



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN Y VINCULACIÓN
CON LA COLECTIVIDAD**

**MAESTRÍA EN REDES DE LA INFORMACIÓN Y
CONECTIVIDAD III PROMOCIÓN**

**TEMA: “MONITORIZACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO EN
REDES INALÁMBRICAS WI-FI CON DIFERENTES ESTÁNDARES
DE COMUNICACIONES Y VOLÚMENES DE TRÁFICO”**

AUTOR: JAYA DUCHE, MANUEL RAFAEL

DIRECTOR: ING. VIZCAÍNO, IVÁN

PATRICIO SANGOLQUÍ, JULIO DEL 2014

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por el Ing. Manuel Rafael Jaya Duche bajo mi dirección.

Ing. Iván Vizcaíno Espinosa. Msc

Director de Tesis

DECLARACIÓN

Yo Manuel Rafael Jaya Duche, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mí autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Ing. Manuel Rafael Jaya Duche

AUTORIZACIÓN

Yo, Manuel Rafael Jaya Duche, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, publicar la tesis que tiene como título “MONITORIZACIÓN DE CONSUMO ENERGÉTICO EN REDES INALÁMBRICAS WI-FI CON DIFERENTES ESTÁNDARES DE COMUNICACIONES Y VOLÚMENES DE TRÁFICO”, en el repositorio público de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.

Ing. Manuel Rafael Jaya Duche

DEDICATORIA

Este trabajo en primer lugar le dedico a Dios, puesto que gracias a El aún sigo aquí con ustedes, luego a mi familia y amigos que de una u otra forma colaboraron para la culminación de este proyecto.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la maestría, en especial a mi tutor de tesis Ing. Patricio Vizcaíno y oponente Ing. Freddy Acosta quienes me supieron guiar con sus acertados consejos y sugerencias.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN	i
DECLARACIÓN	ii
AUTORIZACIÓN	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
ABSTRACT	xi
RESUMEN.....	xii
CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Problemática.....	2
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos.....	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	7
1.5 Metodología.	7
CAPÍTULO 2	9
2 MARCO TEÓRICO.....	9
2.1 Comunicación inalámbrica Wi-Fi	9
2.1.1 Bandas ISM / UNII.....	10
2.1.2 Estándares de comunicación Wi-Fi	10
2.1.3 Tazas de transmisión	11
2.1.4 Capa MAC	12
2.1.5 Modelo OSI	12
2.1.6 Topología de las Wi-Fi	13
2.1.7 Modos de funcionamiento en Wi-Fi.....	13
2.1.7.1 Modo master	14
2.1.7.2 Modo Managed	15
2.1.7.3 Modo Ad-hoc.....	15
2.1.7.4 Modo monitor	16

2.1.8	Wireless Distribution System (WDS)	16
2.2	Dispositivos SBC para pruebas con módulos inalámbricos	16
2.2.1	Descripción de las SBC's	17
2.2.1.1	RouterBoard RB411AH	17
2.2.1.2	RouterBoard RB433UAH.....	18
2.2.1.3	ALIX.2D13	19
2.2.1.4	ALIX.3D3	20
2.2.1.5	GW2345 Avila Network Board.....	20
2.2.2	Módulos de radio Wi-Fi para tarjetas SBC.....	21
2.2.2.1	MikroTik R52Hn/ 802.11abgn	22
2.2.2.2	Wistron DCMA-82/ 802.11abg	23
2.2.2.3	Tabla comparativa de los radios Wi-Fi	23
2.3	Sistemas operativos para tarjetas SBC's.....	24
2.3.1	Linux Voyage.....	25
2.3.2	RouterOS	25
2.4	Inyectores de tráfico bajo Linux.	27
2.5	Métodos de monitorización de consumo energético para Wi-Fi.....	28
2.5.1	Método Invasivo	29
2.5.1.1	Método con Transistor	29
2.5.1.2	Método con Resistencia Serie	29
2.5.2	Método No-Invasivo	30
2.5.2.1	Transformador de corriente	30
2.5.2.2	Bobina Rogowski	31
2.5.2.3	Efecto Hall.....	32
CAPÍTULO 3		34
3	IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO DE INVESTIGACIÓN	34
3.1	Diseño del escenario de experimentación	34
3.2	Esquema del escenario a implementarse en un enlace punto a punto	35
3.3	Diagrama circuital y método de medición adoptado	35
3.4	Escenario de experimentación montado en laboratorio	36
3.5	Diagrama del proceso de mediciones	41
3.6	Cálculo de la Potencia consumida	43
3.7	Configuraciones de red de las tarjetas SBC para dispositivos inalámbricos.	45
CAPÍTULO 4		46

4	PRUEBAS, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	46
4.1	Pruebas y Mediciones.....	46
4.2	Mediciones de consumo energético bajo diferentes volúmenes de tráfico y estándares de comunicaciones.	47
4.2.1	Medición de valores iniciales	47
4.2.2	Medición y cálculo de potencias con módulo de radio R52Hn	49
4.2.3	Medición y cálculo de potencias con módulo de radio DCMA-82	50
4.2.4	Comparativa de consumos de potencias consumidas	51
4.3	Análisis de Resultados.	52
4.3.1	Comparativas de consumo de potencia con radio Wi-Fi (R52Hn) para el estándar 802.11x	53
4.3.1.1	Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11a con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable	53
4.3.1.2	Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11b con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable	54
4.3.1.3	Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11g con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable	56
4.3.1.4	Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11n a 2.4 GHz con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable	57
4.3.1.5	Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11n a 5 GHz con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable	59
4.3.2	Comparativas de consumo de potencia entre diferentes radios Wi-Fi (R52Hn y DCMA-82) 63	
4.3.2.1	Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo UDP en el transmisor	64
4.3.2.2	Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo TCP en el transmisor	65
4.3.2.3	Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo UDP en el receptor	66
4.3.2.4	Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo TCP en el receptor	68
4.4	Propuesta de soluciones al problema de consumo energético en las Wi-Fi.....	69
	CAPITULO 5	71
5	CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO.....	71
5.1	Conclusiones.....	71
5.2	Trabajo futuro.....	72
6	REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA	73

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estándares de comunicación para Wi-Fi -----	10
Tabla 2. Comparativa entre radios Wi-Fi de diferentes marcas -----	24
Tabla 3. Valores iniciales de corrientes -----	48
Tabla 4. Valores de corrientes medidos y potencias calculadas para -----	49
Tabla 5. Valores de corrientes medidos y potencias calculadas para -----	50
Tabla 6. Comparación de la potencia consumida entre los -----	51
Tabla 7. Resumen de los resultados arrojados en las comparativas -----	60

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energía total a nivel mundial -----	3
Figura 2. Consumo de energía en Wi-Fi para Laptops hasta el 2014 -----	4
Figura 3. Consumo de energía en Wi-Fi para Smartphone hasta el 2014 ----	4
Figura 4. Routerboard RB411AH -----	18
Figura 5. Routerboard RB433UAH-----	19
Figura 6. Tarjeta Alix 2D13-----	19
Figura 7. Tarjeta Alix 3D3-----	20
Figura 8. Tarjeta GW2345-----	21
Figura 9. Módulo de Radio Wi-Fi R52Hn-----	22
Figura 10. Módulo de Radio Wi-Fi DCMA-82 -----	23
Figura 11. Interfaz gráfico del Winbox-----	26
Figura 12. Interfaz de configuración para el D-ITG GUI-----	28
Figura 13. Método de medición de la corriente utilizando -----	30
Figura 14. Método de medición con transformador de corriente-----	31
Figura 15. Método de la bobina Rogowski-----	32
Figura 16. Método del efecto Hall -----	33
Figura 17. Diagrama del escenario de experimentación -----	35
Figura 18. Diagrama circuital para la medición indirecta de la corriente-----	36
Figura 19. Diagrama de red para la experimentación-----	36
Figura 20. Enlace armado en el laboratorio entre el transmisor y receptor --	37
Figura 21. Implementación del equipo receptor -----	38
Figura 22. Implementación del transmisor -----	38
Figura 23. Medición indirecta de la corriente en la resistencia serie-----	39
Figura 24. Medición indirecta de la corriente media con -----	40
Figura 25. Señal de corriente en el dispositivo transmisor -----	41
Figura 26. Fases para la obtención de mediciones-----	41
Figura 27. Proceso de configuración para las tarjetas SBC's-----	42
Figura 28. Analizador de tráfico bajo Linux -----	46
Figura 29. Comparación UDP vs TCP con 802.11a-----	53
Figura 30. Comparación UDP vs TCP con 802.11b-----	55
Figura 31. Comparación UDP vs TCP con 802.11g-----	56
Figura 32. Comparación UDP vs TCP con 802.11n a 2.4 GHz -----	58
Figura 33. Comparación UDP vs TCP con 802.11n a 5 GHz-----	59
Figura 34. Comparativa de consumo de potencia en el receptor -----	61
Figura 35. Comparativa de consumo de potencia de transmisor -----	62
Figura 36. Diferencia en el consumo de potencia en porcentajes -----	62
Figura 37. Porcentaje de consumo de potencia -----	63
Figura 38. Consumo de potencia entre radios para UDP -----	64
Figura 39. Consumo de potencias entre radios para TCP -----	65
Figura 40. Consumo de potencias entre radios para UDP-----	67
Figura 41. Consumo de potencias entre radios para TCP -----	68

ABSTRACT

This work aims to monitor and analyze energy consumption in wireless networks Wi-Fi 802.11x standards varying changing traffic speed (from 1 Mbps to 36 Mbps) for this stage of research was implemented by assembling a wireless link point to point (distance of 5 m with 2 dBi omnidirectional antenna) through which TCP and UDP traffic is injected to observe the behavior of power consumption in the form of Wi-Fi radio. From the results obtained and analyzed, it was found that the power consumption in DC of the radio equipment is proportional to the rate of transmitted data, independent of the marks of such equipment, moreover, the power consumption in the transmitter is receptor increased (from 30% to 150% on average) depending on the type of data and wireless standard also verified that there is indeed more energy consumption when transmitting TCP traffic versus UDP on all Wi-Fi standards.

Keywords: Wi-Fi, 802.11x, D-ITG, TCP, UDP, SBC's.

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo monitorizar y analizar el consumo energético en redes inalámbricas Wi-Fi variando los estándares 802.11x y volúmenes de tráfico (desde 1Mbps hasta 36 Mbps), para esto, se implementó un escenario de investigación ensamblando un enlace inalámbrico punto a punto (distancia de 5m con antenas de 2 dBi omnidireccionales) a través del cual, se inyectó distinto tráfico para observar el comportamiento del consumo de potencia en función del tipo del dato cursado, dicha experimentación se realizó para cada estándar inalámbrico, con las pruebas realizadas y el respectivo análisis. Los resultados muestran que el consumo de potencia en dc de los equipos de Radio es proporcional a la velocidad de datos transmitidos e independiente de las marcas de módulos de radio Wi-Fi, además existe mayor consumo de energía cuando se transmite tráfico TCP frente a UDP en todos los estándares de 802.11.x.

Palabras clave: Wi-Fi, 802.11x, D-ITG, TCP/UDP, SBC's.

CAPÍTULO 1

En este capítulo, se describe la problemática de los dispositivos Wi-Fi¹ en cuanto a la optimización de energía, por tanto, se expone también la motivación, objetivos y metodología que se debió seguir para la finalización del presente trabajo de investigación.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes

Esta propuesta de estudio surge de la necesidad de desarrollar investigaciones en hardware y software para comunicaciones inalámbricas alineados con los proyectos de investigación del Departamento de Telecomunicaciones de la institución en la cual laboro, por otro lado, en el Ecuador y en el mundo, se han masificado las comunicaciones inalámbricas como: Wi-Fi, telefonía celular, Bluetooth, Zigbee entre otros.

El caso particular de estudio, es Wi-Fi, que es una tecnología inalámbrica que brinda a los usuarios una comunicación transparente y lista a utilizarse, pero lastimosamente los fabricantes venden sus productos con una arquitectura cerrada tanto en software como en hardware, limitándonos a trabajar en configuraciones preestablecidas o sugeridas por los mismos para ambientes de laboratorio o empresas. Por otro lado, personalmente he estado realizando investigaciones en comunicaciones inalámbricas con módulos Zigbee, Bluetooth, RF asociados con micro controladores para diferentes aplicaciones debido a que estos módulos son abiertos a configuraciones personales con los cuales se pueden hacer numerosas

¹ Wi-Fi: Wireless Fidelity

mediciones cambiando ciertos parámetros como tráfico, frecuencia de transmisión, potencia, tiempos, etc. Bajo esta premisa, se desea utilizar tarjetas con módulos Wi-Fi que me permitan modificar todos los parámetros anteriormente mencionados para realizar investigaciones y análisis como el consumo de potencia, puesto que es un problema a nivel mundial la optimización de los recursos energéticos.

Actualmente, la institución a la que pertenezco, está impulsando investigaciones en varios campos dando todas las facilidades para la consecución de las mismas para brindar en un corto plazo, un servicio educativo de alta calidad a sus educandos y la sociedad, de esta forma se pretende aprovechar la tendencia institucional para realizar investigaciones en el campo antes mencionado.

1.2 Problemática

Actualmente para nuestra civilización, la disponibilidad de energía está fuertemente atada al nivel de bienestar, confort, salud y conservación de la vida del ser humano. Vivimos en una sociedad de consumismo de energía a diferentes escalas, es decir, en teoría, países en vías de desarrollo consumirán mucho menos energía que los países industrializados pero esto no es del todo cierto, puesto que, actualmente las tendencias están cambiando, en definitiva la tendencia siempre será un alto consumo energético. El consumo mundial de energía aumentará según la (Energy Information Administration, 2011) en un 53%, esto es, de 505 cuatrillones de BTU² en el 2008 a 770 cuatrillones de BTU para el 2035 como se muestra en la figura 1.

² BTU: British Thermal Unit

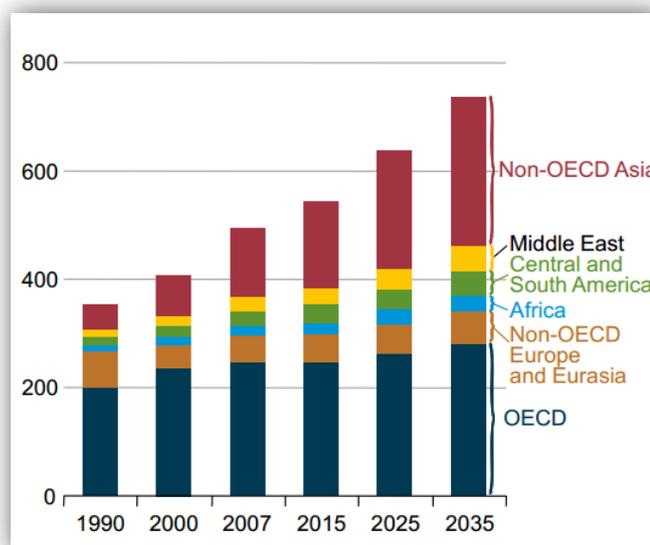


Figura 1. Consumo de energía total a nivel mundial (EIA, 2011)

Para (Jadhav, 2010) la investigación del consumo energético para Laptops y Smartphone que utilizan tarjetas Wi-Fi, las cuales revelan que para el caso de las laptops entre el 2009 y 2014 existirá un incremento de un 170%, es decir, mientras que la potencia consumida en el 2009 fue de 1 TWh, el consumo proyectado para el 2014 será de 2.7 TWh. Por otro lado, para los Smartphone en el mismo intervalo de tiempo el incremento será en un 300%, esto es, la potencia consumida en el 2009 fue de 17.2 GWh y se prevé que en el 2014 el consumo será de 53.961 GWh. Así mismo, las emisiones de CO₂ podrían incrementarse en la misma proporción y países como Brasil, India y China sufrirían en un futuro cercano la elevación de sus costos debido al aumento tecnológico en las Wi-Fi. Por otro lado, el consumo de las tarjetas Wi-Fi es aproximadamente el 9% del consumo total de todos los dispositivos portátiles en el mundo.

En las figuras 2 y 3, se muestran las estadísticas de proyecciones de consumo energético tanto para Laptops como para Smartphone.

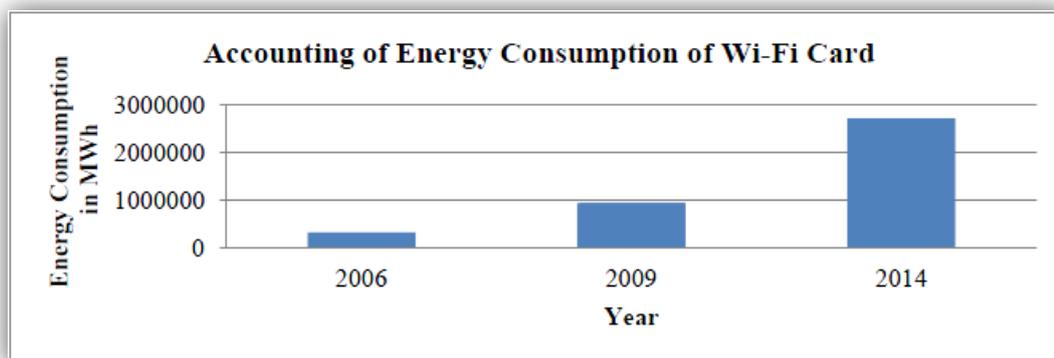


Figura 2. Consumo de energía en Wi-Fi para Laptops hasta el 2014 (Jadhav, 2010)

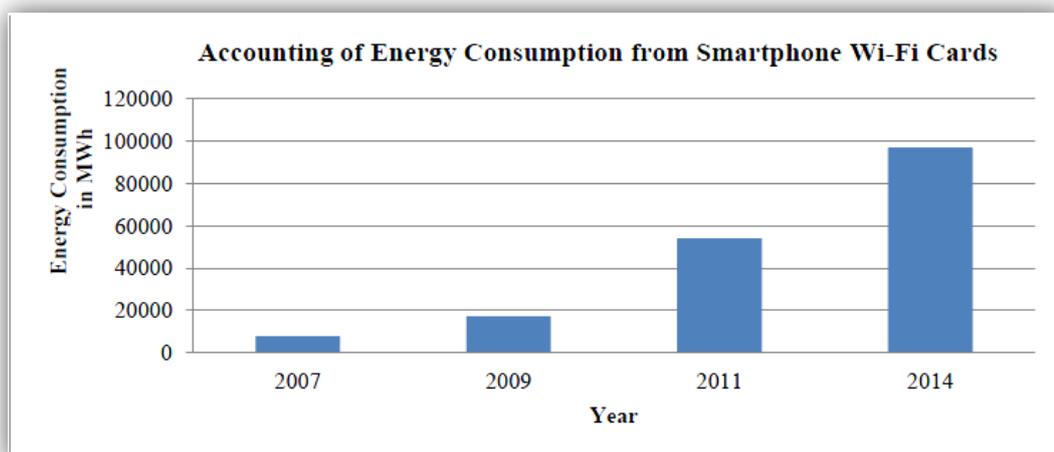


Figura 3. Consumo de energía en Wi-Fi para Smartphone hasta el 2014

Como se observó en las figuras 2 y 3, sobre el consumo de potencia de Laptops y Smartphone, para (Zhang & Kang. G, 2012), Wi-Fi es el primer consumidor de energía para dispositivos móviles y la IL³ es el principal consumidor incluso con el PSM⁴ activado, realizando un análisis extenso de tráfico real, encontraron que era de más del 60% del consumo total.

³IL: Idle Listening

⁴PSM: Power Save Mode

De acuerdo a lo expuesto antes, es alarmante la proyección del consumo de energía a futuro, obviamente este consumo no es solamente debido a los dispositivos electrónicos, sino de otros sectores que requieren de energía, por tanto, se deben buscar mecanismos para la optimización adecuada de los recursos energéticos antes de devastar a nuestro planeta. Así mismo, según (Lee, Su, & Sen, 2007) entre las tecnologías inalámbricas estándar, Wi-Fi es la que más consume energía actualmente tan solo comparable con UWB⁵.

1.3 Justificación

En comunicaciones móviles, redes inalámbricas (Wi-Fi, Bluetooth, Zigbee) y telefonía móvil, se han realizado múltiples esfuerzos por optimizar el uso de recursos, tales como el tráfico de comunicación, reutilización de frecuencias, potencias en dispositivos inalámbricos y antenas. De mayor interés ha sido la optimización en dispositivos con alimentación limitada o nula de energía, dado que sus aplicaciones se extienden al campo militar, doméstico y comercial.

Por otro lado, actualmente los Smartphone, Tablet y otros dispositivos, se están convirtiendo en una plataforma convergente para una gran variedad de aplicaciones en la red, donde incluyen además mensajes de correo electrónico, música, videos, juegos, navegación web y el uso compartido de imágenes. Además existen aplicaciones de fondo que están continuamente funcionando basados en alerta de servicios, notificaciones de localización, y actualizaciones periódicas por efecto de sensores. Esto ha implicado crecimiento en el tráfico de las redes imponiendo una

⁵ UWB: Ultra Wide-Band

demanda de durabilidad en las baterías de los dispositivos, de tal manera que algunos usuarios manifiestan su grado de insatisfacción.

Así mismo, para (Hirales & Martines, 2008), quienes escriben sobre el uso eficiente de recursos computacionales, ellos dicen que este tema no es reciente, sus orígenes datan a inicios de 1992 cuando la EPA⁶ (www.epa.gov) y el Departamento de Energía (www.energy.gov) de los Estados Unidos, conjuntamente, promulgaron reconocer los esfuerzos en el uso óptimo de energía de diferentes dispositivos electrónicos a través del programa conocido como *Energy Star*. Para ellos, el uso eficiente de recursos energéticos tiene como objetivos la viabilidad económica, es decir, que la tecnología sea económica; con responsabilidad social mediante la construcción de tecnología que contribuya a minimizar los problemas de consumo irracional de energía a fin de minimizar el impacto en el medio ambiente.

Por las razones mencionadas, se justifica la importancia de la investigación sobre el consumo de energía en las redes Wi-Fi para aportar con un granito de arena a los esfuerzos a nivel mundial sobre la optimización energética.

1.4 Objetivos.

1.4.1 Objetivo General

Monitorizar el consumo energético en redes inalámbricas Wi-Fi con diferentes estándares de comunicaciones y volúmenes de tráfico.

⁶ EPA: Environmental Protection Agency

1.4.2 Objetivos Específicos

- Analizar las tarjetas SBC's, módulos de radio Wi-Fi e inyectores de tráfico de datos bajo la plataforma Linux.
- Implementar un radioenlace Wi-Fi punto a punto con transceptores de radiofrecuencia y sus respectivas configuraciones bajo el sistema operativo Linux.
- Realizar mediciones del consumo energético de los transceptores de radiofrecuencia bajo diferentes estándares de comunicaciones y volúmenes de tráfico.
- Analizar y evaluar los resultados obtenidos con las diferentes técnicas de investigación y métodos estadísticos.
- Proponer alternativas de reducción de consumo energético en las redes Wi-Fi.

1.5 Metodología.

La metodología a utilizarse en la presente investigación, es experimental, puesto que se van a medir parámetros reales como el consumo de potencia en módulos Wi-Fi, para lo cual, se cambiaran diferentes variables como protocolos, tráfico y módulos de radio Wi-Fi de diferentes marcas, manteniendo el mismo escenario de prueba. Con estos datos, se analizarán los resultados para obtener criterios concluyentes sobre consumo energético en los dispositivos Wi-Fi.

Los procesos a seguir son los siguientes; en primera instancia, se recreará el escenario de investigación con módulos de radio Wi-Fi montados en tarjetas portables llamadas SBC⁷ como las Alix, RouterBoards entre otras, las mismas que trabajan con sistemas operativos propietarios de bajo costo y sistemas operativos abiertos como GNU/Linux, una vez realizadas las respectivas configuraciones, se

⁷ SBC: Single Board Computer

inyectará tráfico con el D-ITG⁸ que es uno de los mejores inyectores bajo software libre, entonces, se manipularán libremente parámetros como canales de frecuencias, potencias de transmisión y recepción, estándares 802.11x, protocolos de datos como UDP y TCP, tiempo de duración de envío de tráfico, entre otros, con los diferentes datos obtenidos, se analizarán rendimientos energéticos, para cada uno de los estándares pertenecientes a Wi-Fi.

Finalmente, se espera obtener resultados concretos de consumo energético, los mismos que serán analizados y evaluados para entregar criterios sobre ahorro y optimización para una adecuada eficiencia energética en las comunicaciones con Wi-Fi.

⁸ D-ITG: Distributed Internet Traffic Generator

CAPÍTULO 2

En este capítulo, se describirá el estado del arte que servirá como sustento para el posterior trabajo de experimentación sobre el consumo energético en redes Wi-Fi. Se inicia con un análisis de las definiciones elementales para comunicación Wi-Fi, luego, se describen los dispositivos SBC sobre los cuales se insertarán los módulos de radio Wi-Fi que se encuentran en el mercado, así mismo, se analizarán también los sistemas operativos con los que funcionan estas tarjetas embebidas. Para el enlace punto a punto, se realizará un análisis sobre la utilización de SBC's Routerboard o Alix, luego, se describirá el funcionamiento de los inyectores de tráfico bajo Linux para envío de datos por el enlace para monitorizar el consumo energético en los módulos Wi-Fi.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Comunicación inalámbrica Wi-Fi

Una de las principales tecnologías inalámbricas en la actualidad es Wi-Fi porque ofrece múltiples beneficios al más bajo costo, además es económica e interoperable con equipos de diferentes fabricantes y puede ser extendida para ofrecer funcionalidades más allá de las originalmente previstas por los fabricantes, esto se debe a que Wi-Fi utiliza estándares abiertos. Según (Pietrosemoli, 2008), hoy en día existen varios dispositivos que utilizan esta tecnología como: Enrutadores, Tablets, PC's, Laptops, Smartphone y otros dispositivos.

A continuación, se expondrá un breve resumen sobre las comunicaciones con Wi-Fi que a su vez, servirá como soporte para la configuración, experimentación y análisis de resultados. Así, se tiene:

2.1.1 Bandas ISM / UNII

Las bandas ISM⁹ permiten el uso de las porciones 2.4-2.5 GHz, 5.8 GHz, y muchas otras frecuencias (no utilizadas en Wi-Fi). Las bandas UNII¹⁰ permiten el uso sin licencia de otras porciones del espectro de 5 GHz.

La mayoría de los dispositivos inalámbricos comerciales (teléfonos móviles, televisión, radio, etc.) usan frecuencias de radio adjudicadas mediante una licencia. Las grandes organizaciones pagan elevados costos por el derecho de utilizar esas frecuencias. Más Wi-Fi, utiliza fragmentos del espectro que no requieren licencia.

2.1.2 Estándares de comunicación Wi-Fi

En la tabla 1, se muestra un resumen de los estándares de comunicación que utiliza Wi-Fi.

Tabla 1.
Estándares de comunicación para Wi-Fi

Estándar	Portadora	Velocidad	Técnica de Tx
802.11a	5Ghz	6-54 Mbps	OFDM
802.11b	2.4Ghz	5.5-1 Mbps	HR/DSSS
802.11g	2.4Ghz	54 Mbps	HR/DSSS +OFDM
802.11n	2.4/5Ghz	300 Mbps	MIMO

Las tecnologías específicamente utilizadas por los equipos Wi-Fi incluyen 802.11a, b, g, y n. 802.11n fue ratificado por IEEE en septiembre 2009, es un estándar muy reciente.

⁹ Industrial, Scientific and Medical

¹⁰ Unlicensed National Information Infrastructure

El 802.11g es compatible con 802.11b, y 802.11n es compatible con 802.11a cuando opera a 5 GHz, y con b/g en la banda de 2.4 GHz. 802.11n puede utilizar dos canales adyacentes de 20 MHz, para un total de 40MHz lo que no está contemplado en los estándares anteriores, y de esta manera puede alcanzar rendimientos reales superiores a 100 Mbps. El estándar permite inclusive mejorar esta cifra usando múltiples flujos de datos, actualmente ya existen equipos que utilizan esta modalidad.

El 802.11a, b y g son ahora parte del estándar IEEE 802.11-2007 que comprende todas las enmiendas ratificadas hasta ese año, incluyendo 802.11e que permite QoS.

2.1.3 Tazas de transmisión

Las tasas de transmisión mencionadas en las especificaciones de equipos Wi-Fi se refieren a la tasa de transmisión total de los símbolos, no al verdadero caudal o rendimiento de la transmisión a nivel de TCP/IP. La diferencia es lo que se conoce como *protocol overhead* (taza debida al protocolo) y es utilizada por el protocolo Wi-Fi para manejar colisiones, retransmisiones y en general la gestión del enlace.

Una regla general es que el caudal máximo a nivel TCP/IP es la mitad de la tasa de símbolos. Por ejemplo, un enlace 802.11g a 54 Mbps tiene un rendimiento máximo práctico de unos 25 Mbps. Un enlace 802.11b tiene un rendimiento máximo de transmisión de 5 Mbps (Butler & Pietrosemoli, 2013).

Wi-Fi usa el mismo canal para ambas direcciones de tráfico, así que cuando un radio transmite datos, no puede recibirlo al mismo tiempo. Esto limita el rendimiento.

2.1.4 Capa MAC

Wi-Fi basado en 802.11 utiliza CSMA¹¹(Acceso Múltiple por Detección de Portadora) para evitar las colisiones de transmisión. Antes de que un nodo pueda transmitir debe escuchar en el canal por las posibles transmisiones de otros radios. El nodo sólo puede transmitir cuando el canal está desocupado.

2.1.5 Modelo OSI

En el modelo OSI, los dispositivos Wi-Fi deben escoger ciertos parámetros antes de establecer la comunicación. Estos parámetros deben configurarse adecuadamente para instaurar conectividad *a nivel de la capa uno*. En otras palabras, en esta capa se deben configurar aspectos como:

- Canal de radio
- Modo de operación del radio
- Nombre de la red
- Tipo de seguridad

Para establecer el mismo nivel de conectividad en Wi-Fi, se deben acordar ciertos parámetros. Obviamente, todos los dispositivos deben compartir el mismo canal, caso contrario podrían *escucharse* entre sí. El modo de operación del radio debe escogerse adecuadamente para que pueda existir comunicación. El nombre de la red (también llamado ESSID¹²) debe ser el mismo para todos los dispositivos que se quiere comunicar. Cualquier mecanismo de seguridad también debe configurarse adecuadamente.

¹¹ CSMA: Carrier Sense Multiple Access

¹² ESSID: Extended Service Set Identifier

A menos que estos parámetros se hayan establecido correctamente, es como si *el cable* estuviera desenchufado. El procedimiento de configuración se analizará con más detalle para AP¹³ y STATION en el escenario de experimentación.

2.1.6 Topología de las Wi-Fi

Toda red inalámbrica compleja está constituida por la combinación de los siguientes tipos de conexiones:

- Punto-a-Punto
- Punto-a-Multipunto
- Multipunto-a-Multipunto

Cualquier tipo de red inalámbrica aunque no sea Wi-Fi, estará constituida por la combinación de estas configuraciones básicas, es importante volver a estos bloques fundamentales cuando se analiza una red compleja. A medida que la red crece en complejidad, se puede hacer más difícil de analizar. Por otro lado, ninguna de estas topologías es la *mejor*, cada una tiene sus ventajas y desventajas que deben ser aplicadas apropiadamente al problema que se desea resolver.

2.1.7 Modos de funcionamiento en Wi-Fi

Los dispositivos Wi-Fi pueden operar en alguno de los siguientes modos:

- Master (AP)
- Managed (también llamado cliente o estación)
- Ad-hoc (usado en redes en malla)
- Monitor (no usado normalmente para comunicaciones)

¹³AP: Access Point

Cada modo tiene restricciones de operación específicas, y los radios sólo pueden operar en un modo en un momento determinado.

Los radios Wi-Fi pueden operar en uno sólo de estos cuatro modos en un momento determinado. Esto significa que el mismo radio no puede funcionar simultáneamente como AP y cliente.

Pero existen enrutadores inalámbricos que aceptan más de un radio en cuyo caso se puede tener un radio funcionando como AP (Access Point) y otro como cliente. Esto se usa a menudo en redes en malla para aumentar el rendimiento.

2.1.7.1 Modo master

El modo master (también llamado modo AP o de infraestructura) se usa para instalar una red con un AP (punto de acceso) que conecta a diferentes clientes.

El AP crea una red con un nombre específico (denominado SSID ó ESSID) y un canal sobre el cual se ofrecen los servicios de la red. Los dispositivos Wi-Fi en modo master pueden comunicarse sólo con los dispositivos asociados a ellos que estén en modo managed.

SSID¹⁴, es el identificador de la red. Cuando hay más de un AP en la misma red se usa el término ESSID. Cuando hay un solo AP se puede usar BSSID (Basic SSID), todos ellos se refieren al nombre de la red, el cual tiene que ser el mismo para el AP y sus clientes.

Los AP crean redes Wi-Fi punto a multipunto. Un radio operando en el modo master funciona como un AP, anunciando una red con cierto nombre en un determinado canal y permite que los clientes se le conecten. Puede haber limitaciones

¹⁴SSID: Service Set Identifier

en el número máximo de clientes permitidos (el límite depende del modelo de AP usado).

2.1.7.2 Modo Managed

El modo *managed* es llamado también modo cliente. Los dispositivos inalámbricos en modo managed, se unirán a una red creada por el master y automáticamente cambiarán el canal para ajustarse al del master.

De los clientes que usan un determinado AP se dice que están asociados con él. Los radios en modo managed no pueden comunicarse directamente entre sí y sólo se pueden comunicar con el master al cual están asociados.

2.1.7.3 Modo Ad-hoc

El modo Ad-hoc se usa para crear redes en malla donde:

- No hay dispositivos en modo master (AP)
- Se realiza la comunicación directamente entre todos los nodos

Los dispositivos deben estar dentro de su rango de cobertura para comunicarse y deben escoger un nombre de red y canal común.

El modo Ad-hoc se usa para crear una red en malla, es decir, una red multipunto a multipunto donde no hay ningún master. El modo Ad hoc también puede usarse para conectar dos laptops equipados con Wi-Fi sin utilizar un AP. En el modo ad-hoc cada tarjeta inalámbrica se comunica directamente con sus vecinas.

2.1.7.4 Modo monitor

El modo monitor se usa para escuchar pasivamente todo el tráfico en un canal dado. Es útil para:

- Analizar los problemas en un enlace inalámbrico
- Observar el uso del espectro en una zona
- Realizar tareas de mantenimiento y de seguridad

2.1.8 Wireless Distribution System (WDS)

Los AP no pueden comunicarse con otros AP por radio. Existe una modalidad especial en Wi-Fi llamada WDS¹⁵ (Sistema de Distribución Inalámbrico), que permite que varios AP se comuniquen entre sí por radio, pero a expensas de una considerable reducción del caudal y es frecuente encontrar problemas de interoperabilidad entre fabricantes, por lo que no se aconseja utilizar esta modalidad. Es posible habilitar la comunicación inalámbrica directa entre AP usando el protocolo WDS.

Una vez que se ha expuesto sobre las comunicaciones con Wi-Fi, a continuación, se describen a las SBC's que contendrán a los módulos de radio Wi-Fi para la posterior experimentación.

2.2 Dispositivos SBC para pruebas con módulos inalámbricos

Las SBC's¹⁶ son computadoras completas implementadas en una sola tarjeta. Están constituidos por un microprocesador, memorias, puertos de E/S y otros módulos. Para comunicarse con estas tarjetas, existen varias maneras como por

¹⁵ Wireless Distribution System

¹⁶ SBCs: Single Board Computers

ejemplo por Ethernet (SSH, Telnet), USB y RS232. Tienen numerosas aplicaciones como Puntos de Acceso inalámbricos, Enrutadores, Puentes, Balanceadores de carga, etc. Para su funcionamiento, algunas vienen con sistema operativo incorporado (Ej. RouterOS) y otras como las ALIX poseen ranuras para insertar disco duros en formato SD o CF.

2.2.1 Descripción de las SBC's

Actualmente existen numerosos fabricantes para SBC's entre ellas se tiene a Mikrotik con sus tarjetas RouterBOARD y PCEngines con las tarjetas ALIX, en este apartado se enfocará al análisis de estas dos soluciones que luego de observar sus potencialidades y ventajas, se escogerá a la solución más idónea a los requerimientos del proyecto.

A continuación, se describirán las diferentes tarjetas SBC y sus respectivos módulos de radio inalámbricos porque estos dispositivos permitirán configurar varios parámetros para las diferentes experimentaciones que se llevaran a cabo en el proyecto de monitorización energética. Se inicia el análisis describiendo a las tarjetas SBC's de Mikrotik denominadas Routerboards con sus series RB4xx.

2.2.1.1 RouterBoard RB411AH

Este es un SBC relativamente de bajo precio, consta de un CPU Atheros AR7161 que es un procesador destinado para redes, cuya velocidad es de 680 MHz y memoria RAM incorporada de 64MB, además, posee un puerto Ethernet con POE y un RS232, viene provisto de una ranura mini PCI A/B para el módulo de radio Wi-Fi.

Además, este dispositivo viene con un Sistema Operativo integrado nivel L5. En la figura 4, se muestra dicha tarjeta.



Figura 4. Routerboard RB411AH
(Mikrotik, 2011)

2.2.1.2 RouterBoard RB433UAH

Este es un SBC relativamente de mayor costo, consta de un CPU Atheros AR7161 que es un procesador destinado para redes, cuya velocidad es de 680 MHz y memoria RAM incorporada de 128MB, además posee un puerto Ethernet con POE y dos extras, dos puertos USB, viene provisto de tres ranuras mini PCI A/B para los módulos de radio Wi-Fi. Además, este dispositivo viene con el Sistema Operativo integrado nivel L5. En la figura 5, se muestra la nombrada tarjeta.



Figura 5. Routerboard RB433UAH
(Mikrotik, 2011)

2.2.1.3 ALIX.2D13

Este es un SBC de costo comparable con la RB433, consta de un CPU AMD GEODE LX800 de 500 MHz y memoria RAM incorporada de 256 MB, además posee tres puertos Ethernet, dos puertos USB, viene provisto de una ranura mini PCI A/B para el módulo de radio Wi-Fi. Además, este dispositivo para cargar el Sistema Operativo viene provisto de una ranura para Compact Flash CF. En la figura 6, se muestra la denominada tarjeta.



Figura 6. Tarjeta Alix 2D13
(Netgate, 2013)

2.2.1.4 ALIX.3D3

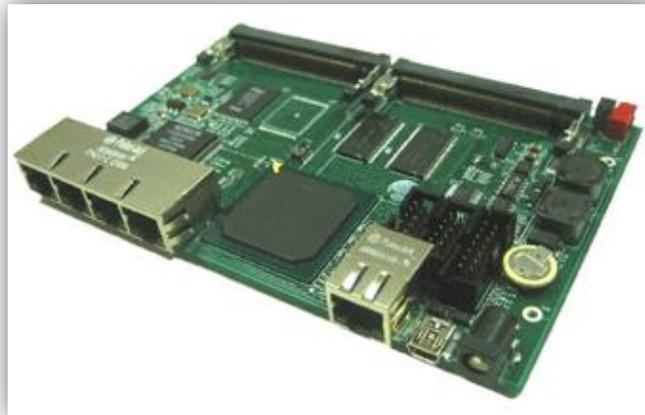
Este es un SBC de costo menor que el RB433, consta de un CPU AMD GEODE LX800 de 500 MHz y memoria RAM incorporada de 256 MB, además posee un puerto Ethernet, un puerto USB, viene provisto de dos ranuras mini PCI A/B para los módulos de radio Wi-Fi. Además, este dispositivo para cargar el Sistema Operativo viene provisto de una ranura para CF. En la figura 7, se muestra la mencionada tarjeta.



**Figura 7. Tarjeta Alix 3D3
(Netgate, 2013)**

2.2.1.5 GW2345 Avila Network Board

Este es un SBC de costo similar a los anteriores RB433 y ALIX.2D13, consta de un CPU Intel™ IXP425 XScale™ de 533 MHz y memoria RAM incorporada de 64 MB, además, posee cinco puertos Ethernet, un puerto USB, viene provisto de cuatro ranuras mini PCI A/B para los módulos de radio Wi-Fi. Además, este dispositivo para cargar el SO viene provista de una ranura para CF. En la figura 8, se muestra la nombrada tarjeta.



**Figura 8. Tarjeta GW2345
(Netgate, 2013)**

2.2.2 Módulos de radio Wi-Fi para tarjetas SBC

Para el proyecto de monitorización de consumo energético, se necesitan tarjetas de radio Wi-Fi para ranuras mini PCI con parámetros tales como potencia de transmisión, sensibilidad de recepción, temperatura, humedad, etc. Desde el punto de vista de hardware es importante el chipset incorporado puesto que debe disponer de un soporte para un Sistema Operativo GNU/Linux o RouterBoard, para las diferentes pruebas deben funcionar en todos los modos de operación como: Master, Managed, Ad-hoc y Monitor, de esta manera, se podrá construir puntos de acceso (AP), puentes (Br), repetidores y enrutadores. Para el experimento, se va a trabajar con dos tipos de tarjetas de radio Wi-Fi: Con la MikroTik R52Hn y una Wistron DCMA-82 con chipset Atheros. Además, se necesitarán controladores para las dos interfaces inalámbricas como el driver Hostap para tarjetas con chipset Atheros como las ALIX y Wi-Fi Mikrotik con chipset Atheros para las RouterBord.

En resumen, se necesitan tarjetas de radio para el proyecto con las siguientes características:

- Tarjetas con potencia promedios de 300 - 600 [mW] en los estándares 802.11a/b/g/n.
- Que contengan Chipset Atheros para que permitan realizar las modificaciones pertinentes.
- Consumo de corriente estándar para la placa a utilizar.
- Que soporten ranuras mini PCI tipo A/B.

A continuación, se describen las características más en detalle de mencionadas tarjetas a utilizarse en el proyecto.

2.2.2.1 MikroTik R52Hn/ 802.11abgn

Este módulo de radio, posee chipset Atheros AR9220, dos bandas, estándar 802.11a/b/g/n, baja potencia de consumo, conectores MMX, ranura mini PCI, todos los tipos de modulación. En la figura 9, se muestra el mencionado modulo y en los anexos se detallan el resto de características.

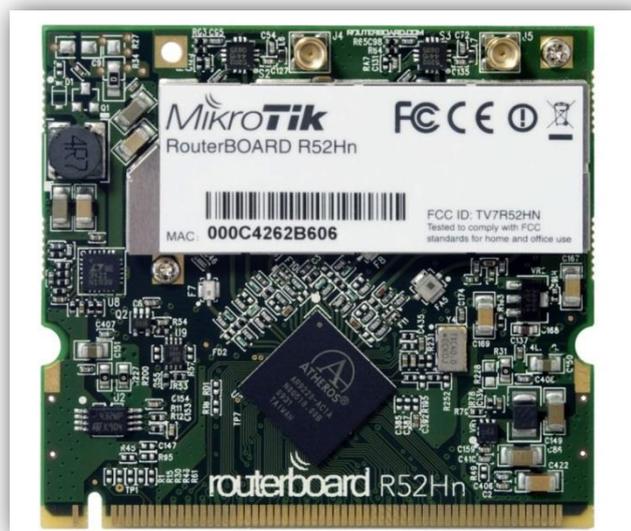


Figura 9. Módulo de Radio Wi-Fi R52Hn (Mikrotik, 2013)

2.2.2.2 Wistron DCMA-82/ 802.11abg

Este módulo posee chipset Atheros AR5314, dos bandas, estándar 802.11a/b/g, baja potencia de consumo, conectores MMX, ranura mini PCI, todos los tipos de modulación. En la figura 10, se muestra el mencionado modulo y en los anexos se detallan el resto de características.



Figura 10. Módulo de Radio Wi-Fi DCMA-82
(Wistron, 2013)

2.2.2.3 Tabla comparativa de los radios Wi-Fi

En la tabla 2, se muestra la comparativa de las principales características de los radios a utilizarse en el presente proyecto.

Tabla 2.

Comparativa entre radios Wi-Fi de diferentes marcas

ITEM	R52Hn	Wistron DCMA-82
Estándares	802.11a/b/g/n	802.11a/b/g
Potencia de Salida	Hasta 25 dBm	Hasta 30 dBm
Multiplicación	MIMO 2x2	
Chipset	Atheros AR9220	Atheros AR5314
Rendimiento	Vtx < 300 Mbps Throughput < 200 Mbps	Vtx < 108 Mbps
Consumo	400 mW en reposo 7 W max	960 mW 4.3 W
Conectores	2 X MMCX	2 X MMCX
Modulaciones	OFDM: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM DSSS: DBPSK, DQPSK,CCK	OFDM: BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM DSSS: DBPSK, DQPSK,CCK
Rango de operación	-40 C a +70 C	0 C a +70 C
Ranuras	mini PCI A/B	mini PCI A/B

Para la experimentación, se utilizarán los dos módulos de radio Wi-Fi, puesto que, en los módulos **R52Hn** se pueden realizar mediciones en el estándar 802.11n, mientras que con el módulo **DCMA-82** las mediciones están restringidas hasta el estándar 802.11g, para fines comparativos, se harán mediciones de consumo de potencia con las dos marcas de radios Wi-Fi solo para sus tres estándares principales. Es decir, 802.11a/b/g y las experimentaciones con el estándar 802.11n, se efectuarán para medir hasta que velocidades del flujo de datos se tiene el máximo throughput y obviamente también, se observará el comportamiento del consumo energético.

2.3 Sistemas operativos para tarjetas SBC's.

Para el presente proyecto como se mencionó en los apartados anteriores, se analizará cuál de las tarjetas SBC será utilizada, La tarjeta Alix de PCengines o RouterBoard de Mikrotik. Para el caso de las tarjetas Alix, utilizan el sistema

operativo Linux Voyage que es instalado en la CF para que posteriormente se procedan a las respectivas configuraciones, mientras que para las Routerboard, utilizan el sistema operativo RouterOS que viene instalado desde fabrica en la tarjeta, es decir, que es un sistema propietario. A continuación, se describirá en detalle los sistemas operativos en cuestión.

2.3.1 Linux Voyage

Según (Punkytse, 2013), Linux Voyage es una distribución derivada de Debian que se ejecuta en algunas plataformas integradasx86, también corre en las SBCALIX/WRAP, Soekris45xx/48xx/65xx y tarjetas basadas en Atom, también, se puede ejecutar en gama baja para plataformas PCx86. Para una instalación típica se requiere un mínimo 128 MB de espacio en disco, aunque si se dispone de un espacio suficiente de almacenamiento, se podrá instalar más paquetes y aplicativos. Linux Voyage es tan pequeña que es la más apropiada para el funcionamiento de aplicativos como firewall, punto de acceso inalámbrico (AP's), Asterisk/VoIP, Gateways, reproductores de música y otros dispositivos de almacenamiento de red. Para acceder al sistema operativo y realizar las configuraciones pertinentes, se puede hacer mediante conexiones vía FTP, Telnet, SSH.

2.3.2 RouterOS

Para (Mikrotik, 2013), el funcionamiento de las RouterBoard, es basado en S. O Linux y se le conoce como Mikrotik RouterOS. Este sistema operativo, permite a los usuarios convertir una computadora personal o placas RBxyz en un ruteador, para aplicaciones como firewall, VPN Server y Cliente, Gestor de ancho de banda, QoS,

punto de acceso inalámbrico y otras características, pero comúnmente es utilizado para el enrutamiento y la conexión de redes.

El sistema operativo es licenciado en una escalada de niveles, cada uno de ellos puede acceder a prestaciones predeterminadas en hardware. Para realizar las respectivas configuraciones, existe un software de configuración con interfaz gráfico llamado *Winbox* que ofrece una sofisticada interfaz para el sistema operativo RouterOS. El software también permite conexiones a través de FTP y Telnet, SSH y acceso Shell. También hay una API que permite crear aplicaciones personalizadas para la gestión y supervisión. En la figura 11, se muestra el software Winbox con una extensa gama de opciones de configuración.

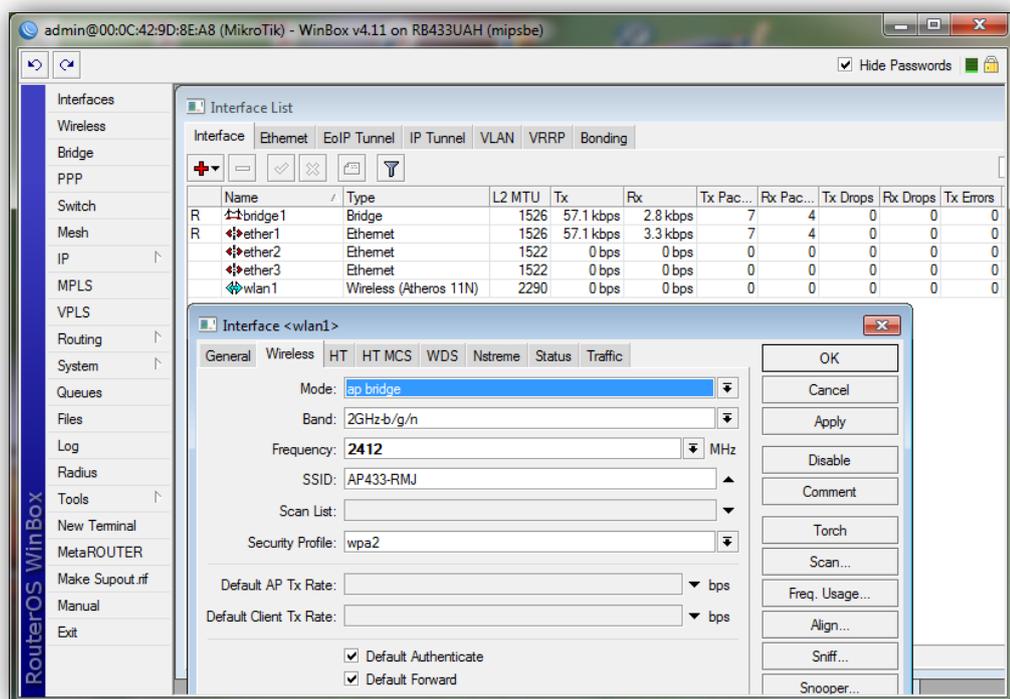


Figura 11. Interfaz gráfico del Winbox

Para el proyecto, se utilizará el software Winbox porque es una aplicación fácil de manipular e intuitivo, además de su facilidad de configuración visual amigable al usuario.

2.4 Inyectores de tráfico bajo Linux.

Existen pocas aplicaciones especializadas en inyección de tráfico en una red, se puede citar entre ellos al Aircrack-ng, D-ITG que funcionan bajo Linux. Para la experimentación de la monitorización, se hace conveniente utilizar al D-ITG puesto que es un aplicativo pequeño en comparación con el Aircrack-ng que es un interesante software multipropósito pero demasiado pesado como aplicación. En el D-ITG se puede trabajar por líneas de comando, pero también tiene una interfaz visual desarrollada en java denominada D-ITG GUI.

Para (Avallone & Pescape, 2011), el D-ITG es una plataforma capaz de producir tráfico de paquetes a nivel de procesos estocásticos y replicar con precisión adecuada tanto para la IDT¹⁷ como para el PS¹⁸, también manejan variables aleatorias como (exponencial, uniforme, Cauchy, Normal, Pareto, etc.). D-ITG es compatible con la generación de tráfico para IPv4 e IPv6, así mismo, es capaz de generar tráfico en la capa de red, transporte, y aplicación. Por tanto, D-ITG presenta propiedades interesantes en comparación con otros generadores de tráfico existentes en el mercado. En la figura 12, se muestra la interface del D-ITG 2.61 GUI 0.92 que es fácil e intuitivo para trabajar.

¹⁷ IDT: Inter Departure Time

¹⁸ PS: Packet Size

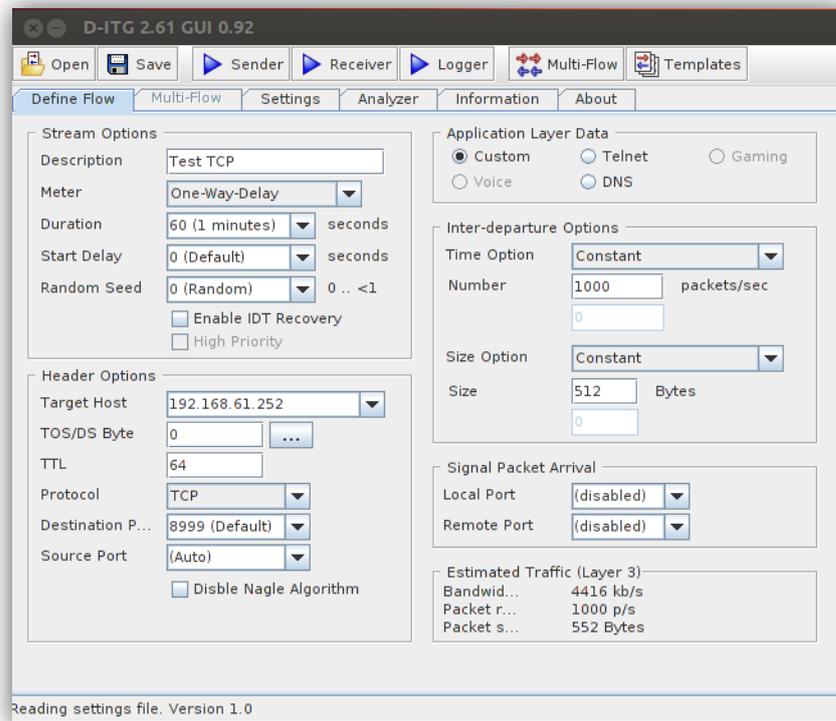


Figura 12. Interfaz de configuración para el D-ITG GUI

2.5 Métodos de monitorización de consumo energético para Wi-Fi.

Existen varios métodos para medir el consumo de energía en diferentes dispositivos electrónicos (normalmente se alimentan con corriente continua), cuando se habla de consumo de energía, se asocia con la potencia eléctrica consumida, a su vez la potencia es directamente proporcional al voltaje y corriente aplicado a un dispositivo electrónico, normalmente el voltaje de alimentación es constante, por tanto, la variable de medición directa para el consumo energético será la corriente eléctrica. Para (Little, 2011), existen dos métodos principales para medir corriente DC como son: método invasivo y no-invasivo.

2.5.1 Método Invasivo

Los métodos invasivos, como su nombre lo indica, significa que se debe poner algún elemento en la trayectoria de la corriente. Entre los elementos utilizados se tienen: transistor y resistencia.

2.5.1.1 Método con Transistor

Los transistores son utilizados como método de detección de sobre corrientes *sin pérdida* ya que son componentes de control que no utilizan resistencias adicionales o dispositivos de disipación de energía.

2.5.1.2 Método con Resistencia Serie

Para (Drafts, 2004), se utiliza generalmente una resistencia "shunt" o de derivación de bajo valor (0.01 a 1 ohm) dependiendo de la corriente a medirse. Por la ley de Ohm se tiene que: $V = IR$, la corriente que fluye a través de una resistencia producirá una pequeña caída de voltaje, la misma que podrá ser medida por algún dispositivo e indirectamente se obtendrá el valor de la corriente que fluye a través de dicha resistencia. Esta resistencia puede estar ubicada en un circuito antes o después de la carga o dispositivo a medirse. Así mismo, se debe tener cuidado con la selección del valor de la resistencia ya que un alto valor de resistencia, producirá una alta caída de tensión, lo que significa una apreciable pérdida de potencia. En la figura 13, se muestra la distribución adecuada de la carga y la resistencia shunt.

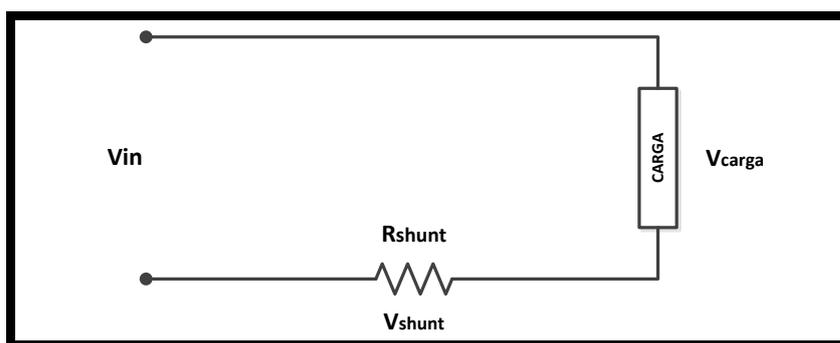


Figura 13. Método de medición de la corriente utilizando resistencia shunt.

Dónde:

$$V_{Shunt} = I \times R_{Shunt}$$

$$P_{Shunt} = I^2 \times R_{Shunt}$$

El voltaje medido en la resistencia shunt, puede conectarse directamente a un microcontrolador o equipo de medida como un osciloscopio, a veces es necesario utilizar una etapa de amplificación y aislamiento para realizar una medición más exacta y sin interferencias.

2.5.2 Método No-Invasivo

Para (Yarborough, 2012), este método utiliza la medición del voltaje por inducción electromagnética cuando cruza corriente eléctrica por un medio conductor. Entre los principales métodos, se tienen: transformador de corriente, bobina Rogowski y dispositivos de efecto Hall.

2.5.2.1 Transformador de corriente

Un transformador de corriente tiene tres ventajas principales como son proporcionar el aislamiento del voltaje de línea, proporcionar una medición sin

pérdida de corriente, y la medida de la señal de voltaje puede ser obtenido con una inmunidad al ruido. Este método indirecto de medición, requiere una corriente variable, corriente transitoria, o corriente continua conmutada; para proporcionar un campo magnético cambiante que se acopla magnéticamente a los devanados secundarios como se muestra en la figura 14.

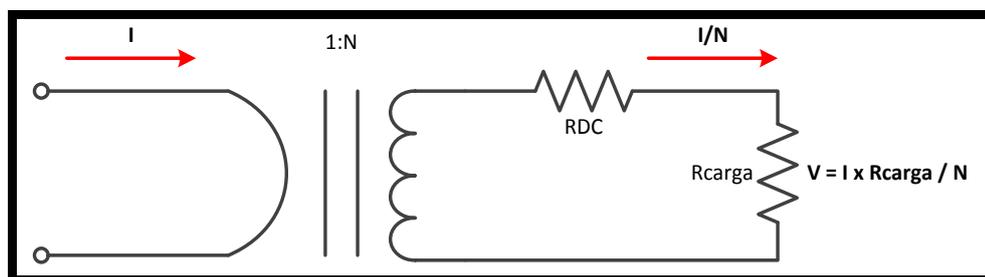


Figura 14. Método de medición con transformador de corriente

La medición de tensión en el secundario, puede ser escalada de acuerdo con la relación de vueltas entre los devanados primario y secundario. Este método de medición se considera "sin pérdida" debido a que el circuito de corriente pasa a través de los devanados de cobre con pérdidas resistivas muy pequeñas. Sin embargo, una pequeña cantidad de energía se pierde debido a las pérdidas del transformador de la resistencia de carga, pérdidas en el núcleo, primario y resistencia DC en el secundario.

2.5.2.2 Bobina Rogowski

La bobina de Rogowski es similar a un transformador de corriente en el que se induce un voltaje en una bobina secundaria que es proporcional al flujo de corriente a través de un conductor aislado. La excepción es que la bobina de Rogowski, es un diseño de núcleo de aire en comparación con el transformador de corriente que se

basa en un núcleo de alta permeabilidad, tal como el acero laminado. El diseño de núcleo de aire tiene una inductancia menor y proporciona una señal de respuesta más rápida y tiene una señal voltaje lineal. En la figura 15, se muestra la descripción gráfica para dicha bobina.

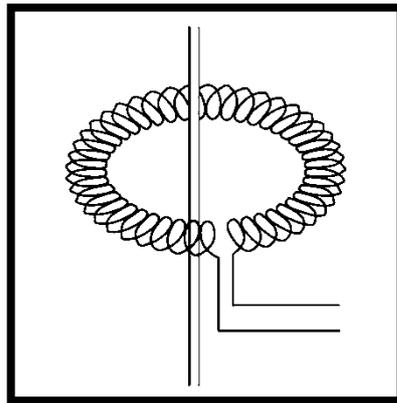


Figura 15. Método de la bobina Rogowski

2.5.2.3 Efecto Hall

Cuando un conductor portador de corriente es colocado en un campo magnético, como se muestra en la figura 16, una diferencia de potencial se produce perpendicularmente al campo magnético y la dirección del flujo de corriente. Este potencial es proporcional a la magnitud del flujo de corriente. Cuando no hay ningún campo magnético y el flujo de corriente existe, entonces no hay diferencia de potencial. Sin embargo, cuando un campo magnético y el flujo de corriente existen, las cargas interactúan con el campo magnético, apareciendo el voltaje Hall.

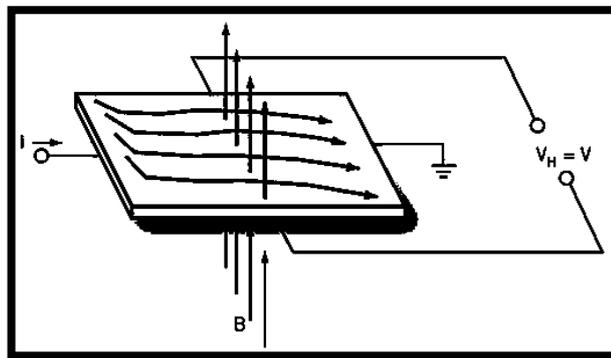


Figura 16. Método del efecto Hall

La ventaja de los dispositivos de efecto Hall, es que son capaces de medir corrientes grandes con baja disipación de potencia. Sin embargo, existen numerosos inconvenientes que pueden limitar su uso, como la variación de temperatura no lineal lo que requerirá una compensación, ancho de banda limitado, bajo rango de detección de corriente lo que requerirá un alto voltaje offset que puede conducir a errores, susceptibilidad a los campos magnéticos externos, y son costosos.

De acuerdo a lo expuesto en este apartado sobre los métodos invasivos y no invasivos, es lógico pensar que es mejor utilizar un método no invasivo, pero estos métodos de investigación no son adecuados para el proyecto, por ejemplo si se utilizará efecto hall, este funciona mejor para corrientes superiores a 3A y en el caso de los transformadores de corriente o inducción electromagnética son más utilizados para corrientes alternas o continuas conmutadas.

Por tanto, para la investigación, se optó por utilizar el método invasivo como es la resistencia en serie al dispositivo objeto de medida porque se adapta mejor para bajas corrientes, es eficiente, efectivo y definitivamente una solución barata.

CAPÍTULO 3

En este capítulo, se implementa un escenario de experimentación para un enlace inalámbrico punto a punto, acorde al análisis realizado en el capítulo 2, así mismo, también se expondrá el proceso de experimentación con las respectivas configuraciones de las tarjetas SBC y el generador de tráfico, una vez obtenido los datos se procederá a calcular el consumo de potencia.

3 IMPLEMENTACIÓN DEL ESCENARIO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Diseño del escenario de experimentación

En este capítulo, el objetivo es configurar e implementar una red inalámbrica punto a punto para monitorizar el consumo de energía al transmitir datos en función del estándar 802.11 a/b/g/n a través de ella, para lo cual, se utilizarán tarjetas SBC's integrados con sus respectivos radios Wi-Fi, por otro lado, estas tarjetas estarán conectadas a sus respectivas terminales de computadoras en las cuales se instalarán el software D-ITG para inyectar tráfico en forma direccional o bidireccional. En un extremo, se utilizará una tarjeta RouterBoard RB433UAH + (radio Wi-Fi), este conjunto será configurado como AP BRIDGE, mientras que en el otro extremo, se utilizará una tarjeta RouterBoard RB411AH + (radio Wi-Fi), el mismo que será configurado como STATION.

Para medir el consumo de potencia en los módulos de radio Wi-Fi, se utilizará el método de la resistencia *shunt* ubicada entre el conversor AC/DC y la placa Routerboard.

3.2 Esquema del escenario a implementarse en un enlace punto a punto

En la figura 17, se muestra el diagrama de bloques del escenario de experimentación.

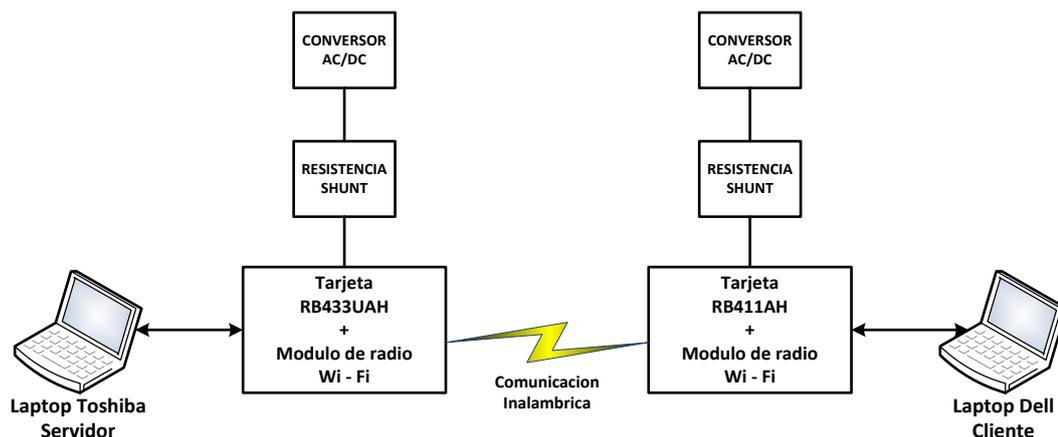


Figura 17. Diagrama del escenario de experimentación

Como se puede apreciar en la figura 17, cada tarjeta SBC (RouterBoard) posee su módulo de radio inalámbrico para la comunicación de servidor a cliente, es decir, de (AP – BRIDGE) a STATION y cada conjunto a su vez, se comunican vía Ethernet a sus respectivas laptops. La monitorización se realiza en la alimentación de cada tarjeta Routerboard aplicando el método de la resistencia *shunt* o serie por las razones descritas en el capítulo 2.

3.3 Diagrama circuital y método de medición adoptado

Como se analizó en el capítulo 2, se utilizará el método de la resistencia en serie ($R = 1\Omega$) conectada con la placa SBC, en la resistencia se puede medir directamente con un osciloscopio o voltímetro, el voltaje y por la ley de Ohm, se tiene que ($I = V$), por tanto, se obtendrá directamente la señal corriente consumida por la placa y el

módulo Wi-Fi en un osciloscopio con tierra flotante como se muestra en la figura 18,

donde ($P_{Wi-Fi} = P_{Total_medida} - P_{SBCinicial_sin_modulo_Wi-Fi}$).

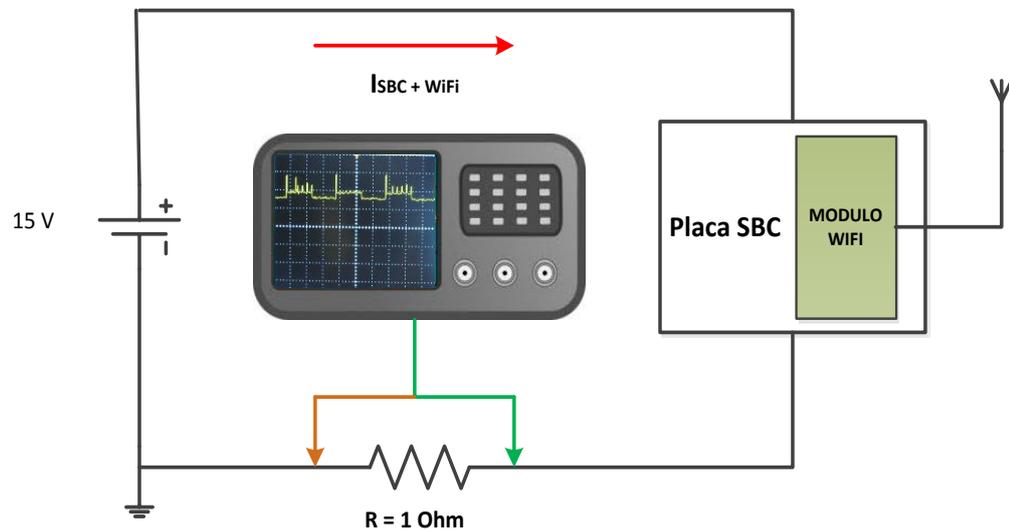


Figura 18. Diagrama circuital para la medición indirecta de la corriente

3.4 Escenario de experimentación montado en laboratorio

En la figura 19, se muestra el diagrama de red para el escenario de experimentación montado en el laboratorio de comunicaciones.

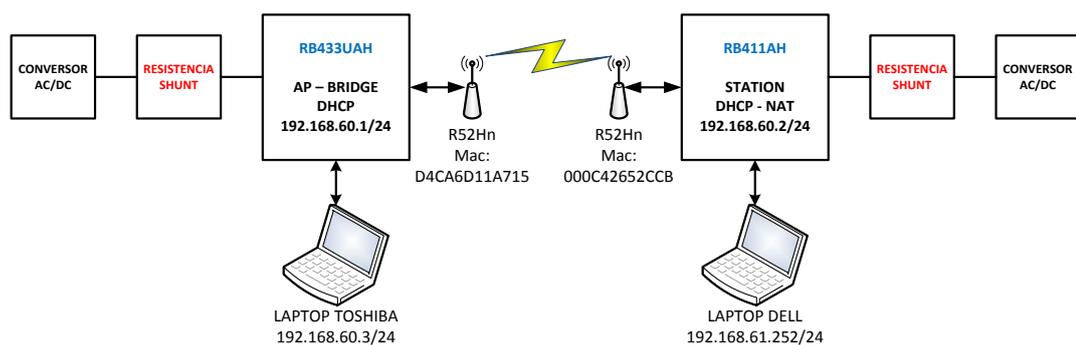


Figura 19. Diagrama de red para la experimentación

En la figura 20, se observa que para el experimento se utilizaron dos tipos de placas diferentes como son el RB433UAH y RB411AH, en cada una de estas tarjetas

se insertan módulos de radio Wi-Fi R52Hn/DCMA-82 y cada conjunto están conectados sus respectivas laptops. La placa de la izquierda está funcionando en modo (AP-Bridge + servidor DHCP) previamente configurado, mientras que la placa de la derecha está funcionando en modo (STATION +servidor DHCP + NAT).



Figura 20. Enlace armado en el laboratorio entre el transmisor y receptor

Como se puede observar en la figura 20, las placas SBC's están conectadas a sus respectivas laptops. La distancia entre placas para las mediciones es de 5 m, pero por requerimientos panorámicos en la figura, se muestra los dispositivos uno al lado de otro.

La figura 21, muestra una imagen ampliada de la placa RB411AH conectada a su respectiva laptop Dell. Esta placa está previamente configurada en modo (STATION + DHCP).

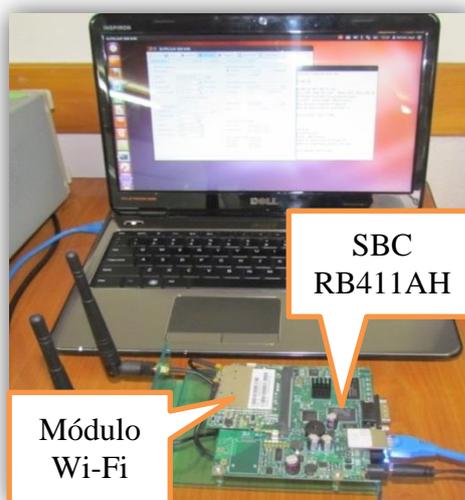


Figura 21. Implementación del equipo receptor

La figura 22, muestra una imagen ampliada de la placa RB433UAH conectada a su respectiva laptop Toshiba. Esta tarjeta está configurada en modo (AP-BRIDGE + DHCP).

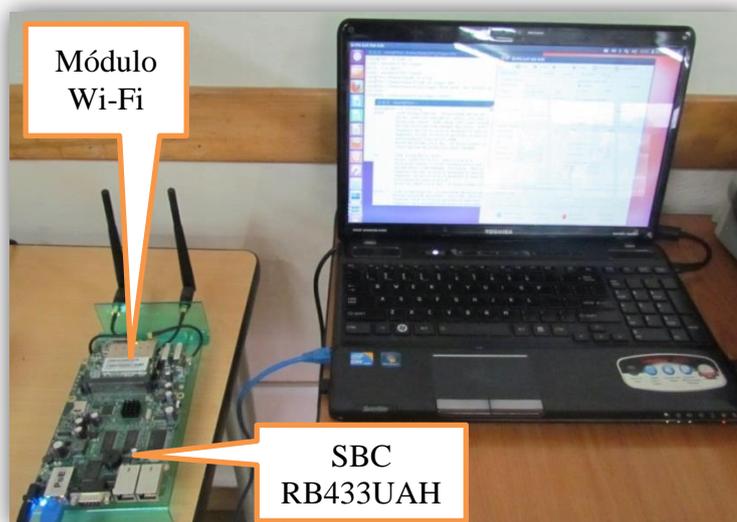


Figura 22. Implementación del transmisor

En las figuras 21 y 22, se observa que los módulos de radio son conectados a dos antenas, las mismas que son utilizadas para enviar y recibir datos simultáneamente a

velocidades significativas en relación a dispositivos con una antena y para radios que soporten el estándar 802.11n es utilizado para MIMO¹⁹.

La figura 23, muestra la forma de medir la corriente, donde se puede apreciar la punta de prueba del osciloscopio conectado a la resistencia serie insertado en el cable de alimentación, en caso de no poseer un osciloscopio, se puede realizar mediciones con un multímetro de precisión.



Figura 23. Medición indirecta de la corriente en la resistencia serie

Como muestra también en la figura 23, existen dispositivos que utilizan POE²⁰ cuyo estándar es 802.3af, para tal caso, el procedimiento será el mismo que cuando se alimenta el dispositivo con un convertor AC/DC, es decir, de acuerdo a los pines dado por el estándar, se tendrá que conectar la resistencia *shunt* en la alimentación a los cables que van hacia los pines 7 u 8 (DC-).

En la figura 24, se muestra la obtención de la medida de corriente promedio para un tráfico de 1 Mbps cursado entre el transmisor y receptor, en este caso el consumo de corriente es de 309 [mA], en el osciloscopio se puede apreciar que la señal es continua cuando están sincronizados el transmisor y el receptor. Cuando no están

¹⁹ MIMO: Multiple Input Multiple Output

²⁰ POE: Power Over Ethernet

sincronizados, en el osciloscopio aparecen señales cuadradas con un periodo de 1.5 ms.

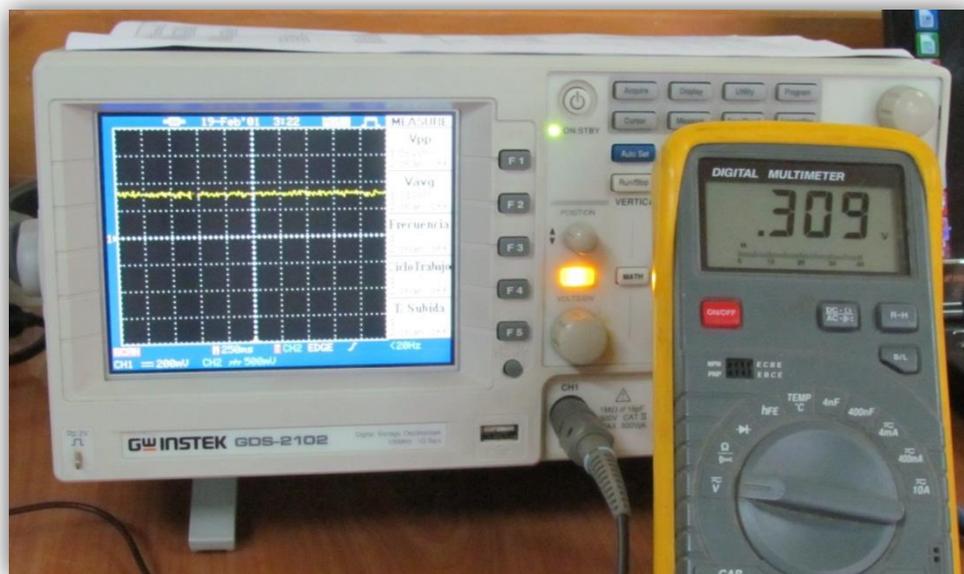


Figura 24. Medición indirecta de la corriente media con multímetro y osciloscopio

En la figura 25, se muestra en el osciloscopio la señal de corriente en el dispositivo transmisor, donde los picos son los denominados *beacons* que son utilizados para sincronización de la red inalámbrica, tienen un periodo de 100 ms aproximadamente, estos picos aparecen cuando está en modo de reposo, es decir, sin transmisión aun de datos.



Figura 25. Señal de corriente en el dispositivo transmisor en modo de reposo

3.5 Diagrama del proceso de mediciones

Para obtener las mediciones, el proceso consta de tres fases principales para realizar las experimentaciones como se muestra en la figura 26.

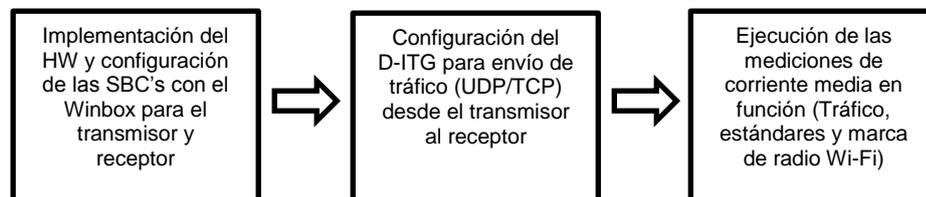


Figura 26. Fases para la obtención de mediciones de corriente consumida.

Como se puede observar en la figura 26, el proceso para obtener las diferentes medidas de corriente consumida tiene un orden dado, es decir, en primera instancia hay que ensamblar el enlace inalámbrico, luego se debe configurar las tarjetas para un enlace punto a punto utilizando *Winbox* tanto en el transmisor como en el receptor, luego, se debe configurar una serie de parámetros en la aplicación D-ITG bajo Linux, finalmente, se inician las experimentaciones para obtener las medidas de

corriente y registrarlos en una base de datos para posteriormente realizar estadísticas, análisis y conclusiones.

En la figura 27, se muestra en detalle el proceso de configuración de los parámetros en las tarjetas SBC's y la aplicación D-ITG.

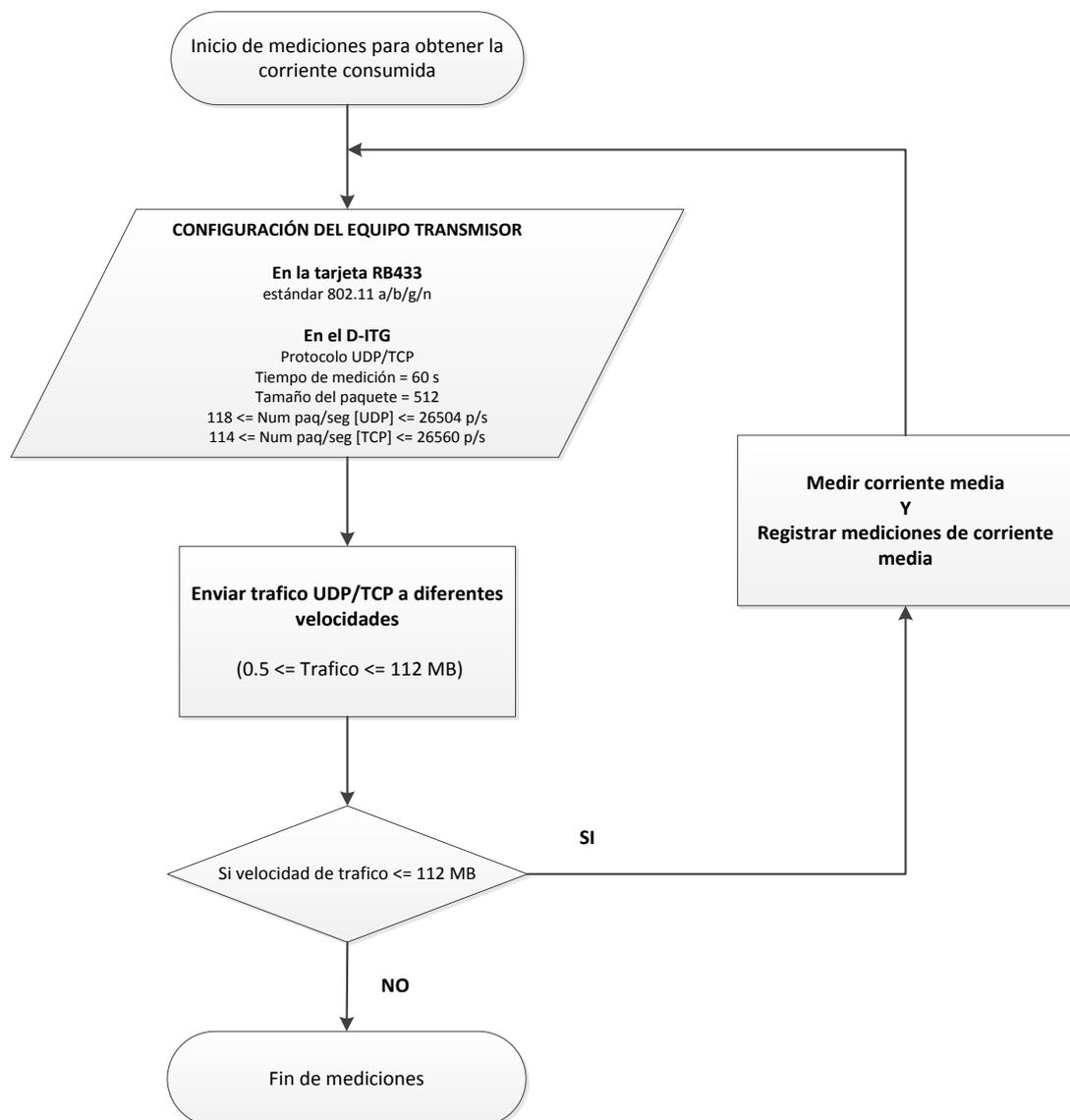


Figura 27. Proceso de configuración para las tarjetas SBC's y aplicación D-ITG

En la figura 27, se muestra el proceso de cómo se realizan las diferentes pruebas para determinar el consumo de corriente en cada caso. Como se puede observar, se efectuarán pruebas para cada estándar 802.11x y tipo de radio Wi-Fi, es decir, 802.11a, 802.11b, 802.11g y 802.11n. Para cada estándar, se toma como constante al primer canal de las portadoras (por ej. 2412 y 5180 KHz), respecto a la distancia entre los dispositivos inalámbricos, será de 5m. Para cada prueba, en la configuración de la tarjeta será cambiando el tipo del estándar inalámbrico. Por otro lado, en la aplicación D-ITG, para cada uno de los estándares, se enviarán valores de tráfico entre 0.5 Mbps y 112 Mbps, tanto para tráfico UDP como para TCP. Para cada protocolo se mantiene constante: el *tiempo de medición* (60 [s]) y *tamaño del paquete* (512 bytes) y como variable, el *número de paquetes/segundo*. Utilizando el osciloscopio y voltímetro, se medirá la *corriente media consumida* para cada tipo de experimento, y se registrará estos valores en una base de datos. Cabe recalcar que se tomó como tiempo de experimentación 60 segundos porque el generador durante este tiempo envía constantemente tráfico UDP o TCP, se pueden proporcionar tiempos superiores de experimentación pero los resultados de las mediciones serán los mismos.

A continuación, se muestra el cálculo de la potencia consumida en función del estándar inalámbrico y tráfico de datos (constante) cursado por la red.

3.6 Cálculo de la Potencia consumida

Cuando una señal de voltaje o corriente posee componente continua y alterna, los instrumentos de medida calculan y muestran como dato de medición al verdadero valor eficaz, cuya definición está dada por (Muhammad, 2004):

$$V_{true-rms} = \sqrt{V_{DC}^2 + V_{AC}^2} \quad (\text{Ec.1})$$

En las pre-mediciones de voltaje realizadas, se observó que el voltaje rms para señales alternas está en el orden de las unidades de mV frente a las centenas de mV del voltaje medio, por tanto, esa es la razón por la cual el valor medido de $V_{rms-true}$ en el osciloscopio o multímetro es aproximadamente igual al V_{DC} , debido a que se toma como despreciable al voltaje V_{AC} para la señal alterna.

En la siguiente ecuación, se obtiene la potencia media cuando se pone en paralelo las puntas de prueba en la resistencia de 1 ohm, donde se obtiene directamente el valor de la corriente media por lo referido en el párrafo de arriba.

$$P_m = V_{SBC} * \left(\frac{I-I_0}{1000}\right) \quad (\text{Ec. 2})$$

Dónde:

P_m: Potencia medida para cualquier tráfico de datos.

V_{SBC}: Voltaje de alimentación a la entrada de la tarjeta SBC.

I: Corriente medida para cualquier tráfico de datos.

I₀: Corriente inicial medida (SBC + módulo Wi-Fi)

3.7 Configuraciones de red de las tarjetas SBC para dispositivos inalámbricos.

El objetivo es interconectar las terminales de computadoras (laptops) por medio de un enlace inalámbrico punto a punto, por tanto, se necesita implantar el módulo de radio Wi-Fi en una de las tarjetas SBC y luego configurar a este conjunto en modo (AP-BRIDGE) para que se comunique con el otro extremo en modo (STATION), estas tarjetas a su vez, se conectan por medio de Ethernet a sus respectivas laptops.

Todas las configuraciones de las tarjetas SBC's y del D-ITG en detalle, se muestran en el *Anexo Configuraciones*, debido a que son demasiado extensas.

CAPÍTULO 4

En este capítulo, se realizan las pruebas y mediciones realizadas para diferentes volúmenes de tráfico y estándares 802.11x, con los datos tabulados se realizaron análisis de resultados en base a las respectivas comparativas.

4 PRUEBAS, MEDICIONES Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Pruebas y Mediciones.

Una vez configurada e implementada correctamente la red punto a punto, se procedieron con las respectivas pruebas de conectividad, como se mostraron en las figuras 35 y 36, luego, se procedió a enviar tráfico de datos con la aplicación D-ITG GUI desde el *servidor* hasta el *cliente*, el valor de este tráfico de datos puede ser observado y medido en el *monitor del sistema* que es una aplicación que debe ser instalada en Ubuntu para las diferentes pruebas de envío y recepción de tráfico de datos como se muestra en la figura 28.

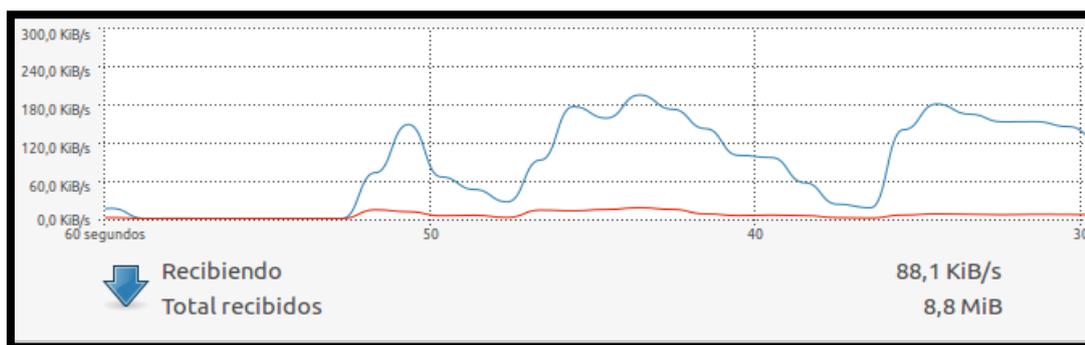


Figura 28. Analizador de tráfico bajo Linux

Como se puede observar en la figura 28, en color azul se representa el tráfico de datos recibido (datos descargados) y en color rojo se representa el tráfico de datos enviado (datos subidos). Una vez establecida la conectividad, se procedió a realizar

las diferentes mediciones de potencia consumida por cada estándar inalámbrico y tráfico de datos cursado.

4.2 Mediciones de consumo energético bajo diferentes volúmenes de tráfico y estándares de comunicaciones.

Las mediciones se realizaron en el conector de entrada de la tarjeta SBC debido a que no fue conveniente la inserción de la resistencia en serie entre la placa y el módulo Wi-Fi, puesto que este hardware tiene numerosos pines de polarización. Por tanto, la solución fue ubicar una resistencia de (1 [Ω]) en el conector de entrada. Luego, se procedió en primera instancia a realizar una medición del consumo de la tarjeta SBC sin radio Wi-Fi, luego se montó el módulo o radio Wi-Fi sin configurar, con este procedimiento, se logró medir el consumo inicial de la tarjeta SBC más el módulo Wi-Fi, a partir de este valor, se realizaron el resto de mediciones en función del tráfico de datos y el estándar utilizado, como se muestran a continuación en los siguientes apartados.

4.2.1 Medición de valores iniciales

En la tabla 3, se muestran los valores iniciales de corriente consumida y voltaje en la entrada para las dos tarjetas RouterBoard RB433UAH y RB411AH (sin radios Wi-Fi), luego, se insertó los respectivos módulos Wi-Fi, para determinar el consumo de corriente de las tarjetas y los módulos inalámbricos, finalmente, se habilitan vía software a los módulos inalámbricos y se mide la corriente consumida en reposo (Idle). A partir de estos valores iniciales se realizaron el resto de mediciones con distintos estándares e inyecciones de diferentes valores de tráfico de datos.

Tabla 3.
Valores iniciales de corrientes

Valores iniciales de corrientes medidas					
SBC's	V _{in}	V _{in'}	I _o (SBC)	I _o (SBC+Wi-Fi-Off+eth)	I _o (SBC+Wi-Fi-On+eth)
	[V]	[V]	[mA]	[mA]	[mA]
RB433UAH	14,84	14,58	208	232	268
RB411AH	14,84	14,7	144	144	178

En la tabla 3, se puede observar que el consumo de corriente es diferente para ambas placas, esto es debido a que la placa RB433 tiene más dispositivos semiconductores que la placa RB411, por ende, consume más corriente, posteriormente se podrá observar que la potencia de consumo inicial para los dos módulos de radio es la misma a pesar de que están montadas en diferentes tarjetas SBC.

Para determinar la potencia en estado de reposo tanto para el transmisor como el receptor se utiliza la *ecuación 2* mostrada en el apartado anterior, entonces se tiene:

$$P_{tx} = 14.58 * (268 - 232)/1000 = 0.524 [W]$$

$$P_{rx} = 14.70 * (180 - 144)/1000 = 0.529 [W]$$

Como se puede apreciar, los valores iniciales o en reposo medidos tienen una diferencia menor al 0.1% tanto en el dispositivo de transmisión como en el de recepción.

4.2.2 Medición y cálculo de potencias con módulo de radio R52Hn

Utilizando la ecuación 2, se calculan las potencias en función de las corrientes medidas como se muestra en la tabla 4, donde los datos observados, corresponden al estándar 802.11a con radio Wi-Fi R52Hn, el resto de tablas para los respectivos estándares, se encuentran en los anexos de *tabla de valores de corrientes medidas*.

Tabla 4.

Valores de corrientes medidos y potencias calculadas para el estándar 802.11a y radio R52Hn

Estándar 802.11a y radio Wi-Fi R52Hn								
Tráfico [bps]	Corriente consumida en el transmisor [mA]		Corriente consumida en el receptor [mA]		Potencia consumida por el transmisor [W]		Potencia consumida por el receptor [W]	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
512k	274	275	180	181	0,61	0,63	0,53	0,54
1M	275	276	181	184	0,63	0,64	0,54	0,59
2M	277	280	182	186	0,66	0,70	0,56	0,62
4M	285	284	186	190	0,77	0,76	0,62	0,68
6M	290	288	190	190	0,85	0,82	0,68	0,68
8M	295	291	193	193	0,92	0,86	0,72	0,72
10M	300	296	193	193	0,99	0,93	0,72	0,72
12M	304	300	196	195	1,05	0,99	0,76	0,75
16M	310	306	195	197	1,14	1,08	0,75	0,78
20M	316	310	196	197	1,22	1,14	0,76	0,78
24M	318	310	196	195	1,25	1,14	0,76	0,75
28M	320	310	196	195	1,28	1,14	0,76	0,75
32M	320	310	196	196	1,28	1,14	0,76	0,76
36M	320	310	196	196	1,28	1,14	0,76	0,76

En la tabla 4, se muestran los datos medidos de corriente consumida por el dispositivo transmisor y receptor para protocolos UDP y TCP, luego aplicando la ecuación 2, se muestran los valores de potencia consumida por el dispositivo transmisor y receptor tanto para protocolos UDP como TCP. Todos los valores medidos, se hicieron para el módulo de radio Wi-Fi R52Hn.

4.2.3 Medición y cálculo de potencias con módulo de radio DCMA-82

En la tabla 5, se muestran los datos obtenidos tanto para las corrientes como la potencia consumida para el estándar 802.11a y radio Wi-Fi DCMA-82.

Tabla 5.

Valores de corrientes medidos y potencias calculadas para el estándar 802.11a y radio DCMA-82

Estándar 802.11a y radio Wi-Fi DCMA-82								
Tráfico [bps]	Corriente consumida en el transmisor [mA]		Corriente consumida en el receptor [mA]		Potencia consumida por el transmisor [W]		Potencia consumida por el receptor [W]	
	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP	UDP	TCP
512k	279	280	188	188	0,69	0,70	0,65	0,65
1M	282	284	189	191	0,73	0,76	0,66	0,69
2M	286	291	191	196	0,79	0,86	0,69	0,76
4M	297	307	197	207	0,95	1,09	0,78	0,93
6M	310	318	202	214	1,14	1,25	0,85	1,03
8M	320	320	207	214	1,28	1,28	0,93	1,03
10M	332	333	212	214	1,46	1,47	1,00	1,03
12M	342	343	218	218	1,60	1,62	1,09	1,09
16M	366	360	225	220	1,95	1,87	1,19	1,12
20M	368	380	230	228	1,98	2,16	1,26	1,23
24M	368	398	230	229	1,98	2,42	1,26	1,25
28M	368	400	230	228	1,98	2,45	1,26	1,23
32M	368	400	230	228	1,98	2,45	1,26	1,23
36M	368	400	230	228	1,98	2,45	1,26	1,23

En la tabla 5, se muestran los datos medidos de corriente consumida por el dispositivo transmisor y receptor para protocolos UDP y TCP, luego aplicando la ecuación 2, se muestran los valores de potencia consumida por el dispositivo transmisor y receptor tanto para protocolos UDP como TCP. Todos los valores medidos, se hicieron para el módulo de radio DCMA-82.

4.2.4 Comparativa de consumos de potencias consumidas

Con los datos de las tablas 4 y 5, se bosquejó la tabla 6, en el que se comparó los diferentes consumos de potencia entre estándares 802.11x y para cada protocolo de comunicación UDP y TCP tanto en el transmisor como en el receptor y para los dos tipos de radios Wi-Fi con los que se realizaron las experimentaciones.

Tabla 6.

Comparación de la potencia consumida entre los estándares 802.11x y radio R52Hn

Comparativa de consumos de potencia en el transmisor con radio R52Hn					
Tráfico [bps]	Consumos de potencia con UDP [W]				
	802.11a	802.11b	802.11g	802.11n-2GHz	802.11n-5GHz
512k	0,69	0,64	0,58	0,61	0,67
1M	0,73	0,73	0,60	0,63	0,74
2M	0,79	0,87	0,67	0,66	0,80
4M	0,95	1,02	0,74	0,77	0,96
6M	1,14	1,14	0,82	0,85	1,14
8M	1,28	1,14	0,89	0,92	1,28
10M	1,46	1,14	0,92	0,99	1,43
12M	1,60	1,14	0,99	1,05	1,59
16M	1,95	1,14	1,04	1,14	2,01
20M	1,98	1,14	0,99	1,22	2,19
24M	1,98	1,14	0,99	1,14	2,39
28M	1,98	1,14	0,99	1,28	2,60
32M	1,98	1,14	0,99	1,28	2,81
36M	1,98	1,14	0,99	1,28	3,03

Como se puede observar en la tabla 6, todos los valores de las mediciones son solo para el protocolo UDP con módulo de radio Wi-Fi R52Hn, el resto de datos medidos serán mostrados en el anexo *tabla de valores de corrientes medidas*. Por otro lado, para las experimentaciones con el radio DCMA-82, las comparativas entre

potencia consumida serán solamente hasta el estándar 802.11g debido a la limitación de esta.

También se pudo apreciar en la tabla de datos experimentales, que la corriente tenía el mismo valor a partir de un tráfico de 36 Mbps, es decir, que se saturaba el canal de transmisión o se tenía máximo *throughput*, dependiendo del estándar (Ver anexo tabla de valores de corrientes).

4.3 Análisis de Resultados.

Una vez recolectados un extenso número de datos, se procedió a procesarlos y luego a analizar los resultados, los mismos que se derivan de las gráficas generadas, ordenando y correlacionando los datos obtenidos de los diferentes experimentos, es decir, las comparativas entre las diferentes escenarios a la cuales fueron sometidas las experimentaciones como son: comparativas en consumos de potencia en cada estándar inalámbricos, variando la velocidad del tráfico de datos para cada protocolo UDP/TCP tanto en el transmisor como el receptor, manteniendo un mismo tipo de radio Wi-Fi, luego se procedió a comparar el consumo de potencia disipada entre los estándares 802.11x variando la velocidad del tráfico de datos para cada protocolo UDP/TCP tanto en el transmisor como el receptor, finalmente, se procedió a comparar la potencia consumida entre diferentes marcas de radios Wi-Fi como el R52Hn y DCMA-82, variando así mismo, la velocidad del tráfico de datos para cada protocolo UDP/TCP en el transmisor y receptor.

4.3.1 Comparativas de consumo de potencia con radio Wi-Fi (R52Hn) para el estándar 802.11x

A continuación, con los datos obtenidos en las mediciones realizadas, se efectúan comparativas para cada estándar 802.11x entre la potencia consumida tanto en el transmisor como el receptor para los dos tipos de tráfico de datos cursados (UDP/TCP) por el enlace punto a punto con la finalidad de evaluar cual tráfico de datos cursado tiene un mayor consumo de potencia.

4.3.1.1 Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11a con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable

En la figura 29, se muestra la curva de potencia consumida vs velocidad del tráfico de datos, donde se compara el consumo de potencia del dispositivo transmisor frente al receptor para los protocolos UDP y TCP bajo el estándar 802.11a.

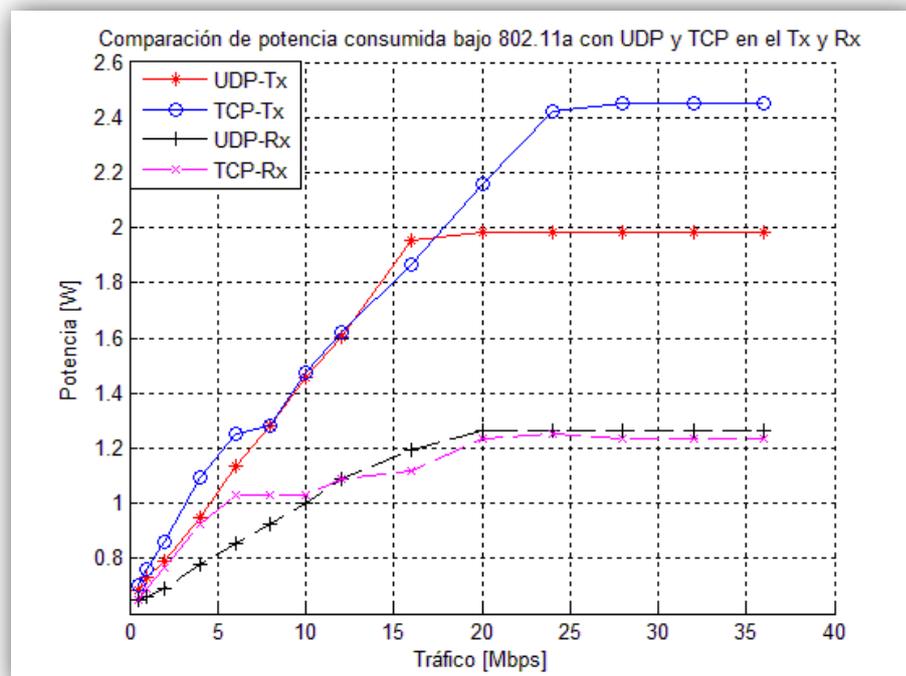


Figura 29. Comparación UDP vs TCP con 802.11a

Análisis: Como se puede apreciar en la figura 29, el consumo de potencia en el dispositivo transmisor frente al receptor difiere alrededor de 0,8 y 1,2 [W], con este dato, se confirma que los dispositivos inalámbricos transmisores gastan más energía que los receptores, por otro lado, en la figura, uniendo y extrapolando los puntos resultan líneas rectas (es decir, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del tráfico) hasta un determinado valor, luego se mantiene constante (a alcanzado su máximo throughput), esto significa que tanto en el dispositivo transmisor como en el receptor se comporta linealmente hasta un tráfico de 20 Mbps para los protocolos UDP y TCP, el comportamiento lineal, ayudará a inferir posibles resultados de consumo intermedios , por otro lado, existe un 60% más consumo de potencia en el transmisor que en el receptor para un tráfico de 20 Mbps. Finalmente, para velocidades de tráfico superiores a 24 Mbps en el transmisor, el consumo de potencia es un 23,1 % más para el protocolo TCP que UDP, mientras que en el receptor, tanto para el protocolo UDP como TCP, el consumo de potencia esta alrededor de 1.25 [W].

4.3.1.2 Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11b con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable

En la figura 30, se muestra la curva de potencia consumida vs velocidad del tráfico de datos, donde se compara el consumo de potencia del dispositivo transmisor frente al receptor para los protocolos UDP y TCP bajo el estándar 802.11b.

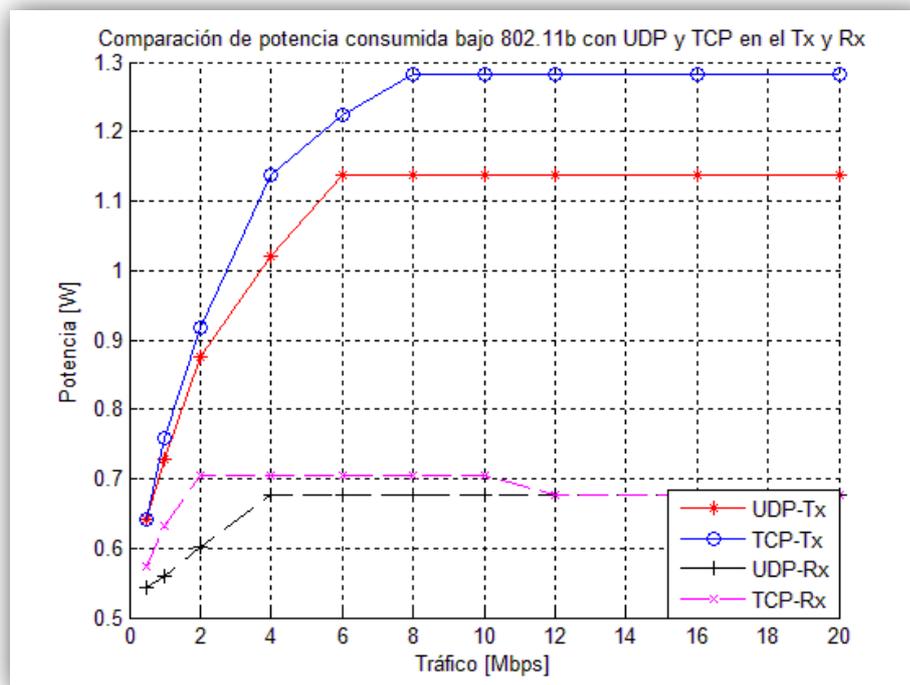


Figura 30. Comparación UDP vs TCP con 802.11b

Análisis: Como se puede apreciar en la figura 30, el consumo de potencia en el dispositivo transmisor frente al receptor difiere alrededor de 0.5 y 0,6 [W], con este dato, se confirma que los dispositivos inalámbricos transmisores gastan más energía que los receptores, por otro lado, en la figura, uniendo y extrapolando los puntos resultan líneas rectas (es decir, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del tráfico) hasta un determinado valor, luego se mantiene constante (al alcanzado su máximo throughput), esto significa que tanto en el dispositivo transmisor como en el receptor se comporta linealmente hasta un tráfico de 6 Mbps para los protocolos UDP y TCP, por otro lado, el comportamiento lineal ayudará a inferir posibles resultados de consumo intermedios, así mismo, existe un 74% más de consumo de potencia en el transmisor que en el receptor para un tráfico de 6 Mbps. Finalmente, para velocidades de tráfico superiores a 8 Mbps en el transmisor, el

consumo de potencia es un 12.3 % mas para TCP que UDP, mientras que en el receptor, tanto para el protocolo UDP como TCP, el consumo de potencia esta alrededor de 0.68 [W].

4.3.1.3 Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11g con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable

En la figura 31, se muestra la curva de potencia consumida vs velocidad del tráfico de datos, donde se compara el consumo de potencia del dispositivo transmisor frente al receptor para los protocolos UDP y TCP bajo el estándar 802.11g.

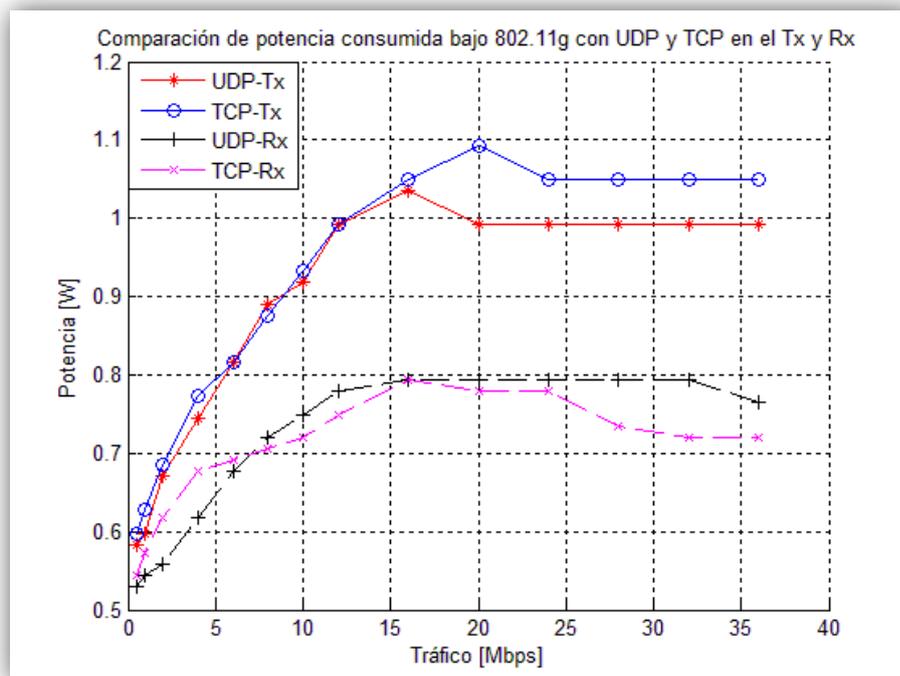


Figura 31. Comparación UDP vs TCP con 802.11g

Análisis: Como se puede apreciar en la figura 31, el consumo de potencia en el dispositivo transmisor frente al receptor difiere alrededor de 0.25 y 0,35 [W], con este dato, se confirma que los dispositivos inalámbricos transmisores gastan más energía que los receptores, por otro lado, en la figura, uniendo y extrapolando los

puntos resultan líneas rectas (es decir, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del tráfico) hasta un determinado valor, luego se mantiene constante (a alcanzado su máximo throughput), esto significa que tanto en el dispositivo transmisor como en el receptor se comporta linealmente hasta un tráfico de 16 Mbps para los protocolos UDP y TCP, por otro lado, el comportamiento lineal ayudará a inferir posibles resultados de consumo intermedios, así mismo, existe un 31% más de consumo de potencia en el dispositivo transmisor que en el receptor para un tráfico de 16 Mbps. Finalmente, para velocidades de tráfico superiores a 20 Mbps en el transmisor, el consumo de potencia es un 6,1 % más para TCP que UDP, mientras que en el receptor, tanto para el protocolo UDP como TCP, el consumo de potencia está alrededor de 0.78 [W].

4.3.1.4 Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11n a 2.4 GHz con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable

En la figura 32, se muestra la curva de potencia consumida vs velocidad del tráfico de datos, donde se compara el consumo de potencia del dispositivo transmisor frente al receptor para los protocolos UDP y TCP bajo el estándar 802.11n a 2.4 GHz.

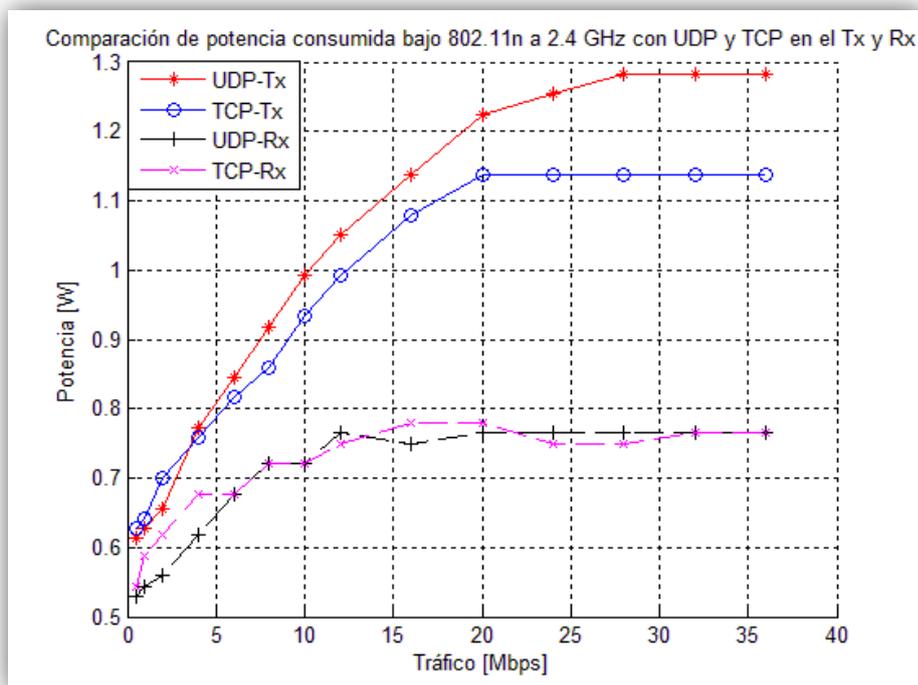


Figura 32. Comparación UDP vs TCP con 802.11n a 2.4 GHz

Análisis: Como se puede apreciar en la figura 32, el consumo de potencia en el dispositivo transmisor frente al receptor difiere alrededor de 0.5 y 0,6 [W], con este dato, se confirma que los dispositivos inalámbricos transmisores gastan más energía que los receptores, por otro lado, en la figura, uniendo y extrapolando los puntos resultan líneas rectas (es decir, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del tráfico) hasta un determinado valor, luego se mantiene constante (a alcanzado su máximo throughput), esto significa que tanto en el dispositivo transmisor como en el receptor se comporta linealmente hasta un tráfico de 20 Mbps para los protocolos UDP y TCP, por otro lado, el comportamiento lineal ayudará a inferir posibles resultados de consumo intermedios, así mismo, existe un 51.3% más de consumo de potencia en el transmisor que en el receptor para un tráfico de 20 Mbps. Finalmente, para velocidades de tráfico superiores a 24 Mbps en el transmisor,

el consumo de potencia es un 14.2 % mas para TCP que UDP, mientras que en el receptor, tanto para el protocolo UDP como TCP, el consumo de potencia esta alrededor de 0.72 [W].

4.3.1.5 Comparativa del consumo de potencia para el estándar 802.11n a 5 GHz con protocolo UDP y TCP a velocidades de tráfico variable

En la figura 33, se muestra la curva de potencia consumida vs velocidad del tráfico de datos, donde se compara el consumo de potencia del dispositivo transmisor frente al receptor para los protocolos UDP y TCP bajo el estándar 802.11n a 5 GHz.

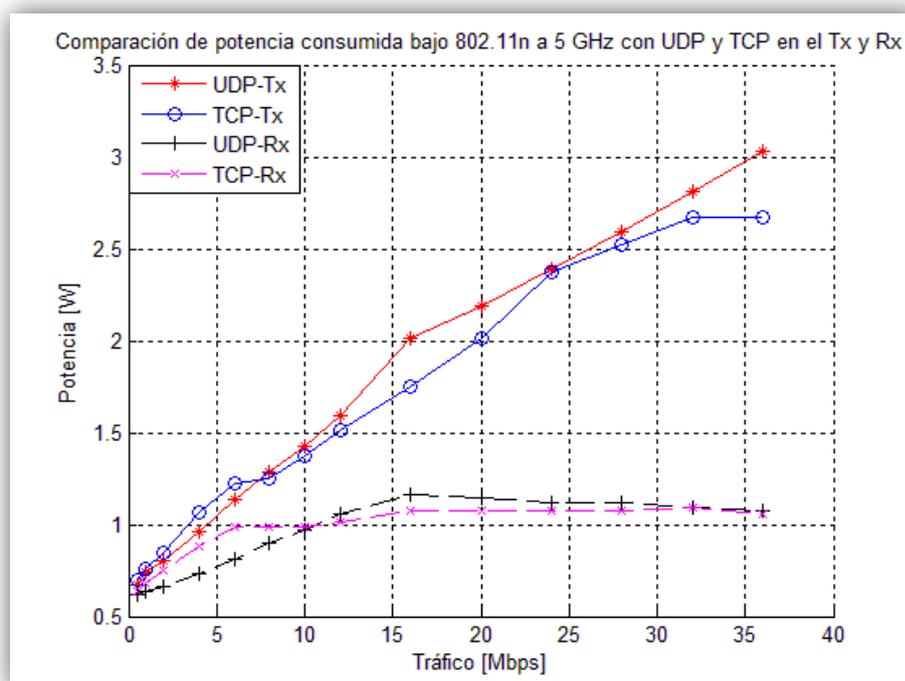


Figura 33. Comparación UDP vs TCP con 802.11n a 5 GHz

Análisis: Como se puede apreciar en la figura 33, el consumo de potencia en el dispositivo transmisor frente al receptor difiere alrededor de 1.75 y 1.85 [W], con este dato, se confirma que los dispositivos inalámbricos transmisores gastan más energía que los receptores, por otro lado, en la figura, uniendo y extrapolando los

puntos resultan líneas rectas (es decir, el consumo de potencia es directamente proporcional a la velocidad del tráfico) hasta un determinado valor, luego se mantiene constante (a alcanzado su máximo throughput), esto significa que tanto en el dispositivo transmisor como en el receptor se comporta linealmente hasta un tráfico de 24 Mbps para los protocolos UDP y TCP, por otro lado, el comportamiento lineal ayudará a inferir posibles resultados de consumo intermedios, así mismo, existe un 98% mas de consumo de potencia en el transmisor que en el receptor para un tráfico de 24 Mbps. Finalmente, para velocidades de tráfico superiores a 36 Mbps en el transmisor, el consumo de potencia es un 10,3 % mas para TCP que UDP, mientras que en el receptor, tanto para el protocolo UDP como TCP, el consumo de potencia esta alrededor de 1.15 [W].

En la tabla 7, se muestra el resumen de los resultados obtenidos de las diferentes comparativas realizadas para el modulo de radio R52Hn.

Tabla 7.

Resumen de los resultados arrojados en las comparativas

RESUMEN DE LAS COMPARATIVAS						
Estándar	Consumos de potencia para TCP en el Tx cuando están saturados en [W]	Consumos de potencia para UDP en el Tx cuando están saturados en [W]	Consumos de potencia para UDP/TCP en el Rx cuando están saturados en [W]	Diferencia de potencia entre UDP y TCP en el Tx en saturación en [%]	Consumo de potencia del Tx vs Rx para TCP en saturación en [%]	Consumo de potencia del Tx vs Rx para UDP en saturación en [%]
802.11a	2,45	1,99	1,25	23,1	96,0	59,2
802.11b	1,28	1,14	0,68	12,3	88,2	67,6
802.11g	1,05	0,99	0,78	6,1	34,6	26,9
802.11n/ 2 GHz	1,29	1,13	0,77	14,2	67,5	46,8
802.11n/ 5 GHz	2,7	3,01	1,15	10,3	134,8	161,7

De acuerdo a la tabla 7, en las figuras 34 a 37, se exponen de manera gráfica las principales comparativas. Así, en la figura 34, se muestra la comparación del consumo de potencia entre estándares 802.11x en el receptor, cabe mencionar en esta figura, que las potencias observadas para cada estandar, son las mismas tanto para trafico UDP como TCP al saturarse el canal como se observaron en las figuras 29 al 33, donde la diferencia entre los dos protocolos es menor al 1%.

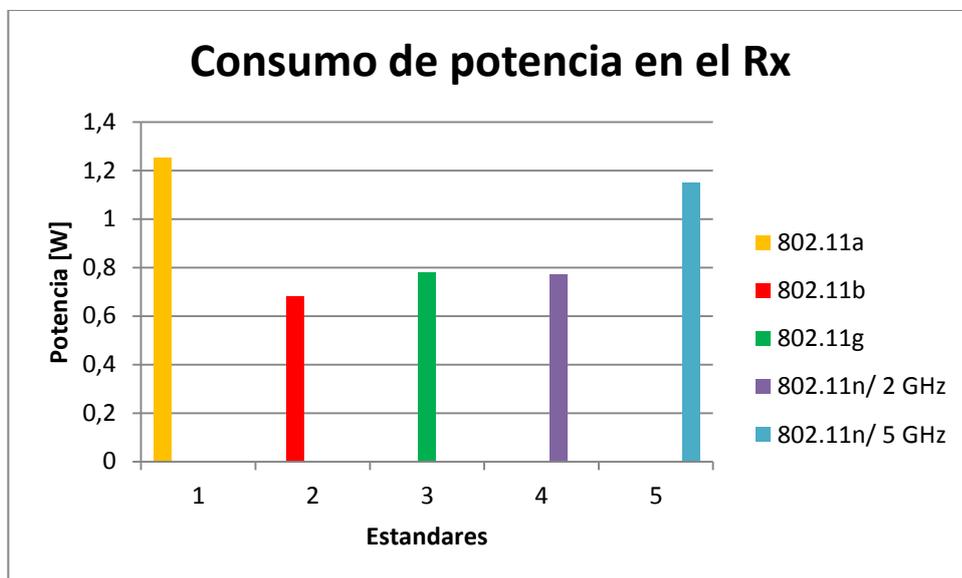


Figura 34. Comparativa de consumo de potencia en el receptor en función de estándares Wi-Fi

En cambio en el transmisor, la potencia consumida al saturarse el canal varía entre los protocolos UDP y TCP, y obviamente existe diferenciación en el consumo entre estándares como se puede observar en la figura 35 y 36.

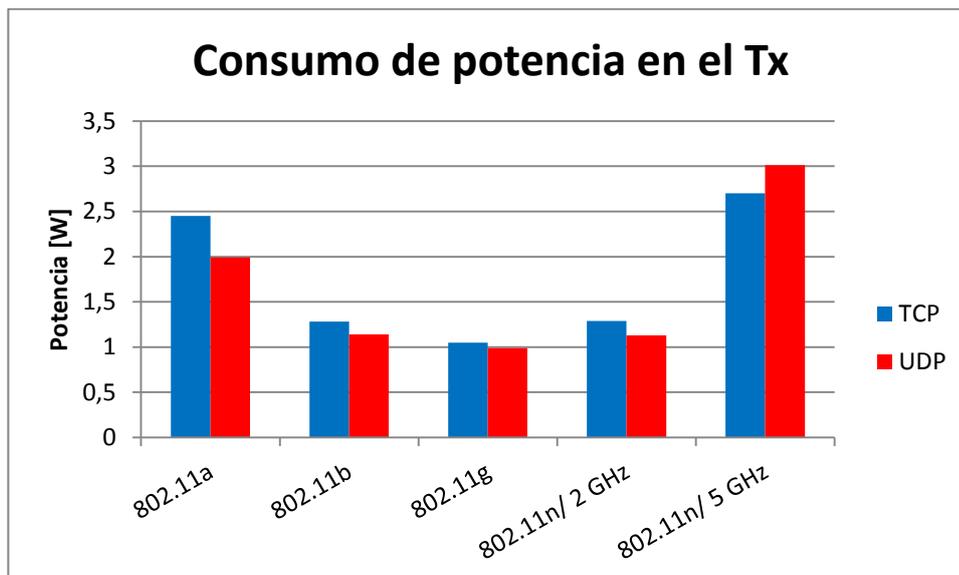


Figura 35. Comparativa de consumo de potencia de transmisor en función de estándares y protocolos

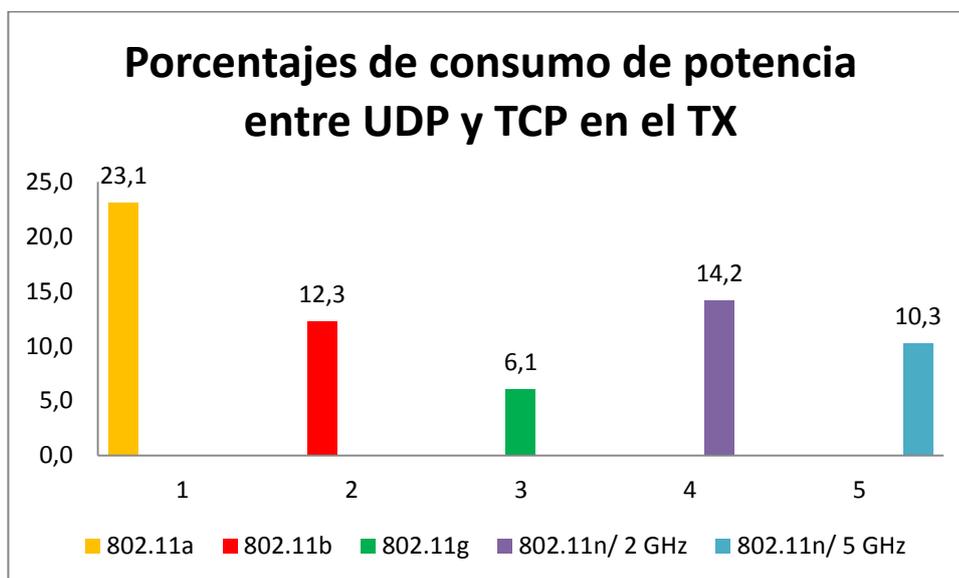


Figura 36. Diferencia en el consumo de potencia en porcentajes entre UDP y TCP

En la figura 37, se muestra en porcentajes la diferencia en consumos de potencia que existe entre el transmisor y el receptor en función de los estándares 802.11x y tipo de protocolo transmitido, por ejemplo, para el estándar 802.11n a 2,4 GHz el

consumo del transmisor es 62,5% más que el receptor con TCP y el consumo del transmisor es 46,8% más que el receptor con UDP.

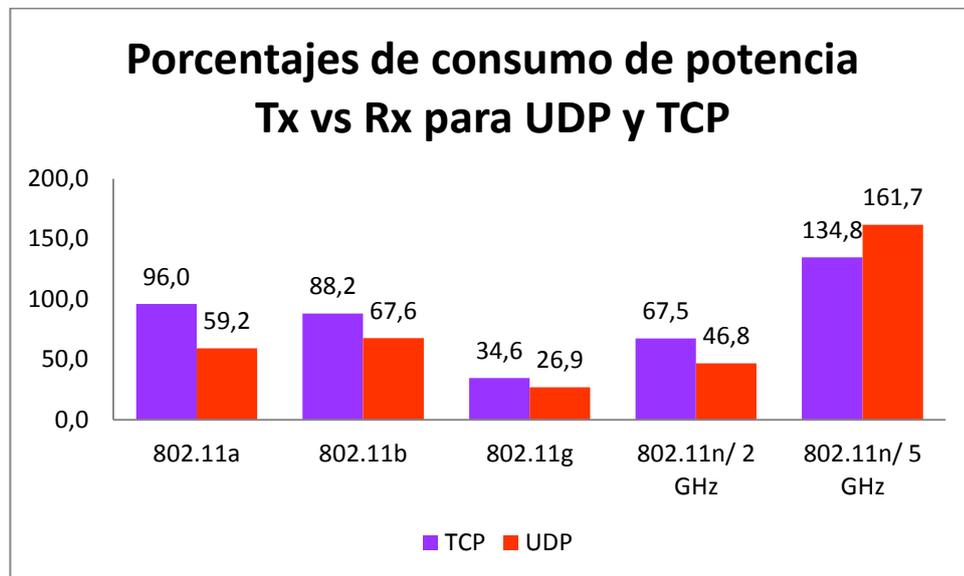


Figura 37. Porcentaje de consumo de potencia de Tx frente a Rx

4.3.2 Comparativas de consumo de potencia entre diferentes radios Wi-Fi (R52Hn y DCMA-82)

En las figuras 38 al 41, se muestran las potencias consumidas vs la velocidad del tráfico de datos para protocolos UDP y TCP tanto en el radio transmisor como en el receptor para comparar las potencias consumidas en cada estándar 802.11x para los dos tipos de radios Wi-Fi, la finalidad de este experimento, es mostrar si existe o no diferencia en el consumo de potencia para marcas distintas de radios.

4.3.2.1 Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo UDP en el transmisor

En la figura 38, se muestra la comparativa de potencia de consumo entre el radio R52Hn de Mikrotik y DCMA-82 de Wistron para el protocolo UDP en el radio transmisor.

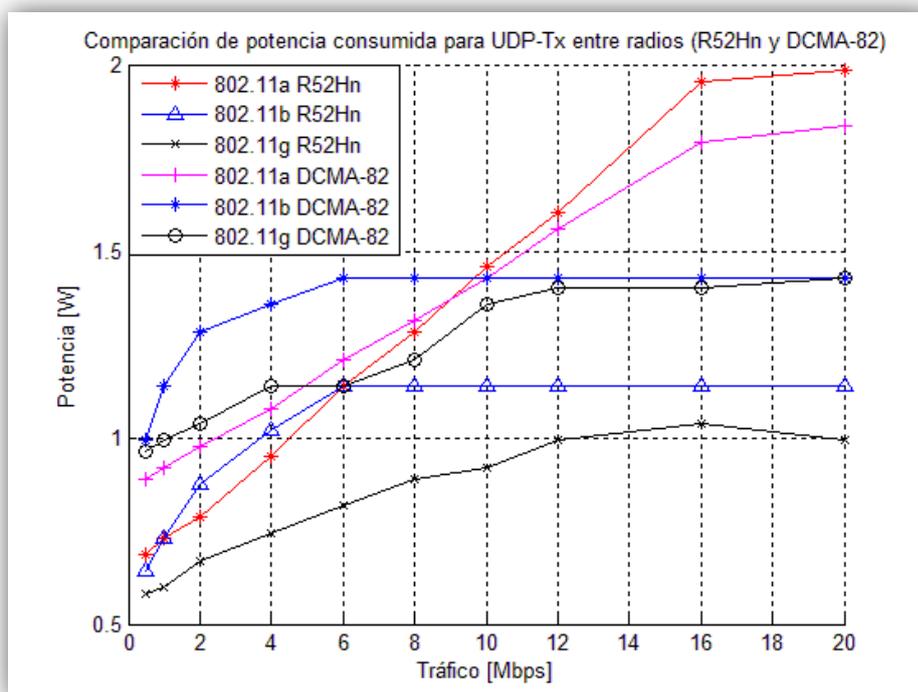


Figura 38. Consumo de potencia entre radios para UDP en el transmisor

Análisis: En la figura 38, se puede observar que existe una diferencia inicial en el consumo de potencia de 0.35 a 0.40 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 58% mayor al R52Hn. En el estándar 802.11b, cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.28 [W] a 6 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 25% mayor al R52Hn. Para el estándar 802.11g cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.4 [W] a 12 Mbps, es decir, el consumo de potencia del

DCMA-82 es un 40% mayor al R52Hn. Finalmente, para el estándar 802.11a, ocurre lo contrario, al saturarse el canal, termina consumiendo el radio R52Hn 0.15 [W], es decir, un 10% más que el DCMA-82 para tráfico mayor a 20 Mbps. Así mismo, para este estándar, se puede observar que consume igual potencia a 1.36 [W] para un tráfico de 9 Mbps.

4.3.2.2 Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo TCP en el transmisor

En la figura 39, se muestra la comparativa de potencia de consumo entre el radio R52Hn de Mikrotik y DCMA-82 de Wistron para el protocolo TCP en el radio transmisor.

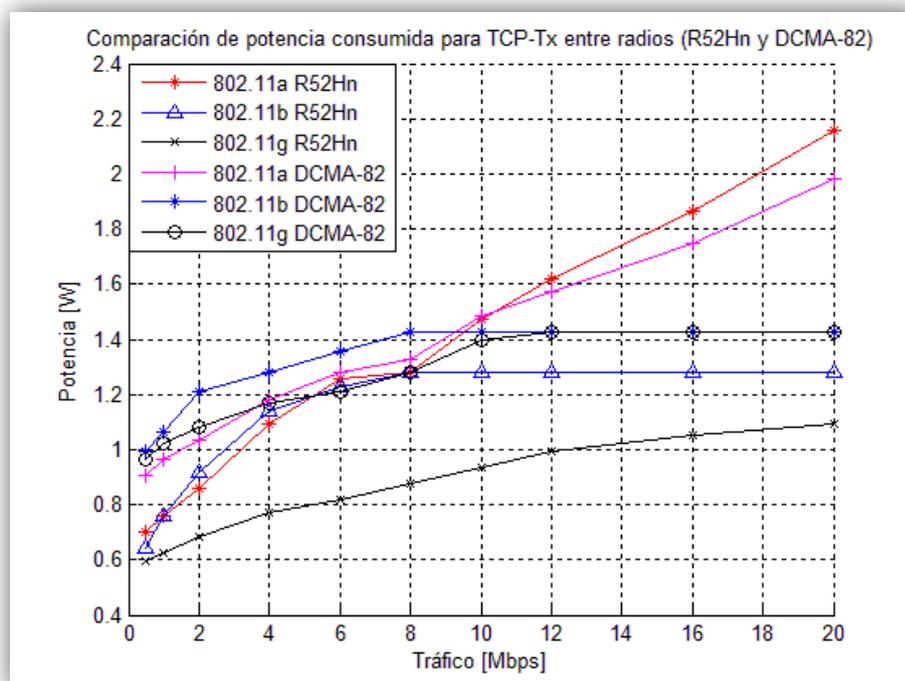


Figura 39. Consumo de potencias entre radios para TCP en el transmisor

Análisis: En la figura 39, se puede observar que existe una diferencia inicial en el consumo de potencia de 0.33 a 0.36 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 55% mayor al R52Hn. En el estándar 802.11b cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.14 [W] a 8 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 11% mayor al R52Hn. Para el estándar 802.11g cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.27 [W] a 20 Mbps, es decir, el consumo de potencia del DCMA-82 es un 23% mayor al R52Hn. Finalmente, para el estándar 802.11a, ocurre lo contrario, al saturarse el canal, termina consumiendo el radio R52Hn 0.18 [W], es decir, un 9% más que el DCMA-82 para tráfico mayor a 20 Mbps. Así mismo, para este estándar se puede observar que consume igual potencia a 1.46 [W] para un tráfico de 10 Mbps.

4.3.2.3 Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo UDP en el receptor

En la figura 40, se muestra la comparativa de potencia de consumo entre el radio R52Hn de Mikrotik y DCMA-82 de Wistron para el protocolo UDP en el radio receptor.

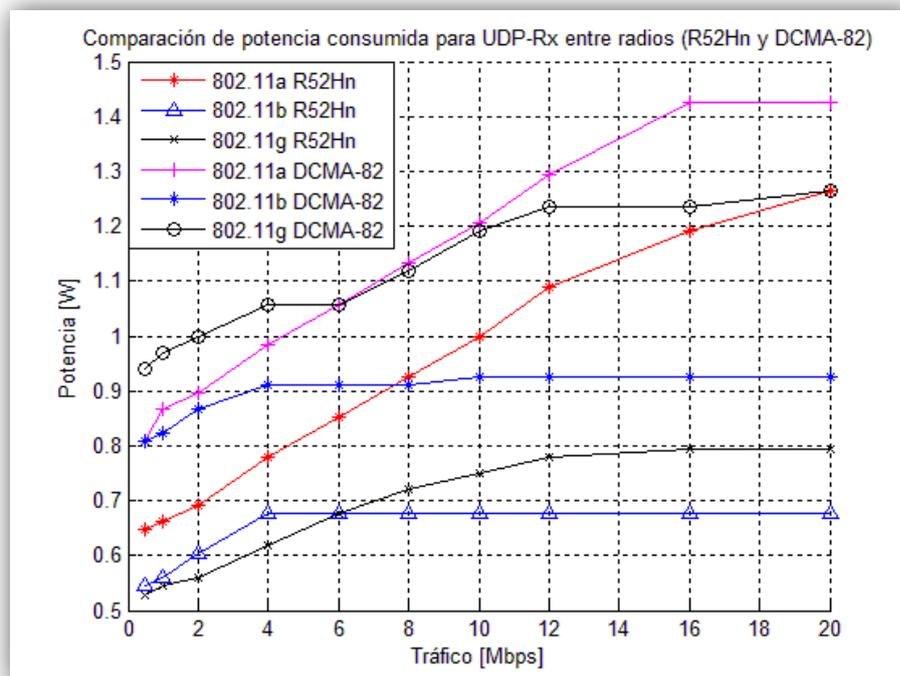


Figura 40. Consumo de potencias entre radios para UDP en el receptor

Análisis: En la figura 40, se puede observar que existe una diferencia inicial en el consumo de potencia para cada estándar, así, para el 802.11a es de 0.17 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 27% mayor al R52Hn. Para el 802.11b es de 0.27 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 50% mayor al R52Hn. Para el 802.11g es de 0.4 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 74% mayor al R52Hn. Por otro lado, en el estándar 802.11b cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.24 [W] a 4 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 35% mayor al R52Hn. Para el estándar 802.11g cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.48 [W] a 12 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 60% mayor al R52Hn. Finalmente, para el estándar 802.11a, existe un crecimiento sostenido y paralelo con una diferencia de

0.2 [W] antes que se saturen, consumiendo el radio DCMA-82 0.15 [W], es decir, un 18% más que el R52Hn. Así mismo, al unir los puntos, se puede observar que las pendientes en todos los estándares 802.11x son paralelos entre sí.

4.3.2.4 Comparativa de consumo de potencia entre dos radios Wi-Fi para cada estándar 802.11x con protocolo TCP en el receptor

En la figura 41, se muestra la comparativa de potencia de consumo entre el radio R52Hn de Mikrotik y DCMA-82 de Wistron para el protocolo TCP en el radio receptor.

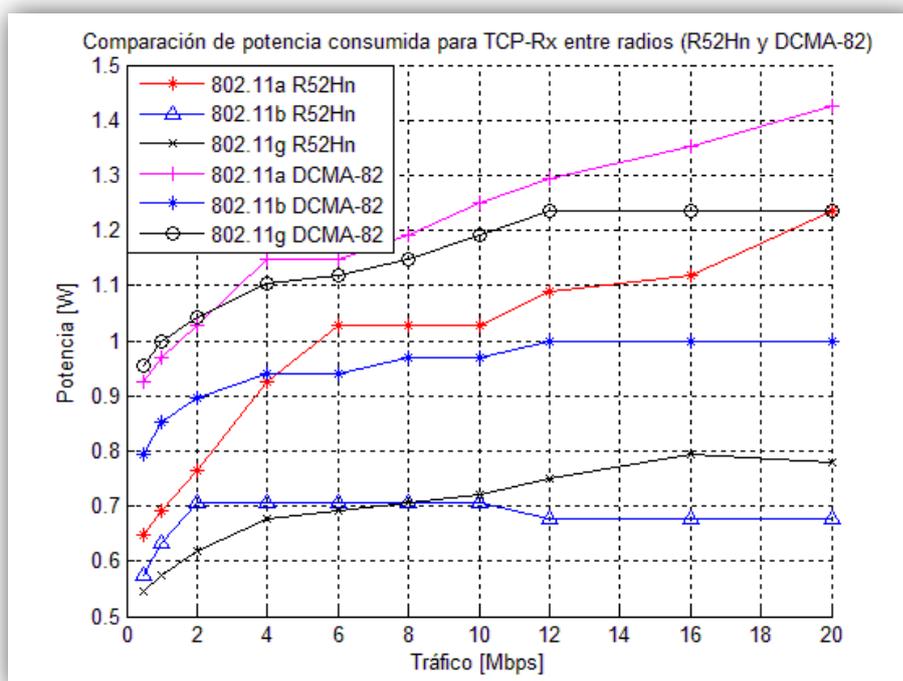


Figura 41. Consumo de potencias entre radios para TCP en el receptor

Análisis: En la figura 41, se puede observar que existe una diferencia inicial en el consumo de potencia para cada estándar, así, para el 802.11a es de 0.27 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 42% mayor al R52Hn. Para el 802.11b es de 0.22 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un

38% mayor al R52Hn. Para el 802.11g es de 0.4 [W], es decir, que el consumo de potencia del DCMA-82 es un 74% mayor al R52Hn. Por otro lado, en el estándar 802.11b cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.24 [W] a 4 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 35% mayor al R52Hn. Para el estándar 802.11g cuando se satura el canal existe una diferencia entre potencias de consumo de 0.46 [W] a 12 Mbps, en otras palabras el consumo de potencia del DCMA-82 es un 59% mayor al R52Hn. Finalmente, para el estándar 802.11a, existe un crecimiento sostenido y paralelo con una diferencia de 0.2 [W] antes que se saturen, consumiendo el radio DCMA-82 0.15 [W], es decir, un 18% más que el R52Hn. Así mismo, al unir los puntos, se puede observar que las pendientes en todos los estándares 802.11x son paralelos entre sí.

4.4 Propuesta de soluciones al problema de consumo energético en las Wi-Fi.

De acuerdo a los datos procesados, analizados y cuantificados, el consumo de potencia en radios Wi-Fi es hasta el doble para estándares 802.11a y 802.11n a 5GHz, este último está siendo utilizado actualmente los radios Wi-Fi por su velocidad de transmisión de datos, es decir, que a mayor velocidad se tendrá mayor consumo de energía ante lo cual los dispositivos actuales ya vienen dotados con un sistema que controla el hardware de los radios Wi-Fi denominada PSM o modo de ahorro de energía en estas redes, la desventaja es que se disminuye la cobertura y los dispositivos se vuelven susceptibles a ruidos y hasta podría causar interferencia con otros dispositivos inalámbricos. También pueden realizarse algoritmos para el PSM, los mismos que ayuden a optimizar el ahorro de energía sin perder ni disminuir la cobertura, esto es utilizando por ejemplo el control en un proxy para PSM estático y

dinámico de esta manera se ganaría un buen porcentaje de optimización de energía en las redes con Wi-Fi.

En la actualidad, una interesante y hasta obligatoria propuesta es concientizar a usuarios que utilizan redes inalámbricas como Wi-Fi a apagar los módulos de radio inalámbrico cuando no los estén utilizando, esto reducirá considerablemente el consumo de energía y para el caso de equipos portátiles aumentará la utilidad de sus baterías, a la vez que, se ayudará a los puntos de acceso (AP) a consumir menos energía y por ende se contribuye significativamente al ahorro global de energía para tratar de cambiar las tendencias en cuanto al consumo mundial de energía para las futuras generaciones.

CAPITULO 5

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

5.1 Conclusiones

- Se constató que existe una marcada diferencia de consumos de potencia en dispositivos Wi-Fi transmisores frente a los receptores, así, la máxima diferencia se da en el estándar 802.11n a 5 Ghz con un 135% para TCP y 162% para UDP y por debajo el 802.11g con un 35% para TCP y 27% para UDP, teniendo un promedio de consumo entre los cuatro estándares de 84% para TCP y 72% para UDP. Lo cual deja ver claramente que se gasta más energía en los dispositivos transmisores como los AP's y los que estén cumpliendo el papel de transmisores. En las experimentaciones solamente se utilizó un cliente conectado al AP, por tanto, es fácil deducir que si se conectan varios clientes a un punto de acceso, el consumo en este aumentará proporcionalmente, obviamente no todos los clientes tendrán consumos similares (dependerán del tipo de tráfico y su velocidad de transferencia).
- Cuando se tiene máximo throughput o canal saturado, el consumo de potencia con en los radios transmisores Wi-Fi es mayor cuando se transmite tráfico TCP frente al UDP, mientras que en los radios receptores Wi-Fi su diferencia porcentual es menor que el 1% entre tráfico UDP y TCP, esta regla se observó para experimentaciones en todos los estándares 802.11x. En general, se comprobó que el consumo de potencia en los dispositivos receptores Wi-Fi es el mismo

independientemente de la marca de radio que se utilice, para cualquier tipo de tráfico.

- Actualmente, la mayoría de dispositivos con módulos Wi-Fi están tendiendo a utilizar el estándar 802.11n y el avanzado debido a que se necesita transmitir los datos más rápidamente, pero eso implica que de acuerdo a las pruebas analizadas, se necesite más energía que el resto de estándares inalámbricos.
- Se constató efectivamente que existe mayor consumo de energía cuando se transmite tráfico TCP frente a UDP debido a que el protocolo TCP posee o incorpora más bits en su trama para conexión segura y con confirmaciones frente al protocolo UDP que tiene una trama más simple.

5.2 Trabajo futuro

Para la presente investigación, se realizaron experimentaciones con dispositivos Wi-Fi para conocer su consumo energético, pero existen otros dispositivos inalámbricos y móviles, por tanto, a futuro se podrían realizar investigaciones sobre algoritmos apropiados que puedan aumentar la eficiencia en el gasto de energía, reduciendo así el consumo. Por ejemplo, se podría investigar sobre el consumo de energía e impacto ambiental en redes móviles con tecnologías 3G/4G/LTE.

6 REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Avallone , S., & Pescape, A. (11 de Agosto de 2011). *Distributed Internet Traffic Generator*. Obtenido de <http://www.grid.unina.it/software/ITG/>
- Butler, J., & Pietrosemoli, E. (2013). *Wireless Networking in the Developing World*. Creative Commons Attribution.
- Drafts, B. (1 de Abril de 2004). *Methods of current measurements*. Obtenido de http://fwbell.com/ckfinder/userfiles/files/Methods_Current_Measurement.pdf
- EIA. (01 de abril de 2011). *Anual Energy*. Obtenido de http://www.columbia.edu/cu/alliance/documents/EDF/Wednesday/Heal_material.pdf
- Energy Information Administration. (19 de 09 de 2011). *World energy demand and economic outlook*. Obtenido de [http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2011\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2011).pdf)
- Hirales, A., & Martines, E. (03 de Marzo de 2008). *Conservación de energía en medios inalámbricos*. Obtenido de <http://www.eveliux.com/mx/conservacion-de-energia-en-medios-inalambricos.php>
- Jadhav, S. (2010). *Accounting of energy consumption from Wi-Fi interface in portable devices*. Wichita.
- Lee, J.-S., Su, Y.-W., & Sen, C.-C. (2007). *A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi*. Taipei.
- Little, M. (8 de Julio de 2011). *DC Current Measurement*. Obtenido de <http://www.re-innovation.co.uk/web12/index.php/en/information/dc-current-measurement>
- Mikrotik. (23 de enero de 2011). *Routerboard411*. Obtenido de <http://routerboard.com/pdf/292/rb411ahbrochure.pdf>
- Mikrotik. (23 de enero de 2011). *Routerboard433*. Obtenido de <http://routerboard.com/pdf/367/rb433UAH.pdf>
- Mikrotik. (12 de septiembre de 2013). *R52Hn*. Obtenido de http://www.Wi-iextreme.com.au/index.php?main_page=product_info&cPath=3_9&products_id=53
- Mikrotik. (01 de Junio de 2013). *Routers and Wireless, Mikrotik Corp*. Obtenido de <http://www.mikrotik.com/software.html#>
- Muhammad, R. (2004). *Electronica de Potencia*. Mexico: Prentice Hall.
- Netgate. (24 de octubre de 2013). *Alix2D13*. Obtenido de <http://store.netgate.com/ALIX2D13-P40C85.aspx>
- Netgate. (24 de octubre de 2013). *Alix3D3*. Obtenido de <http://store.netgate.com/ALIX3D3-P45C85.aspx>
- Netgate. (24 de octubre de 2013). *GW2345*. Obtenido de <http://store.netgate.com/GW2345-Avila-Network-Board-P146C85.aspx>
- Pietrosemoli, L. (2008). *REdes inalámbricas en los países en desarrollo*. USA: Hacker Friendly.
- Punkytse. (20 de Junio de 2013). *Voyage Design and Consultants*. Obtenido de About Voyage Linux: <http://www.linux.voyage.hk/>
- Wistron. (13 de marzo de 2013). *DCMA-82*. Obtenido de <http://www.titanwirelessonline.com/Wistron-DCMA-82-SuperAG-400mW-108Mb-p/mp-dcma-82.htm>

- Yarborough, B. (6 de Junio de 2012). *Components and Methods for Current Measurement*. Obtenido de <http://powerelectronics.com/power-electronics-systems/components-and-methods-current-measurement>
- Zhang, X., & Kang, G, S. (2012). E-MiLi: Energy-Minimizing Idle Listening in Wireless Networks. *IEEE*, 14.