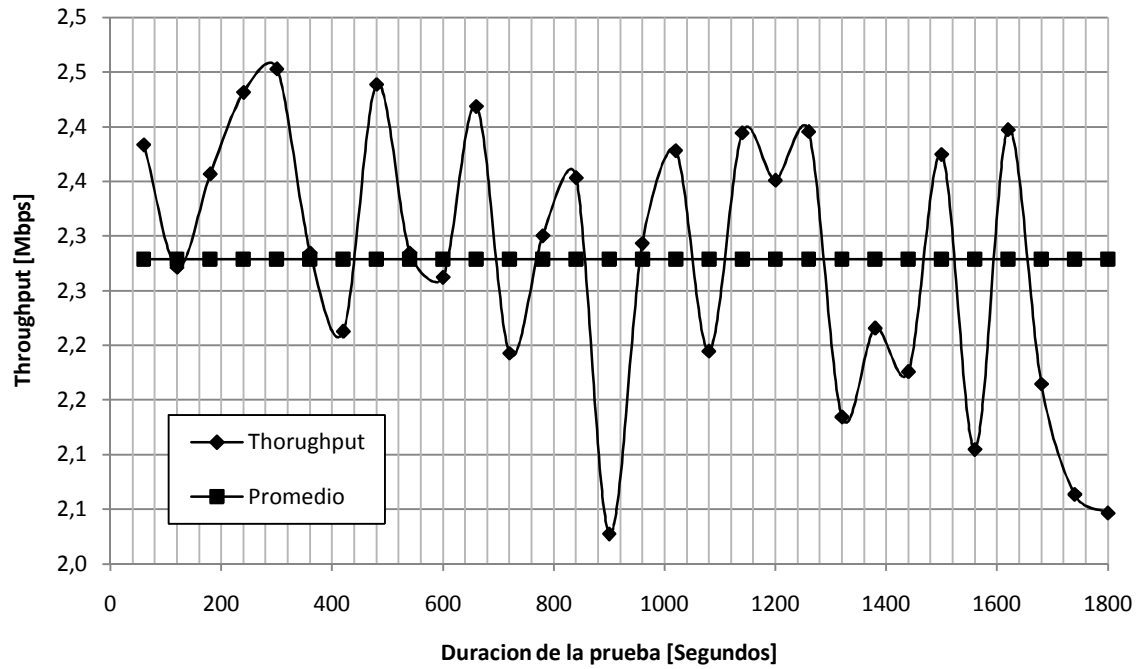
Fuente: El autor.

EN la figura E.5 se observa la comparación de las mediciones realizadas al ajustar el MTU y el tamaño de la ventana TCP. Se aprecia que variando estos parámetros el comportamiento del enlace mejora tanto en las medidas de ancho de banda como de retardos.

2. Prueba de medición de desempeño.

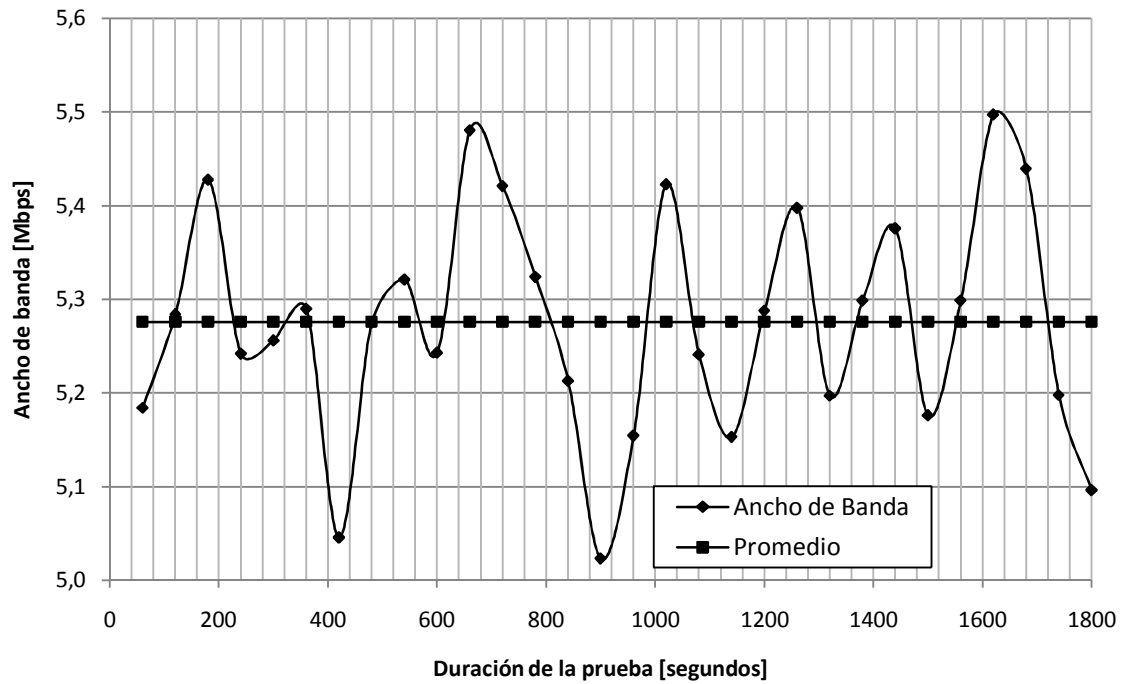
A continuación se muestran los resultados de las mediciones de los parámetros: ancho de banda, throughput, latencia, y jitter. Las mediciones tiene las siguientes características: distancia aproximada de 8 kilómetros, duración del registro de 20 segundos, tamaño de la ventana TCP de 512 Kbytes y MTU de 1472 bytes.

Figura E.6 Throughput para Wireless LAN.



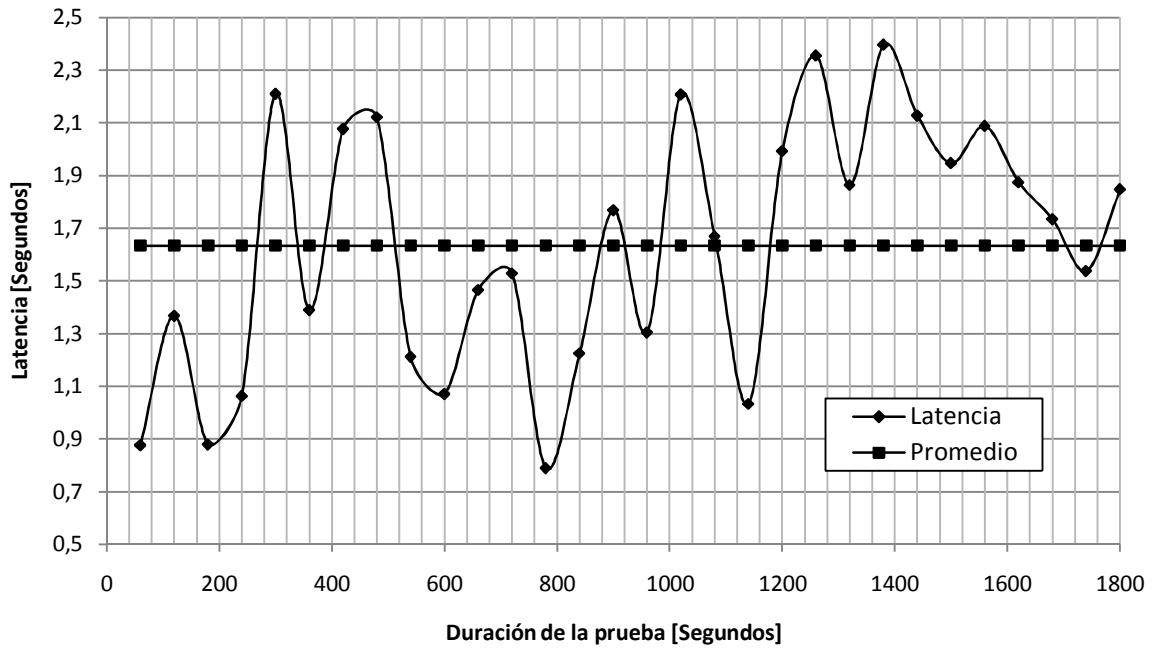
Fuente: El autor

Figura E.7 Ancho de banda para Wireless LAN.



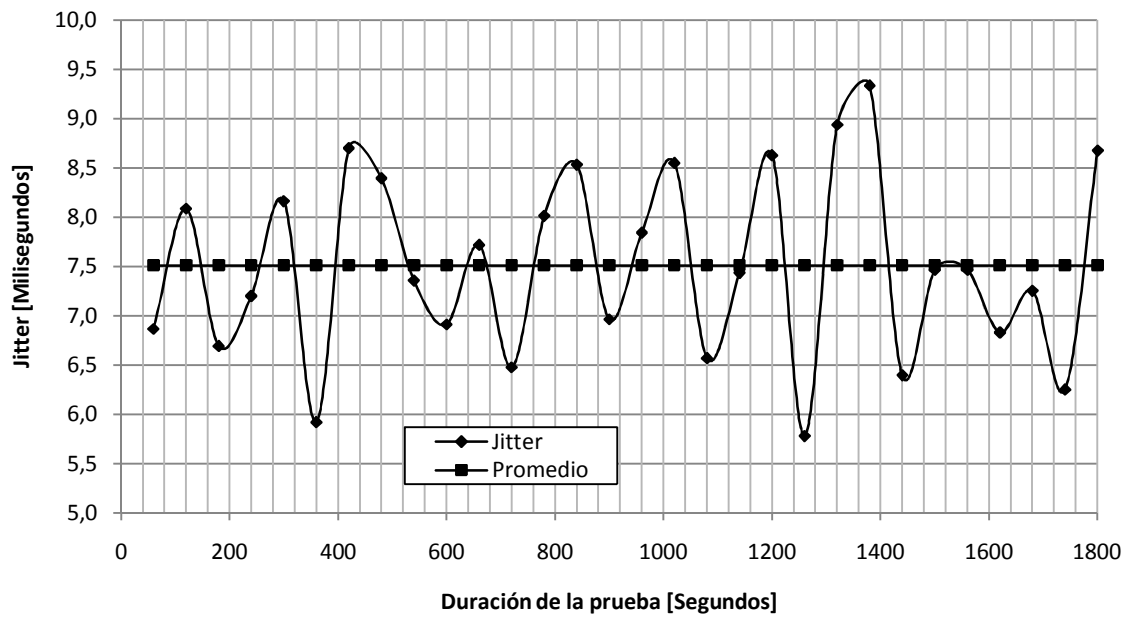
Fuente: El autor

Figura E.8 Latencia para Wireless LAN.



Fuente: El autor

Figura E.9 Jitter para Wireless LAN.



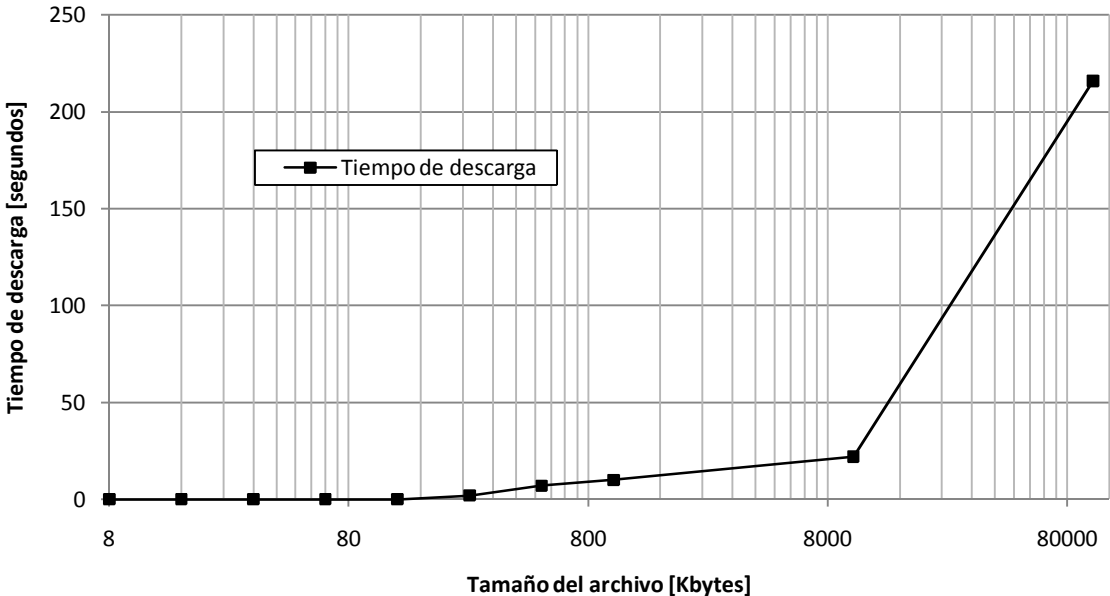
Fuente: El autor.

No se realiza gráfica de paquetes perdidos ya que no se presentó ninguna pérdida en las pruebas realizadas.

3. Prueba de descarga de archivos.

En la figura E.10 se observan los resultados para la descargas de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 8 Kbytes y 100 Mbytes.

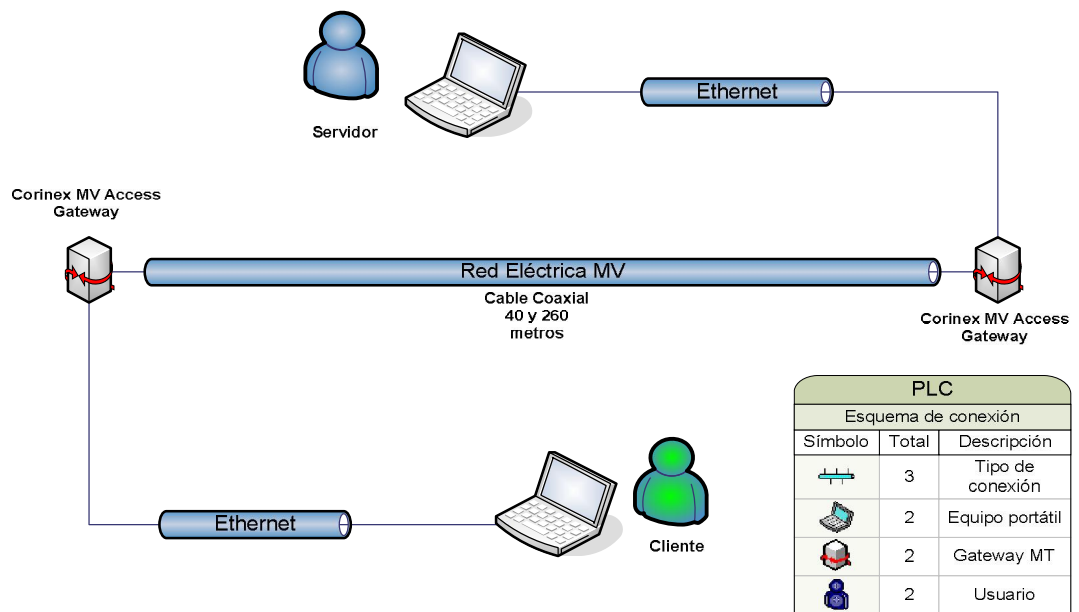
Figura E.10 Duración registrada durante la descarga de archivos para Wireless LAN



ANEXO F: RESULTADOS DE MEDICIONES PARA LA TECNOLOGÍA PLC

A continuación se presentan los resultados de las mediciones realizadas a la tecnología de comunicación Wireless LAN. El enlace de datos es el mostrado en la figura F.1

Figura F.1 Esquema de implementación para la tecnología PLC



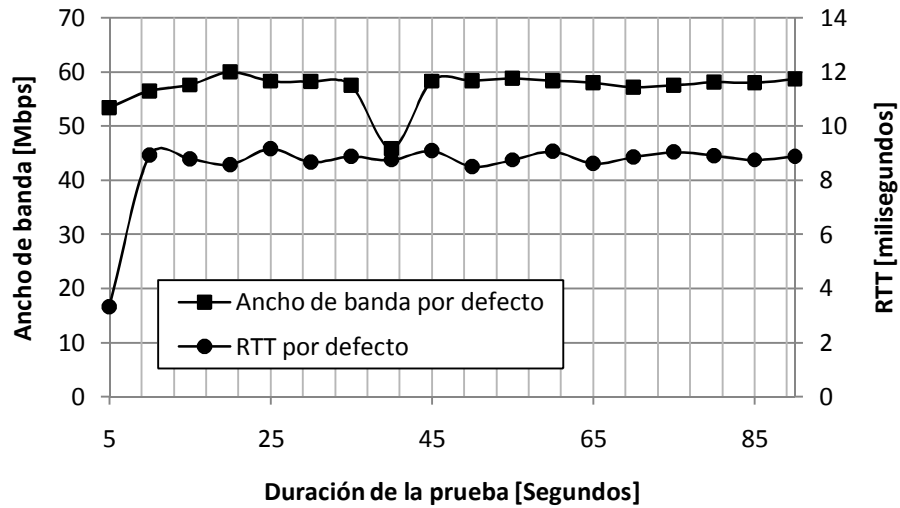
Fuente: El autor.

4. Pruebas de ajustes de los parámetros de medida.

Los parámetros que se requieren ajustar son:

- ✓ Determinación de la duración del tiempo de registro.
- ✓ Determinación de la MTU.
- ✓ Determinación el tamaño de la ventana TCP.

Figura F.2. Ancho de banda y RTT con configuraciones por defecto para PLC.

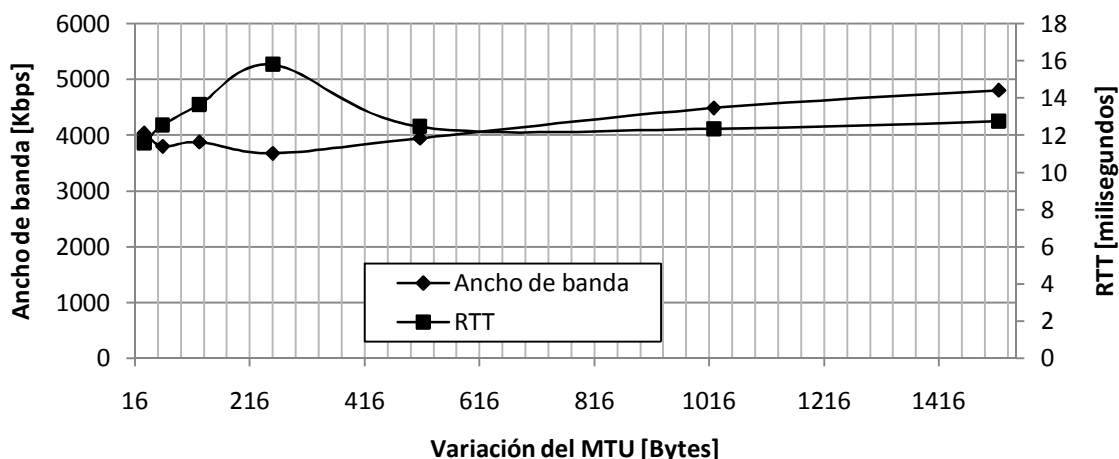


Fuente: El autor.

En la figura F.2 se observa la variación del retardo (eje vertical derecho) y la variación del ancho de banda (eje vertical izquierdo); el comportamiento del ancho de banda permanece estable por debajo de los 60 Mbps, mientras que los retardos presentan una variación localizada entre los 28 y 48 milisegundos. Se define la duración entre registros de 20 segundos, el cual muestra un ancho de banda de 60 Mbps y retardo de 4 milisegundos.

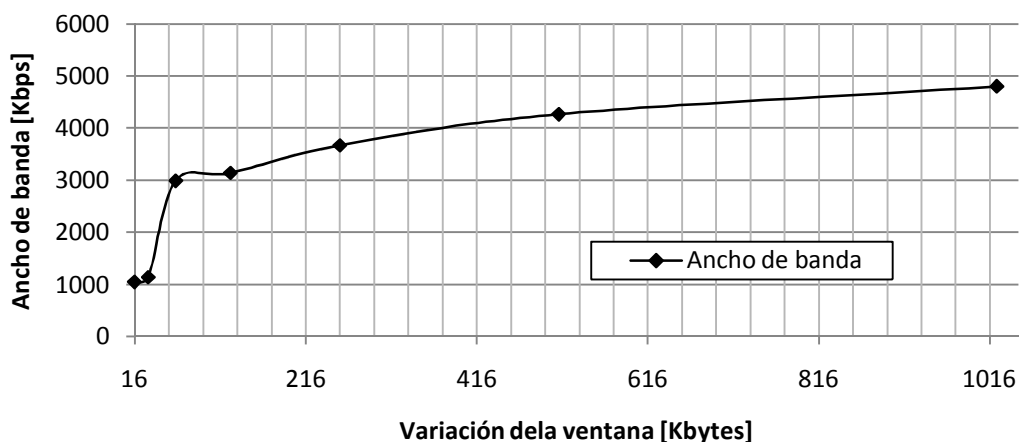
En la figura F.3 se observa el ancho de banda y los retardos con respecto a la variación de la MTU. Aunque en la medición se presenta un alto ancho de banda para las MTU inferiores a 256 bytes, esta medida es inestable respecto a las de mayor MTU; para el retardo, se presenta un leve incremento sin sobrepasar los 15 milisegundos, por ello, se escoge 1472 bytes como tamaño de la MTU para el resto de las pruebas de esta tecnología.

Figura F.3. Ancho de banda y RTT variando la MTU para PLC



Fuente: EL autor.

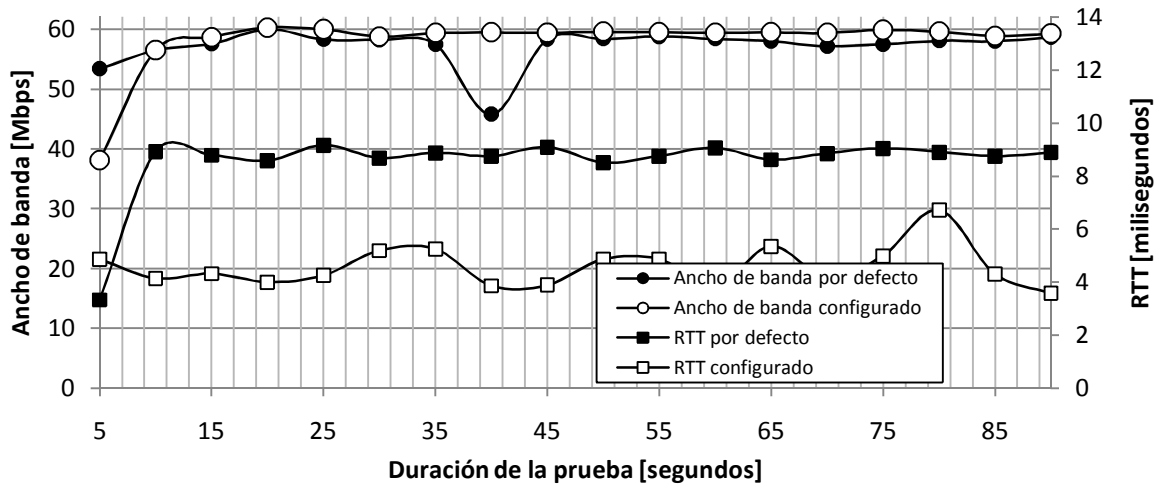
Figura F.4 Ancho de banda variando la ventana TPC para PLC



Fuente: EL autor.

La figura F.4 muestra los resultados obtenidos durante las mediciones de ancho de banda al variar el tamaño de la ventana TCP. El ancho de banda es creciente conforme el tamaño de la ventana TCP aumenta, para una ventana TCP el ancho de banda medido es aproximadamente 4,7 Mbps y por ello se escoge esta ventana como la más apropiada para el resto de las mediciones.

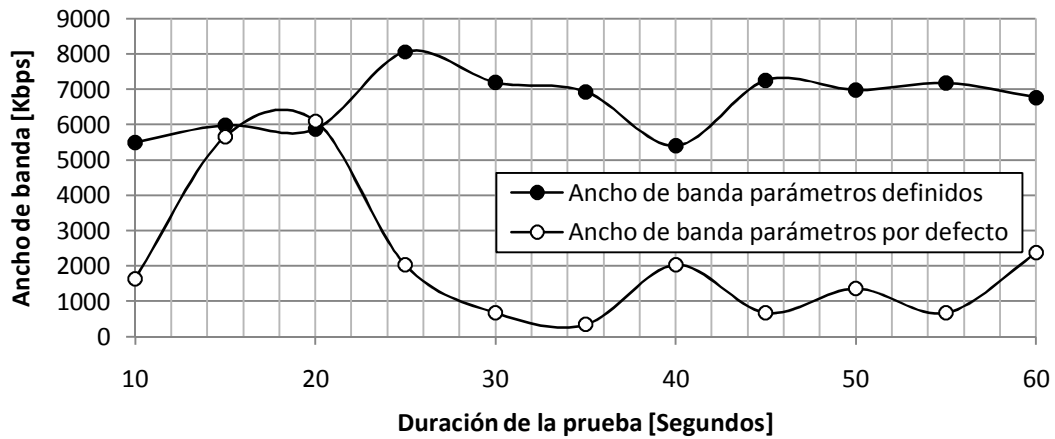
Figura F.5 Comparación de parámetros por defecto y configurados para PLC con cable coaxial RG6.



Fuente: El autor

En la figura F.5 se presenta la comparación de las mediciones de los parámetros por defecto y los configurados, realizadas con el cable coaxial RG6. Se observa una leve mejoría en cuanto a las mediciones de ancho de banda y una disminución de aproximadamente el 50% en los retardos.

Figura F.6 Comparación de parámetros por defecto y configurados para PLC en línea de 13200 voltios.



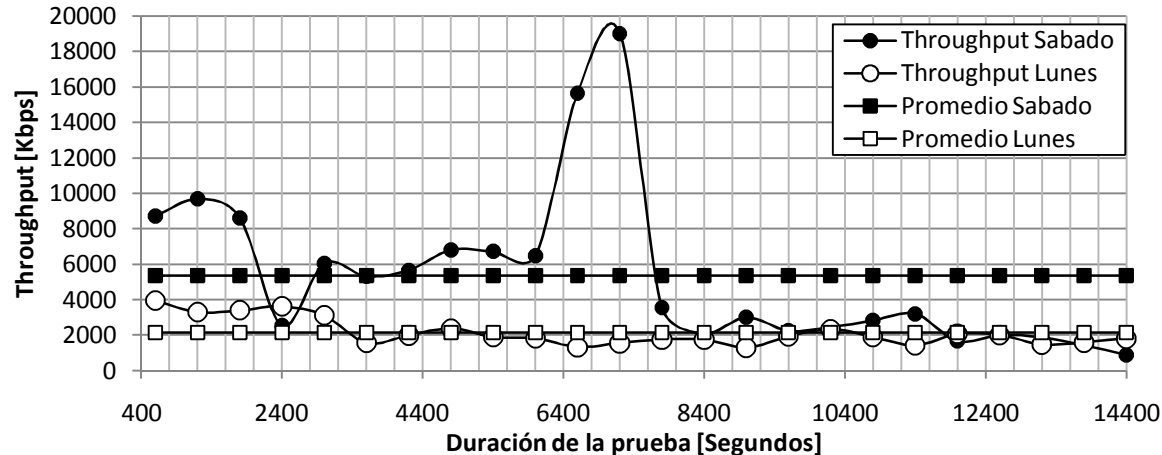
Fuente: El autor

La figura F.6 muestra el desempeño del ancho de banda empleando la línea de 13200 voltios, en la cual se deben realizar las pruebas de desempeño; en la figura se observa que el ancho de banda mejora al modificar los parámetros de desempeño de las herramientas, MTU y ventana TCP.

5. Prueba de medición de desempeño.

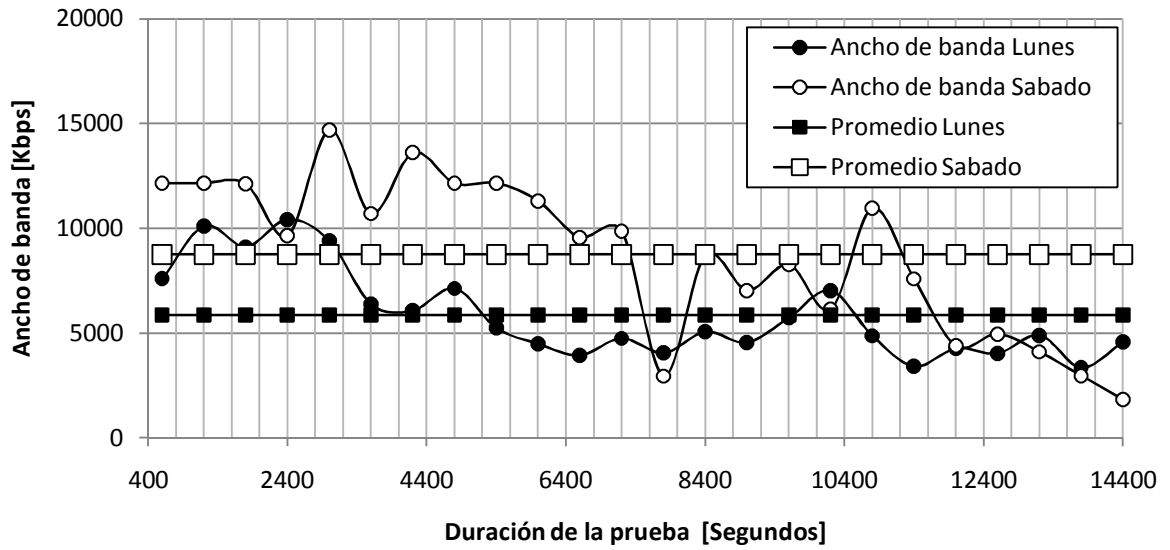
Desde la gráfica F.7 hasta la F.11 se muestran los resultados de las mediciones de los parámetros: ancho de banda, throughput, latencia, y jitter. Las mediciones tiene las siguientes características: distancia aproximada de 300 metros, duración del registro de 20 segundos, tamaño de la ventana TCP de 1024 Kbytes y MTU de 1520 bytes.

Figura F.7 Throughput para PLC.



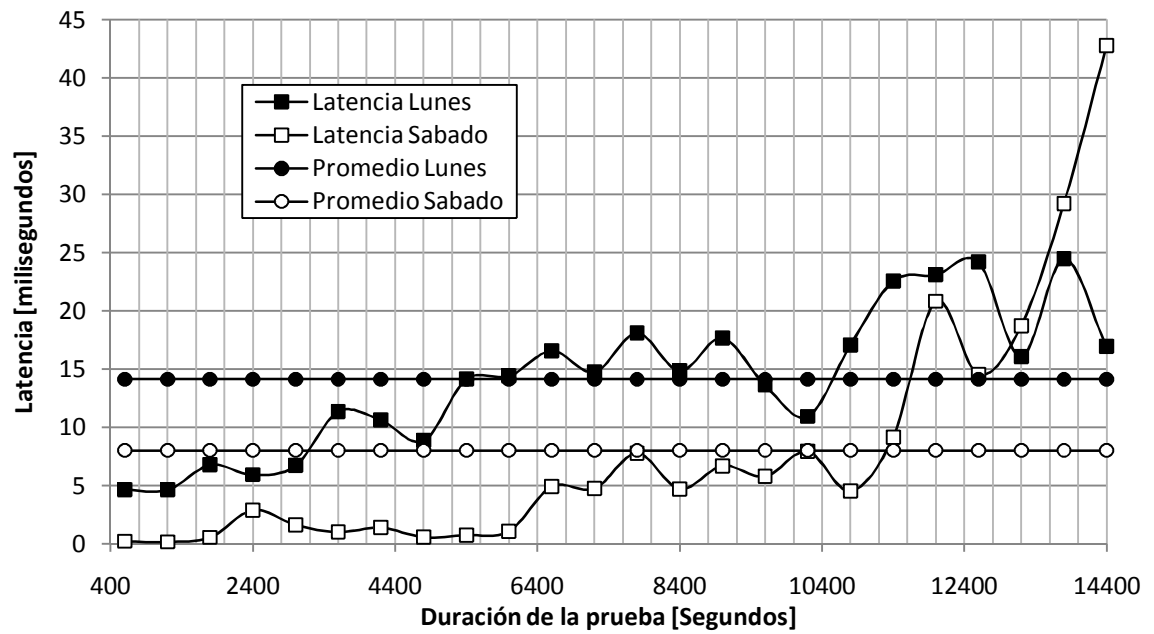
Fuente: El autor

Figura F.8 Ancho de banda para PLC.



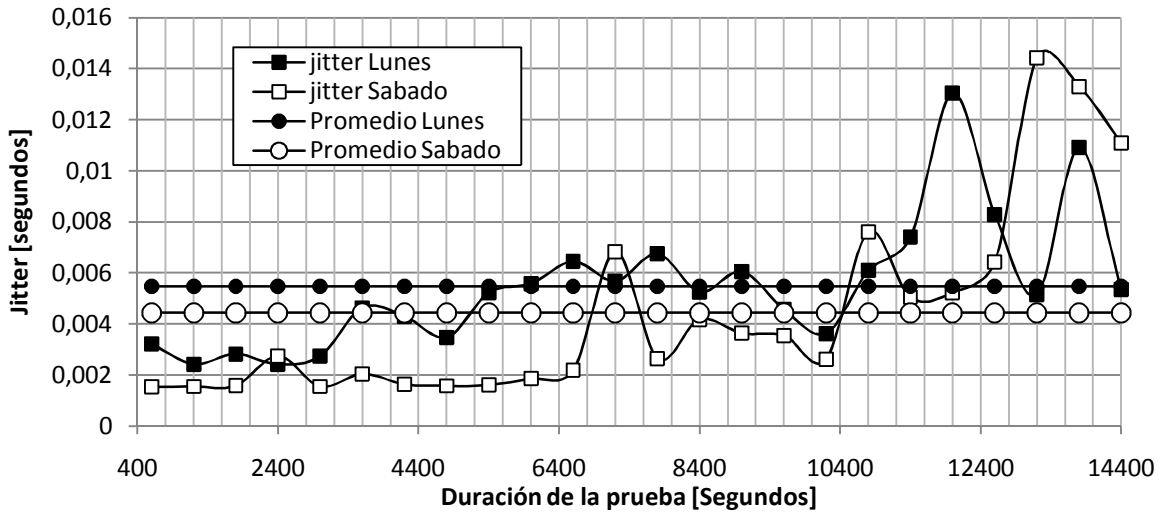
Fuente: El autor

Figura F.9 Latencia para PLC.



Fuente: El autor

Figura F.10 Jitter para PLC.

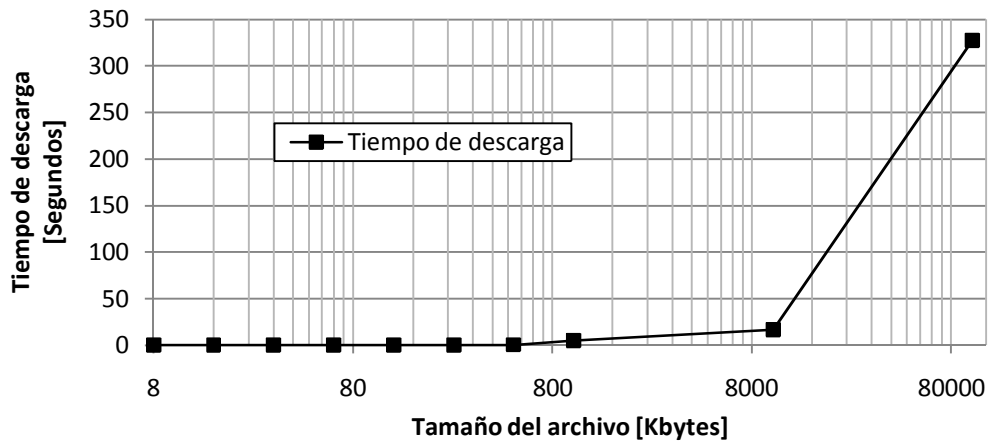


Fuente: El autor.

6. Prueba de descarga de archivos.

En la figura F.11 se observan los resultados para la descargas de archivos, las variaciones de tamaño están comprendidas entre 8 Kbytes y 100 Mbytes.

Figura F.11 Duración registrada durante la descarga de archivos para PLC.



ANEXO G: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MÉTODO AHP PARA SITELRED

Realizar un análisis de sensibilidad tiene como finalidad confirmar que los resultados obtenidos son robustos, es decir, que los resultados no superan los índices de consistencia permitidos para matrices de decisión como el que se está presentando en el capítulo 4.

Para llevar a cabo este análisis, se deben variar los valores de las prioridades y observar el comportamiento de los resultados obtenidos, comprobando que el índice de consistencia no supere el máximo permitido. En el capítulo 4 se observa detalladamente la forma de realizar este análisis.

A continuación se presenta el análisis de sensibilidad tomando como referencia los valores obtenidos en las mediciones de rendimiento de enlaces de datos empleando las tecnologías de comunicación ADSL, CIA, PLC, GPRS, WiMAX y Wireless LAN. Estos son:

Tabla G.1 Valores a incluir en la matriz de valores técnicos.

	ADSL	CIA	GPRS	PLC	WiMAX	Wireless LAN
Throughput	474	616	38	3742	731	2279
Ancho de banda	619	651	85	7302	813	5276
Latencia	1,66	0,46	1,11	11,07	0,7	1,63
Tiempo de descarga*	4,2	5,1	65,4	0,05	3,6	2,0
* Para un archivo de 256Kbytes						

Fuente: El autor

Se debe variar la ponderación de cada criterio según la escala de Satty, hasta que el índice de consistencia sobrepase el límite permitido (Ratio de consistencia

menor o igual que 0,1). En adelante se presentaran los que se varían junto con los resultados que se obtienen. Inicialmente se realiza el análisis de sensibilidad para el nivel más bajo de la jerarquía y luego para el nivel superior.

1. Nivel inferior: de aspectos técnicos.

a. Todas las ponderaciones tienen el mismo valor.

Tecnologías de comunicación								
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor	
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,670	
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,438	
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,403	
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,348	
Tdes	1	1	1	1	5	PLC	0,306	
Ratio de consistencia: 0,0					6	GPRS	0,303	

b. Se varía la importancia del throughput sobre el ancho de banda, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación								
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor	
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,671	
Th	1	4	1	1	2	CIA	0,437	
BW	1/4	1	1	1	3	Wireless	0,404	
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,348	
Tdes	1	1	1	1	5	PLC	0,310	
Ratio de consistencia: 0,095					6	GPRS	0,301	

- c. Se varía la importancia del throughput sobre el ancho de banda, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty fuerte-moderado, valor de escala igual a ¼. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varia el nivel de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,669
Th	1	1/4	1	1	2	CIA	0,433
BW	4	1	1	1	3	Wireless	0,410
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,344
Tdes	1	1	1	1	5	PLC	0,310
Ratio de consistencia:							
0,095					6	GPRS	0,301

- d. Se varía la importancia del throughput sobre la latencia, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,667
Th	1	1	4	1	2	CIA	0,419
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,412
RTT	1/4	1	1	1	4	WiMAX	0,338
Tdes	1	1	1	1	5	PLC	0,329
Ratio de consistencia:							
0,095					6	GPRS	0,293

- e. Se varía la importancia del throughput sobre la latencia, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. En este caso se obtiene un cambio en el

quinto y sexto puesto, debido a que los valores medidos de la latencia fueron mayores para PLC que para GPRS, como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,676
Th	1	1	1/4	1	2	CIA	0,465
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,394
RTT	4	1	1	1	4	WiMAX	0,363
Tdes	1	1	1	1	5	GPRS	0,316
Ratio de consistencia:							
0,095					6	PLC	0,276

- f. Se varía la importancia del throughput sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,673
Th	1	1	1	4	2	CIA	0,438
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,417
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,350
Tdes	1/4	1	1	1	5	PLC	0,310
Ratio de consistencia:							
0,095					6	GPRS	0,301

- g. Se varía la importancia del throughput sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios

significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,666
Th	1	1	1	1/4	2	CIA	0,430
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,385
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,340
Tdes	4	1	1	1	5	PLC	0,310
Ratio de consistencia:					6	GPRS	0,301
0,095							

- h. Se varía la importancia del Ancho de banda sobre la latencia, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,666
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,417
BW	1	1	4	1	3	Wireless	0,416
RTT	1	1/4	1	1	4	WiMAX	0,335
Tdes	1	1	1	1	5	PLC	0,329
Ratio de consistencia:					6	GPRS	0,293
0,095							

- i. Se varía la importancia del Ancho de banda sobre la latencia, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. En este caso se obtiene un cambio en el quinto y sexto puesto, debido a que los valores medidos de la latencia fueron mayores para PLC que para GPRS, como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,677
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,467
BW	1	1	1/4	1	3	Wireless	0,392
RTT	1	4	1	1	4	WiMAX	0,365
Tdes	1	1	1	1	5	GPRS	0,316
Ratio de consistencia:							
0,095					6	PLC	0,276

- j. Se varía la importancia del Ancho de banda sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,671
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,436
BW	1	1	1	4	3	Wireless	0,421
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,347
Tdes	1	1/4	1	1	5	PLC	0,310
Ratio de consistencia:							
0,095					6	GPRS	0,301

- k. Se varía la importancia del Ancho de banda sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. No se obtiene cambios significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,667
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,431
BW	1	1	1	1/4	3	Wireless	0,383
RTT	1	1	1	1	4	WiMAX	0,342
Tdes	1	4	1	1	5	PLC	0,310
Ratio de consistencia:							
0,095					6	GPRS	0,301

- I. Se varía la importancia de la latencia sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. . En este caso se obtiene un cambio en el quinto y sexto puesto, debido a que los valores medidos de la latencia fueron mayores para PLC que para GPRS, como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,678
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,468
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,406
RTT	1	1	1	4	4	WiMAX	0,367
Tdes	1	1	1/4	1	5	GPRS	0,316
Ratio de consistencia:							
0,095					6	PLC	0,276

- m. Se varía la importancia de la latencia sobre el tiempo de descarga, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado-fuerte, valor de escala igual a 4. . No se obtiene cambios

significativos en los valores, solo varía el ratio de consistencia como se observa a continuación:

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz					Orden	Nombre	Valor
	Th	BW	RTT	Tdes	1	ADSL	0,663
Th	1	1	1	1	2	CIA	0,414
BW	1	1	1	1	3	Wireless	0,391
RTT	1	1	1	1/4	4	WiMAX	0,331
Tdes	1	1	4	1	5	PLC	0,329
Ratio de consistencia:					6	GPRS	0,293
0,095							

Para valores superiores en la escala de Satty del nivel 5 (o en opuesto, 1/5) todos los índices de consistencia sobrepasan el máximo permitido, por ello no se realiza el análisis con estos niveles. En ninguno de los casos calculados se modifica el orden de las cuatro primeras alternativas de comunicación, cabe resaltar además, que las escalas del nivel superior son en igualdad de condiciones.

2. Nivel superior: nivel de decisión.

- a. Todas las ponderaciones tienen el mismo valor.

Tecnologías de comunicación							
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor	
				1	ADSL	0,670	
	Te	p	D	2	CIA	0,438	
Te	1	1	1	3	Wireless	0,403	
p	1	1	1	4	WiMAX	0,348	
D	1	1	1	5	PLC	0,306	
Ratio de consistencia:				6	GPRS	0,303	
0,05							

- b. Se varía la importancia de los aspectos técnicos sobre el valor de instalación de un nodo, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. . Se presenta un cambio entre la posición cuarta y quinta, ya que los aspectos técnicos tienen una importancia superior al precio y en esto PLC presenta una notable ventaja frente a WiMAX. A continuación se observan los resultados:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
				1	ADSL	0,610
	Te	p	D	2	CIA	0,390
Te	1	2	1	3	Wireless	0,377
p	1/2	1	1	4	PLC	0,354
D	1	1	1	5	WiMAX	0,309
Ratio de consistencia: 0,05				6	GPRS	0,253

- c. Se varía la importancia de los aspectos técnicos sobre el valor de instalación de un nodo, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. . Se presenta un cambio entre la posición quinta y sexta, ya que el valor de instalación tiene una importancia superior a los aspectos técnicos y en esto GPRS presenta una notable ventaja frente a PLC. A continuación se observan los resultados:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
				1	ADSL	0,725
	Te	p	D	2	CIA	0,493
Te	1	1/2	1	3	Wireless	0,435
p	2	1	1	4	WiMAX	0,392
D	1	1	1	5	GPRS	0,357
Ratio de consistencia: 0,05				6	PLC	0,264

- d. Se varía la importancia de los aspectos técnicos sobre la disponibilidad, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. . Se presenta un cambio entre la posición cuarta y quinta, ya que los aspectos técnicos tienen una importancia superior a la disponibilidad y en esto PLC presenta una notable ventaja frente a WiMAX. A continuación se observan los resultados:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
				1	ADSL	0,603
	Te	p	D	2	CIA	0,457
Te	1	1	2	3	Wireless	0,430
p	1	1	1	4	PLC	0,364
D	1/2	1	1	5	WiMAX	0,362
Ratio de consistencia: 0,05				6	GPRS	0,307

- e. Se varía la importancia de los aspectos técnicos sobre la disponibilidad, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. . Se presenta un cambio entre la posición quinta y sexta, ya que la disponibilidad tiene una importancia superior a los aspectos técnicos y en esto GPRS presenta una ventaja frente a PLC. A continuación se observan los resultados:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
				1	ADSL	0,734
	Te	p	D	2	CIA	0,410
Te	1	1	1/2	3	Wireless	0,369
p	1	1	1	4	WiMAX	0,325
D	2	1	1	5	GPRS	0,290
Ratio de consistencia: 0,05				6	PLC	0,250

- f. Se varía la importancia de valor de instalación sobre la disponibilidad, aumentando la importancia del primero sobre el segundo hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. Se presenta un cambio entre la posición quinta y sexta, ya que el valor de instalación tiene una importancia superior a la disponibilidad y en esto GPRS presenta una ventaja frente a PLC. A continuación se observan los resultados :

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
	Te	p	D	2	CIA	0,514
Te	1	1	1	3	Wireless	0,462
p	1	1	2	4	WiMAX	0,408
D	1	1/2	1	5	GPRS	0,364
Ratio de consistencia: 0,05				6	PLC	0,314

- g. Se varía la importancia de valor de instalación sobre la disponibilidad, aumentando la importancia del segundo sobre el primero hasta el nivel de Satty moderado, valor de escala igual a 2. Se presenta un cambio entre la posición cuarta y quinta, ya que la disponibilidad tiene una importancia superior al valor de instalación y en esto PLC presenta una ventaja frente a WiMAX. A continuación se observan los resultados :

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
	Te	p	D	2	CIA	0,364
Te	1	1	1	3	Wireless	0,342

p	1	1	1/2	4	PLC	0,290
D	1	2	1	5	WiMAX	0,288
Ratio de consistencia: 0,05				6	GPRS	0,244

3. Casos especiales de variaciones.

A continuación se realizan algunos cálculos para ordenar las tecnologías de comunicaciones, variando dos o más ponderaciones.

- a. Extrema importancia de los aspectos técnicos sobre el valor de la instalación y la disponibilidad, en este caso PLC sería la de mayor aceptación debido a que esta presenta los mejores resultados, seguida de Wireless LAN y CIA:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
					Te	p
	Te	p	D	2	Wireless	0,407
Te	1	9	9	3	CIA	0,348
p	1/9	1	1	4	ADSL	0,273
D	1/9	1	1	5	WiMAX	0,272
Ratio de consistencia: 0,0				6	GPRS	0,161

- b. Extrema importancia del valor de instalación sobre los aspectos técnicos y la disponibilidad, en este caso CIA sería la de mayor aceptación debido a que esta presenta los mejores resultados, seguida de ADSL y Wireless LAN:

Tecnologías de comunicación						
Asignación para la matriz				Orden	Nombre	Valor
					Te	p

	Te	p	D	2	ADSL	0,828
Te	1	1/9	1	3	Wireless	0,691
p	9	1	9	4	WiMAX	0,676
D	1	1/9	1	5	GPRS	0,664
Ratio de consistencia:						
0,0				6	PLC	0,200

Los resultados presentados anteriormente se pueden comprobar empleando la metodología de selección de tecnología de comunicación desarrollada bajo el proceso analítico jerárquico. Existen diversas combinaciones que se pueden obtener sin sobrepasar el límite permitido del índice de consistencia y arrojan resultados robustos para satisfacer las necesidades de la selección de tecnología.