



UNIVERSIDAD DE
LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

Programa de Doctorado en Empresa, Internet y
Tecnologías de las Comunicaciones

TESIS DOCTORAL

Contribuciones al ahorro de energía en puntos de acceso
WiFi

JUAN PABLO GARCÍA BAQUERIZO

Las Palmas de Gran Canaria, a 19 de junio de 2020
Contribuciones al ahorro de energía en puntos de acceso WiFi

Dedicatoria

A Dios, que me guía y me fortalece

A mi esposa María Elena por su apoyo y dedicación constante

A mi hijo Juan Pablo

A mis padres, siempre en mi corazón

A mi hermana Rossi

Agradecimientos

Mi agradecimiento a los maestros que me instruyeron en las ciencias en las diferentes etapas de mi vida y que también dedicaron su tiempo a orientarme.

A mis directores y amigos, Álvaro Suárez y Elsa Macías, por sus importantes consejos, por su guía y orientación en el desarrollo de la tesis.

A los compañeros y maestros que colaboraron en algunas de las etapas de investigación

Al profesor Enrique Salcedo Arce, por despertar mi interés en la física, en la ciencia y en la cátedra.

A mi familia, por su apoyo y sacrificio.

Resumen

La mayoría de los estudios actuales se basan en el ahorro de energía en: los equipos terminales (usuarios) Wireless Fidelity, en el desarrollo de algoritmos o actualizaciones de los estándares y no en los puntos de acceso. Por eso, nosotros nos centramos en desarrollar un circuito electrónico que consiga ahorrar energía durante la operación de un punto de acceso Wireless Fidelity estándar. En esta tesis hemos demostrado que se puede reducir la energía consumida por tal punto de acceso.

Para demostrarlo construimos un circuito electrónico que adaptamos a un punto de acceso realizando pruebas de operación con y sin transmisión de datos. El circuito funciona en intervalos de tiempo diferenciados, en uno de los cuales no empleamos la fuente de energía propia del punto de acceso para alimentarlo. Cada uno de los elementos empleados en el circuito fue probado detenidamente en varios experimentos antes de integrarse en un todo. También desarrollamos un par de ecuaciones, una para analizar las variables y condiciones que permiten el ahorro de energía y otra para calcular el posible consumo de potencia según la cantidad de datos transmitidos.

Los resultados demuestran que se obtiene un ahorro de energía al emplear nuestro circuito electrónico y cuyo uso proyectado en el tiempo puede ahorrar algunos cientos de Watts por punto de acceso, lo que apoya un ahorro energético en entidades gubernamentales que emplean grandes cantidades de puntos de acceso en su red. El funcionamiento del circuito no disminuye la calidad del servicio de la red. Se concluye que la energía consumida por la red de comunicación de una entidad gubernamental es considerable y que el desarrollo de investigaciones para conseguir su reducción es importante y se debería reforzar en los próximos años.

Finalmente se plantean aportes y posibles trabajos futuros que se podrían realizar en relación a nuestro circuito, a su mejora y a la aplicación de energías emergentes.

Índice de contenidos

Resumen	i
Índice de contenidos.....	iii
Índice de figuras	v
Índice de tablas.....	vii
Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1 Antecedentes.....	2
1.2 Motivación	5
1.3 Objetivos	6
1.4 Estado del arte.....	7
1.4.1 Energy harvesting.....	8
1.4.2 Reducción de consumo energético en redes inalámbricas.....	12
1.4.3 Métodos de reducción del consumo de energía en WSN susceptibles de ser usados en redes WiFi	15
1.4.4 Reducción del consumo de energía en redes WiFi	21
1.5 Contribuciones y aportaciones.....	26
1.6 Estructura de la memoria.....	28
Capítulo 2. Ahorro de energía en puntos de acceso de redes WiFi.....	31
2.1 Discusión sobre posibles fuentes de energía para puntos de acceso WiFi	32
2.1.1 Aprovechamiento de energía de ondas electromagnéticas.....	32
2.1.2 Fuente de energía solar	41
2.1.3 Fuente de energía mediante Power over Ethernet.....	44
2.2 Discusión sobre algunos métodos de ahorro de energía existentes	47
2.3 Análisis de la potencia consumida en los PA WiFi de redes densas	55
2.3.1 Potencia consumida en redes de VoIP y en video llamadas	55
2.3.2 Potencia consumida en PA de redes WiFi hospitalarias	61
2.4 Valores de operación de los PA WiFi	70
Capítulo 3. Método de ahorro de energía para Puntos de Acceso WiFi.....	75
3.1 Introducción	76
3.2 Principios de diseño	77
3.2.1 Formulación, parámetros de operación y optimización matemática.....	81
3.2.2 Modelado de la optimización de las ecuaciones de operación	84
3.3 Modos de operación del circuito según el tipo de transmisión	86
3.3.1 Análisis del funcionamiento en modo reposo	87
3.3.2 Análisis del funcionamiento con tráfico estandarizado	88
Capítulo 4. Resultados experimentales	91
4.1 Pruebas iniciales de operación del PA y selección de batería.....	92

4.2 Análisis de resultados en modo reposo	99
4.3 Análisis de resultados en modo activo	107
4.4 Discusión de resultados	114
Capítulo 5. Conclusiones	117
5.1 Conclusiones finales.....	118
5.2 Líneas de investigación abiertas.....	119
Bibliografía	121
Glosario	138
Anexo. Esquemas del Hospital Vernaza.....	142

Índice de figuras

Figura 2.1: Modelo de Oscilador Colpitts.....	34
Figura 2.2: Tabla de Verdad para variables de alimentación de la antena	35
Figura 2.3: Mapas de Karnaugh y ecuaciones.....	36
Figura 2.4: Diseño lógico del circuito de alimentación	36
Figura 2.5: Corriente inducida por un campo magnético	39
Figura 2.6: Circuito detector de llamadas implantado en protoboard	39
Figura 2.7: Circuito detector de llamadas.....	40
Figura 2.8: Funcionamiento de circuito detector de llamadas: a) encendido del led para detectar llamadas al teléfono móvil, b) uso de una antena monopolo con la que se detectaba el paso de una mano cercana.	40
Figura 2.9: Componentes básicos para la alimentación solar del PA.....	43
Figura 2.10: Método A de conexión PoE.....	45
Figura 2.11: Conexión PoE (PSE a PD)	46
Figura 2.12: Fases de alimentación PoE.....	47
Figura 2.13: Equipos del Sistema de VoIP de Brenntag	55
Figura 2.14: Corriente consumida en la red de VoIP	56
Figura 2.15: Medición de corriente en barras de alimentación principales	57
Figura 2.16: Valores de corriente y voltaje medidos	58
Figura 2.17: Prueba de video llamada	58
Figura 2.18: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en el INC.....	62
Figura 2.19: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en el Hospital Vernaza.....	66
Figura 2.20: Paquetes/s durante la transmisión de 12 videos en tiempo real	71
Figura 2.21: Kbps de transmisión en la Red del Hospital en horario de la madrugada	72
Figura 2.22: Kbps de transmisión en la Red del Hospital en horario laborable	73
Figura 3.1: Circuito de alimentación PoE de un PA.....	79
Figura 3.2: (a) Esquema gráfico del PA WiFi y los componentes principales de nuestro nuevo mecanismo para el ahorro de energía. (b) Modelo de procesamiento: períodos de carga y descarga alternados.....	80
Figura 3.3: Modelo formal durante el proceso de Carga	82
Figura 3.4: Modelo formal durante el proceso de descarga.....	84
Figura 4.1: Prueba de funcionamiento del PA con batería de 3,85 V.	93
Figura 4.2: Prueba de funcionamiento del PA con batería de 3 celdas.	93
Figura 4.3: Volumen de datos transmitidos durante prueba de Video Call.....	94
Figura 4.4: Transmisión de datos durante prueba de batería de 12 V y 5.000 mAh.	95
Figura 4.5: <i>Badt</i> o circuito cargador.....	95
Figura 4.6: Medición del suministro de corriente y voltaje al PA solo transmitiendo balizas.	96
Figura 4.7: Medición de la corriente y el voltaje de carga de la batería aislada.....	98
Figura 4.8: Carga de corriente y voltaje de la batería con nuestro mecanismo: a) la salida PoE, b) la salida <i>Badt</i>	100

Figura 4.9: a) Evolución de V_c e I_c en el tiempo. b) Evolución del consumo de energía en el tiempo (T_c).	103
Figura 4.10: Corriente (I_d) y voltaje (V_d) durante la descarga de la batería: a) <i>OBTx-1</i> y b) <i>OBTx-2</i>	105
Figura 4.11: Evolución de V_d e I_d y del consumo de energía en el tiempo (T_d).	107
Figura 4.12: Medición del voltaje y corriente del PA con <i>VDTx</i> mientras se carga la batería.	108
Figura 4.13: Evolución de V_c e I_c en el tiempo y evolución del consumo de energía en el tiempo (T_c).	110
Figura 4.14: Evolución de V_d e I_d y del consumo de energía en el tiempo (T_d).	112
Figura 4.15: Comparación de la potencia de descarga de la batería (<i>OBTx-1</i> , <i>OBTx-2</i> y <i>VDTx</i>).....	113
Figura 4.16: valores de T_d al alcanzar el umbral de 12 V.....	114
Figura 4.17: Comparación del consumo de energía durante las pruebas.....	115
Figura 4.18: Ahorro de energía en un mes	116

Índice de tablas

Tabla 2.1: Cuadro de estándares PoE	45
Tabla 2.2: tipos de teléfonos de la red de VoIP	56
Tabla 2.3: Consumo de corriente en laptops y comparativo de consumo durante llamada por Skype vs consumo de VoIP	59
Tabla 2.4: Consumo de corriente en laptops y comparativo de consumo durante llamada por Hangout vs consumo de VoIP	60
Tabla 2.5: Potencia y Kbps medidos en los PA.....	61
Tabla 2.6: Parámetros obtenidos en el análisis de la red del INC.....	62
Tabla 2.7: Modelos de PA detectados en la red	63
Tabla 2.8: Cantidad de datos transmitidos de manera aleatoria.....	65
Tabla 2.9: Parámetros obtenidos en el análisis de la red Hospital Luis Vernaza	65
Tabla 2.10: Potencia máxima y mínima del modelo de PA Ruckus 7982.....	67
Tabla 2.11: Potencias obtenidas en el PA modelo Ruckus R500.....	67
Tabla 2.12: Potencia consumida en los dispositivos de red.....	68
Tabla 2.13: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en oficinas administrativas.....	69
Tabla 2.14: Valores medidos de la potencia consumida en un PA	71
Tabla 2.15: Kbps de transmisión en la Red del Hospital	73
Tabla 3.1: Variables del Modelo Matemático propuesto	90
Tabla 4.1: Variables de Operación del PA	96
Tabla 4.2: Valores de Voltaje y Corriente medidos durante el proceso de carga de la Batería.....	97
Tabla 4.3: Variables medidas durante el proceso de carga sin transmisión	104
Tabla 4.4: Variables medidas durante el proceso de carga con transmisión de datos.....	111

Capítulo 1. Introducción

En este capítulo, primero se presentan aspectos relacionados con las principales ideas de esta Tesis, los antecedentes, la contextualización de la misma en el ámbito del ahorro de energía en las redes inalámbricas en general y en *Wireless Fidelity (WiFi)* en particular. Después se describe la motivación, los objetivos y las contribuciones de la Tesis. Finalmente, se describe la organización global de los diferentes capítulos y apartados del presente documento.

1.1 Antecedentes

La *Tecnología de la Información y la Comunicación (TIC)* es el sistema nervioso de la Economía y la Sociedad hiperconectada [1,2,3], que previamente fue denominada con términos como: Sociedad Digital, Cibersociedad, Sociedad de la Información, Sociedad del Conocimiento... Al punto que parece claro que una red de telecomunicaciones apropiada que permita flujos de información, es un factor clave para participar en la economía global [4]. En los últimos años, la TIC que más aplicación Social ha experimentado son las de comunicación inalámbrica y móvil [4]. Y dentro de estas últimas, las redes de comunicación WiFi tienen un uso masivo en todo el Mundo [5] que actualmente compiten y complementa a la quinta generación de comunicaciones móviles (5G).

La tecnología de comunicación WiFi (implantación empresarial del estándar *International Electrical and Electronic Engineering (IEEE) 802.11* y sus distintas versiones: a, b, c, e, n, ac, ax... [6,7]) se utiliza para muchos propósitos sociales: como backbone de una *Wireless Sensor Network (WSN)*, como redes de acceso a redes inalámbricas de amplio alcance geográfico como *Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX)*, entre otras, o como redes de acceso a redes basadas en tecnologías de fibra óptica en el hogar y centros oficiales o empresariales de grandes dimensiones. Estas redes conectan a estos centros a Internet. Nosotros centramos nuestro interés en las redes WiFi de estos centros.

El tipo de tráfico predominante sobre esas redes WiFi es el multimedia [8,9,10]. En particular dos servicios multimedia se utilizan ampliamente:

- *Voz sobre IP (VoIP)* [11]: que tiene mecanismos especializados para transportar la voz sobre *Wireless Local Area Network (WLAN)* como VoWLAN [12,13], además se ha realizado una gran cantidad de trabajos de investigación para optimizar la comunicación de voz sobre WiFi [14, 15].
- *Video streaming* en tiempo real y bajo demanda (*VoD*, del inglés *Video on demand*): para los cuales también se han provisto una gran cantidad de estudios especializados en la comunicación eficiente en WiFi [10,16]. En este sentido el IEEE 802.11e definió características de *Quality of Service (QoS)* para tráfico multimedia en las redes definidas por el IEEE 802.11a/b. Estas recomendaciones posteriormente se añadieron a las versiones IEEE 802.11n, ac y ax.

Nosotros no nos centramos solamente en este tipo de tráfico: deseamos contemplar cualquier tipo de tráfico en las redes WiFi. Si bien es verdad que este tipo de tráfico es el

que más consumo de energía demanda. Esto es, los dispositivos de las redes WiFi consumen una cantidad de energía considerable cuando se comunica tráfico multimedia.

Se estima que el consumo de energía de las TIC está entre el 2 al 10% del consumo mundial de energía [17] y posiblemente para fines del 2030 se podría presentar valores de consumo de hasta 1.700 *Tera Watts por hora (TWh)* [18]. Además, son responsables del 2,5% de emisiones de monóxido de carbono en el Mundo [19] (el 0,6 % se debe a las telecomunicaciones [20]). Curiosamente hay 14 empresas relacionadas con el desarrollo tecnológico de hardware y software, las telecomunicaciones, la tecnología de la información y los negocios por Internet [21] que están entre las 30 primeras del mundo (y las 50 más rentables del Mundo) lo que explica el potencial uso de estos dispositivos en el desarrollo empresarial. El consumo de energía en las redes WiFi depende de: el consumo de los elementos de la electrónica de red, los terminales conectados y el tipo de tráfico que curse por la red. Se han llevado a cabo varias iniciativas para reducir el consumo de los distintos elementos de red en las redes WiFi. Destacamos:

- Mejora del consumo de energía en los terminales (teléfonos móviles, computadores, coordinadores de WSN...), añadiendo nuevas versiones al estándar del IEEE. La versión IEEE 802.11n introdujo mejoras y nuevos procedimientos de ahorro de energía en los terminales. El mecanismo principal de ahorro de energía se basa en un estado de baja potencia en el que la etapa de radio no puede transmitir ni recibir, pudiendo estar en uno de los dos estados de energía:
 - *Despierto*: se alimenta constantemente y puede recibir y transmitir.
 - *Dormido (sleep)*: no puede recibir ni transmitir y consume poca energía.

Un cliente inalámbrico entra en el modo *Ahorro de Energía (PS)* haciendo que la etapa de radio del terminal pueda entrar en transición entre los dos estados anteriores. Pudiendo estar en uno de los dos modos de administración de energía:

- *Activo*: el terminal está despierto todo el tiempo. El *Punto de Acceso (PA)* le transmite inmediatamente tramas WiFi.
- *PS*: el cliente se encuentra principalmente en sleep, pero también puede estar despierto para transmitir y recibir cada cierto tiempo [22]. Un terminal puede transmitir una trama al PA en cualquier momento, y el PA puede transmitirle algo de tráfico siguiendo reglas específicas. El PA almacena en memoria intermedia las

tramas elegibles destinadas al terminal que por el momento no puede comunicarle.

Posteriormente, estas mejoras se ampliaron y se mejoraron en las versiones IEEE 802.11ac (*WiFi5*) definiendo el *Power Saving Mode (PSM)* [23] y en la versión IEEE 802.11ax (*WiFi6*) se han introducido un nuevo mecanismo de ahorro de energía en el terminal que le permite negociar el *Tiempo Objetivo de Activación (TWT)* [24] para reducir su consumo de energía [25]:

- Trabajos de investigación concretos dirigidos a mejorar el ahorro de energía en terminales WiFi. Por ejemplo, en [26] los autores hacen un estudio particular en redes de acceso inalámbricas para estudiar la relación entre el tráfico y el consumo de energía para IEEE 802.11g, para desarrollar a futuro modelos de ahorro.
- La extensión de la vida útil de la batería en dispositivos móviles es un aspecto que tanto los fabricantes como los desarrolladores de aplicaciones estudian continuamente. Sus estudios se enfocan en extender la vida útil de las baterías de iones de litio (comúnmente utilizadas en dispositivos móviles), bajo la premisa de que los ciclos de carga en este tipo de baterías no alcanzan el 100% de su capacidad. Por ello en [27] los autores se proponen emplear un sistema autónomo para controlar el nivel máximo de carga de la batería de un dispositivo móvil. El sistema también recopila y analiza los datos sobre los ciclos de carga de la batería en tiempo real mediante el uso de la plataforma FIWARE de código abierto. Las pruebas preliminares permitieron: a) mantener un nivel de carga relativamente constante al encender y apagar automáticamente el enchufe inteligente, b) comunicar los niveles de carga y descarga del dispositivo en tiempo real a través de una aplicación de Android y c) mostrar toda la información en un gráfico de series de tiempo utilizando la herramienta *grafana*.
- Algunas empresas de tecnología de la información y comunicación [28] definen la eficiencia energética en la alimentación de los PA que reciben energía de un *Power Sourcing Equipment (PSE)* como el HPE 2520G-24-PoE y HPE 2920-48G-PoE+ [29] usando *Power over Ethernet (PoE)* o directamente desde la red eléctrica. Estos PSE proveen energía entre los 15,4 W y los 90 W en cables Ethernet de 100 m, según se consideren los estándares IEEE 802.3af, 802.3at y 802.3bt [30].

Estas iniciativas no impiden que el consumo de energía de un PA esté entre el 2% y el 10% del consumo de potencia mundial [17].

Nosotros no estamos interesados en cambiar, modificar o alterar los estándares de ahorro de energía en los terminales inalámbricos por entender que no tendría mucha utilidad y ya esos estándares tienen procedimientos muy optimizados. Tampoco queremos centrarnos en un tipo de tráfico concreto para ahorrar energía en la red WiFi. Estamos interesados en cambio en indagar si es posible añadir mecanismos externos al PA WiFi, independientemente de su versión y funcionamiento interno, para producir un ahorro de energía extra al que se obtiene en los terminales, ya que como hemos demostrado, no existen trabajos previos que hayan investigado de forma definitiva si es posible disminuir la energía consumida por un PA sin modificar la cantidad de energía que reciba desde un punto de conexión a la red eléctrica un PSE o por PoE.

1.2 Motivación

Partimos de la base que las grandes empresas, los centros gubernamentales o las organizaciones de un tamaño considerable disponen de una red WiFi con una gran cantidad de PA, tanto para facilitar el acceso a los recursos de su red interna como de Internet a sus empleados y a sus clientes. Además, partimos de la base que esos centros disponen de equipos de red adicionales como pueden ser encaminadores capaces de manejar un *throughput* de datos elevadísimos. Y en ciertos casos pueden tener un centro de cálculo interno en el que existen servidores de VoIP, de VoD y otros servidores que permiten el funcionamiento interno y la atención a clientes. Además, disponen de un acceso a Internet con una velocidad suficiente para manejar grandes volúmenes de datos por segundo.

En el contexto anterior, suponemos que existe una gran cantidad de PA dentro de las instalaciones del centro. Por ejemplo, en la Universidad de las Palmas de Gran Canaria [31] existen más de 400 PA en el total de sus campus universitarios. En el hospital Luis Vernaza de la ciudad de Guayaquil (Ecuador) [32], en el año 2017 existía un total de 73 PA.

Normalmente, estos PA suelen estar encendidos durante todo el día y toda la noche. Si nos centramos en los PA WiFi, podemos resaltar que su consumo energético varía con una serie de variables a estudiar, entre otras: la funcionalidad de los equipos, el número de usuarios conectados, la potencia aplicada, la frecuencia utilizada y el alcance programado de la señal radio [33]. Dicho consumo permanece latente a pesar de que no exista transmisión de datos en el tiempo, ya que el equipo requiere de una energía

mínima preestablecida para mantener los servicios listos para su operación. En muchos casos podríamos decir que hay energía que se desperdicia mientras los PA WiFi están encendidos y sin uso. Esto significa que la cantidad de energía que consume un PA puede llegar a ser considerable. Independientemente del coste económico de la energía que se consume (puesto que se pueden aprovechar precios bajos o zonas de consumo no facturables...), es importante disminuir, en la mayor medida de lo posible, la cantidad de energía consumida por el total de estos PA dentro del centro.

Somos conscientes de que es posible monitorizar el consumo de energía de los PA (y otros elementos de red y servicios) del centro, para caracterizar su funcionamiento habitual y determinar si es posible apagar los PA durante cierto tiempo sin afectar al rendimiento de la red, la QoS, ni afectar a la calidad de la experiencia de usuario (*QoE*, del inglés *Quality of Experience*). Para ello, es necesario contar con la colaboración de las autoridades del centro.

Queremos demostrar que es posible reducir el consumo energético de un PA si somos capaces de almacenar energía en una batería adicionada al PA y controlándola mediante un circuito electrónico que conmutaría el uso de la batería para alimentar al PA una vez se ha cargado por completo. Además, queremos demostrar que los ciclos de carga y descarga de esta batería no afectarían a su rendimiento antes de un número prudencial de años. Sería deseable construir esta batería con un sistema de alimentación proveniente de un operador eléctrico y añadiendo otras fuentes de energía renovables utilizando la técnica *Energy Harvesting (EH)* [34]. Se pretende demostrar si el uso de estas fuentes externas facilita un mejor funcionamiento de la batería y el circuito a implantar.

Por último, queremos demostrar, mediante experimentación que nuestra solución no afecta a la QoS ni a la QoE.

1.3 Objetivos

El principal objetivo de esta tesis doctoral es el diseño e implantación de un mecanismo hardware acoplable a cualquier PA WiFi para disminuir su consumo eléctrico. Para ello se pretende diseñar un circuito electrónico basado en una batería eléctrica y un circuito de control que permita aprovechar la descarga de la batería para alimentar al PA y su carga sin que esto suponga un exceso de consumo eléctrico, respecto a si no se usa dicha batería. Mediante la construcción de un prototipo, se pretende, experimentalmente, demostrar que dicho mecanismo es eficaz y permite disminuir dicho consumo eléctrico.

Para lograr este objetivo se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Constatar que en la práctica el consumo eléctrico de algunas instituciones oficiales es más elevado en caso que los PA nunca se apaguen (ni de día ni de noche). Mediante esta constatación práctica se lograría obtener un modelo de consumo energético de los PA de dichos centros. La importancia de la obtención de este modelo es que nos puede guiar para conseguir el diseño de nuestro mecanismo de forma eficiente.
- Observar el tipo de tráfico que suele cursar los PA de las instituciones públicas, para poder determinar la influencia que tiene en el rendimiento de nuestro mecanismo. A partir de este modelo se debe obtener, en primer lugar, un modelo matemático paramétrico de optimización de la reducción de consumo eléctrico frente al consumo que el PA tiene en función del tráfico que cursa. Este modelo debería asegurar que no se pierdan paquetes de datos por el uso de nuestro mecanismo y por tanto se vea afectada la QoS y la QoE. En segundo lugar, este modelo debe limitar los valores de los parámetros considerados de tal forma que permita dimensionar los parámetros básicos del circuito electrónico a diseñar e implantar.
- Verificar el funcionamiento real del mecanismo propuesto utilizando el prototipo construido para establecer su bondad de funcionamiento. Una vez diseñado e implantado el mecanismo electrónico, se procede a la realización de un conjunto de pruebas funcionales que permitan verificar que el mecanismo funciona de manera adecuada en presencia de distintos tipos de tráfico y además se obtiene un funcionamiento acorde con la predicción del modelo matemático paramétrico de optimización.

Con la consecución de estos objetivos se debe demostrar que efectivamente, en caso de reducir eficazmente el consumo energético de los PA del centro institucional, se puede proyectar un ahorro energético global que puede ser significativo.

1.4 Estado del arte

En la práctica hemos detectado que nuestro mecanismo es inédito y no existe en la literatura científica ningún mecanismo similar: todos los mecanismos de ahorro energético en redes WiFi se concentran en los terminales inalámbricos. Por este motivo, para contextualizar el mecanismo, hemos optado por revisar el estado del arte en distintos ejes: el EH, el ahorro energético en distintas tecnologías de redes inalámbricas, nos centramos en el ahorro energético de redes de sensores para observar si alguno de

los métodos revisados se podrían aplicar a nuestro mecanismo y por último se discuten algunos métodos de ahorro energético en las redes WiFi para poder contextualizar mejor nuestro mecanismo de ahorro de energía en los PA WiFi.

1.4.1 Energy harvesting

Nuestro mecanismo incluye una batería que almacena energía hasta que se carga por completo, y en ese momento se descarga alimentando al PA WiFi. Eventualmente, se podría utilizar las técnicas de EH para intentar complementar la carga de la batería con energía extra obtenida de la Naturaleza. Dos formas con posibilidad de ser aplicadas son: la conversión de la energía de las ondas electromagnéticas libres en el espacio a energía eléctrica y convertir la energía radiada por el Sol a energía eléctrica.

En [35] se genera una fuente de voltaje DC inalámbrica, a partir de ondas electromagnéticas en la banda de *Frecuencia Media (MF)*. Se expone el diseño y la implantación de un circuito electrónico pasivo que cumple la función de convertir las ondas electromagnéticas emitidas por estaciones de radio difusión de *Amplitud Modulada (AM)* en voltaje de corriente directa. Los autores fabricaron un prototipo y llevaron a cabo pruebas de campo donde se demostró el buen funcionamiento del prototipo. Los resultados obtenidos demuestran que los niveles de potencia suministrados por la fuente de voltaje permitirían alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia. Para ello sintonizaron el circuito resonante a la frecuencia de trabajo del transmisor de 50 KW de la estación de radio difusión (*Radio Caroní 740KHz*). La antena del transmisor se encuentra ubicada a 184 m aproximadamente sobre el nivel del mar. Se realizaron mediciones eléctricas de campo, dentro de un radio de 10 Km de distancia y a distintas alturas sobre el nivel del mar con respecto a la antena de la estación de radio difusión. Los niveles de tensión arrojados por la fuente de voltaje de corriente directa inalámbrica dependen de la potencia de transmisor, de la longitud y polarización de la antena, de la distancia y la altura entre las antenas transmisora y receptora. Los voltajes que se obtuvieron iban desde los 0,4 V a distancias cercanas hasta los 12 V a 5 Km de distancia.

En [36] plantearon el aprovechamiento de ondas recibidas desde un horno microondas, para alimentar dispositivos de bajo consumo de energía, del orden de los mW. Los resultados experimentales mostraron que la fuga de ondas recibida por una antena dipolo fue de aproximadamente 0 dBm (1 mW) en un punto de 5 cm delante de la puerta. Una rectenna que consiste en una antena dipolo y una bomba de carga puede convertir la energía de microondas filtrada en una corriente continua. Cuando un horno microondas funciona durante 2 m, se obtuvieron 9,98 mJ. Demostrándose que esta

energía es suficiente para encender un temporizador de cocción digital para realizar una cuenta regresiva durante 3 m y emitir un pitido durante 2,5 s. También se demostró el funcionamiento de otros dispositivos de cocina. En otro estudio similar [37] se discute el diseño y análisis de circuitos de recolección de energía inalámbrica de microondas de alto voltaje de salida, hechos de una antena de parche microstrip y un rectificador Cockcroft-Walton de tres etapas. La simulación del Rectificador propuesto y una ANTENA (rectenna) se realiza utilizando el software Keysight *Advanced Design System (ADS)*. Los resultados muestran que la rectenna puede proporcionar un alto voltaje de salida de más de 10 V para una potencia de *Radio Frecuencia (RF)* de entrada de 20 dBm y una eficiencia máxima del 45% para una potencia de entrada de 16 dBm a 2,45 GHz. De igual forma en [38] se diseñó, simuló, fabricó y midió una antena de microstrip de parche suspendido con ranuras rectangulares cortadas para la recolección de energía de RF en la banda de comunicación móvil 3G de 2,11-2,17 GHz y la banda WiFi de 2,45 GHz. Se confirmó que el parche suspendido aumenta enormemente el ancho de banda del 2,5% al 15%.

Siguiendo el mismo criterio, en [39] se presenta una nueva rectenna de doble banda para el sistema de recolección de energía de RF. Esta rectenna se crea a partir de una antena y un rectificador de doble banda que funciona en bandas del *Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM)* (900 MHz y 1.800 MHz). La antena monopolo impresa contiene dos líneas de meandro. La señal recibida de la antena receptora es rectificadora por un duplicador de voltaje usando el diodo Schottky SMS-7630. El rectificador está optimizado para un bajo nivel de potencia de entrada de -20 dBm. Los resultados de la simulación muestran que la rectenna presentada brinda la posibilidad de recolectar la energía electromagnética ambiental y que puede alcanzar un buen voltaje, obteniéndose un máximo de 415 mV en el ambiente. En [40] también se diseñó y optimizó una *Antena Monopolo Rectangular (RMA)* escalonada para la recolección de energía de RF para la banda de 1.800 MHz en GSM, para la comunicación en 3G, 4G e ISM. Se introducen pasos en la antena monopolar cerca de la línea de alimentación y en el lado superior del monopolo rectangular para aumentar el ancho de banda. Además, se agrega un paso más que da como resultado la resonancia en LTE850 (banda 5) también. El resultado muestra que la ganancia y el ancho de banda se mejoran con el uso de la *Antena Monopolo Rectangular de Doble Paso (DSRMA)* diseñada, con una ganancia obtenida de más de 3 dBi para las frecuencias GSM 1.800, 3G, 4G e ISM.

Por otra parte, en [41] los autores presentan una antena monopolo multibanda para aplicaciones de recolección de energía por radiofrecuencia. La antena propuesta funciona bien en las bandas de comunicación inalámbrica. La antena está impresa en sustrato FR4 con piezas en forma de L, para lograr un ancho de banda con una impedancia adecuada.

Dos piezas simétricas con un ancho igual a 0,6 mm y cinco brazos ranurados están grabados en la superficie del radiador, cada brazo es responsable de una cierta frecuencia de resonancia. La antena funciona en cinco bandas operativas (banda del *Sistema de Posicionamiento Global (GPS)*, banda de *Llamada Selectiva Digital (DSC)*, banda de radio *Industrial, Científica y Médica (ISM)*, banda WiFi y banda WiMax) con coeficientes de reflexión de menos de 10 dB. El resultado de la simulación del rectificador muestra que están trabajando con el sistema de recolección de energía de RF de triple banda para tres bandas de banda ancha a 2,5 GHz, 3,7 GHz y 5,8 GHz. Esta antena muestra una buena correspondencia entre la simulación y los resultados experimentales. Los resultados muestran que puede proporcionar una alta eficiencia de conversión de RF-CC que es adecuada para aplicaciones de recolección de energía de RF.

A partir de los estudios anteriores, sería importante observar si es posible convertir de forma eficiente las ondas en las inmediaciones a los PA WiFi para transformarlas en energía eléctrica para complementar la alimentación de la batería de nuestro mecanismo.

Las redes WSN se utilizan ampliamente en aplicaciones de monitoreo, como la detección de humedad y temperatura en edificios inteligentes, automatización industrial y predicción de la salud de los cultivos. Los nodos de sensores se implantan en lugares remotos para detectar la información de datos del entorno y transmitir los datos de detección a la *Estación Base (BS)*. Cuando un sensor se queda sin energía, ya no puede cumplir su función sin una fuente de energía sustituta. Por ello la energía limitada en la batería de un sensor impide el proceso a largo plazo en tales aplicaciones. Además, reemplazar las baterías de los sensores y volver a implantar los sensores es muy costoso en términos de tiempo y presupuesto. Para superar la limitación de energía, se puede emplear un sistema de recolección de energía para recargar la batería mediante la gestión de energía autónoma que logra la recolección de energía piezoeléctrica. En [42] los autores se enfocan en el control de la recolección de energía de bajo nivel mediante el sistema de vibración piezoeléctrica de técnica más frecuente para WSN. La idea es suponer que el recurso de vibración existe continuamente. Además, el sistema de energía de recolección piezoeléctrica emplea un modelo equivalente de *Mass Spring-Damper (MSD)* con un controlador de *Derivado Integral Proporcional (PID)* que adapta la cantidad de energía cosechada por el nodo sensor para seguir funcionando y continuar sus procesos, además emplea una *Unidad de Controlador de Microprocesador (MCU)* para controlar los modos del sensor. Este nuevo sistema de poder de auto organización podría asegurar la prolongación de la vida útil de WSN, proporcionando una gestión eficiente de la energía para aumentar los beneficios de tener energía ambiental adicional.

Actualmente, las placas solares no son todo lo eficientes que sería deseable y diversos factores ponen en duda que sea eficientes. En [43] se discute una hoja de ruta futura para el aprovechamiento eficaz de la *Energía Solar (ES)*. De forma natural es posible utilizar estas placas solares en redes inalámbricas. En [44] se analiza un nuevo protocolo centralizado de jerarquía de agrupación adaptativa de baja ES y baja pérdida y se revisa el rendimiento de una WSN. En estas redes, los sensores consumen energía a la vez que realizan la recolección, procesamiento, transmisión y recepción de datos. Se espera que los sensores con restricción de energía funcionen de forma autónoma durante largos períodos. En [45] se diseña un sistema robusto de recolección de ES para mejorar el tiempo de vida de las baterías de los sensores de una WSN. El sistema de suministro de ES propuesto consiste principalmente en un panel solar, una batería recargable y un circuito de control. Para obtener suficiente voltaje para cargar la batería, la energía eléctrica generada a través del panel es impulsada por el convertidor elevador. Los diferentes nodos sensores reciben energía de este sistema. Los resultados experimentales muestran que este sistema compacto y autosuficiente permite que los nodos de WSN basados en exteriores funcionen con éxito. En [46] se plantea un sistema de aprovechamiento de ES para las baterías recargables de los nodos de una WSN. Se demuestra que su sistema depende de la eficiencia del panel solar, la eficiencia del convertidor DC-DC controlado por el circuito de *Seguimiento de Punto Máximo de Potencia (MPPT, del inglés Maximum Power Point Tracking)* y la eficiencia de la batería recargable. Mediante la simulación en Matlab [47] y Simulink [48] del sistema se demostró una eficiencia del 96%. A partir de estos trabajos es indudable que la batería que se utilice para nuestro mecanismo debe ser lo más eficaz posible y del mismo modo, el circuito de control también debe ser lo más eficiente posible para que pueda controlar la carga máxima de la batería.

Un tema interesante es el estudio realizado en [49] para controlar el funcionamiento intermitente del sensor *WirelessHART* [50] en una WSN, utilizando o bien una matriz de celdas fotovoltaicas o bien una batería recargable de tal manera que si se aprovechara al máximo la ES la batería tendría una duración máxima. Observaron que la batería tarda unos 50 m en cargarse completamente con una corriente de 1,08 A (extraídos de las celdas fotovoltaicas) y es capaz de proporcionar energía para 32 meses. Sin embargo, estos tiempos de carga y descarga no suelen ser constantes en la práctica porque dependen de factores ambientales como son: temperatura ambiente, química de la batería, la forma en cómo se sucedan los ciclos de carga y descarga y el tiempo de servicio de la batería. Esto significa que el control de la batería se debe configurar teniendo en cuenta estos factores para evitar que el sensor interrumpa su funcionamiento por no disponer de energía. La naturaleza de este problema es el mismo para nuestro

mecanismo. Sin embargo, hay diferencias notables, debido a que la energía que consume un PA es mayor que la que consume un sensor WirelessHART; y además sobre la temperatura se puede tener un mayor control si el PA está en interiores.

1.4.2 Reducción de consumo energético en redes inalámbricas

A nivel general se han ensayado diversos mecanismos para reducir el consumo energético en redes móviles e inalámbricas.

Como se ha explicado previamente, una técnica para reducir el consumo de energía de los terminales inalámbricos consiste en cambiar dinámicamente su estado. Aumentar el tiempo de vida de las baterías de los terminales inalámbricos colocando su interfaz de red en modo sleep a nivel *Medium Access Control (MAC)*, puede restringir seriamente su uso. Esto a su vez puede tener un impacto negativo en la QoS. Los métodos a emplear deben tener en cuenta estos aspectos. En [51] se presenta un mecanismo que permite un ahorro del 70% de energía comparado con los algoritmos empleados por el IEEE 802.11 y un 20% con IEEE 802.16, mientras previenen la degradación del desempeño y el impacto negativo del usuario de la QoE y con un QoS aceptable. La idea es trabajar en tres fases para ahorrar energía sin incrementar los paquetes: la primera es *slow start*, las segunda y tercera son los incrementos exponencial y lineal de la ventana de sleep sin introducir un retraso significativo.

La gestión de tráfico desde el punto de vista energético es otro clásico. La VoWLAN, tiene utilidad en las redes públicas y privadas [52]. Sin embargo, su implantación se ve complicada por las variaciones en la potencia consumida de las estaciones WLAN y en las capacidades de servicio de los PA. Por ello, se analiza un modelo de energía-eficiente para la transmisión de paquetes de VoIP, que considere las características de tolerancia a ciertas pérdidas y que pueda deshabilitar dinámicamente a nivel MAC los paquetes de ACK (*Acknowledgment*), reduciendo la energía consumida para transmitir y recibir datos sin sacrificar la calidad de la voz. El mecanismo consiste en desactivar el ACK, de los paquetes de voz, lo que significa que los paquetes no pueden ser detectados y retransmitidos, por lo tanto, la calidad de voz se podría degradar. Entonces el mecanismo es modificado a un sistema de encendido-apagado según se consiga que la pérdida y los errores de paquetes se produzcan rara vez, así el acuse de recibo de nivel MAC para un paquete de voz se desactiva, lo que mejora a su vez la eficiencia de la red y la energía. A la inversa, al aumentar la tasa de pérdida de paquetes, el acuse de recibo de nivel MAC se activa para asegurar la calidad de la voz. El mecanismo propuesto reduce el consumo medio de energía en alrededor de 23 y 17% para los diversos modelos comparados. En las redes

WiFi de los centros en los que ponemos nuestra atención no es posible acceder a una gestión de tráfico de este tipo, por lo que nuestro mecanismo debe ser independiente del tipo de tráfico que curse la red, aunque sí se puede tener en cuenta sus efectos sobre el mecanismo.

Las nuevas técnicas de gestión de redes ocupan un lugar importante en la agenda de las redes celulares móviles (5G). Las técnicas de *Machine Learning* [53, 54] son útiles para la extracción de datos sin procesar, conocimiento que puede aplicarse para mejorar la experiencia en la operación de dichos sistemas. En [55] se propone el uso del aprendizaje automático aplicado a la eficiencia energética, que sería un desafío en futuras implantaciones de red. La idea es derivar modelos predictivos para diferentes métricas de carga celular, activando y desactivando dinámicamente las estaciones base para proporcionar ahorros de energía en una red celular móvil. Además, la explosión del tráfico de datos en redes inalámbricas ha dado como resultado un despliegue denso y a gran escala de celdas pequeñas, con lo cual el creciente costo de la energía ha llamado la atención de los investigadores. Por eso en [56] presentan un mecanismo nuevo de sleep para las celdas pequeñas con el fin de disminuir el consumo de energía de las redes heterogéneas. Específicamente, en el área del borde de la celda de una macrocelda, las celdas pequeñas se pondrían en suspensión donde sea posible y sus áreas de servicio estarían cubiertas por las celdas pequeñas de rango expandido cercanas. Al usar un modelo de red basado en geometría estocástica los resultados indican que el mecanismo de suspensión propuesto puede reducir significativamente el consumo de energía de la red en comparación con métodos existentes, garantizando el requisito de QoS. Nosotros no estamos interesados en el uso de Machine Learning ni de modelos de tráfico especializados para implantar nuestro mecanismo.

Otro clásico es construir sistemas de ahorro de energía muy concretos, como los que se exponen a continuación.

El primero de ellos se enfoca en soluciones prácticas de ahorro de energía en hogares y oficinas. Por ejemplo, la configuración de la temperatura del agua, en las casas, conduce a una gran cantidad de gasto de agua y energía. La configuración de una temperatura adecuada del agua, una caída repentina o un aumento de la temperatura, también provocan molestias al consumidor y un desperdicio. Esta gran cantidad de desperdicio se puede reducir utilizando optimizadores de vanguardia. Por ello en [57] se propone una nueva solución basada en *Optimizadores de Objetivos Múltiples (MOO)* para establecer un caudal y una temperatura del agua adecuados, minimizando la cantidad de energía utilizada por los grifos. En este escenario, el usuario ingresa la temperatura del agua preferida, así como la velocidad de flujo para cada grifo. El sistema propuesto

optimiza la cantidad utilizada de energía y el desperdicio de agua. Mientras tanto, el sistema diseñado mantendría la temperatura con un número dinámico de usuarios. Aquí, los controladores son parte del sistema de calefacción para controlar la cantidad de energía utilizada. Para la tarea de control y procesamiento, se utilizó una placa Arduino que tiene interacciones con un simulador Matlab usando el módulo Bluetooth (HC-05). Se usa Matlab para trazar la salida en tiempo real. Además, el usuario ingresa la temperatura y el flujo preferidos a través de un teléfono inteligente Android por Bluetooth. También podrían emplearse microprocesadores basados en *Internet de las Cosas (IoT, del inglés Internet of Things)*, más caros, por ejemplo, Intel Edison que ha sido equipado con un módulo incorporado. El software empleado llamado Blynk se utiliza para conectar el teléfono inteligente de un usuario determinado al dispositivo de mezcla. Blynk es compatible con Android y Apple iOS.

El segundo se enfoca en el coste de iluminación en los países en desarrollo y áreas atrasadas, donde se propone una aplicación de la tecnología de IoT, combinada con la informática de vanguardia, para lograr un sistema de iluminación inteligente para edificios de oficinas [58]. El sistema toma la tecnología de IoT como el núcleo y combina la ventaja de comunicación inalámbrica ZigBee de corta distancia, baja complejidad, baja tasa, baja potencia y bajo costo, y se basa en diseños de topología de malla. El sistema de ahorro para iluminación de edificios de oficinas controla de forma inteligente el interruptor de la luminaria o cambia el modo de iluminación preestablecido de acuerdo con el número detectado de personas en la oficina, la ubicación y el brillo de la iluminación, supera de manera efectiva los defectos del atraso de la gestión del modo de iluminación tradicional, el desperdicio de energía, la poca comodidad y el cableado complicado. El objetivo es lograr un ahorro de energía y la reducción de consumo en iluminación de edificios de oficinas. A través de la práctica y el análisis de la prueba experimental, el consumo de energía mejorado presenta un ahorro de aproximadamente 30% por año, y el efecto es notable.

El tercero [59] construye un sistema inteligente de ahorro de energía eléctrica en el hogar mediante la combinación de dispositivos inteligentes (medidor y enchufe inteligente), módulos de comunicación y teléfonos móviles inteligentes. Las funciones del medidor inteligente incluyen la visualización y el almacenamiento del consumo total de energía, los parámetros de energía eléctrica y las condiciones de funcionamiento anormales... Además, el usuario puede verificar la información del consumo de energía de forma remota, y el ahorro de energía eléctrica del dispositivo se implanta mediante un enchufe inteligente bajo el control de un teléfono inteligente. El enchufe inteligente consta de diferentes módulos de comunicación, unidad de control de carga y *Pantalla de*

Cristal Líquido (LCD). Los miembros del hogar pueden usar el teléfono inteligente para verificar la información del consumo de energía a través de la red, y la aplicación puede implantar el control del dispositivo eléctrico en el teléfono inteligente a través de las interfaces WiFi. Además, la información de energía en el enchufe inteligente se transmite al medidor inteligente mediante módulos ZigBee. El rendimiento del sistema inteligente de ahorro de energía eléctrica en el hogar, se probó en el laboratorio, y los resultados validan la viabilidad del sistema propuesto.

Ninguno de estos ejemplos se enfoca en los centros de nuestro interés; pero podría ser de aplicación con ligeras modificaciones. Sin embargo, nosotros no estamos interesados en el ahorro del coste de la factura eléctrica, sino en reducir la cantidad de energía consumida en los PA WiFi.

1.4.3 Métodos de reducción del consumo de energía en WSN susceptibles de ser usados en redes WiFi

La eficiencia energética en WSN ha sido ampliamente considerada en la literatura científica recientemente centrándose en los tres niveles de comunicación inalámbrica: los niveles físicos, MAC y de red. La eficiencia energética centrada a nivel físico y de red tiene capacidades limitadas. Sin embargo para el nivel MAC requiere un control de transmisión cooperativo de tráfico, por lo que en [60] los autores presentan un modelo analítico de cadena de Markov de tiempo discreto unidimensional del protocolo *MAC de Tiempo de Espera (T-MAC)*, con el cual se deriva un modelo matemático que se centra en un análisis de retraso del servicio, el rendimiento, el consumo de energía y la eficiencia energética en condiciones de tráfico no saturado, consiguiendo una mayor eficiencia energética en comparación con las técnicas de vanguardia, en términos de un mejor ahorro de energía, mayor rendimiento y menor consumo de energía bajo diversas cargas de tráfico.

Debido al límite de la capacidad de cálculo y almacenamiento de los dispositivos en una WSN, las técnicas de seguridad tradicionales enfrentan desafíos en el proceso de transmisión de datos. Es así que las redes necesitan consumir más energía para transmitir datos en un estado de red inseguro. Para abordar los problemas de retraso de extremo a extremo en WSN en [61] se propone un esquema de *Ciclo de Trabajo Dinámico (DDC)* para minimizar el retraso. Con este método se prolonga el período activo de los nodos con un ciclo de trabajo mayor siendo que el conjunto de nodos de reenvío permanece despierto con una mayor posibilidad. En consecuencia, el retraso del modo sleep de un nodo y de la transmisión disminuyen. Finalmente se concluye que en el esquema DDC, en comparación con el *Ciclo de Trabajo Fijo (SDC)* existente, el retraso de transmisión se reduce en un 20-

50%, incrementando la vida útil en más del 16,7% y mejorando la eficiencia energética de 15,3 -16,3%.

En algunas WSN de gran número de sensores, éstos a menudo no son fácilmente accesibles. Además de utilizar ES, en los últimos años se ha hecho una cantidad enorme de investigación teórica para la reducción del consumo global de energía de la WSN de tal manera que se pueda extender su tiempo de aplicación. En [62] se presenta un amplio estudio de las compensaciones entre los requisitos de la aplicación y la extensión de la vida útil que surgen al diseñar las WSN. Primero identifican las principales categorías de aplicaciones y sus requisitos específicos. Luego presentan una nueva clasificación de los esquemas de conservación de energía encontrados en la literatura reciente, seguida de una discusión sistemática sobre cómo estos esquemas entran en conflicto con los requisitos específicos. Finalmente, examinan las técnicas aplicadas en WSN para lograr un equilibrio entre múltiples requisitos, como la optimización multiobjetivo. También en [63] se estudian los principales problemas para diseñar las WSN, que son: reducir el consumo de energía de los nodos de sensores y mejorar la vida útil de los nodos que tienen una capacidad de batería limitada. Por ello, se ha propuesto un esquema de transmisión de eficiencia energética en condiciones climáticas dinámicas para WSN. Este esquema es IEEE 802.15.4, donde se consideran dos procesos, uno con retroalimentación y otro sin retroalimentación. El proceso sin retroalimentación se usa para evaluar y compensar la calidad del enlace debido a los efectos de diferentes condiciones climáticas como la temperatura, la lluvia y la nieve (seca y húmeda), mientras que el proceso con retroalimentación se usa para dividir la red en dos regiones lógicas para disminuir la pérdida de paquetes de control. El número real de nodos y la pérdida de potencia en cada región se utilizan para ajustar el *Nivel de Potencia de Transmisión (Plevel)* del nodo de acuerdo con las variaciones en la calidad del enlace y las condiciones climáticas. Los resultados de la simulación muestran que el esquema propuesto ajusta la transmisión *Plevel* para compensar la calidad del enlace con menos sobrecarga de paquetes, lo que da como resultado un menor consumo de energía. Este estudio revela que el estado del enlace de las comunicaciones en los PA puede influir en el consumo de energía, por lo que se debe intentar disponer de enlaces de comunicación lo más optimizados posible dado que normalmente no se varía la potencia de transmisión en los PA WiFi. En el caso de que se pudiera hacer, esto también se debería tener en cuenta para reducir la energía consumida. Sin embargo, esto no es sencillo en un centro donde el número de PA es muy grande y además se ha hecho una planificación previa de la red para que la cobertura de los PA sea óptima.

En [64] se estudian las principales técnicas utilizadas para la conservación de energía en redes de sensores. Se analizan esquemas de los ciclos de servicio de los sensores más compatibles con la reducción de energía de la WSN. También estudian algunos protocolos de comunicación propuestos para las WSN que permitan reducir su consumo energético. Otro estudio similar al anterior es [65]. Clasifica las técnicas de gestión de energía, o técnicas de conservación de energía, en técnicas de ciclo de trabajo, técnicas basadas en datos y técnicas basadas en la movilidad. Los autores presentan una investigación caracterizada por introducir ideas y conceptos que pueden impulsar nuevos pasos, ya sea como investigación o aplicaciones, bajo el interés de la Industria. Al igual que en estos trabajos, nosotros debemos tener en cuenta los ciclos de trabajo de los PA para observar si es posible cargar y descargar la batería en caso que se puedan administrar eficientemente esos ciclos de trabajo. El problema es complejo, porque a diferencia de una WSN, los PA no suelen mostrar patrones de trabajo que permitan definir ciclos de trabajo de forma sencilla, y también que sea factible analizar si nuestra técnica se puede utilizar para cualquiera que sean estos ciclos de trabajo del PA.

Aunque la conservación de la energía durante la comunicación se puede realizar en diferentes niveles de la arquitectura *Transmission Control Protocol/Internet Protocol (TCP/IP)*, se considera que el nivel MAC es el más eficaz debido a su capacidad para controlar el nivel radio directamente y mejorar la eficiencia energética maximizando la duración del modo sleep, minimizando la inactividad de escucha del canal, y eliminando el problema del terminal oculto o la colisión de paquetes. En [66] los autores investigan los protocolos MAC disponibles energéticamente más eficientes. Estos métodos son altamente dependientes de la topología del nivel físico, y por ejemplo existen factores en redes de malla que no se pueden evitar. Para tratar de resolver este tipo de factores, en [67] se utilizó una especificación de *Low Power Wide Area Network (LPWAN)* denominada LoRaWAN [68]. Presentan los conceptos básicos y los límites de LoRaWAN, un estudio de viabilidad de la topología en estrella, métodos de compresión de datos para reducir el consumo de energía y un método de gestión del modo sleep modificando la política de sensado de los nodos. Las redes LPWAN se han identificado como una de las tecnologías inalámbricas emergentes por su autonomía y amplia gama de aplicaciones. Sin embargo, los recursos energéticos limitados de los nodos sensores alimentados por batería son una limitación importante, especialmente cuando los nodos están ubicados lejos de la estación base, pues requieren comunicaciones de *Enlace Ascendente (UL)* en niveles de alta potencia. Aunque estas tienen capacidad de reducir el consumo de energía al permitir transmisiones a saltos más cercanos es difícil identificar las rutas energéticamente eficientes. En [69] se propone un algoritmo de *Refuerzo Simple (RL)* llamado *Epsilon Multi-*

Hop (EMH) basado en ϵ -greedy para topologías multi-hop LPWAN confiables y de bajo consumo. Los resultados al emplear EMH logran ahorros de energía significativos con relación al enfoque de salto único. Estos métodos no se pueden trasladar directamente a la red WiFi de centros con un número elevado de PA debido a que normalmente la gestión de esos PA es interna al centro y no se permite que un mecanismo externo, como el nuestro, se pueda aplicar a este nivel de administración de su red.

La agrupación (*clustering*) eficiente de sensores dentro de la WSN, nombrando a un representante de todos ellos (similar un coordinador interno a ese grupo, pero con funciones mucho más reducidas que únicamente se limitan a la recepción y envío de mensajes agregados) permite implantar políticas de encaminamiento jerárquico con agregación de mensajes que permiten reducir el consumo de energía. En [70] se utilizan políticas de clustering basadas en redes neuronales. La simulación de ese método revela una reducción considerable de consumo de energía. En otro estudio de una aplicación de las WSN, para mejorar la protección de los derechos de autor de la imagen digital, se utiliza la técnica de marca de agua. Al cambiar la entropía, se identifica la ubicación donde los datos secretos se incrustan en la imagen original. Proporciona menos distorsión y alta robustez. La imagen con marca de agua se envía al receptor a través de la red inalámbrica de sensores. Considerando que en WSN la agrupación es la mejor técnica para ahorrar energía y que en las WSN basadas en clúster, el coordinador (*head*) del clúster requiere más energía para recibir los datos de los nodos del sensor y transmitirlos a la estación base, para mantener la vida útil de WSN la selección adecuada del canal es esencial. Por ello, en [71] los autores proponen los algoritmos múltiples de mínimos cuadrados basados en energía. Los resultados de la simulación muestran que el algoritmo de métodos de ajuste de nivel electromagnético (*ELSM*, del inglés *Algorithm Electromagnetic Level Set Methods*) es más eficiente en comparación con el *Algoritmo de Métodos de Mínimos Cuadrados Ponderados (WLSM)* para mejorar el rango de ancho de banda, sobrecarga del clúster, tasa de inclinación, tasa de desplazamiento, señal portadora, señal de referencia y señal de salida de control. En [72] los autores estudian esquemas de procesamiento de datos que definen la distribución de la toma de decisiones, lo que afecta la precisión del sistema y el consumo de energía en las redes WSN. Los dos esquemas de detección típicos son los esquemas centralizados y distribuidos. En un esquema centralizado, los nodos recolectan muestras del entorno y las envían a un centro de fusión de datos, donde las muestras se utilizan para llegar a una decisión final. Este esquema proporciona una precisión de decisión óptima; sin embargo, consume mucha energía. Por el contrario, los esquemas distribuidos permiten a los nodos tomar decisiones locales de 1 bit, que se envían al centro de fusión para tomar la decisión final. Ambos esquemas son básicos y no

poseen flexibilidad. En el tercer esquema, el esquema híbrido, se utilizan los dos esquemas anteriores para equilibrar la precisión y energía; sin embargo, todos los nodos permanecen con configuración fija y flexibilidad limitada. A diferencia de los esquemas anteriores, el esquema que se propone está diseñado para ser más flexible a fin de equilibrar el poder de consumo y la precisión de detección a nivel de nodo. Cada nodo es flexible para decidir cómo comportarse, es decir, si debe ser más centralizado o distribuido. Los resultados de la simulación muestran que el esquema planteado ahorra una cantidad sustancial de energía en comparación al esquema híbrido, mientras que conserva la precisión en casi el mismo grado. Además de que opera de manera más eficiente en un área de red más grande y con un número de nodos más denso. El traslado de estas técnicas a redes WiFi en los centros de nuestro interés no se puede llevar a cabo directamente salvo que el centro permita su implantación según sus políticas de gestión de datos en la red.

La tecnología de radio múltiple se considera una forma prometedora de mejorar el rendimiento de las redes WSN y ha atraído mucha atención de los investigadores. Es muy importante reducir el consumo de energía y prolongar la vida útil de los *WSN Multiradio (MR-WSN)*, ya que el nodo generalmente funciona con batería en entornos MR-WSN. En [73] se analizan en primer lugar dos tipos típicos de proceso de consumo de energía, el consumo de energía de transmisión y el consumo de energía de escucha inactiva. Basado en el análisis anterior, se construye el modelo de consumo de energía de los nodos de radio múltiple, y luego se considera como el objetivo de optimización para minimizar el consumo de energía de dichos nodos. Además, se propone la estrategia de programación de tareas de consumo de energía óptima heurística basada en el algoritmo de *Optimización de Enjambre de Partículas (PSO)*, y luego se presentan los pasos detallados de la estrategia propuesta. Finalmente, la efectividad y el rendimiento de la estrategia propuesta se evalúan mediante experimentos prácticos y simulaciones. Los resultados de la evaluación muestran que la estrategia propuesta supera a algunos otros algoritmos, en términos de consumo de energía, vida útil de la red y extensibilidad de tareas. Con la aplicación de WiFi6 en los centros se podría aplicar una técnica similar a las redes WiFi de los centros; sin embargo, esta versión tardaría un tiempo en establecerse en dichos centros y por ello, es preferible utilizar un mecanismo independiente de las versiones de WiFi.

La operación de los radios en redes WSN en las aplicaciones de IoT son la fuente más común de consumo de energía. Por lo tanto, reconocer y controlar los factores que afectan el funcionamiento de la radio puede ser valioso para gestionar el consumo de energía del nodo. ContikiMAC es un protocolo de ciclo de trabajo de radio de baja

potencia en el sistema operativo Contiki que se utiliza en modo WakeUp, que es una *Evaluación Clara del Canal (CCA)* para verificar periódicamente el estado de la radio. El tiempo dedicado a verificar la radio es de suma importancia para monitorear el consumo de energía. En IEEE 802.15.4 las radios empleadas son de baja potencia y se utilizan en muchas aplicaciones de IoT y redes de sensores inalámbricos. Algunos sistemas operativos ofrecen una variedad de mecanismos de *Ciclo de Trabajo de Radio (RDC)* para controlarlas. Uno de los desafíos en los protocolos RDC son los WakeUps en escucha inactiva y los falsos WakeUps. En [74] los autores presentan un análisis, donde el método propuesto, *CCA Ligero (LW-CCA)* tiene como objetivo reducir el tiempo de activación causado por el falso WakeUp y los nodos de escucha inactivos. Para este propósito, el rendimiento de ContikiMAC se evalúa de acuerdo con los factores de tiempo que afectan cada WakeUp. El tiempo de verificación del estado del indicador de fuerza de la señal recibida (*RSSI*, del inglés *Received Signal Strength Indicator*), es un factor de tiempo importante para la radio. ContikiMAC considera un tiempo fijo de 20 símbolos (0,32 ms) para realizar un tiempo de verificación RSSI por WakeUp. En cambio, el método LW-CCA, considera dos valores de mínimo y máximo de 8 símbolos (0,128 ms) y 28 símbolos para la verificación por radio.

Los resultados muestran que los nodos LW-CCA, han reducido el 18% del ciclo de trabajo en comparación con ContikiMAC, que pueden reducir aproximadamente 0,12 mW en la potencia promedio consumida en modo Rx. Por lo tanto, es capaz de reducir el nivel general de consumo de energía en los nodos en aproximadamente un 8%. Además, reduce el consumo de energía mientras mantiene una *Tasa de Entrega de Paquetes (PDR)* del 99%. El método propuesto se puede aplicar a todas las plataformas IoT basadas en IEEE 802.15.4 como Z1, Tmote-SKY y Micaz. La eficiencia del método propuesto disminuye al aumentar la interferencia en la red. Cuanto más equilibrada sea la distribución de nodos, mejores resultados se obtienen del método propuesto en términos de vida útil de la red.

Una WSN Zigbee contempla el modo de suspensión de la operación para los terminales, pero no lo hace para los coordinadores y encaminadores. En [75] se propone que estos dispositivos incluyan el modo de funcionamiento de suspensión cuando los sensores están entregando datos durante el período de muestreo, lo que funciona para cualquier topología de WSN, logrando ampliar la duración de la batería de los encaminadores. Aunque no es posible hacer una transformación directa de este método para nuestro mecanismo, si es posible aplicar el mismo concepto, sin tener en cuenta el tráfico cursado por la red WiFi ni tampoco las suposiciones sobre encaminamiento que se hacen en este artículo.

Debido a sus atributos de ahorro de energía, *Bluetooth Low Energy (BLE)* ha sido un fuerte candidato para conectar diferentes tipos de sensores y actuadores para comunicarse en el contexto de IoT. En comparación con otras tecnologías de comunicación de datos, BLE ofrece una arquitectura simple y económica, con un tamaño reducido y un alcance similar a otras tecnologías. Para explotar mejor esta tecnología, en [76] se propone un protocolo de autenticación en la capa de aplicación, garantizando la autenticidad y una mejor eficiencia energética de los equipos involucrados en la comunicación, ya que este es el diferencial de esta tecnología. El BLE tampoco estandariza la gestión de la reducción de energía en los *masters* (coordinadores asimilables a PA WiFi), por lo que estas técnicas tampoco son directamente aplicables a nuestro mecanismo.

1.4.4 Reducción del consumo de energía en redes WiFi

Aumentar la cantidad de estaciones de IoT o estaciones regulares aumenta la contención del acceso al canal de enlace descendente y el retraso en la cola de paquetes, lo que a su vez resulta en un mayor consumo de energía y demoras en la comunicación con las estaciones de IoT. Por ello en [77] se presenta el *Punto de Acceso WiFi IoT (Wiotap)*, un punto de acceso WiFi mejorado que implanta un mecanismo de programación de paquetes de enlace descendente. Además de asignar una mayor prioridad al tráfico de IoT en comparación con el tráfico normal, el algoritmo de programación calcula las prioridades por paquete para arbitrar la contención entre la transmisión de paquetes de IoT. Wiotap logra una mejora del 37% con respecto al ciclo de trabajo de las estaciones de IoT en comparación con un PA normal. Además, las evaluaciones empíricas muestran hasta 44% y 38% de mejora en energía y 52% y 41% de mejora en el retraso, respectivamente. En [78] se analiza la programación de los intervalos de entrega de balizas para reducir eficientemente el consumo de energía de los dispositivos IoT que utilizan WiFi direct. En [79] se presentan varias recomendaciones para el ahorro de energía. Un mecanismo de ahorro de energía que toma parte de esas recomendaciones se propone en [80] para las comunicaciones *Máquina a Máquina (M2M)* [81] que toman ventaja de la técnica del ciclo inactivo. En la computación en la nube móvil para IoT, se propone un cloudlet para el procesamiento de datos en terminales WiFi cercanos, usando WiFi en lugar de la evolución a largo plazo para la comunicación de datos [82] para ahorrar energía. Estamos interesados en un mecanismo de ahorro de energía que pueda ser aplicado de manera general en lugar de ser personalizado para dominios específicos. Nuestro mecanismo debería ser compatible con la coordinación entre PA WiFi y datos provenientes de sensores. En concreto debería ser capaz de soportar la comunicación sin cortes cuando los sensores comunican datos críticos.

La eficiencia energética de las interfaces de los terminales WiFi que funcionan con baterías es un desafío importante. En las redes WiFi, la sobrecarga de paquetes recibidos representa una fracción significativa del consumo total de energía durante la contención del canal. En los estándares IEEE 802.11, el esquema de control de acceso medio es la *Función de Coordinación Distribuida (DCF)* donde las estaciones compiten por el canal utilizando *Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA / CA)*. Para ello cada estación selecciona aleatoriamente un contador de retroceso para realizar el procedimiento de retroceso antes de transmitir, dicho proceso puede ser interrumpido por las transmisiones de paquetes de otras estaciones. Entonces la estación congela su contador de retroceso y permanece en el estado activo porque puede ser el receptor previsto. Como el canal inalámbrico tiene una naturaleza de transmisión inherente, la estación puede escuchar las transmisiones de paquetes de otras estaciones incluso si no es el receptor previsto. Por lo tanto, la estación desperdiciaría energía para decodificar los paquetes recibidos en la capa física, incluso si no es el receptor previsto. Ya que la probabilidad de congelación de retroceso aumenta con el número de estaciones en las redes WiFi, el desperdicio de energía innecesario inducido por la sobrecarga de paquetes se vuelve más significativo.

En [83] para reducir el consumo de energía inducido por la sobrecarga de paquetes los autores proponen un nuevo esquema de transmisión, llamado *Data Symbol Silence (DSS)*, que borra intencionalmente algunos símbolos de datos cargando energía de transmisión cero en la parte frontal de un paquete de datos en el nivel físico para codificar información. Los símbolos de datos borrados por DSS se denominan símbolos de datos silenciosos. Al explotar la ventaja de la transmisión inalámbrica, las estaciones vecinas reciben la información incorporada. La detección de energía a nivel de símbolo de datos se utiliza para extraer la información incrustada sin recibir y decodificar todo el paquete de datos. Por lo tanto, los receptores no deseados pueden detener rápidamente la recepción y el procesamiento de paquetes inútiles. La brecha de la *Relación Señal a Ruido (SNR)* en las redes WiFi actuales se utiliza para garantizar que los símbolos de datos silenciosos insertados no afecten a la decodificación correcta del paquete de datos original. De acuerdo a los resultados obtenidos, en comparación con los estándares IEEE 802.11, el estudio planteado muestra que DSS mejora significativamente la eficiencia energética de las interfaces WiFi.

En [84] los autores analizan el impacto del RSSI de WiFi en el consumo de energía de teléfonos inteligentes en diferentes entornos de red. Se descubrió que una mala señal puede conducir a una disminución en velocidad de enlace de red y a un aumento en el consumo de energía; mientras que una buena señal contribuye a una rápida transmisión y

a un bajo consumo de energía. Para reducir el consumo de energía y prolongar la vida útil de la batería, a través de la combinación con el mecanismo original IEEE 802.11 PSM [85] se propuso un mecanismo de optimización basado en RSSI que agregaba paquetes de red y retrasaba la transmisión. En esencia, el mecanismo propuesto funcionó extendiendo el tiempo de permanencia de WiFi en el modo PS. Los resultados indicaron que el mecanismo propuesto era práctico y capaz de reducir el consumo de energía de teléfonos inteligentes de manera efectiva.

Los futuros sistemas de *Ondas Milimétricas (mmWave)*, celulares 5G o WiFi asumen que sus enlaces son altamente direccionales para superar las pérdidas producidas por rutas severas en estas bandas de frecuencia.

Casi toda la comunicación inalámbrica actual tiene lugar en una región relativamente pequeña del espectro electromagnético por debajo de 6 GHz. Esta región ha sido asignada por agencias gubernamentales de todo el mundo para uso comercial, civil, militar, seguridad pública y uso experimental. Sin embargo, la proliferación de dispositivos y servicios que usan o dependen de tecnologías inalámbricas ha causado una discrepancia cada vez mayor entre la demanda y el ancho de banda disponible, o *Grados de Libertad (DoF)*. Esta discrepancia denominada reducción del espectro, si no se aborda, conduciría a velocidades de datos más bajas y a una calidad de servicio reducida. La crisis del espectro se agudizaría aún más cuando se agregue Internet de las cosas y el tráfico de comunicación de dispositivo a dispositivo a las redes ya sobrecargadas. El aumento de DoF es la única opción para los sistemas inalámbricos de próxima generación (5G). El uso de mmWave permite un aumento en DoF al agregar más ancho de banda debido a la gran disponibilidad (del orden de unos pocos GHz) sin un espectro de licencia entre 30 y 300 GHz. Sin embargo, las señales transmitidas en mmWave tienen una alta pérdida de ruta isotrópica, es decir, se descomponen a una velocidad mucho mayor con la distancia recorrida. Esto lleva a una comunicación reducida. Por ejemplo, tienen una alta pérdida de penetración en la mayoría de los materiales y, por lo tanto, son fácilmente bloqueados por los objetos del entorno. Los sistemas mmWave pueden superar estas deficiencias mediante la *Formación de Haces (BF)*, empleando matrices de múltiples elementos de antena para extender el rango de comunicación y evitar obstáculos en el entorno al dirigir la energía de la señal en una dirección prevista.

Sin embargo, la dependencia de la comunicación mmWave en enlaces direccionales a través de la formación de haces plantea nuevos desafíos que no existen en los sistemas inalámbricos sobre las bandas de microondas. El *Transmisor (Tx)* y el *Receptor (Rx)* deben descubrir primero las direcciones antes de que puedan iniciar la comunicación de datos. Este proceso, generalmente se realiza omnidireccionalmente (o utilizando haces muy

anchos) en las bandas sub-6 GHz. Pero, debido a la alta pérdida de ruta, si los sistemas mmWave siguieran el mismo paradigma, el rango de descubrimiento mutuo sería mucho menor que el rango donde sería posible la comunicación direccional de alta velocidad. Por lo tanto, el descubrimiento mutuo debe realizarse de manera direccional. La fase de descubrimiento direccional puede durar mucho tiempo cuando la estación base y el usuario emplean matrices con muchos elementos de antena que forman haces estrechos. Mientras busca la estación base, el usuario con batería limitada siempre está en estado encendido quemando energía.

En [86] los autores muestran que este consumo de energía puede reducirse significativamente mediante el uso de un front-end totalmente digital de baja resolución en el lado del usuario. La razón es que la formación de haces a través de una interfaz digital reduce la latencia de descubrimiento (o retraso) en un orden de magnitud en comparación con una interfaz analógica. Por lo tanto, el usuario está en estado encendido durante un período de tiempo más corto, lo que conduce a ahorros considerables de energía. Nuestro mecanismo debe ser independiente de la gestión que se haga del canal inalámbrico, adaptándolo de esta manera a cualquier versión futura del canal que se tenga en la red WiFi.

En [17] se muestra la propuesta de implantar un esquema de encaminamiento distribuido para mejorar la eficiencia energética de la red de una manera distribuida sin comprometer significativamente los valores de retraso del tráfico de datos. Se empieza evaluando la red bajo dos métricas, consumo de energía y el retraso del tráfico. Escogiendo una escala de velocidades a manera de ahorro de energía, donde el consumo de energía va en función de los enlaces de la red, considerando el consumo de energía por enlace durante la transmisión de datos. Normalmente los dispositivos de red son diseñados de tal manera que, a menor velocidad de operación, menor consumo de energía. Demostrándose que con *Distributed Routing Scheme (HDEER)* se puede reducir el consumo de energía hasta en un 32% comparado con el *Algoritmo de Camino más Corto (SPT)*, en este caso Dijkstra. En [20] se hace un análisis de los diferentes protocolos de encaminamiento, su eficiencia de energía en las redes de malla inalámbricas y su comparación con un protocolo cruzado implantado con *Time Division Multiple Access (TDMA)*. Realizando un enfoque basado en la conservación de la energía y comparando los protocolos entre sí con funciones básicas de encaminamiento con el protocolo propuesto, *Cross-Layer Routing Protocol*. Hay dos familias de protocolos de encaminamiento, los proactivos, que anticipan la demanda de ruteo de paquetes y los reactivos que responden a los requerimientos. Entre estos dos grupos surgen los protocolos híbridos inspirados en los dos anteriores. El *Ad Hoc On demand Distance Vector Routing Protocol (AODV)* [87] es

el más popular para *Mobile and Hoc Networks (MANET)*. Es reactivo, las rutas se establecen por demanda y solo se mantienen los canales activos. Habilita un mecanismo simple de descubrimiento de ruta, *Request-Response, (RREQs-RREP)*. El *Ad Hoc on Demand Multipath Distance Vector Routing Protocol (AOMDV)* [88] descubre y mantiene varias rutas de llegada al mismo destino. Cuando un camino falla, instantáneamente hay un camino alternativo, eliminando la sobrecarga de redescubrimiento. El *Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV)* [89] es un protocolo proactivo, está basado en el algoritmo de Vector distancia, limitando los mensajes de control solamente a los nodos vecinos. Usa propiedades de difusión para transmitir la información de encaminamiento. Un estudio del comportamiento de estos protocolos en una *Wireless Mesh Networks (WMN)* permite observar que la energía residual (energía restante) para los protocolos de encaminamiento AODV, AOMDV y DSDV disminuye a medida que aumenta el tiempo. Aproximadamente cada 70 s se pierden 0,05 J en AODV y en AOMDV y 0,25 J cada 75 s en DSDV, con lo que este último consume más energía que los otros dos [20]. Por otra parte, los protocolos basados en TDMA son más eficientes en consumo de energía, la que es proporcional a la duración del ciclo de transmisión, mientras que la latencia es proporcional al tamaño de la red. Aproximadamente se pierden 0,038 J cada 50 s en AOMDV y 0,036 J en AODV, contrario a los protocolos TDMA que pierden apenas 0,002 J en AODV y 0,004 J en AOMDV. Lozano, en su artículo [90], plantea que las WMN proveen las características técnicas necesarias para el desarrollo tecnológico de las Smart Cities, permitiendo un eficiente uso de recursos y la implantación de un diseño que soporte QoS, por ello propone aplicar el algoritmo de encaminamiento basado en *Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA)*. Este algoritmo construye el camino más eficiente considerando el camino más corto, el consumo de energía, la pérdida de espacio libre y las restricciones de QoS, como el delay y el ancho de banda, todo al mismo tiempo. Se proponen *Algoritmos Evolutivos Multiobjetivos (MOEA)* y un modelo matemático basado en encaminamientos de multidifusión, que puede ser visto como un modelo genérico. La flexibilidad del modelo matemático permite su uso en diferentes formas, por lo que se realizaron estudios en una WMN, con tecnologías WiMAX (IEEE 802.16e), WiFi (IEEE 802.11 a, b, g, n) y Bluetooth (IEEE 802.15). Los resultados se comparan con el algoritmo SPT. En función de los resultados se pudo observar que MOEA es una opción para encontrar rápidamente una diversidad de rutas óptimas, además es válido para esquemas unicast o multicast, con o sin restricciones y en medios centralizados o descentralizados. Nuestro mecanismo es independiente del tipo de encaminamiento que se lleve a cabo en la red porque únicamente se centra en la reducción de la energía que consume los PA que de forma básica es independiente del algoritmo de encaminamiento utilizado.

Existen diferentes formas de ahorro de energía en WMN basadas en WiFi del protocolo IEEE 802.11s. El más común de estos modos, llamado light sleep mode, tiene como objetivo la conservación de energía, manteniendo el rendimiento del enlace de malla [91]. Se basa en la recepción periódica de balizas en pares de nodos, junto con un algoritmo de sincronización para minimizar la sobrecarga de los recibos de baliza programados. Se definen tres modos de potencia: active, light sleep and deep sleep mode. Un punto a analizar del algoritmo de ahorro de potencia del IEEE 802.11s es su escalabilidad en relación con el número de pares; con más pares más despertadores son necesarios cuando los enlaces están en modo light sleep [92]. Teóricamente, esto no debería ser un gran problema, ya que el tiempo necesario para recibir una trama de baliza de malla es normalmente muy bajo en comparación con el intervalo de baliza. Pero además del tiempo real de recepción hay retrasos adicionales debido al mecanismo de acceso al canal CSMA/CA y al tiempo para encender la radio del receptor, del procesamiento de la baliza y de reanudar el estado sleep. Para minimizar estos gastos generales de activación se propone un algoritmo llamado de sincronización de alineación de baliza cuyo criterio clave es minimizar el tiempo hasta que todos los pares estén alineados. En este escenario la sincronización de baliza requeriría 2.500 períodos de baliza hasta la terminación, se requiere 512 s para un intervalo de baliza de 200 TU (*Unidades de Tiempo de 1.024 μ s*). Los resultados de las pruebas muestran que, si bien no se puede lograr una relación constante sleep mode/ active mode al aumentar el número de enlaces entre pares de light sleep, el algoritmo propuesto aumenta con éxito el ahorro de energía. Normalmente es poco común que se utilice una red en malla en los centros que contemplamos en esta tesis. Sin embargo, en el caso que se usen, nuestro mecanismo sería independiente de la topología en malla porque solamente se centra en un mecanismo anexo a los PA de la red (que en este caso tendrían capacidad de encaminamiento).

1.5 Contribuciones y aportaciones

Para la propuesta planteada en esta tesis doctoral, partimos del hecho de que las redes WiFi [93] se encuentran de manera masiva en hogares inteligentes [94,95], empresas, edificios públicos, campus de universidades y ciudades inteligentes [96,97]. En estos lugares se usan varios PA WiFi que están normalmente siempre encendidos y por consiguiente consumiendo una gran cantidad de energía. Las contribuciones de esta tesis doctoral son las siguientes:

- Se ha procedido a observar el uso de los PA del hospital Luis Vernaza de la ciudad de Guayaquil (Ecuador) por parte de los trabajadores del hospital y de sus usuarios habituales, durante un largo período de tiempo y a varias horas del día y la noche. Se aprovechó la condición del doctorando como gestor del sistema de comunicaciones de dicho hospital durante ese tiempo. A partir de esta observación se pudo obtener unas estadísticas muy prolijas del uso de todos los PA de la instalación y se pudo obtener un modelo de consumo energético de cada PA en función del tráfico que cursaba por la red. El tipo de tráfico que cursaba por dicha red era de tipo multimedia (en menor medida), tráfico *best effort* (correos electrónicos, mensajería, acceso a Internet) y en menor medida acceso a grandes archivos de datos para acceder a datos gráficos de las historias clínicas de los pacientes. En ningún caso se hizo acceso a datos de sensores y no se contempló ninguna WSN conectada a los PA WiFi. La topología de la red era un Sistema WiFi distribuido con tramos de fibra óptica y un punto de conexión con Internet. El encaminamiento de datos es estático y gestionado estáticamente a partir de los distintos segmentos de red a nivel de TCP/IP. Por este motivo no hubo problemas con algoritmos de encaminamiento dinámicos. La importancia de esto es que este hospital tenía una densidad de PA de 73, además, en el Anexo se muestra la red y la ubicación de los cuartos de datos del hospital, la ubicación de algunos PA en áreas como la sala UCI de Emergencia y la bodega de la bótica, así como un listado de parte activa de la red distribuida en los cuartos de datos. Algunas trazas de datos que demuestran el consumo de energía monitorizado a través de la consola de administración de la red se muestran en el Capítulo 2.
- A partir del profundo estudio anterior se logró obtener un modelo de rendimiento energético de un PA WiFi a partir del tipo y cantidad de tráfico que cursaba y considerando todas las variables de consumo de energía que tiene el PA, es decir: número de interfaces radio, el gasto energético del circuito y el consumo de operación o estabilización. Estos valores pueden variar según el tipo de PA que se tome en cuenta, sin embargo, la expresión matemática es válida para todo PA estándar.
- Con la experiencia ganada en los puntos anteriores, se construyó un modelo matemático basado en la optimización de distintos parámetros necesarios para diseñar un circuito electrónico capaz de controlar los ciclos de carga y descarga de una batería que se conecta a un PA WiFi. Este modelo matemático estima que, en general, si el período de carga de la batería es

menor que el período de descarga, en global se obtiene una reducción del consumo de energía del PA WiFi. Sin embargo, se ha de tener en cuenta el modelo de consumo de energía de un PA estimado en el punto anterior. Con nuestro mecanismo la batería y el circuito de control electrónico están acoplados externamente a cualquier PA WiFi. De esta manera se puede aplicar a cualquier tipo de PA. Nuestro mecanismo intenta continuamente acortar el período de carga de la batería y aumentar el período de descarga de la batería. Cuando se carga la batería, el PA utilizaría el suministro eléctrico estándar. Después de ese período de tiempo, la batería se descarga suministrando energía eléctrica para el PA. Ese ciclo está continuamente encadenado (ciclos de carga y descarga). Construimos un prototipo del mecanismo funcional y el conjunto de pruebas experimentales realizadas verificó el modelo matemático. Esas pruebas experimentales revelan que es posible ahorrar energía con nuestro mecanismo. La proyección de resultados para varias horas muestra que se podría ahorrar una cantidad considerable de energía.

Estas contribuciones se han recogido, a modo de aportaciones novedosas, en el siguiente artículo indexado en el *Journal Citation Report (JCR)* en la categoría ... “Instruments & Instrumentation”, dentro del *Primer Cuartil (Q1)* [98]: Publicado en la revista *Sensors* de la editorial MDPI, con el título “Hardware Mechanism for Energy Saving in WiFi Acces Points”. Noviembre 2019. Volumen 19. Además, el artículo pertenece al número especial “Hacia un *Internet Industrial de las Cosas (IIoT)*”. Los autores son: García Baquerizo, J.P.; Suárez, A.; Macias, E.; Salas, E.

1.6 Estructura de la memoria

En el capítulo 1 se presentan los antecedentes, objetivos, la motivación, el estado del arte relacionado con el contexto de la tesis, las contribuciones y aportaciones de esta tesis.

En el capítulo 2 se presenta un análisis de distintas fuentes de energía susceptibles de ser usadas para alimentar los PA WiFi. Después, se discute sobre la más apropiada para ser usada en nuestro mecanismo. Para justificar el uso de nuestro mecanismo de ahorro de energía, se presenta un estudio empírico de consumo de energía, el del *Instituto de Neurociencias (INC)* y el del *Hospital Luis Vernaza (HLV)* que demuestran que el consumo sería menor si se pudieran mantener apagados algunos de los PA WiFi o sus interfaces de red durante parte del día. Se finaliza dicho capítulo con la presentación de un modelo de consumo en función del tráfico multimedia que cursan los PA WiFi.

En el capítulo 3 se presenta el análisis y diseño de nuestro mecanismo de ahorro de energía. Se presenta los principios de diseño de dicho mecanismo, un modelo formal de optimización matemática que guía la posterior implantación del mecanismo y un análisis teórico de funcionamiento de dicho mecanismo identificando dos modos de operación (pasivo y activo).

En el capítulo 4 se presenta la verificación experimental del funcionamiento de nuestro mecanismo y se analiza su funcionamiento para los dos modos de operación identificados en el capítulo 3. Se analizan los resultados desde un punto de vista comparativo y destacando las mejoras que se introducen en los resultados buscados y/o alcanzados.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones obtenidas, se revisan las líneas de investigación abiertas y se hacen recomendaciones para trabajar con otras fuentes de energía y con una tasa de bps variable.

En un Anexo se presentan algunos detalles sobre el Hospital Luis Vernaza de la ciudad de Guayaquil en el que se trabajó de forma práctica en esta tesis doctoral.

Capítulo 2. Ahorro de energía en puntos de acceso de redes WiFi

En este capítulo presentamos datos de otros autores sobre el consumo energético de los sistemas inalámbricos, su importancia y repercusión en la Sociedad. Además, revisamos los métodos que proponen con el fin de obtener ahorro energético y mejora del desempeño de la red de comunicación. Comentamos sobre algunas fuentes alternativas de energía, como sistemas PoE, EH y uso de ES. Por último, presentamos resultados experimentales de la potencia consumida en VoIP y en redes WiFi hospitalarias; para este último caso, hacemos un análisis de la potencia consumida en un PA Ruckus.

2.1 Discusión sobre posibles fuentes de energía para puntos de acceso WiFi

Actualmente se pueden considerar varias fuentes de alimentación de los PA WiFi. En este apartado presentamos el aprovechamiento de la energía electromagnética, ES y la alimentación PoE, con el fin de revisar la fuente más adecuada, considerando criterios como: complejidad de su diseño técnico, rendimiento energético, aplicabilidad a nuestro mecanismo.

2.1.1 Aprovechamiento de energía de ondas electromagnéticas

La primera cuestión que nos planteamos al estudiar posibles fuentes de alimentación de PA WiFi fue el aprovechamiento de la energía electromagnética circundante, que se enmarca dentro de la técnica denominada *EH*. El objetivo era comprobar si sería posible añadir una fuente de alimentación de este tipo para proveer más energía que la tomada de la que proporcionan los proveedores de energía eléctrica o bien implantar un mecanismo de almacenamiento y aprovechamiento alternativo. Para ello:

- En primer lugar, estudiamos varios trabajos [35] y [36] prácticos para ganar experiencia en este tipo de fuente de energía.
- Se elaboró un circuito propio mediante el cual se comprobó el funcionamiento y sus limitaciones prácticas.

Según Faraday [99], cuando un conductor en un circuito cerrado se acerca a un campo magnético se genera una fuerza electromagnética inducida (\mathcal{E}), que responde a la expresión:

$$\mathcal{E} = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Dónde: Φ_B es el flujo magnético que pasa por el conductor, N el número de vueltas o espiras del alambre conductor. La *fuerza electromagnética (fem)* inducida en una espira cerrada es igual al negativo de la tasa de cambio del flujo magnético a través de la espira con respecto al tiempo.

Siendo el flujo magnético:

$$\Phi_B = BACos\phi$$

Dónde: B es el campo magnético, A el área del conductor y ϕ el ángulo entre ellos.

Además:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R}$$

Dónde: I es la corriente inducida y \mathcal{E} es la fem inducida.

Por lo tanto, para aumentar la corriente inducida a emplear en un circuito, como una fuente DC o dispositivo de baja potencia, debe aumentar la *fem* y a su vez el valor del campo magnético circundante. Si analizamos la expresión que define la intensidad del campo magnético en un solenoide:

$$B = N \left(\frac{\mu_k I}{2r} \right)$$

Dónde: B es la intensidad del campo magnético, N el número de vueltas del alambre conductor, I la intensidad de corriente que atraviesa el conductor, μ_k es la permeabilidad magnética y r es la distancia del centro del solenoide hasta el conductor.

Determinamos que las opciones para aumentar el campo magnético podrían ser: incrementar I , lo que produciría un mayor gasto energético, o aumentar el bobinado (N).

Además, para obtener provecho de la energía que se puede recoger de un campo magnético hay que tomar en cuenta que el radio de acción (cobertura), distancia hasta donde tiene incidencia el campo magnético, suele ser limitado. Al igual que los campos eléctricos, los campos magnéticos son más intensos en los puntos cercanos a su origen y su intensidad disminuye rápidamente conforme aumenta la distancia a la fuente. Además, la radiación electromagnética se caracteriza por su longitud de onda y su frecuencia, las que están relacionadas por la expresión:

$$\lambda f = c$$

Donde: la longitud de onda (λ) es la distancia que existe entre los puntos correspondientes a un ciclo completo de la onda electromagnética y se mide en metros (m), la frecuencia (f) es el número de oscilaciones completas que pasan por un determinado punto por unidad de tiempo y se mide en hertzios (Hz) y (c) es el valor de la velocidad de la luz en el vacío (3×10^8 m/s²). Como el valor de c es constante, las señales de baja frecuencia tienen una longitud de onda muy larga, mientras que, en las señales de

frecuencia alta, la longitud de onda sería corta. La diferencia entre unos campos y otros está en la frecuencia, cuanto más elevada es su frecuencia mayor es la cantidad de energía que transporta la onda [100]. Ello nos lleva a pensar en aumentar la frecuencia, para incrementar la intensidad generada del campo magnético y que pueda ser utilizado para alimentar a los dispositivos circundantes con mayor eficiencia y por más tiempo. Por lo que podemos usar un resonador que permita llevar la señal a una baja potencia y obtener una frecuencia en el orden de los miles de Hertzios, pero cuidando que la frecuencia generada sea la misma en los dos dispositivos. Al resonar a la misma frecuencia se logra que el voltaje sea amplificado y la corriente sea mayor, con lo que se consigue la energía necesaria para emplearla en algún dispositivo. En la Figura 2.1, se muestra un oscilador de Colpitts [101], con el que se obtiene una frecuencia aproximada de 58 MHz, utilizando una inductancia de 150 nH y capacitores de 100 pF. El cálculo de la frecuencia se realiza de la siguiente forma:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L\left(\frac{C_1C_2}{C_1+C_2}\right)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{150nH*\left(\frac{10000pFpF}{200pF}\right)}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{7500nHpF}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{7.5\cdot 10^{-18}s^2}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi*2.738*10^{-9}s} = 0.058*10^9 Hz = 58MHz$$

Donde: L es la inductancia, C_1 y C_2 los capacitores del circuito LC y f_0 la frecuencia.

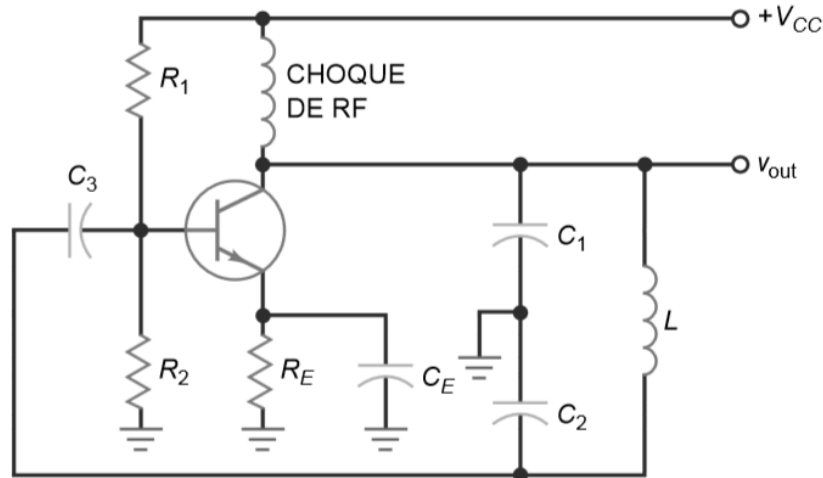


Figura 2.1: Modelo de Oscilador Colpitts
Fuente: [101]

Por lo tanto, hemos incrementado la frecuencia, amplificado el voltaje y la corriente, consiguiendo aumentar la posibilidad de usar la energía electromagnética circundante para alimentar dispositivos de bajo voltaje.

Diseño de prototipo de control para carga de batería y operación de un PA

Realizamos el diseño de un prototipo de circuito de control, mostrado en las Figuras 2.2, 2.3 y 2.4, en las que se muestra la tabla de verdad con las variables consideradas, las ecuaciones y el circuito lógico respectivamente. Este prototipo inicial no implantado consideraba la posibilidad de que el PA podría recibir a través de su antena (*R*) energía de manera ocasional de las ondas electromagnéticas circundantes para mantener un proceso de almacenamiento y posterior empleo de energía (no considerado en el diseño). En este caso se considera que el PA se alimenta originalmente desde el PSE a través del puerto PoE o desde la batería si es que tiene carga (*S*). Consideramos relevante que la batería cumpla períodos de carga y descarga de manera repetitiva. Las salidas consideradas están por lo tanto relacionadas a la operación de la batería: está descargada y se la conecta al circuito PoE para su carga (*S0*), la batería está cargada y puede alimentar al PA (*S1*) (independientemente de si se recibe energía para almacenamiento desde *R*) y se conecta de manera simultánea la energía del PoE al PA (*S2*) (Igual que a la batería *S0*).

TABLA DE VERDAD VARIABLES DE CONTROL						
P	Q	R	S	S0	S1	S2
0	0	0	0	1	0	1
0	0	0	1	0	0	0
0	0	1	0	1	0	1
0	0	1	1	0	0	0
0	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	0
0	1	1	0	1	0	1
0	1	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1
1	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1
1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	0	1	0

P: HAY TRAFICO
Q: HAY PERSONAS
R: ANTENA AUTOALIMENTADA
S: BATERIA FULL
S0: CARGAR BATERIA X POE
S1: CONECTAR ALIMENTACION DE BATERIA
S2: CONECTAR ALIMENTACION POE
CADA VEZ QUE SE CARGA LA BATERIA SE ENCIENDE EL POE

TRANSMISION SOLO DE BALIZAS

Figura 2.2: Tabla de Verdad para variables de alimentación de la antena

Las ecuaciones que se obtienen se muestran en la Figura 2.3. El circuito de tres salidas se muestra en la Figura 2.4.

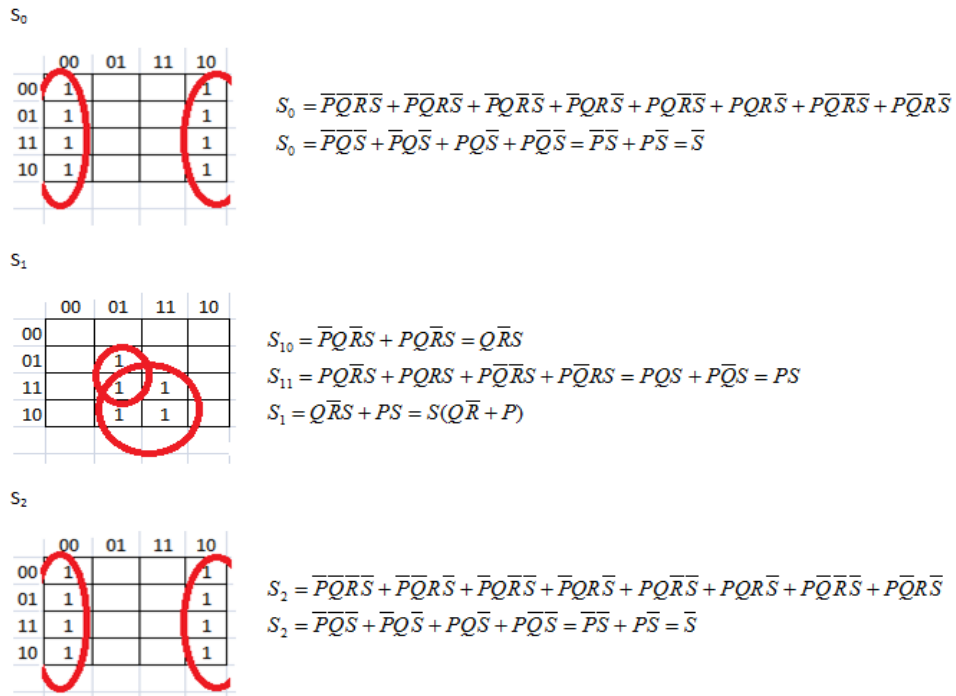


Figura 2.3: Mapas de Karnaugh y ecuaciones

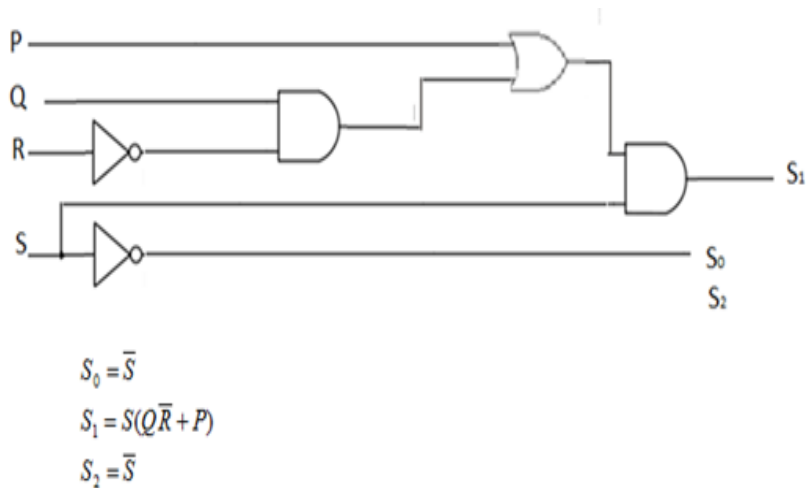


Figura 2.4: Diseño lógico del circuito de alimentación

Las salidas S_0 y S_2 se activarían cuando la batería está descargada, la activación de S_0 significa que la batería se cargaría desde el circuito PoE y en el caso de S_2 que el circuito recibiría carga directa del PSE debido a que la batería no tiene carga. En cambio, S_1 activa la alimentación desde la batería al PA al detectarse que tiene carga completa, hay transmisión de datos y personas conectadas al PA.

Ejemplos de aprovechamiento de las corrientes inducidas

En [35] se genera una fuente de voltaje DC inalámbrica, a partir de ondas electromagnéticas en la banda de frecuencia media. Se expone el diseño y la implantación de un circuito electrónico pasivo que cumple la función de convertir las ondas electromagnéticas emitidas por estaciones de radio difusión AM en voltaje de corriente directa. Los autores fabricaron un prototipo y llevaron a cabo pruebas de campo donde se demostró el buen funcionamiento del prototipo. Los resultados obtenidos demuestran que los niveles de potencia suministrados por la fuente de voltaje permiten alimentar dispositivos electrónicos tales como: teléfonos celulares, computadores personales, asistentes digitales personales, tabletas electrónicas y cualquier otro dispositivo que requiera ser alimentado con corriente continua, logrando obtener una movilidad y portabilidad completa. Para ello sintonizaron el circuito resonante a la frecuencia de trabajo del transmisor de 50 KW de la estación de radio difusión (*Radio Caroní 740KHz*). La antena del transmisor se encuentra ubicada a 184 m aproximadamente sobre el nivel del mar. Se realizaron mediciones eléctricas de campo, dentro de un radio de 10 Km de distancia y a distintas alturas sobre el nivel del mar con respecto a la antena de la estación de radiodifusión. Los niveles de tensión arrojados por la fuente de voltaje de corriente directa inalámbrica dependen de la potencia de transmisión, de la longitud y polarización de la antena, de la distancia y la altura entre las antenas transmisora y receptora. Los voltajes que se obtuvieron iban desde los 0,4 V a distancias cercanas hasta los 12 V a 5 Km de distancia.

En [36] plantearon el aprovechamiento de ondas recibidas desde un horno microondas, para alimentar dispositivos de bajo consumo de energía, del orden de los mW. Los resultados experimentales mostraron que la fuga de ondas recibida por una antena dipolo fue de aproximadamente 0 dBm (1 mW) en un punto de 5 cm delante de la puerta. Una rectenna que consiste en una antena dipolo y una bomba de carga puede convertir la energía de microondas filtrada en una corriente continua. Cuando un horno microondas funciona durante 2 m, se obtuvieron 9,98 mJ. Demostrándose que esta energía es suficiente para encender un temporizador de cocción digital para realizar una

cuenta regresiva durante 3 m y emitir un pitido durante 2,5 s. También se demostró el funcionamiento de otros dispositivos de cocina.

Uso de la corriente inducida para detectar llamadas telefónicas

Revisamos un circuito sencillo de detección de llamadas de teléfonos móviles para analizar el uso de la corriente que la antena del teléfono móvil induciría. El dispositivo a utilizar debe estar muy cerca del teléfono celular para que el sensor detecte el campo emitido por el receptor del móvil durante la llamada entrante. Su funcionamiento está basado en los principios de la ley de Lenz [99]: si el flujo magnético aumenta, la bobina lo disminuiría; si disminuye lo aumentaría. Para conseguir estos efectos, tendría que generar corrientes que, a su vez, creen un flujo que se oponga a dicha variación. Se dice entonces que en la bobina ha aparecido una corriente inducida, y, por lo tanto, una fuerza electromotriz inducida.

Al inicio, la bobina tiene un flujo nulo, por lo que la corriente (I) sería nula también. Al recibir el teléfono móvil la llamada telefónica, parte del flujo magnético producido atravesaría la bobina del dispositivo, por lo que el flujo de la bobina pasaría de ser nulo a tener un valor. La bobina reaccionaría tratando de anular este aumento de flujo magnético. Lo haría creando una I en el sentido indicado en la Figura 2.5, para a su vez originar un flujo contrario que se opone al aumento impuesto desde el exterior [102]. Una vez transcurrido cierto tiempo, la bobina se ha amoldado a las nuevas condiciones y el flujo que la atraviesa sería el que le impone las señales de radiofrecuencia. Al amoldarse dejaría de crear la corriente indicada, que pasaría de nuevo a ser cero. Si se aleja el móvil del circuito, el flujo magnético que estaba atravesando la bobina disminuiría, por lo que la bobina reaccionaría creando de nuevo una I , esta vez de signo contrario al anterior, para producir un flujo que se oponga a la disminución.

Procedimos a implantar un circuito electrónico en una protoboard (Figura 2.6) a partir del esquema de la Figura 2.7, con el que hicimos pruebas de funcionamiento, para estudiar de manera realista si se podría aprovechar la energía eléctrica generada en la bobina. La idea es aprovechar la corriente inducida para alimentar baterías u otros dispositivos, mientras exista flujo en la bobina y el campo magnético, es decir durante el período de la llamada. Primero se alimenta el circuito con una batería o fuente de 9 V, verificando que el led (dispositivo que permite observar la corriente eléctrica producida) se encuentre apagado antes de hacer las pruebas de detección. Luego acercamos un teléfono móvil y le efectuamos la llamada; si todo va bien el led empezaría a parpadear. Si

no parpadea subimos poco a poco el potenciómetro hasta que empiece a parpadear. El led se apagaría cuando se cierre la llamada.

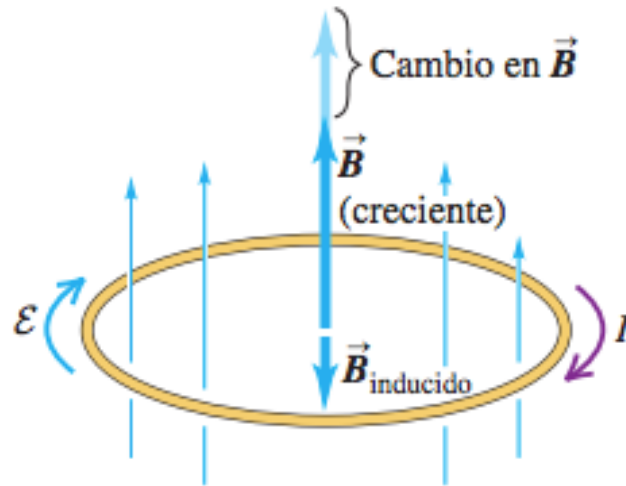


Figura 2.5: Corriente inducida por un campo magnético
Fuente: [99]

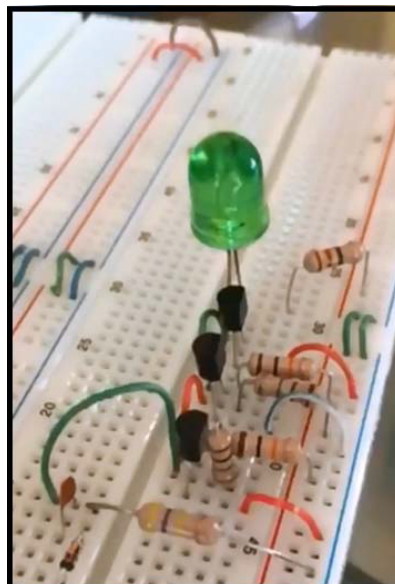


Figura 2.6: Circuito detector de llamadas implantado en protoboard

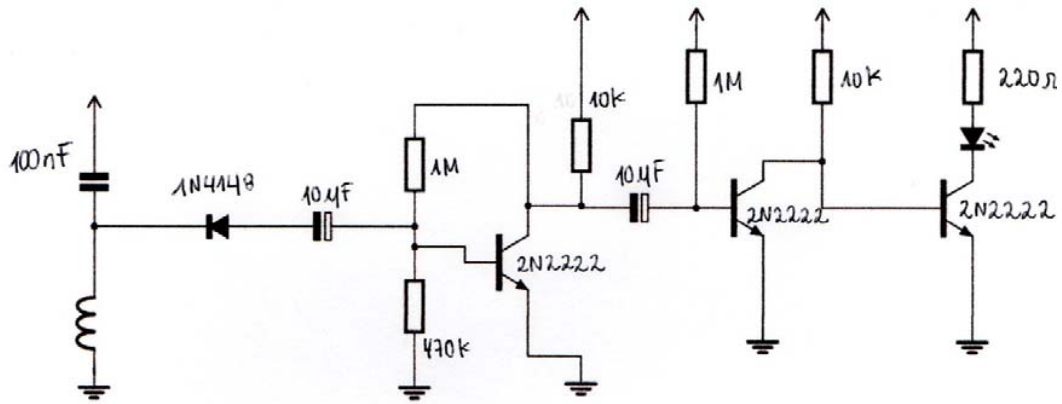
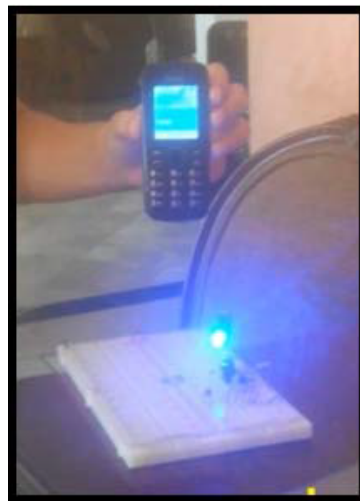


Figura 2.7: Circuito detector de llamadas

Fuente: Edison Viveros, Editronikx, tomado de: <https://www.youtube.com/watch?v=v7oeS2hDQ3I&t=3s>

Los resultados experimentales obtenidos (Figura 2.8.a) fueron muy variados: en teléfonos móviles de gama baja tipo Nokia o Motorola se producen mejores resultados y en teléfonos inteligentes las señales casi no eran detectadas (posible influencia de la frecuencia oscilante). Incluso el circuito se comportó como detector de presencia a distancias muy cortas. Esto es, pasando una mano cerca del circuito se encendía el led. Además, su respuesta variaba mucho en función de la antena utilizada (simple alambre o una antena monopolo, Figura 2.8.b).



(a)



(b)

Figura 2.8: Funcionamiento de circuito detector de llamadas: a) encendido del led para detectar llamadas al teléfono móvil, b) uso de una antena monopolo con la que se detectaba el paso de una mano cercana.

Como se puede comprobar, es relativamente sencillo construir un circuito resonante que permita implantar EH aprovechando las ondas electromagnéticas utilizadas para transportar la información de forma inalámbrica. Además, el coste económico de producción de este tipo de dispositivos es reducido porque los circuitos son de reducida complejidad. El rendimiento energético de esta técnica sería muy reducido para el aprovechamiento de las corrientes inducidas por las comunicaciones en un PA WiFi debido a que las antenas de esos componentes tienen tamaño reducido y son de poca capacidad receptiva.

Por otro lado, dado que un porcentaje elevado de las comunicaciones se lleva a cabo hoy día usando teléfonos inteligentes, se podría pensar en el aprovechamiento de las ondas producidas por las antenas de esos teléfonos. Sin embargo, como hemos demostrado en nuestros resultados experimentales, los circuitos tradicionales no se pueden utilizar y se requeriría de circuitos más complejos cuyo coste cambiaría. Y todo ello, para obtener una reducida cantidad de energía.

Por estas razones descartamos la utilización del EH para nuestros propósitos.

2.1.2 Fuente de energía solar

Otra forma de EH consiste en reconvertir la energía que proporcionan los receptores de energía emitida por el Sol en energía eléctrica. El desarrollo de nuevas tecnologías de ES se considera una de las muchas soluciones clave para satisfacer una creciente demanda mundial de energía. Sin embargo, el rápido crecimiento en el campo de las tecnologías solares se enfrenta a varias barreras técnicas, como la baja eficiencia de las células solares, el *Bajo Equilibrio de Sistemas (BOS)*, los obstáculos económicos (por ejemplo, altos costos iniciales y la falta de mecanismos de financiación), y obstáculos institucionales (por ejemplo, infraestructura inadecuada y escasez de mano de obra calificada). Con el fin de ayudar a abrir nuevas rutas con respecto a la investigación y las prácticas de ES, en [43] se discute una hoja de ruta futura para el aprovechamiento de la ES.

Las fuentes de energía renovables juegan un papel importante en el ahorro de energía, por lo que se convierte en la esperanza real de mejorar una de los principales desafíos para las redes WSN, que es la vida útil de la red, especialmente cuando los nodos de sensores se colocan en lugares inaccesibles. *La Recolección de ES (SEH)* es uno de los tipos de energía renovable más abundantes y accesibles, que se produce al recoger la luz solar y convertirla en electricidad. En [44] se analiza un nuevo protocolo llamado *Protocolo Centralizado de Jerarquía de Agrupación Adaptativa de Baja ES y Baja Pérdida (SLLEACH-C)* y se revisa el rendimiento de la red.

Como sabemos una WSN es una red de nodos de sensores desplegados espacialmente con recursos de energía limitados. Por ello en [45] los autores se enfocan en diseñar un sistema robusto de recolección de ES para mejorar el tiempo de vida de los nodos sensores. El sistema de suministro de ES propuesto consiste principalmente en un panel solar, batería recargable y un circuito de control. Para obtener suficiente voltaje para cargar la batería, la energía eléctrica generada a través del panel es impulsada por el convertidor elevador. Los diferentes nodos sensores reciben energía de este sistema. Los resultados experimentales muestran que este sistema compacto y autosuficiente permite que los nodos de WSN basados en exteriores funcionen con éxito.

Las WSN son el componente básico de la infraestructura moderna del Internet de las cosas, en edificios, estacionamientos y ciudades inteligentes. Los nodos WSN sufren una importante restricción de diseño ya que la energía de su batería es limitada y solo pueden funcionar durante unos pocos días dependiendo del ciclo de trabajo. En [46], proponen una nueva solución a este problema de diseño mediante el uso de ES fotovoltaica. Se plantea un sistema de recolección de ES altamente eficiente y único para nodos WSN basados en baterías recargables. Idealmente, los *optimized Solar Energy Harvesting Wireless Sensor Network (SEH-WSN)* deben funcionar durante una vida útil de red infinita (en años). Se aplica el sistema de carga de batería con seguimiento de punto de máxima potencia para nodos WSN. El objetivo de la investigación es aumentar la eficiencia general del sistema de recolección, que depende de la eficiencia del panel solar, la eficiencia del convertidor DC-DC controlado por MPPT y la eficiencia de la batería recargable.

Se han desarrollado varios modelos para el sistema de aprovechamiento de la ES y se realizó una simulación iterativa en MATLAB / SIMULINK para ES, con convertidores DC-DC con MPPT para lograr resultados óptimos. A partir de los resultados de la simulación, se demuestra que el sistema de recolección de ES tiene una eficiencia del 96%.

En [103, 104] se plantean estudios del uso de la ES en las redes de malla WLAN que utilizan la retransmisión de salto múltiple entre los *PA de Malla (MAP)* y *Puntos de Malla (MP)*, para solucionar el costo que involucra el proporcionar la energía eléctrica y las conexiones de red cableadas a la malla. Esto es especialmente en las zonas donde se brinda cobertura en áreas exteriores extendidas como los Campus Universitarios o Empresariales. Aunque la alimentación se puede suministrar a través de PoE, dicha solución requiere una conexión de red por cable, que a menudo es muy costosa. En las redes de malla WLAN con ES, la asignación de recursos de nodo incluye la asignación de un panel solar y de una batería a cada nodo de malla. Desafortunadamente, IEEE 802.11 no incluye ningún procedimiento nativo que permita que un PA logre un ahorro de energía, y este aspecto de IEEE 802.11 es un impedimento para el desarrollo de una

infraestructura WLAN real de ahorro de energía. En el clásico IEEE 802.11, el ahorro de energía se ocupa de las estaciones de usuario final, ya que se supone que los puntos de acceso tienen conexiones de alimentación continuas.

Cuando se realiza la configuración del panel solar / batería, se determina un perfil de carga para cada nodo. El perfil de carga es una función de tiempo que representa la carga de trabajo máxima para la que está diseñado el nodo en cuestión. Para una ubicación geográfica dada, los datos meteorológicos públicos se utilizan para diseñar el nodo sujeto a una probabilidad de interrupción del objetivo. Por esta razón, se introducen algoritmos de control que intentan mantener el funcionamiento sin interrupciones del nodo introduciendo a veces un déficit de capacidad. También se muestra que los algoritmos de control evitan interrupciones incluso a altos niveles de exceso de carga y se muestra que funcionan bien en comparación con los límites inferiores del déficit de capacidad. Los resultados dan una fuerte motivación para incluir el ahorro de energía en los PA en redes de malla WLAN externas. En estos experimentos, se observa que el rendimiento del PA es independiente del tipo de tráfico o proceso de llegada, siempre que el consumo de energía promedio del PA sea el mismo. En la Figura 2.9 se muestran los componentes que permiten la conversión de ES en eléctrica y su aprovechamiento para la alimentación del PA o del MAP.

De acuerdo a los artículos comentados existen varios avances en el uso de la ES en las redes WiFi, más en particular para áreas en las que el acceso a otro tipo de energía es complejo, como grandes áreas externas (*outdoor*) donde el cableado eléctrico representa un alto costo.

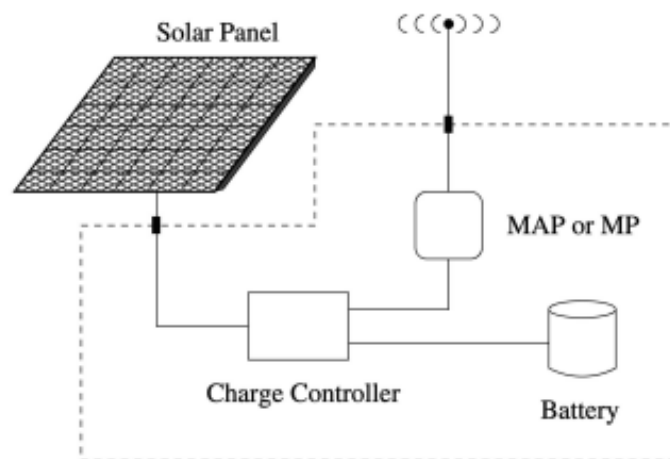


Figura 2.9: Componentes básicos para la alimentación solar del PA

Fuente: [103]

Dado que disponemos de la fuente solar este tipo de energía puede ser empleada con regularidad, sin embargo, su implantación requiere cubrir costos como el de los paneles solares, el controlador de carga y la batería. Dicha implantación sería más compleja para ambientes internos.

Por estas razones descartamos la utilización de paneles solares para nuestro propósito.

2.1.3 Fuente de energía mediante Power over Ethernet

Desde la ratificación del primer estándar PoE en 2003 (IEEE 802.3), el uso de PoE ha aumentado mucho y ha avanzado hacia nuevas aplicaciones: proporciona enormes beneficios en relación con la facilidad de instalación, ahorro de costes y proporciona un estándar de alimentación unificado y seguro para uso en todo el Mundo. El IEEE 802.3af proporcionó hasta 15,4 W de potencia de salida a cada dispositivo sobre dos pares de cables *Categoría 5e (Cat5e)*. El estándar IEEE 802.3at, también conocido como PoE+, introdujo el *Tipo 2* o equipo fuente de energía, *PSE / Dispositivo Alimentado (PD)*, capaz de soportar 30 W de potencia de salida y 25,5 W de potencia de carga. Este último es principalmente una extensión del primer estándar.

El principal factor limitante que afecta el uso de PoE en nuevas aplicaciones es la cantidad de potencia disponible. Mientras que 15,4 W en la fuente de alimentación es suficiente para la mayoría de los teléfonos IP y los puntos de acceso 802.11a/b/g, no es suficiente para las cámaras de vídeo IP, 802.11n y *Zoom Panorámico (PTZ)*. Por esa razón se lanzó IEEE 802.3at en el 2009, especificando 30 W en la fuente PoE. Hoy en día existe la demanda de una potencia aún mayor para soportar dispositivos adicionales conectados a la red Ethernet, como cámaras de seguridad PTZ, quioscos, *Terminales Punto de Venta (POS)*, clientes ligeros, puntos de acceso 802.11ac, celdas pequeñas e iluminación tipo *Light-Emitting Diode (LED)* conectada. Es por ello que desde el 2013 se iniciaron los estudios de un nuevo estándar, el IEEE 802.3bt, que aumenta la potencia PoE máxima disponible principalmente utilizando los cuatro pares del cableado estructurado. IEEE 802.3bt [105] extiende la información de clasificación de potencia intercambiada durante la negociación inicial para permitir una capacidad significativa de administración de energía, permitiendo el soporte de múltiples clases PoE, al mismo tiempo que es compatible con versiones anteriores. Estas mejoras resuelven el reto de los sistemas de suministro PoE de mayor potencia y eficiencia (Tabla 2.1).

Para alimentar un dispositivo PoE actualmente se utilizan los cuatro pares de cables, ya que incorporan un transformador de toma media en cada par de datos, a este sistema mostrado en la Figura 2.10 se le conoce como Método A.

Tipo	Standard	PSE Mínima Potencia de salida	PD Mínima Potencia de entrada	Categoría de cable	Longitud de cable	Energía
1	IEEE802.3af	15,4W	12,95W	5e	100m	2 pares
2	IEEE802.3at	30W	25,5W	5e	100m	2 pares
3	IEEE802.3bt	60W	51-60 W	5e	100m	2 pares clase 0-4 4 pares clase 0-4 4 pares clase 5-6
4	IEEE802.3bt	90W	71-90 W	5e	100m	4 pares clase 7-8

Tabla 2.1: Cuadro de estándares PoE
Fuente: [105]

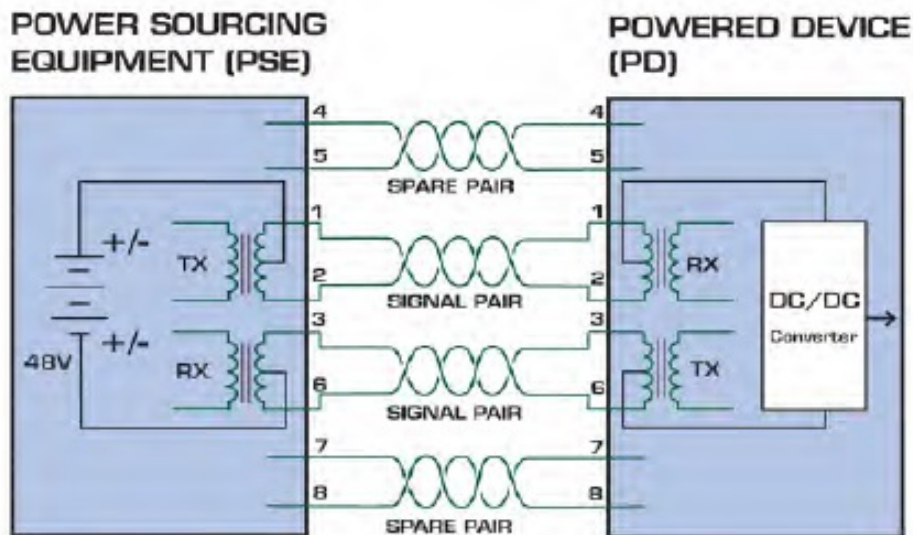


Figura 2.10: Método A de conexión PoE
Fuente: [105]

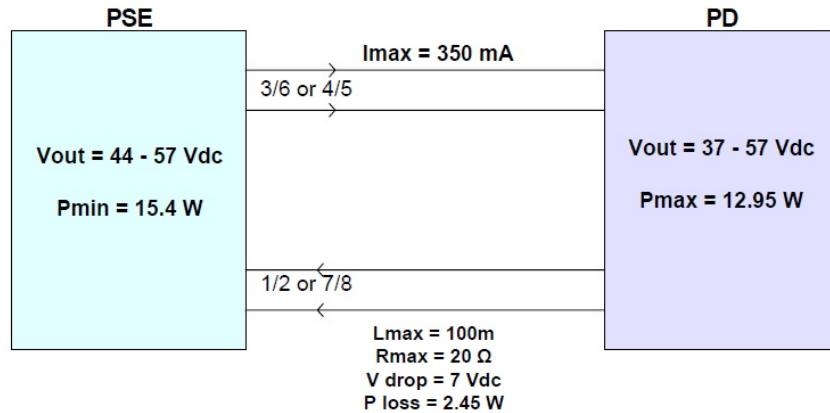


Figura 2.11: Conexión PoE (PSE a PD)

Fuente: [105]

Para minimizar las pérdidas en el cable, que puede llegar a 100 m de longitud, la tensión utilizada es de 48 V. En el caso de un cable de categoría 5e, Figura 2.11, la resistencia es de 20Ω con 100 m de largo, cuando normalmente no debe superar los $9,38 \Omega$ [106]. En todo caso es el mismo dispositivo PoE incorpora un convertidor DC/DC para obtener la tensión que se necesite.

La aplicación de energía mediante PoE requiere de tres fases (Figura 2.12):

- Descubrimiento del dispositivo PoE: el dispositivo que suministra PoE (PSE) comprueba que entre los pares de transmisión y recepción existe una resistencia típica de $25 \text{ K}\Omega$, inyectando una tensión comprendida entre 2,5 y 10 V, midiendo la corriente que circula por el circuito. Un dispositivo que no cumpla con el estándar PoE no tendría esta resistencia de $25 \text{ K}\Omega$ entre los pares de transmisión y recepción.
- Clasificación del dispositivo PoE: el equipo PSE determina las necesidades de potencia del dispositivo PoE a alimentar, de tal manera que se previene el hecho de conectar un dispositivo PoE que necesite más potencia de la que el propio PSE es capaz de suministrar.
- Operación en PoE: el PSE suministraría el voltaje requerido durante toda la operación.

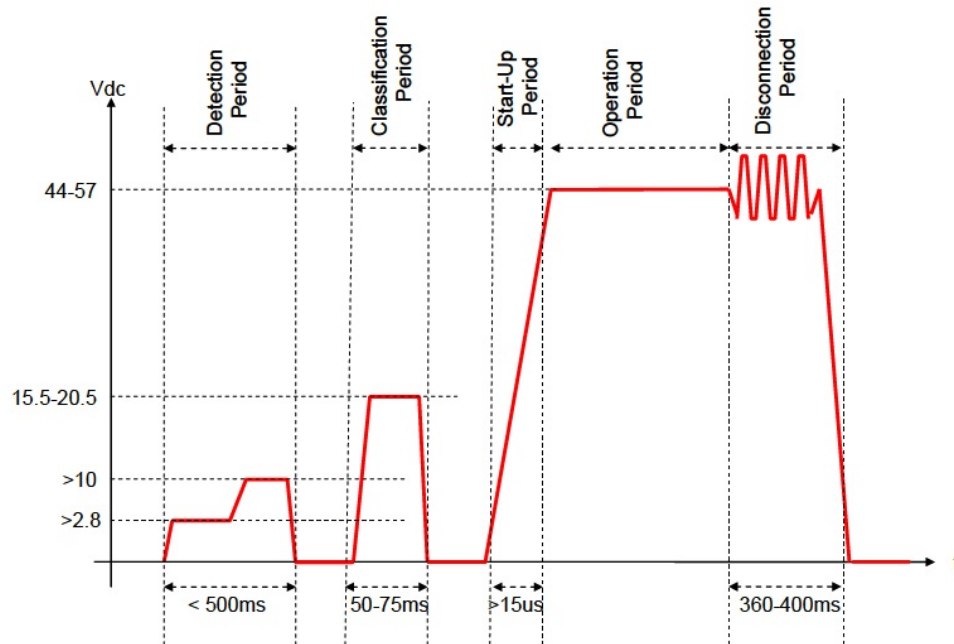


Figura 2.12: Fases de alimentación PoE
Fuente: [106]

La tecnología PoE proporciona la cantidad de potencia requerida para alimentar al mismo tiempo el PA y la batería de nuestro mecanismo. Además, el voltaje entregado al circuito permite cargar perfectamente la batería que empleamos. Para la implantación solo requerimos tomar la salida de manera directa hacia nuestro circuito.

Los PA estudiados se encuentran ubicados al interior de edificios gubernamentales y algunos de ellos en áreas críticas, por tal motivo una implantación PoE es conveniente.

Por esta razón seleccionamos este método de alimentación para nuestro propósito.

2.2 Discusión sobre algunos métodos de ahorro de energía existentes

El consumo de energía de los PA WiFi depende de varios parámetros [107]: el consumo de energía eléctrica, el número de los Wireless Terminal (WT) conectados y en transmisión, y su rango de cobertura. Varias técnicas se han desarrollado hasta el momento para reducir el consumo de energía.

La reducción del tiempo de inactividad combinado con el monitoreo del enlace descendente de WiFi y la activación de la interfaz de radio de baja potencia es simulado en [108] logrando una reducción considerable del consumo de energía. Perfiles de energía

WiFi en WT que actúan como PA (anclaje a red) se utilizan para pasar de la interfaz WiFi al estado de suspensión durante el 90% del tiempo de comunicación sin afectar el performance de la red [109]. Nosotros implantamos un mecanismo de hardware, pero sin considerar esas técnicas, aplicamos nuestro mecanismo a algún PA WiFi que podría tener un enlace activo de Ethernet para Internet.

Las técnicas de recolección de energía [110] y TDMA [111] en redes móviles optimizan el ahorro de energía considerando el tiempo de comunicación y el tiempo necesario para obtener el acceso a los canales móviles (asignados en diferentes frecuencias) que detectan terminales móviles inactivos. Nuestra propuesta no está basada en técnicas de TDMA, aunque puede ser un mecanismo complementario para aumentar el ahorro de energía. Nosotros conseguimos un ahorro de energía de manera independiente al tiempo de comunicación y de acceso, más bien el volumen de datos transmitidos puede incidir, por ello también nos beneficiamos de los WT inactivos, ya que permite acortar el tiempo de carga de la batería y aumentar su operación.

La desactivación de la interfaz WiFi del PA cuando hay un largo período de inactividad en la red detectado es otra técnica. En [112] las asociaciones de WT son monitoreadas para que el PA pueda estimar la probabilidad de nuevas asociaciones de WT en un corto período de tiempo. Cuando esa estimación no detecta que se puedan producir asociaciones en el futuro a corto plazo, la interfaz WiFi del PA se desactiva por un corto período de tiempo. Para redes densas controladas por WiFi, en [113] se proponen dos algoritmos para desactivar las interfaces WiFi de un PA maestro cuando una asociación exitosa de WT con PA esclavos podría lograrse durante un período de tiempo prefijado. Un retraso de comunicación podría producirse debido a esta técnica. Por ello no desactivamos la interfaz WiFi del PA para no retrasar las comunicaciones.

El kernel en tiempo real *Energy Neutral Operating System (EnOS)* [114] adapta el consumo de energía de los PA extremos de alta gama a un suministro de energía desde una batería adicional. Nuestro mecanismo de hardware no necesita EnOS u otro software y se puede aplicar a cualquier PA con cualquier sistema operativo.

Nuestro mecanismo de hardware se puede aplicar a los PA utilizados en ciudades inteligentes como parte de una red WMN basada en IEEE 802.11s. Algunos trabajos de investigación suponen que los PA en la WMN son alimentados eléctricamente por un PSE con PoE. En [115] se analizan algunas rutas características que los WT deben conservar en WMN para mantener los caminos de enrutamiento cuando pasen al estado de suspensión (deben soportar eficientemente la comunicación y sincronización de balizas WiFi). En [116], el algoritmo evolutivo Pareto fuerte usado para el enrutamiento, está diseñado

para optimizar el consumo de energía de los PA en una WMN. En [117] se analiza la influencia de la inactividad pendiente de PSM para evitar la degradación de la calidad de servicio y la QoE. El trabajo en [118] implantado de manera experimental mide el consumo de energía en una WMN con pocos PA y simuló el comportamiento para un número alto de PA conectados a un panel solar. Nuestro mecanismo mantiene la QoE, es independiente del número de PA conectados y se aplica cuando el PA WiFi no comunica los datos del usuario o mantiene un tráfico estándar.

Nuestro mecanismo se puede utilizar en aplicaciones de hogar inteligente como las que se analizan en [119,120], donde se controla el encendido y apagado de bombillas eléctricas en un edificio, dependiendo de la cantidad de personas en una habitación, usando la Infraestructura de la red y la Información que tienen los PA WiFi de los WT en el edificio. Nuestro mecanismo no regula su operación según la presencia de personas en el área circundante a los PA WiFi, se mantiene en operación constante, pero sí se beneficia cuando los WT tienen una baja tasa de transmisión ya que se logra un mayor ahorro de energía. Nuestro mecanismo no controla dispositivos eléctricos del hogar, más bien emplea con mayor eficiencia la energía disponible para que la operación del PA WiFi sea energéticamente más eficiente.

La adopción masiva esperada de puntos de acceso interiores requiere soluciones específicas para cumplir con los requisitos de sostenibilidad ecológica con respecto a la energía consumida y las interferencias radio. Dado que los puntos de acceso no se utilizan la mayor parte del día, la aplicación de un mecanismo de modo de suspensión es un enfoque prometedor. Sin embargo, su implantación representa un cambio radical en el paradigma de las redes móviles y requiere mecanismos innovadores para despertar los puntos de acceso y así restaurar rápidamente la conectividad. En [121] plantean un enfoque que utiliza una interfaz de radio auxiliar de baja potencia que maneja la información de control, manteniendo la conectividad y activando los puntos de acceso cuando sea necesario. Se ha introducido un concepto de baliza inversa, utilizando propiedades de consumo de radio ultrabajas hechas para módulos de sensores de red. La solución proporciona un importante ahorro de energía, incluso considerando que el PA no haya sido diseñado teniendo en cuenta la conciencia energética y que el resto de componentes utilizados consumen gran parte de la potencia general. Si el consumo de energía de la *Unidad Central de Procesamiento (CPU)* y otros componentes que no son parte de la interfaz de radio del PA se minimizan, se puede alcanzar un objetivo fácil con los avances modernos en electrónica: reducir el consumo de energía del PA. Otra ventaja importante de esta solución es la salud. El argumento es que ya no hay más radiaciones innecesarias cuando el equipo no se usa activamente. La seguridad también es una

ventaja, ya que el PA se apaga cuando el usuario habitual está ausente. Nuestra propuesta no plantea la desconexión de los PA para evitar pérdidas de tiempo en la activación, pero puede aprovechar otros mecanismos de ahorro.

El número creciente de redes WiFi en hogares, edificios y áreas públicas puede consumir energía excesiva y, por lo tanto, aumentar las emisiones de CO₂. Por lo que en [122] han investigado el consumo de energía de las redes WiFi en general. Este estudio se basa en observaciones del mundo real, tanto del uso como del consumo de energía de los PA. Se examinaron una variedad de PA listos para usar en la investigación de la medida en que los patrones de uso de los clientes, especialmente la relación señal/ruido afecta el consumo de energía. Los resultados indican que una SNR baja aumenta el consumo de energía hasta un 136% en varios PA WiFi. Por lo que, confinar a los clientes con un bajo nivel de SNR puede reducir el consumo de energía de los puntos de acceso WiFi al tiempo que aumenta el rendimiento de la red. Lo que permite mejorar la eficiencia energética de las redes WiFi, en particular de los puntos de acceso públicos. Nuestro mecanismo es independiente del nivel de SNR empleado.

Los investigadores en [123] abordan el problema de la gestión del tráfico eficiente mediante la aplicación del concepto de descarga WiFi en redes celulares. Presentan el concepto de una red integrada de Femto-WiFi y analiza dos estrategias de gestión de recursos de radio desde las perspectivas de costo y eficiencia energética. Se esfuerzan por evaluar y discutir los beneficios para el operador de la red de aplicar la distribución dinámica de tráfico inteligente propuesta entre las redes Femto y WiFi. Muestra que tales soluciones se pueden usar no solo para equilibrar la carga, sino también para ahorrar energía, ya que ofrecen la opción de desconectar las estaciones base no utilizadas, lo que lleva a soluciones de operación del sistema más ecológicas. Nuestra propuesta se aplica para modo sleep y para transmisión activa de paquetes tipo estándar y podría ser una opción complementaria a lo planteado para la gestión de tráfico y así obtener un mayor ahorro energético.

IEEE 802.11 es una de las tecnologías de acceso de radio más utilizadas, presente en casi todos los dispositivos portátiles con capacidades de red. Sin embargo, sus modos de comunicación que consumen mucha energía son un desafío para el aumento de la vida útil de la batería de dichos dispositivos y son un obstáculo para su uso en dispositivos con limitaciones de batería, como los definidos por muchas aplicaciones de Internet de las cosas. Los sistemas *Wake-up Radio (WuR)* han aparecido como una solución para aumentar la eficiencia energética de las tecnologías de comunicación mediante el empleo de una interfaz de radio secundaria de baja potencia, que siempre está en estado activo y conmuta el transceptor primario (utilizado para la comunicación de datos principal) del

modo de ahorro de energía al modo de operación activa. Los autores de [124] analizan la viabilidad de las soluciones WuR basadas en IEEE 802.11, e introducen los últimos esfuerzos de estandarización en este dominio WuR, basado en IEEE 802.11, IEEE 802.11ba, que es una próxima enmienda IEEE 802.11, discutiendo sus características principales y casos potenciales de uso. Como por ejemplo una aplicación WiFi ecológica, con un sistema de enchufe inteligente de prueba de concepto implantado por un WuR que se activa de forma remota utilizando dispositivos IEEE 802.11, evalúan sus ahorros monetarios y energéticos, y lo comparan con dispositivos inteligentes disponibles comercialmente. Como resultado, se argumenta que la solución WuR basada en IEEE 802.11 admitiría una amplia gama de dispositivos e implantaciones, tanto para comunicaciones de baja potencia como para transmisiones de alta velocidad. Nosotros no implantamos una interfaz radio adicional, presentamos un hardware que permite el ahorro de energía en ciclos.

En las redes WiFi durante los períodos nocturnos, el desperdicio de energía puede ser significativo, ya que todos los PA se mantienen encendidos, aunque haya una demanda de tráfico mínima o nula. El hecho de que más del 80% de todo el tráfico inalámbrico se origine o termine en interiores, y sea atendido por WiFi, ha llevado a la comunidad científica a buscar mecanismos de ahorro de energía para redes WiFi. Las soluciones de vanguardia abordan el problema activando y desactivando los PA en función de programaciones insertadas manualmente o analizando la demanda de tráfico en tiempo real. Los primeros son específicos del proveedor; el segundo puede inducir *Transferencias Frecuentes de Estaciones (STA)*, lo que tiene un impacto en el rendimiento de la red. La falta de implantabilidad de las soluciones también es una deficiencia en la mayoría de los trabajos. Por ello en [125] se propone un algoritmo, denominado *Algoritmo de Gestión del Consumo de Energía (ECMA)*, que aprende los períodos diurnos y nocturnos de la red WiFi. ECMA fue diseñado teniendo en cuenta su capacidad de implantación sobre equipos WiFi heredados. Durante el día, las interfaces de radio del PA (2,4 GHz y 5 GHz) se encienden y apagan automáticamente, de acuerdo con la demanda de tráfico. Por la noche, se forman grupos de PA, que cubren la misma área, dejando un PA siempre encendido para la cobertura básica y los PA redundantes apagados para maximizar el ahorro de energía, mientras se evita la cobertura y el rendimiento. Los resultados de la simulación muestran que son posibles ahorros de energía de hasta el 50% utilizando el algoritmo ECMA. Nuestro mecanismo no implanta algún algoritmo en particular para obtener el ahorro de energía ni procura apagar los PA.

A medida que IEEE 802.11 se convierte en el estándar global de facto para las *Redes Inalámbricas de Área Local (WLAN)*, se implanta una gran cantidad de PA WiFi y los usuarios móviles disfrutan de acceso inalámbrico a Internet casi ubicuo. Cuando los PA densamente desplegados que cubren un área determinada son administrados por una sola organización (por ejemplo, una empresa), puede haber múltiples PA candidatos para servir a un usuario. En este caso, la *Asociación de Usuarios (UA)*, es decir, la selección de PA en servicio, desempeña un papel clave en el rendimiento de la red. En [126] se propone un esquema eficiente de UA para el equilibrio de carga entre los PA y el ahorro de energía en la WLAN empresarial, considerando varias técnicas para mejorar el rendimiento, como la transmisión de multidifusión, la entrada múltiple y la salida múltiple de múltiples usuarios, y la suspensión de PA, juntos. A través de una optimización multiobjetivo se desarrolló un banco de pruebas WLAN para demostrar la practicidad y la viabilidad del esquema propuesto. Además, a través de simulaciones extensas, se comparó el rendimiento del esquema propuesto con el de algunos otros esquemas de UA. Los resultados de la simulación muestran que el esquema propuesto supera a los otros esquemas en términos de rendimiento total del sistema, rendimiento por PA funcional, eficiencia energética y factor de equilibrio de carga. Nuestra propuesta plantea un sistema de ciclos de trabajo para optimizar el consumo de energía a diferencia de las técnicas planteadas sobre la gestión de UA.

Para utilizar la energía de manera más eficiente, los algoritmos y protocolos de red deben incorporar en sus mecanismos de decisión algunas funciones centradas en el ahorro de energía. Por ello, en [127] se ha estudiado diferentes características y parámetros de las redes inalámbricas para establecer su relación con el consumo de energía. Primero, han analizado la variación del consumo de energía de los PA en función de la potencia de transmisión de la antena. En segundo lugar, recopilaron información del usuario de una red inalámbrica pública real para determinar los requisitos reales de los recursos de la red en tiempo real. En base a esta información, proponen una nueva extensión para el protocolo Openflow sobre redes de *Redes Definidas por Software (SDN)* para administrar la red inalámbrica, con el objetivo de mantener el rendimiento óptimo de la red con un consumo mínimo de energía. Esta extensión presenta nuevos mensajes de Openflow y una nueva función para incorporar en los controladores SDN y dispositivos habilitados para Openflow. La propuesta es validada por simulaciones apropiadas basadas en escenarios reales: un centro comercial y una red inalámbrica municipal. Nuestro mecanismo puede ser empleado en todo tipo de red y se alinea a sistemas de reducción de energía que puedan existir y que sean aplicables a instituciones gubernamentales.

Otro tema importante es que la adopción de fuentes de energía renovables intermitentes [128] (no siempre están disponibles, esto es, en algunos instantes los aparatos alimentados por ellas no tendrían de fuente de alimentación), ha puesto a las tecnologías de batería en el centro de atención, iniciando un impulso para desarrollar materiales sostenibles para el almacenamiento de energía que no dependan de elementos raros o tóxicos. Los materiales de electrodos orgánicos están hechos de elementos abundantes, lo que puede hacer que la fabricación y el reciclaje a gran escala de estos materiales sean menos perjudiciales para el medio ambiente. Así en [129] los autores exploran el uso de los viológenos (fosfaviológenos) con puente de fosforilo electroactivo orgánico, compuestos con *Nanotubos de Carbono de Pared Simple (SWCNT)* para usarse como electrodos orgánicos compuestos de materiales sostenibles y abundantes. El anclaje de las especies activas redox en la superficie de los SWCNT evita la disolución de los electrodos y las baterías híbridas de alto voltaje (1.95-3.5 V) vs. Li / Li + que utilizan fosfaviológenos, ya que el cátodo permanece estable después de 500 ciclos de carga / descarga. Este resultado es de gran expectativa para el empleo de baterías de largo uso. Otra investigación similar analiza que el almacenamiento de energía a gran escala es cada vez más crítico para equilibrar las energías renovables, la producción y el consumo de energía. Las baterías orgánicas de flujo redox, hechas de materiales redox de bajo costo y sostenibles, son un almacenamiento prometedor en tecnologías que son más baratas y menos peligrosas para el medio ambiente que las baterías de vanadio, pero tienen vidas más cortas y menor densidad de energía. Por lo tanto, se requiere una visión fundamental a nivel molecular para mejorar el rendimiento. Por ello en [130] se presentan dos métodos de *Resonancia Magnética Nuclear (RMN)* in situ para estudiar las baterías de flujo redox, que se aplican a dos electrolitos redox activos: 1) *2,6-Dihydroxiantraquinona (DHAQ)* y 2) *4,4'-((9,10-Antraquinona-2,6-Diil) Dioxi) Dibutirato (DBEAQ)*. Estas técnicas de RMN permiten la descomposición de electrolitos y la autodescarga de la batería. para ser explorado en tiempo real, y mostrar que DHAQ se descompone electroquímicamente a través de una reacción que puede minimizarse limitando el voltaje utilizado en la carga. Se prevé el desarrollo de aplicaciones de estos métodos de RMN para comprender una amplia gama de procesos redox y otros sistemas electroquímicos. Nosotros no aplicamos métodos basados en análisis de los componentes químicos para mejorar la vida de la batería que utilizamos, pero si procuramos reducir el tiempo de carga.

Lo analizado hasta ahora trata de investigaciones de ahorro de energía en PA WiFi, basados en la reducción del tiempo que demora pasar del estado activo al de reposo, reducir el tiempo de inactividad, desactivar la interfaz WiFi cuando hay largos períodos de inactividad, usar un sistema operativo en tiempo real, usar rutas adecuadas y algoritmos

que mejoren el rendimiento y beneficien el ahorro, usar una interfaz radio auxiliar de baja potencia, reducir la energía total de la red, confinar los usuarios con una SNR baja, aplicar una gestión de tráfico eficiente, usar un sistema Wake Up radio o algoritmos de gestión de desempeño entre otros. Finalmente se abordaron temas sobre el uso de fuentes de energía renovables con materiales menos contaminantes y que puedan tener un mayor tiempo de vida.

Selección de método a emplear

Después de haber revisado las opciones de alimentación energética que pudiéramos emplear con el fin de tener un ahorro de energía, tenemos que decidir entre las siguientes opciones:

- Aprovechar ondas electromagnéticas circundantes al área de implantación de la red de los PA WiFi, donde los voltajes residuales son pequeños y su recolección depende del empleo de los mismos dentro de una determinada área. Se requeriría usar amplificadores de voltaje y corriente necesarios para obtener valores más elevados que permitan usar nuestro mecanismo en el tiempo. Además de asegurar que existan los equipos que puedan generar ondas electromagnéticas durante toda la operación de los PA instalados.
- Aplicar la ES almacenada para alimentar los PA WiFi, donde la distancia entre la celda solar y los PA debe ser la más corta posible para evitar que se presenten caídas de tensión durante el servicio. Debido a la distribución de los PA WiFi en toda la estructura gubernamental, se corre el riesgo que las distancias entre ellos y los paneles sea muy extensa, aumentando la posibilidad de que se presenten caídas de tensión.
- Tomar la energía del puerto PoE disponible, que presenta valores de voltaje y corrientes suficientes para alimentar y operar nuestro circuito durante todo el proceso, lo que garantizaría la continuidad del servicio. Prácticamente solo se requeriría conectar el circuito implantado a los puertos disponibles.

Por ello, nos inclinamos a emplear la alimentación PoE para energizar nuestro circuito, detallando los pasos en el capítulo 3.

2.3 Análisis de la potencia consumida en los PA WiFi de redes densas

Presentamos los trabajos experimentales y resultados iniciales conseguidos al tomar datos de consumo en una red de VoIP empresarial, en video llamadas empresariales y en redes WiFi de hospitales (organización gubernamental). Hacemos una breve introducción teórica.

2.3.1 Potencia consumida en redes de VoIP y en video llamadas

Se analizó el consumo de energía del sistema de VoIP en la empresa Farmacéutica Brenntag del Ecuador, en la ciudad de Guayaquil. Se colocó un analizador de energía Fluke 1735 en las barras de alimentación del centro de cómputo por 3 días para tomar el consumo del encaminador, Cisco 2921 (Figura 2.13), que administra el sistema de VoIP de 87 usuarios de la empresa. En la Tabla 2.2 se muestran los modelos de los teléfonos utilizados.

El encaminador tiene una capacidad de consumo de energía de 370 W y puede transmitir a 75 Mbps dentro del marco del protocolo IEEE 802.3af, proporcionando alimentación tipo PoE a cada uno de los teléfonos. En el análisis de las lecturas e imágenes que se obtuvieron con el analizador Fluke, se revisaron variaciones y picos de corriente, voltaje y frecuencia. En la Figura 2.14 se muestra el comportamiento de la corriente, donde el mayor número de eventos lo representan corrientes de 2,25 A con más de 2.500 eventos, siendo 2,12 A el valor mínimo con cerca de 100 eventos.



Figura 2.13: Equipos del Sistema de VoIP de Brenntag

Tipo de Teléfono	Cantidad
CP7942G	75
CP9951	9
CP8831	2
CP7965G	1
Total	87

Tabla 2.2: tipos de teléfonos de la red de VoIP

Las lecturas tomadas en Brenntag, permitieron concluir que la energía consumida de un sistema de VoIP, basado en una conexión PoE, está relacionada con lo que consumiría cada puerto del conmutador o del encaminador IP utilizado. Lo que generalmente puede ser configurado al momento de la implantación de la red y que tendría un valor de potencia máxima indicada por el proveedor del equipo, que para el protocolo 802.3af es 15,4 W.

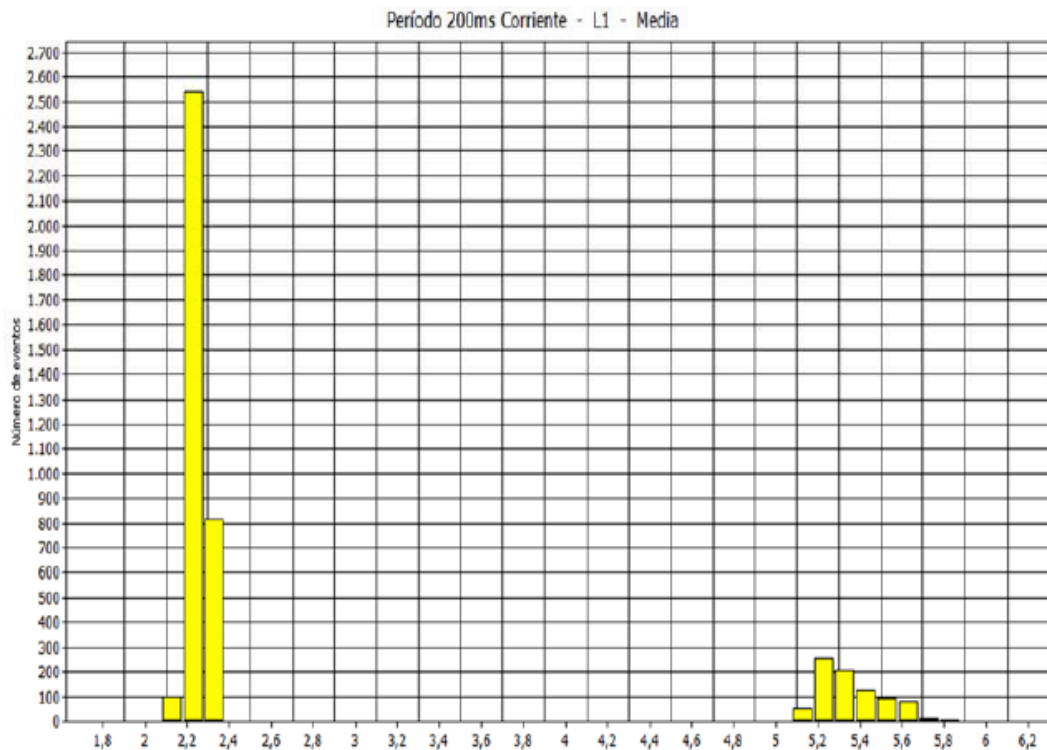


Figura 2.14: Corriente consumida en la red de VoIP

Comparación de la potencia total consumida versus la de un sistema VoIP

El crecimiento de la carga en las empresas no es uniforme, por lo general las adecuaciones o nuevas implantaciones generan importantes diferencias de cantidades de cargas entre las fases del sistema eléctrico, lo que desbalancea el sistema y se convierte en un peligro al momento que se sobrecargan las líneas. De esta manera, se procedió a instalar en la empresa Brenntag el analizador de energía en las barras del tablero principal de alimentación, tal como lo muestra la Figura 2.15.

En la Figura 2.16 se muestran los valores tanto de voltaje como de corriente de alimentación del tablero principal. El voltaje presenta un diferencial de apenas 0,4 V entre cada línea, a diferencia de la corriente que presenta valores bastante alejados unos de otros, es decir: L1 tiene 160,5 A, L2 tiene 145,2 A y la L3 tiene 211,4 A. Lo que indica que la L3 está totalmente desbalanceada con un diferencial mayor a 50 A con respecto a las otras líneas de alimentación, lo que se origina por el crecimiento de la carga y conexión sin un estudio previo de la carga sobre la fase 3 del circuito principal.

Comparando el amperaje total y la lectura de 2,25 A de la red de VoIP concluimos que el sistema de VoIP está consumiendo aproximadamente el 0,44% del valor total. Dicho valor, significa una carga de 17,5 KW-h al mes.



Figura 2.15: Medición de corriente en barras de alimentación principales



Figura 2.16: Valores de corriente y voltaje medidos

Potencia consumida en Laptops al momento de hacer video llamadas

Las pruebas de consumo de energía en las laptops realizadas en la empresa Celco, al momento de mantener una comunicación desde Skype o Hangout a móviles, como se muestra en la Figura 2.17, presentaban variaciones del orden de las décimas y milésimas, por ejemplo, un aumento de 0,3 A durante una video llamada por Hangout.



Figura 2.17: Prueba de video llamada

Los consumos de energía medidos en el taller de la empresa CELCO, sobre video llamadas en laptops a móviles fueron:

- Laptop conectado a Skype: Video y Voz (conectada a la red x cable de cobre):* la red empresarial de Celco cuenta con 40 puntos de red y cuentan con un conmutador de 24 puntos. Procedimos a tomar el consumo de corriente (*I*) en Amperios de una laptop del área técnica y del conmutador antes de realizar una llamada por Skype. Posteriormente repetimos las lecturas, pero durante la llamada. Las mediciones del consumo de la laptop tomadas para ambos casos no mostraban variación en el orden de las décimas. Luego calculamos matemáticamente el valor de corriente que consume el conmutador por punto de red y el total consumido por cada laptop durante una llamada. El total de consumo en ese instante sería la suma de la corriente que pasa por el puerto del conmutador que maneja la llamada más la corriente consumida por la laptop, es decir tendríamos un valor consumido de 0,4175 A. La Tabla 2.3 nos muestra las mediciones realizadas:

Finalmente comparamos este consumo con el necesario para la transmisión por VoIP que revisamos anteriormente de la empresa Brenntag para 87 usuarios, que fue de 2,25 A. Con solo 6 conexiones se sobrepasaría su consumo, ya que tendríamos 0,4 A por computador más 0,0175 por punto del conmutador, en total 2,505 A. Por ello la red de VoIP resulta ser energéticamente más eficiente.

Total de puntos de red Celco	40
------------------------------	----

	Laptop	Conmutador	Consumo por punto de red	Consumo total por punto
I (A)	0,4	0,7	0,0175	0,4175
	Laptop en Skype	Conmutador	Consumo por punto de red	Consumo total por punto
I (A)	0,4	0,7	0,0175	0,4175
	Red de VoIP Brenntag (87 usuarios)	Laptops en Skype por usuario	40 Usuarios en Skype	Diferencia
I (A)	2,25	0,4175	16,70	14,45

Tabla 2.3: Consumo de corriente en laptops y comparativo de consumo durante llamada por Skype vs consumo de VoIP

- *Laptop conectado a Hangout:* Video y Voz (por cable). Igual que en el caso anterior procedimos a tomar el consumo de corriente (*I*) en Amperios de una laptop del área técnica y del conmutador antes de realizar una llamada por Hangout. Posteriormente repetimos las lecturas, pero durante la llamada. Las mediciones del consumo de la laptop tomadas mostraron una variación en el orden de las décimas, concretamente una diferencia de 3 décimas. Luego calculamos matemáticamente el valor de corriente que consume el conmutador por punto de red y el total consumido por cada laptop durante una llamada. El total de consumo en ese instante sería la suma de la corriente que pasa por el puerto del conmutador que maneja la llamada más la corriente consumida por la laptop, es decir tendríamos un valor consumido de 0,72 A. La Tabla 2.4 nos muestra las mediciones realizadas:

También comparamos los resultados del consumo con el necesario para la transmisión por VoIP que revisamos anteriormente de la empresa Brenntag para 87 usuarios. En este caso con 4 conexiones por Hangout se sobrepasaría el consumo de VoIP, ya que tendríamos 0,7 A por computador más 0,02 por punto del conmutador, en total 2,88 A. Confirmando que la red de VoIP resulta ser energéticamente más eficiente que el empleo de laptops para hacer video llamadas.

Total de puntos de red Celco	40
------------------------------	----

	Laptop	Conmutador	Consumo por punto de red	Consumo total por punto
I (A)	0,4	0,7	0,0175	0,4175
	Laptop conectada a Hangout	Conmutador	Consumo por punto de red	Consumo total por punto
I (A)	0,7	0,8	0,02	0,72
	Red de VoIP Brenntag (87 usuarios)	Laptops en Hangout por usuario	40 Usuarios en Hangout	Diferencia
I (A)	2,25	0,72	28,80	26,55

Tabla 2.4: Consumo de corriente en laptops y comparativo de consumo durante llamada por Hangout vs consumo de VoIP

2.3.2 Potencia consumida en PA de redes WiFi hospitalarias

La idea es presentar una introducción al lector sobre la energía y/o potencia consumida en redes inalámbricas de hospitales de Guayaquil. Presentamos el consumo de toda la red del Hospital Vernaza y la comparamos con el consumo eléctrico general o al menos con el costo proyectado mensual (incluimos datos de cuartos de comunicación). Se presenta información básica de la configuración de la red, algunas conclusiones de los datos que se obtuvieron y se plantean recomendaciones para mejorar la estructura de la red o disminuir el consumo de energía. Además, se presenta la revisión energética de los PA del Instituto de Neurociencias.

Estudio de la potencia consumida en los PA del Instituto de Neurociencias de Guayaquil

La evaluación se hizo en 18 PA del Instituto de Neurociencias de Guayaquil en el lapso de dos semanas, obteniéndose los resultados como los que se muestran en la Tabla 2.5, tales como el porcentaje de potencia consumida por PA, su valor en Watts, la velocidad de transferencia de datos de subida y bajada, así como el número de usuarios conectados en horas de oficina.

#PA	%	Potencia (W)	Up Kbps	Dow Kbps	Usuarios
1	84	10,92	600	900	13
2	40	5,2	0	0	2
3	38	4,94	0	1	3
4	84	10,92	320	340	9
5	38	4,94	0	0	1
6	38	4,94	1	7	1
7	38	4,94	35	8	4
8	67	8,71	0	1	2
9	81	10,53	0	6	4
10	76	9,88	0	4	3
11	29	3,77	0	0	1
12	38	4,94	0	0	0
13	36	4,68	0	0	0
14	83	10,79	100	700	1
15	83	10,79	2	49	3
16	38	4,94	4	1	2
17	38	4,94	0	1.000	3
18	13	3,9	0	5	1
					53

Tabla 2.5: Potencia y Kbps medidos en los PA

Variable medida	Valor
Máximo número de usuarios simultáneos	129
Máximo número de usuarios por PA	15
Máxima potencia consumida por PA	11,18 W
Mínima potencia consumida por PA	3,9 W
Total potencia consumida	139 W
Máxima transferencia de datos (subida)	600 Kbps
Máxima transferencia de datos (bajada)	4.950 Kbps
Potencia medida consumida al mes (Proyección)	100,08 KW-h-mes
Costo	\$3,11

Tabla 2.6: Parámetros obtenidos en el análisis de la red del INC

En otro análisis, en la Tabla 2.6 se presentan algunos parámetros importantes registrados durante el estudio, incluida la potencia medida en KW-h-mes. En la Figura 2.18 se muestra el comportamiento típico de la red durante el proceso de transmisión de datos.

De la información que se obtuvo se concluye que las cantidades de datos transmitidas son insignificantes para toda la plataforma implantada y que el número de usuarios es bajo, por lo que no ocurre la saturación del sistema.

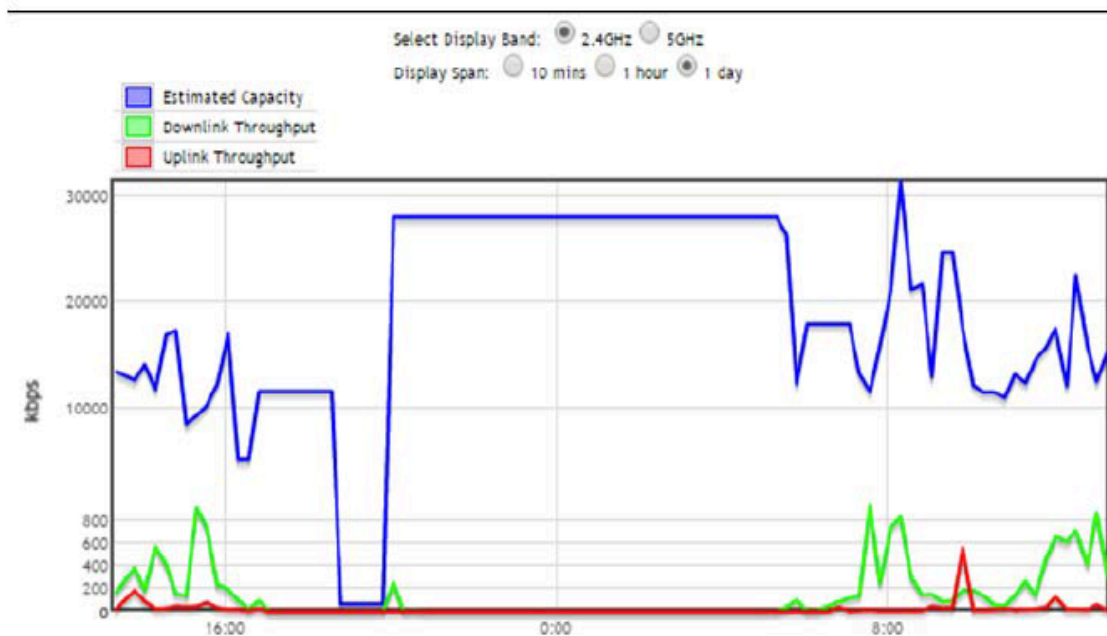


Figura 2.18: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en el INC

Estudio de la potencia consumida en los PA del Hospital Luis Vernaza de Guayaquil

El Hospital Luis Vernaza es nuestro centro principal de estudio, la evaluación se hizo en 73 PA con tecnología PoE, marca Ruckus, en el lapso de dos semanas. Los modelos implantados se encuentran en la Tabla 2.7.

En el cuadro identificamos las potencias máxima, típica y mínima, el número de clientes para datos y voz soportados, la capacidad de transmisión de datos en Mbps. El valor de potencia máxima mostrada ya incluye las pérdidas de energía por la longitud del cable de datos.

La Tabla 2.8 presenta el tráfico de datos tomado de manera aleatorio en días y horas diferentes, las capacidades máximas de potencia y capacidad de transmisión de datos están definidas por modelo en la Tabla 2.7.

Modelo PA	Pmin (W)	Ptípica (W)	Pmax (W)	Clientes	Mbps	clientes Voip	Protocolos	clase
7982	5	7	13	500	450	60	af y at	
7372	1,5	3,5	8	500	225	30	Af	
7363	0,45		12,95	256	150	20	Af	0
R300	3,4	5,3	9,7	256	300	30	Af	
T300	6,5	7,5	11	512	300	30	Af	3

Tabla 2.7: Modelos de PA detectados en la red

N	Área de ubicación del PA	Modelo PA	Jueves		Domingo	
			Down (Kbps)	Up (Kbps)	Down (Kbps)	Up (Kbps)
1	Clínica Privada 2d piso	7363	836	43	816	2
2	C Externa 2d piso	7982	31	77	1	0
3	San Aurelio	7363	3.047	415	1.250	14
4	Postoperatorio 3	7363	659	82	4	1
5	Sub/Img Corredor Central Norte	r300	1.934	310	171	10
6	Subgerencia	7372	2.808	235	0	0
7	P Assaf Auditorio	7363	280	22	58	2
8	San Miguel	7363	1.860	83	311	33
9	Derma 1	7363	576	163	1.519	15
10	Clínica Día 1piso	7363	1.436	201	621	499
11	Pensionado 2d piso	7363	1.740	43	1.401	67
12	Emergencia	7363	906	170	359	79
13	P Valdez	7363	1.139	10	565	20

14	Clínica Privada 1 piso	7363	1.495	55	315	70
15	Gastro	7363	2.002	18	43	2
16	Neuro 2	7363	224	20	651	29
17	Inspector	7982	1.175	55	9	14
18	Sub Imag Hall Central	r300	1.303	6	116	12
19	San Gabriel 1	7363	1.227	27	996	113
20	San Gabriel 2	7363	866	152	813	126
21	Sub Corredor central Sur	r300	572	2.276	1.525	42
22	Con Externa Piso 1 A	7363	10	2	0	0
23	Cardio Varones	7363	1.638	12	435	227
24	Sun Imag Consultorio PB	r300	477	10	30	4
25	Sub Suelo Ala Derecha	r300	603	86	460	9
26	Pensionado 1piso	7363	1.092	78	266	185
27	Pensionado 3piso	7363	524	795	316	27
28	Postoperatorio	7363	1.641	492	1.172	634
29	P Valdez 3	7363	147	129	0	0
30	Sistemas	7363	8.417	5.422	6.836	1.643
31	Quemados	7372	1.963	46	71	8
32	Clínica P 1 piso 2	7363	1.161	514	264	142
33	Sub Hall Norte	r300	610	52	1.655	101
34	Con Externa Piso 2 CD	7982	284	11	0	0
35	San Vicente	7363	899	1.021	200	58
36	Clínica P PB	7363	1.079	570	2.252	166
37	Comunicaciones	7363	2.002	99	1.149	32
38	Trauma 1	7363	1.376	1.372	1.863	171
39	Consulta Externa PB	7982	845	72	3	2
40	Mantenimiento	7363	251	267	819	195
41	Subsuelo Sala Vip PB	r300	195	39	765	36
42	Cardio Mujeres	7363	455	61	349	58
43	Posoperatorio 2	7363	2.052	94	12	1
44	Con Externa Piso 1 C	7982	212	9	0	0
45	Santa María	7363	833	23	520	39
46	Con Externa Piso 2 E	7363	1.889	10	63	3
47	Servinte	7363	11.670	519	1	0
48	Sub Inspector	7363	184	12	235	5
49	Subsuelo Hall Sur	r300	533	51	218	434
50	UCI Privada	7363	759	372	1.046	108
51	Emergencia PB	7363	2.103	784	2.690	113
52	Clínica P 1er piso 3	7363	1.033	168	858	389
53	San Gabriel Enfermería	7363	397	150	2.116	16
54	Auditorio 2	7982	483	11	93	8
55	Santa Elena	7363	470	16	262	67
56	Auditorio 3	7982	28	8	44	12
57	Biblioteca	7372	605	21	4	50

58	Clínica Pr 2 piso 1	7363	1.290	916	1.145	564
59	Clínica Pr 2 piso 2	7363	542	26	1.674	113
60	Consulta Externa P1 B	7363	0	0	0	0
61	Auditorio 1	7363	64	2	0	0
62	Santa Teresa	7363	185	4	110	10
63	Subsuelo Imag Externa	t300	2.207	146	693	119
64	Gerencia 2	7363	1.384	8	163	32
65	Mega UCI	7363	611	116	2.257	2.398
66	Neurología	7363	417	113	1.080	54
67	Con Externa piso 2	7982	321	7	7	1
68	Pensionado PB 2	7363	797	64	347	31
69	San Guillermo	7363	1.761	24	521	15
70	Trauma II	7363	1.924	146	1.154	193
71	UCI área B	7363	4.349	1.193	2.195	200
72	Hall ingreso rampa emer Subs	r300	599	129	397	98
73	Cons Externa Piso 1 D	7982	10	4	6	0

Tabla 2.8: Cantidad de datos transmitidos de manera aleatoria

Variable medida	Valor
Máximo número de usuarios simultáneos	411
Máximo número de usuarios por PA	46
Máximo potencia por PA posible (W)	15,5
Mínima potencia por PA (Ruckus 7363) (W)	2,8
Total potencia Máxima consumida por día (W)	1.131,5
Máxima transferencia de datos (subida) (Kbps)	5.422
Máxima transferencia de datos (bajada) (Kbps)	11.670
Potencia consumida al mes (KWh-mes)	814,680 KWh-mes
Costo de consumo PA	77,39 \$

Tabla 2.9: Parámetros obtenidos en el análisis de la red Hospital Luis Vernaza

En la Tabla 2.9 se muestran algunos parámetros importantes registrados durante la investigación, incluida la potencia medida en KW-h-mes. En la Figura 2.19 se presenta el comportamiento típico de la red durante el proceso de transmisión de datos.

Se concluye que las cantidades de datos transmitidas son insignificantes para toda la plataforma implantada y que el número de usuarios en la mayoría de PA es bajo, por lo que no ocurre la saturación del sistema. En la Tabla 2.10 en cambio se analiza el consumo de potencia del modelo PA Ruckus 7982.

También se procedió a realizar una prueba de apagado de una antena del PA Ruckus modelo R500, para definir su potencia consumida, obteniéndose los resultados mostrados en la Tabla 2.11.

El consumo activo variaba entre el 28 y el 50% de la potencia calibrada, es decir, entre 3,78 y 6,75 W. Al apagar la antena la potencia bajo a un 19%, o sea un 9% menos que la potencia activa menor, lo que significa un consumo de 2,565 W, lo que permite una reducción de 1,435 W comparándola con la potencia mínima y de 3,385 W con respecto a la potencia típica.

De los datos que se obtuvieron se puede concluir que habría un ahorro de energía con el apagado de la antena, incluso cuando el PA se encuentra en estado inactivo, por ello se podría plantear como una opción el uso de un algoritmo de apagado de la antena que funcione de manera secuencial.

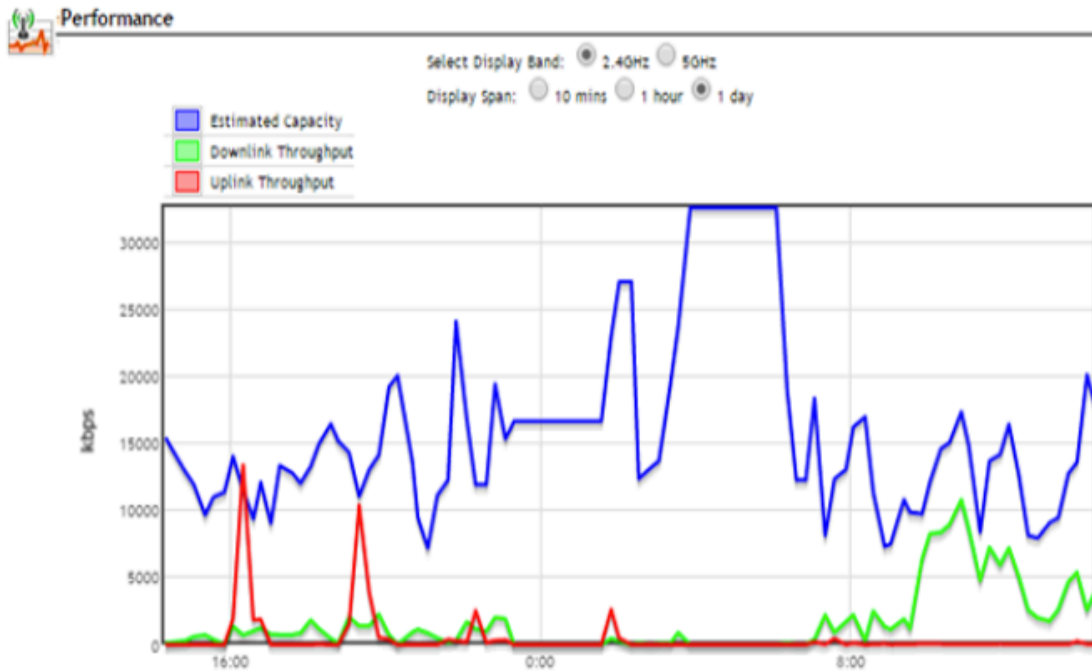


Figura 2.19: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en el Hospital Vernaza

Franja Horaria	Potencia	Consumo Total (W)	Kw-h Mensual	Costo Mensual \$
Todas	Máxima	1.124,2	809,42	75,52
Todas	Mínima	365	262,8	24,52

Tabla 2.10: Potencia máxima y mínima del modelo de PA Ruckus 7982

Por otra parte, hay que tomar en cuenta que los grandes hospitales, como el que hemos analizado, tienen una estructura que no permite reducir el número de cuartos de datos, sino que más bien tiende a aumentarlos, con mayor razón si cuenta con varios pisos y áreas de cuidado intensivo o críticas. Ese es el caso del Hospital Luis Vernaza, ubicado en la ciudad de Guayaquil, el cual cuenta como parte de su red los siguientes dispositivos descritos en la Tabla 2.12.

El Hospital cuenta con 20 centros de cableado y un centro de cómputo, todos con uno o más racks de comunicación. Cada uno de ellos tiene un sistema de climatización, que trabaja entre los 18 y 21°C con una capacidad de 12.000 a 36.000 BTU. Además, para protección y disponibilidad de los equipos de comunicación se emplean UPS con capacidades de carga desde 1 Kva hasta 10 Kva. Todo ello para que el sistema tenga un funcionamiento adecuado y no presente caídas en su servicio.

Alimentación PoE	Potencia (W)
Potencia Inactivo:	4
Potencia típica	5,95
Potencia pico	10,5
Potencia calibrada	13,5
Potencia máxima 802.3af	15,4
Valores Leídos	
Consumo activo	28 al 50 %
Potencia	3,78 al 6,75 W
Consumo antena apagada	19% o 2,565 W
Ahorro posible	
Caso Inactivo (Mínimo)	1,435 W
Caso típico (Promedio)	3,385 W

Tabla 2.11: Potencias obtenidas en el PA modelo Ruckus R500

Los valores calculados corresponden a las potencias consumidas máximas de los cuartos de datos (total 1), del centro de datos principal (total 2) y de los PA instalados en todo el Hospital (total 3), lo que da un gran total de 123,52 Kw o 88.934,4 Kw-h mes, lo que significaría un costo promedio de 8.448,77 \$. Si consideramos que el valor promedio de la planilla de energía eléctrica mensual del Hospital es de 50.000 \$, la potencia de la red pudiera representar un 16,9% del total.

De manera complementaria se analizó también el tráfico de datos en dos edificios administrativos, con un total de 19 PA. Los resultados se muestran en la Tabla 2.13.

$$P_t = 123,52 \text{ Kw}$$

$$123,52 \text{ Kw} * 24 \text{ h} * 30 \text{ d} = 88.934,4 \text{ Kw} - \text{h}$$

$$\text{Costo: } 88.934,4 \text{ Kw} - \text{h} * 0,095 \text{ \$} = 8.448,77 \text{ \$}$$

El mayor volumen de tráfico de bajada fue de 33.964 Kbps y de subida 20.201 Kbps, por lo tanto, la transmisión de datos no alcanza la saturación del sistema.

Dispositivo	Capacidad	Cantidad	Potencia (W)	Total (W)
Switch Cisco	2960 Poe	28	740,00	20.720,00
Switch Cisco	3750 Poe	14	350,00	4.900,00
Switch Cisco	2960 No Poe	23	47,00	1.081,00
UPS 1	1000 KVA	8	40,00	320,00
UPS 2	3000 KVA	3	120,00	360,00
UPS	>3000 KVA	4	1.000,00	4.000,00
A.A.	9000BTU	7	2.637,64	18.463,48
A.A.	12000BTU	9	3.516,85	31.651,65
A.A.	18000BTU	1	5.275,28	5.275,28
A.A.	36000BTU	1	10.550,56	10.550,56
Total 1				97.321,97

Dispositivo	Capacidad	Cantidad	Potencia (W)	Total (W)
Switch Cisco	2960 No Poe	2	47,00	94,00
Switch Cisco	3750 Poe	3	350,00	1.050,00
UPS	>3000 KVA	3	1.000,00	3.000,00
A.A.	36000BTU	2	10.550,56	21.101,12
Total 2				25.245,12

Dispositivo	Capacidad	Cantidad	Potencia (W)	Total (W)
Acces Point		73	13,00	949,00
Total 3				949,00

Tabla 2.12: Potencia consumida en los dispositivos de red

De los resultados anteriores podemos obtener las siguientes conclusiones:

- Las pruebas muestran que al apagar la antena del PA se puede conseguir un ahorro de 1,435 W o mayor si se apagan los PA de áreas no críticas cuando no hay usuarios.
- El consumo de potencia mensual de los PA del Hospital Luis Vernaza puede llegar a 1.000 KW-h-mes.
- La transferencia de datos medida en el hospital Vernaza no llega a valores de saturación, lo que permitiría establecer períodos de apagado de los PA con poco tráfico para ahorrar energía, utilizando un algoritmo secuencial.
- La red WiFi del hospital Vernaza, considerando todos los dispositivos necesarios para su disponibilidad y buen funcionamiento como: AA, UPS, conmutador... puede llegar a consumir valores de 4.000 KW por cada cuarto de datos.

Area Ubicación PA	Usuarios	Downlink Kbps	Uplink Kbps
Inspector	2	3.266	187
Marketing	3	942	59
Legal	2	5.332	271
Dirección	6	2.404	4.510
Mantenimiento	14	14.939	606
Auditorio	5	2.829	499
Sistemas 1	39	25.864	20.201
Mezz Entrada	18	7.193	14.289
Tesorería	5	2.062	128
Sistemas Sáenz	23	33.967	1.105
Sistemas 3	30	4.814	978
Sistemas 2	29	8.082	2.310
Pro Secretaría	6	5.901	756
5to Luque	9	3.548	438
Capacitación	5	7.464	105
Sala Gómez Lince	1	2.762	45
Financiero	11	3.666	450
Auditoría Interna	10	4.086	1.365
Inspector RRHH	0	31	1

Tabla 2.13: Ejemplo de cantidad de datos transmitidos en oficinas administrativas

Por lo que se podrían aplicar medidas para bajar el consumo de energía y conseguir así un ahorro de energía.

2.4 Valores de operación de los PA WiFi

En este apartado, revisamos la potencia consumida de un PA WiFi de la red gubernamental, según su operación, trabajando con una o dos radios a la vez. Además, se revisan los valores de volumen de transmisión de datos que se presentaron en el apartado anterior.

Análisis de la potencia consumida en los PA

Las pruebas realizadas permitieron establecer los parámetros de comportamiento de la potencia consumida durante la operación de los PA en redes de 2,4 y 5 GHz. Los PA de la marca Ruckus se configuraron con una Potencia Máxima de 13,5 W y presentaban un consumo de 2,835 W sin las interfaces de radios encendidas. Al activar la interfaz radio de 2,4 GHz la potencia se incrementó a 3,375 W sin que se realicen conexiones de usuarios.

Al realizarse varias conexiones a la red, de usuarios con portátiles, celulares y computadores de escritorio transmitiendo video, música y navegación de Internet de manera simultánea la potencia llegó a 4,645 W, pero cuando no se presentaba un proceso de carga de bytes en las estaciones de los usuarios, la potencia se estabilizaba en 3,645 W.

Luego, la potencia llega a 3,915 W cuando se enciende la interfaz radio de 5 GHz sin mantener conexiones con usuarios. Con las dos interfaces de radio encendidas se procedió a conectar sesiones de video y de *Team Viewer* versión 10 [131], registrándose una potencia de 6,075 W, que se estabilizaba en 4,185 W cuando no había carga de datos.

También se hicieron pruebas de saturación con videos en tiempo real, detectando una transmisión aproximada de 1.000 paquetes cuando había menos de 5 videos y de 2.000 paquetes con 9 videos. En la Figura 2.20 se muestra el comportamiento de la transmisión de los paquetes/s y el valor pico presentado de 2.500 paquetes. La potencia consumida alcanzó los 6,075 W. En la Tabla 2.14 se muestran los valores medidos durante las pruebas realizadas.

El PA Ruckus 7363 utilizado para las pruebas tiene dos antenas de 2,4 GHz y dos de 5 GHz, las que operan en simultáneo, es decir, si se deshabilita una de las dos interfaces las dos antenas de la misma frecuencia se apagarían, y como consecuencia los usuarios pasarían al PA más cercano en la misma banda que estaban.

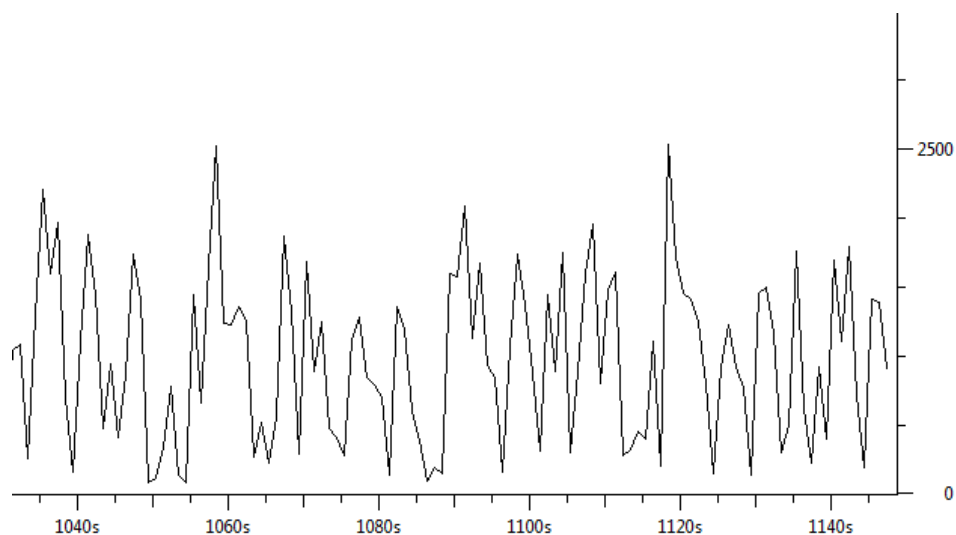


Figura 2.20: Paquetes/s durante la transmisión de 12 videos en tiempo real

Lo mismo ocurre si al tener configuradas varias redes dentro de la misma frecuencia de un PA, la desconecto durante su operación, los usuarios que estaban conectados a ella pasarían al PA más cercano dentro de la misma banda.

Sin embargo, en ocasiones se nota que los usuarios solo usan una de las dos bandas, por lo que la otra puede estar perfectamente apagada, generando un ahorro de energía momentáneo en reposo de 0,81 W y de 0,54 W en caso de una conexión sin transmisión de datos.

Alimentación PoE	Potencia (W)
Potencia Calibrada	13,5
Potencia interfases apagadas	2,835
Potencia interfase de 2,4 GHz activa	3,375
Potencia interfases de 2,4 y 5 GHz activas	3,915
Potencia estabilizada con interfase 2,4 GHz activa	3,645
Potencia estabilizada con interfases 2,4 y 5 GHz activas	4,185
Potencia alcanzada durante pruebas	6,075

Tabla 2.14: Valores medidos de la potencia consumida en un PA

Análisis de la transmisión de datos

En la Figura 2.21 se muestra la cantidad de datos transmitidos de entrada y salida en el hospital Luis Vernaza en horas de la madrugada, con valores de transmisión mínimos desde 0 bps a valores máximos que no superan los 7 Mbps.

En la Figura 2.22 en cambio se muestra la cantidad medida de datos transmitidos de entrada y salida en el Hospital en horas de trabajo normal, con valores mínimos desde 0 bps a valores máximos que no superan los 12 Mbps.

En la Tabla 2.15 se muestra la cantidad máxima y mínima de datos transmitidos en el Hospital en dos días aleatorios de la semana, como se registra los valores no pasan de 12 Mbps.

Podríamos decir que la cantidad de datos que se transmiten de manera normal no son muy elevados, siendo lo importante que el servicio se mantenga permanentemente ya que existen áreas críticas dentro de las entidades gubernamentales consideradas en este estudio. Esto quiere decir que la disponibilidad es fundamental por lo que se debe asegurar el servicio las 24 horas del día y durante toda la semana.

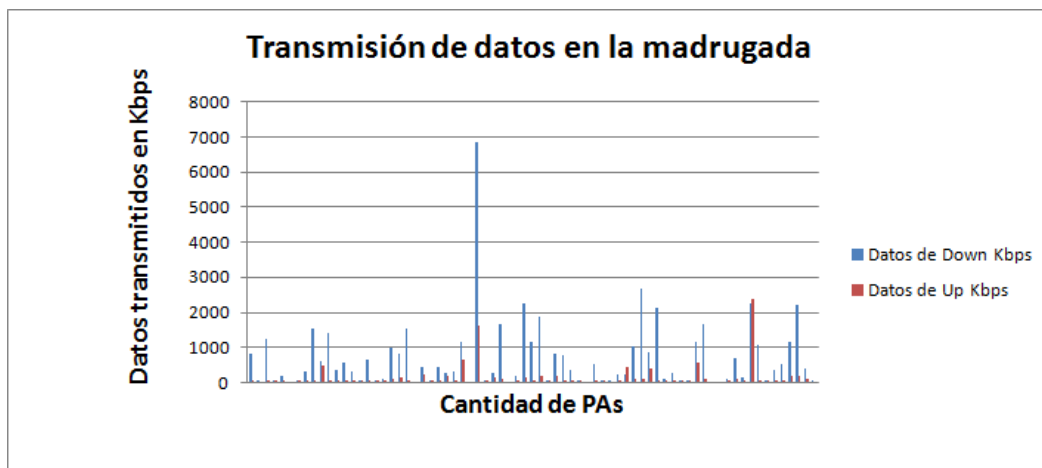


Figura 2.21: Kbps de transmisión en la Red del Hospital en horario de la madrugada

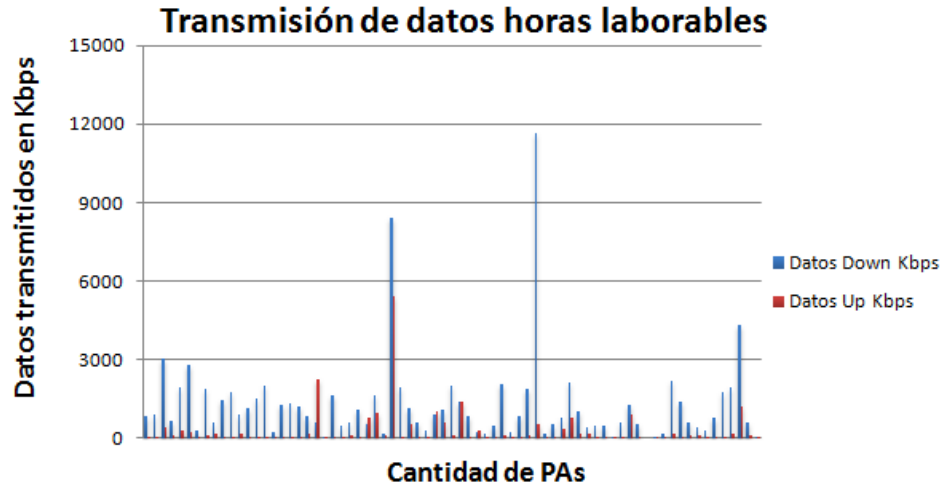


Figura 2.22: Kbps de transmisión en la Red del Hospital en horario laborable

	Jueves		Domingo	
	Down (Kbps)	Up (Kbps)	Down (Kbps)	Up (Kbps)
Máximo	11.670	5.422	6.836	2.398
Mínimo	0	0	0	0
Media	1.253	284	689	135

Tabla 2.15: Kbps de transmisión en la Red del Hospital

Capítulo 3. Método de ahorro de energía para Puntos de Acceso WiFi

En este apartado presentamos nuestra solución, empezamos mostrando el circuito normal de un PA WiFi y luego el de nuestra propuesta, explicando la idea sustancial del circuito de manera general. Describimos el diseño del circuito, su funcionamiento, las variables y las ecuaciones principales, para luego plantear la expresión que nos permite analizar el ahorro de energía que podríamos obtener. Por último, presentamos un modelo matemático según los datos analizados en el apartado 2.4 para el estudio de la potencia consumida de los PA WiFi en función del volumen de datos que se comunican.

3.1 Introducción

En el capítulo 2 revisamos varias opciones de alimentación de energía de los PA. También presentamos pruebas experimentales de análisis del consumo en redes WiFi densas. A partir del análisis de los datos observados se podrían proponer algunas formas de obtener la reducción del consumo de energía de los PA en una red inalámbrica WiFi densa, entre ellas:

- Realizar el apagado de la interfaz WiFi de los PA en áreas de tráfico reducido. Lo que podría ser contraproducente cuando se requiera encenderla y se necesite usarla, sobre todo en áreas críticas. Esto es, si existe algún PA cuya interfaz radio debe estar encendido continuamente, podría incurrir en pérdidas de conexión urgente de los usuarios de la organización o empresa. Con lo cual descartamos el uso de esta propuesta.
- Realizar el apagado de las interfaces de radio en los PA de áreas no críticas, por tiempo de espera de inactividad o cuando un sensor detecta que no hay usuarios conectados. Esta opción, a priori es muy interesante, porque se ha detectado que en general pueden existir zonas de las redes WiFi en organizaciones no gubernamentales, en las que los PA no tienen la necesidad crítica de estar encendidos continuamente. El problema de esta opción es que eventualmente, en algún momento no predecible algún usuario crítico (por ejemplo, un médico), con la necesidad de conectarse desde una zona no crítica y que no pueda hacerlo porque el PA tenga su radio con la interfaz WiFi apagada. Por esa razón no se contempla esta opción.
- Añadir a los PA un circuito electrónico que capte energía electromagnética del área que los rodea. Este circuito generaría una corriente eléctrica inducida que se almacenaría en una batería eléctrica auxiliar. Esa batería se utilizaría para alimentar al PA y habría que definir claramente un algoritmo de alimentación del PA desde la batería o una fuente alternativa de alimentación. Uno de los problemas, ya analizado en el tema 2, es que se requiere de voltajes elevados para mantener la infraestructura principal de los equipos de las redes de las empresas u organismo oficial. En cambio, estos circuitos son únicamente útiles para entregar corriente a equipos de bajo voltaje. Esto significa que cargar la batería auxiliar podría tardar una cantidad de tiempo muy elevada, lo cual es inviable.
- Emplear circuitos de ES para la alimentación de la red. Es factible pero cuando se trata de gran cantidad de PA, distribuidos en interiores, se complica la

posibilidad de su uso, además que requeriría de otros equipos y mayores costos invertidos. También se debe considerar que al ser voltaje continuo el requerido, el cable que conecta la celda solar hasta la batería no puede ser muy largo para evitar las caídas de tensión.

- Realimentar los PA con una batería interna o externa, retroalimentada por el mismo circuito PoE. Es la opción seleccionada, ya que:
 - Aplica un proceso de reingeniería que emplearía el par de cables que se encuentra sin uso en el conector PoE.
 - Proporciona un voltaje de 48 V, el que sería ajustado a través de un circuito reductor para obtener el valor necesario para la carga de una batería.
 - La alimentación es posible de manera permanente, por lo que los ciclos de carga pueden repetirse según sea necesario.
 - Se trata de un circuito sencillo.
- Independiente del consumo de los PA, se puede considerar la disminución de la generación de calor en los cuartos de cableado y por consiguiente conseguir un sistema de enfriamiento más estable. Esto es factible a través del uso de equipos con menor generación de potencia y la eliminación de equipos innecesarios. Hay que tomar en cuenta que aquí se instalan los equipos que cumplen la función de ser PSE, entre ellos los encaminadores y conmutadores Cisco, por ejemplo. Si bien hoy en día el hardware de red trae opciones que permiten reducir el consumo de energía, el alto volumen de equipos utilizados en redes densas y la potencia consumida por cada uno de ellos produce mayor calor al interior de los cuartos de datos, con lo que el sistema de Aire Acondicionado debe ser de entre los 24.000 a los 64.000 BTU, generando un alto consumo de energía eléctrica por cuarto, sobre todo en los cuartos de red principales. Por lo que siempre habría una carga energética importante producida por esa situación.

3.2 Principios de diseño

La idea principal de nuestro mecanismo es reducir el consumo general de energía por PA y así reducir el consumo total de energía de la red. No alteramos la operación del circuito interno del PA, ni de su fuente de energía, ni del circuito de las interfaces de radio internas. Añadimos al PA un circuito controlador, rectificadores y una batería.

A partir del análisis del apartado anterior, enunciamos los siguientes aspectos para nuestra propuesta:

- Diseñar un circuito sencillo controlado que permita ahorrar energía durante el funcionamiento de un PA.
- Que el ahorro gestionado se consiga durante el corte de la alimentación principal y el uso de una fuente alterna.
- Que el circuito no afecte al PA en su operación normal.
- Limitar en las pruebas de laboratorio la cantidad de datos transmitidos.

Además, en el desarrollo de este capítulo establecemos expresiones que determinen la potencia del circuito de un PA sin nuestro mecanismo y lo comparamos con las expresiones que definan la potencia de nuestro circuito para los períodos de trabajo que definimos más adelante, con el fin de encontrar la expresión que nos ayude a obtener un ahorro de energía. Primero presentamos nuestro nuevo mecanismo, luego en los apartados siguientes planteamos el modelo matemático de rendimiento para el ahorro de energía y finalmente un segundo modelo matemático que defina el consumo de potencia según el grado de operación del PA.

Idea básica de nuestro mecanismo

Nuestro mecanismo al emplear una batería requiere de dos períodos de trabajo, uno correspondiente a la carga y otro a la descarga, a los que llamamos ciclos de carga y descarga y que en conjunto forman un ciclo de trabajo. Este proceso es controlado por un dispositivo inteligente cuya función es dar paso secuencial e instantáneo a cada ciclo, además controla el modo de alimentación del PA WiFi (encaminamiento de corriente entre PSE a PA WiFi y batería de manera simultánea o de batería a PA WiFi). La alimentación simultánea del PA WiFi desde PSE y el ciclo de carga de la batería se logra en unidades de tiempo T_c . El ciclo de descarga (alimentación del PA WiFi desde la batería) se logra en unidades de tiempo T_d . Estos dos ciclos se repiten (en ese orden) para siempre. A lo largo del ciclo de carga, la batería almacena energía eléctrica del PSE. Es decir, el PSE proporciona un voltaje constante y una corriente que es suficiente para alimentar el PA WiFi y cargar la batería. Esto se debe a que la corriente suministrada por el PSE se distribuye de acuerdo con la demanda de cada uno de los dispositivos, que en el caso de la batería presenta una demanda creciente al principio, pero por un corto período de tiempo para luego descender y llegar a aproximarse a 0. Durante el ciclo de descarga, la energía almacenada en la batería se usa para alimentar el PA WiFi.

El proceso de trabajo a lo largo del tiempo de todo el sistema es el siguiente:

- Carga de la batería: durante T_c , el PSE alimenta simultáneamente la batería y el PA WiFi. El controlador realiza la conexión para permitir la alimentación de la batería y el PA WiFi en paralelo sin que el consumo de energía exceda el límite máximo de la fuente PSE.
- Descarga de la batería: durante T_d , la batería alimenta el PA WiFi. El dispositivo controlador corta la alimentación desde el PSE.
- Se repiten los pasos anteriores (carga / descarga) cumpliendos k iteraciones. Tengamos en cuenta que el tiempo necesario para cambiar del ciclo de carga al ciclo de descarga y viceversa, no afecta el rendimiento del PA. Esto se debe a que el controlador toma un tiempo insignificante para dicho trabajo.

Nuestro mecanismo funciona bien porque durante T_c los valores de energía PSE para los dos dispositivos corresponden a un porcentaje limitado con respecto a la demanda en un circuito convencional y durante T_d la energía del PSE no se consume. A continuación, detallamos formalmente nuestro circuito:

El circuito convencional de alimentación PoE del PA, se muestra en la Figura 3.1, donde S es la fuente PoE y $Aadt$ el rectificador de voltaje y corriente que envía la energía necesaria para que el PA funcione. En este caso el PA puede consumir toda la corriente liberada por el PSE, así como emplear el voltaje total.

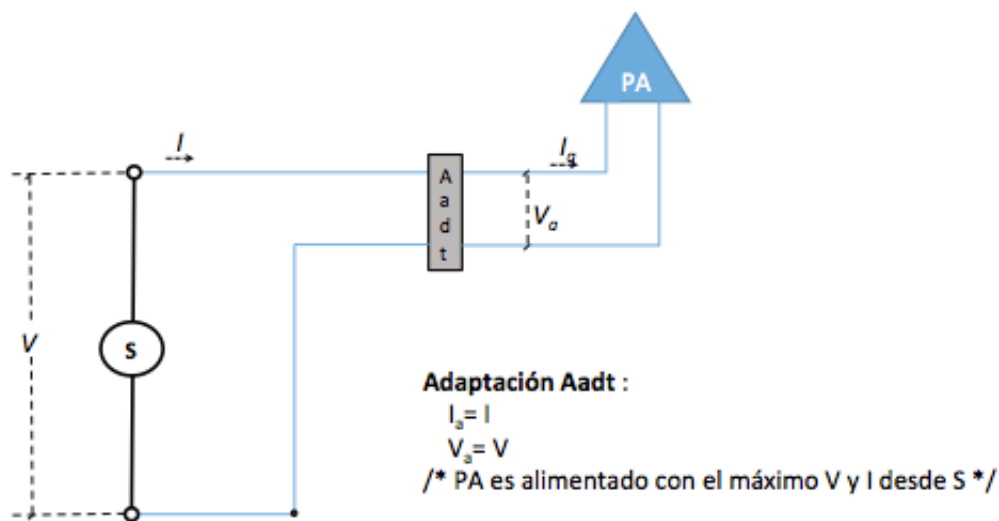


Figura 3.1: Circuito de alimentación PoE de un PA

La Figura 3.2.a muestra un esquema gráfico de los componentes de nuestro mecanismo aplicado a un PA genérico: el *suministro de voltaje* (S) alimenta al *encaminador de energía* (PR) que controla el suministro de voltaje del PA usando una *unidad de control* (CU); básicamente cambia S y el suministro de *batería* (B) para el PA, y se adapta el voltaje y la corriente a través de los rectificadores respectivos para el PA ($Aadt$) y para B ($Badt$). El empleo de la batería implica la formalización de los períodos de carga y descarga, que se aplican de manera continua y por ciclos en la operación de nuestro mecanismo. La Figura 3.2.b muestra el algoritmo de procesamiento: en el período de carga, S carga a B y suministra energía al PA, en el período de descarga, B suministra energía al PA. La CU controla adecuadamente los componentes $Aadt$ y $Badt$ en ambos períodos.

La implantación requiere que una de las salidas de la fuente de alimentación PSE, de aproximadamente 48 V, del puerto PoE esté conectada a la entrada del $Badt$, cuya corriente de entrada es I'_c con un valor máximo de 0,4 A y la otra salida esté conectada al $Aadt$, lo que permite al PA trabajar simultáneamente con el proceso de carga. Una vez que se alcanza T_c durante el proceso de carga, la entrada de voltaje PSE del $Aadt$ se desconecta, entonces B se conecta en su lugar a través del CU . El PA funciona durante T_d con el voltaje V_d suministrado por la batería. El mismo proceso se repite durante todos los ciclos de operación.

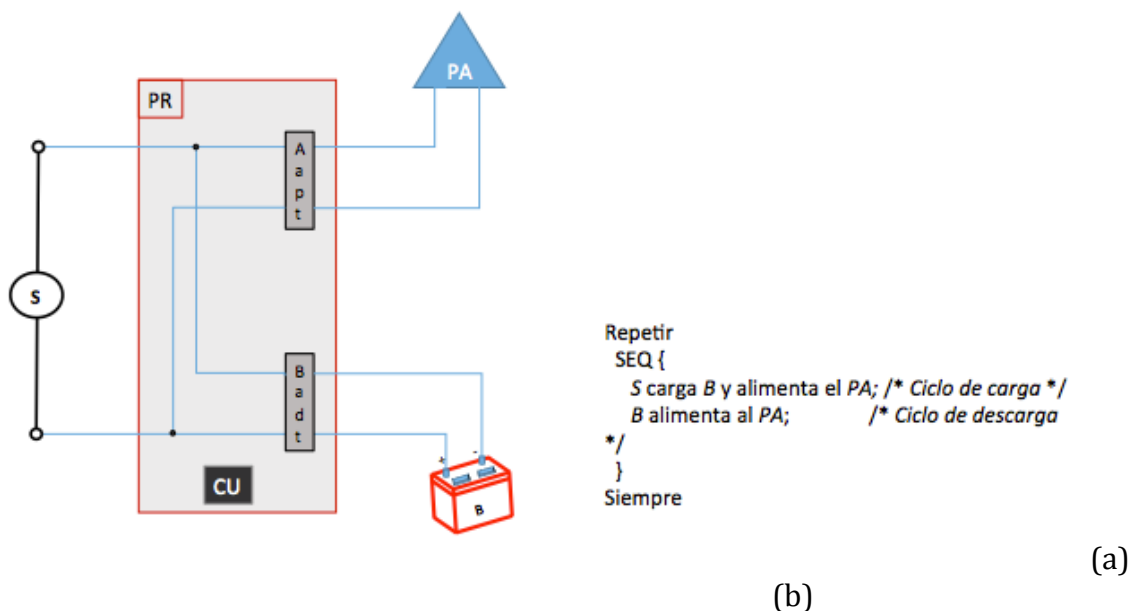


Figura 3.2: (a) Esquema gráfico del PA WiFi y los componentes principales de nuestro nuevo mecanismo para el ahorro de energía. (b) Modelo de procesamiento: períodos de carga y descarga alternados.

El comportamiento mostrado, indica que durante el ciclo de descarga el consumo de energía se debe solo al PA y no existe consumo de energía por parte del *Badt*. El voltaje del PA durante este tiempo depende solo del voltaje suministrado por *B* (V_d). Al contrario, durante el ciclo de carga el consumo depende del PA y de la energía demandada por *B* al cargarse. Como se sabe, la carga de una batería no es lineal lo que significa que I_c es una función no lineal en toda la extensión del ciclo correspondiente. La demanda de corriente de *B* esta relacionada con las capacidades de operación del *Badt*.

Para diseñar el componente *Badt* usamos un convertidor estándar de corriente continua DC - DC (*circuito integrado (IC)*), que cumpla con los requisitos técnicos para cargar la batería seleccionada y que tenga las protecciones térmicas adecuadas (por un posible sobrecalentamiento que pudiera ocurrir durante los ciclos de carga de la batería). Para implantar el *PR*, utilizamos circuitos integrados estándar: (a) *CU*: utilizamos un Arduino One R3 con un microcontrolador basado en el ATmega 328P [132] y un módulo de relé de 4 canales. (b) *Aadt*: su funcionalidad es limitar la corriente que alimenta el PA si es necesario, dependiendo del modelo de PA utilizado en la red WiFi. (c) *Badt*: se utilizó el LM 2576 *IC* [133] que es un regulador de voltaje, con capacidad para controlar cargas de hasta 3 A. Su entrada oscila entre 40 y 60 V (CC) y las posibles salidas son 3,3, 5, 12 y 15 V con una versión de salida ajustable. Tiene una tolerancia de $\pm 4\%$ en el voltaje de salida y $\pm 10\%$ en la frecuencia del oscilador, cuenta con un apagado térmico permitido para una protección total en condiciones de falla. La salida del *Badt* genera un voltaje regulado de 14,27 V para cargar la batería.

3.2.1 Formulación, parámetros de operación y optimización matemática

A continuación, modelamos las condiciones teóricas que deben cumplirse para obtener el ahorro de energía comparando el consumo de energía del sistema según los circuitos mostrados en las Figuras 3.1 y 3.2, es decir, al usar nuestro mecanismo y al no utilizarlo. Consideramos la transición entre carga y descarga de la batería (y viceversa), los períodos requieren una cantidad insignificante de energía y por esa razón no lo modelamos. Esa transición tampoco afecta el rendimiento de la transmisión de las balizas WiFi en el PA.

Para las pruebas realizadas consideramos que $T > 0$ es la cantidad de tiempo durante el test de ahorro de energía, V es la tensión constante y continua suministrada por S e I es la corriente correspondiente. En la Figura 3.1 mostramos el sistema sin nuestro mecanismo y la función del componente *Aadt* (lo incluimos solo por uniformidad en la discusión). Planteamos primero durante T , la expresión que define la potencia consumida (P) del PA sin nuestro mecanismo:

$$P = \int_0^T V_a(t) I_a(t) dt = \int_0^T V(t) I(t) dt$$

Como segundo punto, para analizar el consumo de potencia con nuestro mecanismo, diferenciamos el consumo durante el período de carga (P') y durante el período de descarga (P''). La Figura 3.3 muestra el nombre de los voltajes y corrientes y los convertidores $Aadt$ y $Badt$ en el período de carga. Donde, w_v es un divisor de voltaje del cargador ($Badt$), que depende de los componentes internos y del valor de voltaje requerido para cargar la batería, y w_c es un divisor de corriente del cargador ($Badt$), que depende de los componentes internos y del valor de la corriente necesaria para cargar la batería.

Si el período de carga dura T_c unidades de tiempo, entonces el consumo de potencia en el PA es:

$$\int_0^{T_c} V_a(t) I_a(t) dt$$

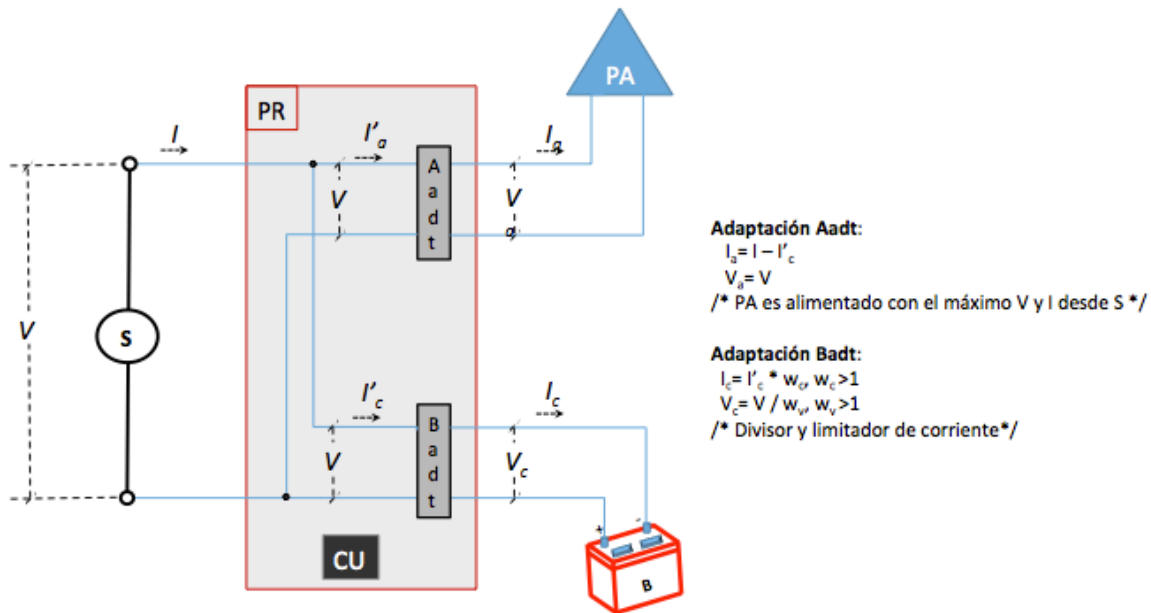


Figura 3.3: Modelo formal durante el proceso de Carga

y la potencia consumida por B :

$$\int_0^{T_c} V_c(t) I_c(t) dt$$

Agregando esas potencias, considerando el consumo de $Aadt$ y $Badt$ e ignorando la potencia consumida en el PR (consideramos es insignificante), y suponiendo que el V sea suficiente para suministrar energía al PA y cargar B , obtendremos:

$$\begin{aligned} P' &= \int_0^{T_c} V_a(t) I_a(t) dt + \int_0^{T_c} V_c(t) I_c(t) dt = \\ &= \int_0^{T_c} V(t) \left(I(t) - \frac{I_c(t)}{w_c} \right) dt + \int_0^{T_c} \frac{V(t)}{w_v} I_c(t) dt \\ &= \int_0^{T_c} V(t) I(t) dt - \frac{1}{w_c} \int_0^{T_c} V(t) I_c(t) dt + \frac{1}{w_v} \int_0^{T_c} V(t) I_c(t) dt = \\ &= \int_0^{T_c} V(t) I(t) dt + \left(\frac{1}{w_v} - \frac{1}{w_c} \right) \int_0^{T_c} V(t) I_c(t) dt \end{aligned}$$

La Figura 3.4 muestra el nombre de los voltajes y corrientes y la adaptación de ellos realizada en $Aadt$ ($Badt$ no transforma sus entradas) en el período de descarga. Donde w_d es un divisor de voltaje con referencia a $Aadt$ y w_b es un factor de multiplicación con referencia a $Aadt$. Si el período de descarga dura T_d , entonces la potencia consumida en el PA es:

$$P'' = \int_0^{T_d} V_a(t) I_a(t) dt = \int_0^{T_d} \frac{V(t)}{w_d} I_d(t) w_b dt = \frac{w_b}{w_d} \int_0^{T_d} V(t) I_d(t) dt$$

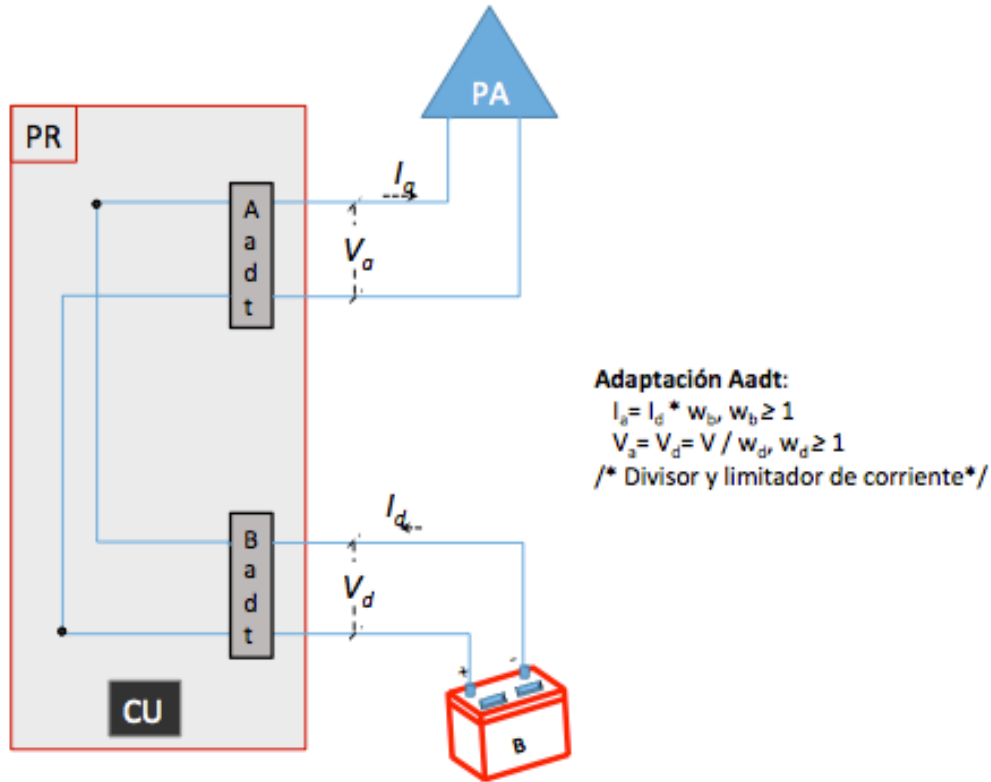


Figura 3.4: Modelo formal durante el proceso de descarga

3.2.2 Modelado de la optimización de las ecuaciones de operación

Describimos ahora las ecuaciones, analizamos los parámetros y su manera de afectación en la operación del circuito. Planteamos la condición principal para que nuestro modelo cumpla con su propósito.

Optimizando T_c y T_d : Consideremos ahora $T = T_c + T_d$, es decir, solo consideramos un período de carga y descarga para optimizar T_c y T_d para obtener el ahorro de energía. Argumentamos que, en general, el ahorro de energía necesita que T_c se minimice y T_d se maximice para obtener los valores apropiados de los coeficientes nombrados con la letra w . El valor de T_c se puede minimizar optimizando w_v, w_c y maximizando I_c en P' , manteniendo el PA funcionando correctamente. El valor de T_d se puede maximizar optimizando w_d, w_b y minimizando I_d , donde el PA podría funcionar con un mínimo de capacidad. Los valores óptimos de los coeficientes w pueden obtenerse en la práctica calibrando la operación del PA. Las expresiones formales de I_c e I_d son bien conocidas. Entonces, a continuación, nos centramos en cómo optimizar sus valores.

Donde:

$$I_c(t) = \begin{cases} I_e(t) = \sum_{i=0}^n w_i t^i; 0 < t \leq T_e \\ w_t; T_e < t \leq T_{ct} \\ I_p(t) = w_p t^{-w_r} (w_p > 0 \text{ and } w_r > 0); T_{ct} < t \leq T_c \end{cases}$$

Los valores de w_i , w_t , w_p , w_r y los límites de tiempo: T_e y T_{ct} determinan el valor mínimo de T_c . Esos parámetros dependen de los valores de fábrica de la batería. En general, se deben tener en cuenta las condiciones de funcionamiento para ajustar sus valores.

Siendo:

$$I_d(t) = w_s t + w_f$$

donde $w_s \approx 0$ y $w_f > 0$. Lo que significa que su pendiente ($+w_s$) es positiva y muy pequeña. Esto permite que la batería pueda comenzar a trabajar con un valor de corriente alto ($w_f > 0$) para mantener funcionando el PA correctamente y dentro de márgenes seguros. Se debe suministrar un voltaje inicial adecuado para asegurar ese valor de corriente inicial.

Optimización del ahorro de energía en varios ciclos de carga y descarga:

Consideremos ahora ciclos k ($0 \leq k \leq K$) de carga y descarga consecutivos. Es decir, $T = k(T_c + T_d)$. La idea principal es observar qué condiciones se deben cumplir para el ahorro de energía (minimizar la cantidad de suministro de energía S). Decidimos trabajar con valores medios de P , P' y P'' .

$$\begin{aligned} \bar{P} &= \bar{V} \bar{I} T \\ \bar{P}' &= \bar{V} \bar{I} T_c + \left(\frac{1}{w_v} - \frac{1}{w_c} \right) \bar{V} \bar{I}_c T_c \\ \bar{P}'' &= \frac{w_b}{w_d} \bar{V} \bar{I}_d T_d \end{aligned}$$

WoS_k es la diferencia del consumo de energía sin y con nuestro mecanismo k ($< \bar{P} - \bar{P}' >_k$), y WoS es un vector cuyas entradas son valores positivos, negativos o cero dependiendo de si se obtuvo un ahorro, desperdicio o si el ahorro es nulo en cada iteración k . La suma de los valores de WoS resultan en el ahorro o desperdicio de energía en k ciclos de carga y descarga. Si es seguro que en cada iteración obtenemos ahorro de

energía, entonces, en promedio, trivialmente obtendremos ahorro de energía en el ciclo de carga y descarga k (caso más restrictivo). Ahora mostramos las condiciones bajo el que se obtiene ahorro de energía en este caso:

$$\bar{V} \bar{I} T - \bar{V} \bar{I} T_c - \left(\frac{1}{w_v} - \frac{1}{w_c} \right) \bar{V} \bar{I}_c T_c > 0$$

Esto es:

$$\bar{I} T_d > \left(\frac{1}{w_v} - \frac{1}{w_c} \right) \bar{I}_c T_c$$

Como $\bar{I}_c < \bar{I}$, la condición $T_d > T_c$ se lograría cuando $w_v > w_c$. Se demuestra que, teóricamente, nosotros podemos calcular los valores de los coeficientes w que permitirían un ahorro de energía después de k ciclos de carga y descarga. Encontrar una solución analítica óptima para las ecuaciones anteriores es muy difícil. Simular las ecuaciones usando la distribución de probabilidad para las entradas de WoS podría ilustrar más sobre la dimensión de valores para coeficientes w . Nos centramos en el caso de que es posible calibrar los valores de coeficientes w en una implantación práctica para obtener ahorro de energía.

3.3 Modos de operación del circuito según el tipo de transmisión

En este apartado proponemos las formas en las que podemos usar el circuito y los experimentos a realizar. Previamente vamos a determinar de manera independiente los valores de V e I para el PA Ruckus durante la transmisión de balizas WiFi y las características de carga para la batería. Luego diseñamos y probamos dos tipos diferentes de experimentos para verificar nuestro modelo formal y que es posible conseguir un ahorro de energía con nuestro mecanismo:

- Análisis del T_c utilizando nuestro mecanismo: el objetivo es analizar el comportamiento de la corriente y el voltaje de carga de la batería cuando el suministro S energiza al PA Ruckus y a la batería simultáneamente. Observamos el comportamiento de I_c , V_c , I_a y V_a .
- Análisis del T_d utilizando nuestro mecanismo: el objetivo es analizar si el PA Ruckus podría funcionar siendo energizado por B y determinar T_d . Observamos el comportamiento de I_d y V_d .

Los experimentos se realizarían en dos formatos: a) manteniendo el PA Ruckus en modo reposo, transmitiendo solo balizas y luego b) en modo activo, transmitiendo una tasa máxima de 2.500 paquetes/s.

3.3.1 Análisis del funcionamiento en modo reposo

Las primeras pruebas se realizarían con el PA en modo reposo. Los experimentos a realizar son codificados como *OBTx* para su identificación. Para todos los casos se haría un análisis durante el proceso de carga (T_c) y el proceso de descarga (T_d).

Pruebas durante el proceso de carga

En este caso procedemos a conectar el *CU* desde la alimentación PoE. El *CU* se conecta al *Aadt* y al *Badt*. Durante el T_c se alimenta al PA y se carga *B* y se miden los valores de voltaje y corriente respectivos. Además, se toma el tiempo de carga de *B*. También se analiza el comportamiento del PA Ruckus, observando su estabilidad y midiendo voltajes y corrientes. Obtenemos: I_c , V_c , I_a , V_a y T_c .

En las pruebas no se conectan dispositivos o equipos a la red del PA Ruckus, solo se transmiten balizas. La idea es analizar la estabilidad del circuito, viendo si la alimentación PoE permite el funcionamiento simultáneo del PA Ruckus y el proceso de carga de *B*.

Pruebas durante el proceso de descarga

Una vez que la batería se cargue (alcanzado el valor máximo de I_c y V_c) se procede a analizar T_d manteniendo activas las interfaces WiFi del PA Ruckus, transmitiendo solo balizas. Ahora el I_d fluye de la batería al PA Ruckus a través de *Aadt* mientras el *Badt* permanece inactivo (el *PR* dejó el PSE en alta impedancia). Es decir, se desconecta la alimentación PoE y la batería es la que alimenta el PA. Observamos la estabilidad de operación del PA y obtenemos los valores de T_d , I_d y V_d .

El proceso se mantiene hasta que la batería llega al voltaje del umbral, luego del cual el voltaje cae rápidamente y al poco tiempo ya no es capaz de mantener funcionando el PA. En ese instante el *CU* habilitaría la entrada de energía al *Badt* para que *B* vuelva a cargarse y al *Aadt* para que se energice el PA.

3.3.2 Análisis del funcionamiento con tráfico estandarizado

En este caso mantenemos los mismos circuitos anteriores, tanto en el proceso de carga como en el de descarga, pero a diferencia de los casos en modo reposo permitimos la conexión de equipos a la red de 2,4 GHz del PA Ruckus. Las pruebas se realizarían con una transmisión de datos de volumen constante ($VDTx$) desde equipos portátiles y/o móviles con una tasa de transmisión baja.

Repetimos las mediciones de T_c y T_d junto con las corrientes y voltajes para cada caso. Verificamos la estabilidad del funcionamiento del PA Ruckus. Asumimos que la corriente que alimenta al $Aadt$ durante el proceso de carga sería un poco mayor que cuando se trabaja a manera de reposo y por lo tanto el tiempo necesario para que B se cargue completamente y llegue a T_c tomaría un poco más de tiempo. A continuación, planteamos una expresión que nos permita determinar el consumo de potencia para el caso de transmisión de datos.

Modelado matemático del consumo de potencia de un PA

En este apartado, en función del comportamiento observado de consumo de potencia en los PA Ruckus, planteamos una expresión matemática que relacione el número de bytes transmitidos con el consumo de potencia, así como con su operación característica. Explicaremos los parámetros considerados y las condiciones de trabajo.

En función del comportamiento estudiado de los PA, podemos plantear una propuesta de modelo matemático a través de las siguientes consideraciones:

- Una potencia total consumida (P_t).
- La potencia del circuito sin enlaces habilitados (P_c).
- La potencia de conexión de enlace (P_i).
- Una potencia de estabilización (P_e).
- Un coeficiente α del enlace de 2.4 GHz.
- Un coeficiente β del enlace de 5 GHz.
- Un coeficiente η para los usuarios conectados.
- Un coeficiente θ que indica que hay usuarios cargando datos.
- Una variable ε (paquetes por segundo, pps) durante un proceso de carga, amplificado en un factor de 50.

Siendo el modelo matemático el siguiente (1):

$$P_t = P_c + (\alpha + \beta)P_i + \eta P_e + \theta \left(1 + \frac{\log(\varepsilon+0,01)}{10}\right) \quad (1)$$

Las pruebas realizadas y comentadas en el apartado 2.4 permitieron establecer los parámetros de comportamiento de la potencia consumida durante la operación de los PA en redes de 2,4 y 5 GHz. En las lecturas se demostró que hay una potencia de operación del circuito del PA aún sin estar encendidas las dos radios, una potencia al habilitar cada radio y una potencia que llamaremos de estabilización, que se presenta si al menos una interface de red está habilitada, por lo que a este término en la fórmula se le aplica la función escalón para que se active en caso de que un enlace esté habilitado, lo mismo ocurre con la potencia producida por la transmisión de datos, que tiene una dependencia a las interfaces del sistema. Finalmente, la potencia total dependería de las interfaces, de si hay usuarios conectados, si hay un proceso de transmisión de datos y de la cantidad de paquetes y/o bytes que se transmiten por segundo, convirtiéndose en variables dependientes para el sistema, es decir llegamos a (2):

$$P_t(\alpha, \beta, \eta, \theta, \varepsilon, H) = P_c + (\alpha + \beta)P_i + \eta P_e H_{\alpha+\beta} (1) + H_{\alpha+\beta} (1) \theta \left(1 + \frac{\log(\varepsilon+0,01)}{10}\right) \quad (2)$$

Donde:

$$\varepsilon = 50 \text{ pps}$$

$$H_{\alpha+\beta} = \begin{cases} 1; \alpha + \beta \geq 1 \\ 0; \alpha + \beta < 1 \end{cases}$$

Los primeros términos de la ecuación producen una potencia consumida a pesar de que no exista transmisión de datos, tal como la potencia del circuito, la que producen los enlaces cuando están habilitados y la de estabilización. Por lo tanto, se podría analizar cada uno de estos factores con la finalidad de conseguir un mejor rendimiento y un ahorro energético sin perjudicar la operación. En la Tabla 3.1 se muestra el comportamiento del consumo de potencia de los PA analizados en función del modelo planteado y que va en relación a los valores medidos durante las pruebas realizadas y presentadas en la Tabla 2.14.

Si para nuestro análisis tomamos los datos de transmisión de la Tabla 2.15, en la que tenemos un valor máximo de 11.670 Kbps, y los parámetros de potencia de la Tabla 2.14,

entonces tendríamos según nuestro modelo un consumo de potencia de 5,8 W en el PA, lo que haría que el *Aadt* exija una corriente de 0,127 A aproximadamente al PSE del PoE. Lo que significa casi el triple de corriente requerida que en el caso de reposo. Esto implicaría probablemente un mayor tiempo T_c para cargar *B*. Sin embargo, hay otros parámetros que pueden incidir en ello, que serán analizados en el capítulo 4.

A pesar del resultado encontrado en este ejemplo, el valor calculado es menor al máximo posible que puede suministrar la fuente PoE, que es 0,4 A, por lo que podemos sustentar la operación simultánea del PA como del *Badt* durante el proceso de carga de *B*, manteniendo estable la operación y el funcionamiento de la red WiFi.

P_c (W)	2,835	η	α	B	θ	Bytes	P_t (W)	%
P_i (W)	0,54	0	0	0	0	1	2,835	21
P_e (W)	0,27	0	1	0	0	1	3,375	25
P_{max} (W)	13,5	1	1	0	0	1	3,645	27
		0	1	1	0	1	3,915	29
		1	1	1	0	1	4,185	31
		1	1	0	1	1	4,645	34
		1	1	1	1	1	5,185	38
		1	1	1	1	10	5,285	39
		1	1	1	1	1.000	5,485	41
		1	1	1	1	1.000.000	5,785	43
		1	1	1	1	10.000.000	5,885	44
		1	1	1	1	100.000.000	5,985	44
		1	1	1	1	795.000.000	6,075	45

Tabla 3.1: Variables del Modelo Matemático propuesto

Capítulo 4. Resultados experimentales

Presentamos el estudio de las características requeridas de operación del PA y de la selección de la batería, los resultados experimentales con las respectivas gráficas que se obtuvieron, en los dos casos estudiados: en reposo y con transmisión constante de bits. Se hace para cada caso un breve análisis de los resultados encontrados y se plantea una discusión final.

4.1 Pruebas iniciales de operación del PA y selección de batería

Para obtener el rendimiento y funcionalidades adecuadas, hicimos varias pruebas de funcionamiento hasta encontrar la mejor opción para obtener los coeficientes adecuados de los componentes *Aadt* y *Badt*, que garanticen el resultado esperado. Por ello realizamos varias pruebas de laboratorio (algunas comentadas en este apartado) y una investigación bastante compleja con respecto a las características requeridas para que el PA funcione de manera óptima y sobre los valores de operación de la batería que se requiere emplear como fuente de alimentación de nuestro mecanismo.

El PA utilizado es un WiFi estándar Ruckus PA Zone Flex 7363 inteligente, IEEE 802.11n. Tiene tecnología de antena adaptativa, estándar PoE Clase 0 IEEE 802.3af, doble banda (5 GHz y 2,4 GHz) y una potencia eléctrica máxima de 12,95 W. La potencia PoE utiliza los terminales 4, 5, 7 y 8 del conector RJ45. Durante la revisión del circuito electrónico del PA detectamos un CI convertidor DC-DC que reduce los 48 V suministrados desde la entrada PoE a 3,6 V para dar energía a los circuitos que alimentan la etapa de comunicación y por ello determinamos que no era necesario tener una fuente alternativa (batería) de 48 V para la operación del PA.

La selección de la batería no fue sencilla porque, hasta donde sabemos, no existe un enfoque estándar para encontrar la batería personalizada para diferentes PA, de diferentes fabricantes. Según el análisis realizado al circuito, primero elegimos una batería de 3,6 V y 800 mAh, logrando que el PA encendiera, pero no fue suficiente para mantener operativo el PA Ruckus. Luego probamos una batería de 4 V y 2.400 mAh; ampliando en mayor grado la corriente, entonces el PA Ruckus podía lograr la ignición y permanecer en estado activo brevemente, lo que claramente no fue suficiente. En paralelo a las pruebas de las baterías, diseñamos un circuito cargador que permitía tener 5 V a la salida, con el que pudimos cargar baterías de 3,6 V y 800 mAh, 4 V y 2.400 mAh y 3,85 V y 3.000 mAh. Para la siguiente prueba de funcionamiento del PA, utilizamos una batería de 3,85 V y 3.000 mAh, logrando el encendido del equipo, activación de las radios de 2,4 GHz y 5 GHz, levantamiento de la señal de 2,4 GHz y navegar por un espacio de 8 m, hasta que se degradó la alimentación del circuito, colocándose el led de encendido en color rojo, lo que significa que estaba en el proceso de activación del equipo. El voltaje de alimentación en ese momento había caído a 3 V. El PA prosigue intentando levantarse generando un estado de on/off de la señal de 2,4 GHz. Al resetearse el equipo el PA se activaba por un momento, repitiéndose el proceso hasta que finalmente se apagó. En la Figura 4.1 se muestra la prueba realizada con la batería de 3,85 V.



Figura 4.1: Prueba de funcionamiento del PA con batería de 3,85 V.

En la cuarta prueba se empleó una batería de 3 celdas de 4,2 V, empleada en drones de fumigación, con una capacidad máxima de 12,6 V y 5.400 mAh, mostrada en la Figura 4.2. Empezamos con un voltaje de 12,57 V. En los primeros 10 minutos se habilitó una conexión a Internet, pero sin navegar para ver el nivel de tráfico propio entre el router, el PA y la NIC del computador (balizas), manteniéndose valores de datos inferiores a 200 paquetes/s. Posteriormente se accedió a varias páginas simples, de noticias y correo, subiendo la transferencia de datos a valores menores a los 900 paquetes/s. Al habilitar videos en tiempo real tuvimos valores superiores a los 1.000 paquetes/s. Finalmente se levantó una Voice Call en Hangout y seis videos en tiempo real, llegando a obtenerse valores de hasta 2.500 paquetes/s. Durante la prueba la corriente del circuito oscilaba entre los 0,2 y 0,4 A, mientras que el voltaje de la batería bajaba en un aproximado de 0,1 V por cada hora de operación. Al llegar a los 11,1 V la batería ya no tenía la capacidad para mantener operativo el PA. En la Figura 4.3 se muestra el volumen de datos transmitidos durante la prueba realizada. A pesar del rendimiento mostrado se descartó este tipo de batería al presentar problemas al intentar cargarla luego de las pruebas realizadas, por lo que no daba confiabilidad para operaciones continuas como la nuestra.



Figura 4.2: Prueba de funcionamiento del PA con batería de 3 celdas.

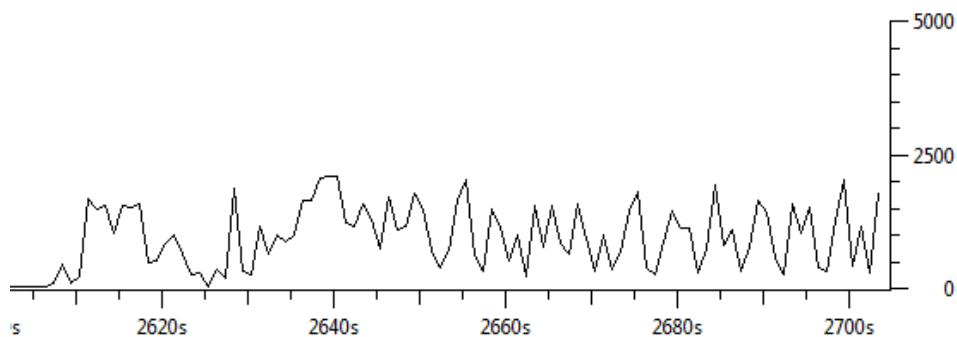


Figura 4.3: Volumen de datos transmitidos durante prueba de Video Call.

Finalmente, probamos con una batería ácida sellada de 12 V y 5.000 mAh que pudo mantener el PA Ruckus funcionando durante largos períodos de tiempo, por lo que optamos por seguir las pruebas de laboratorio con ella. Pudimos observar que los leds tenían mayor intensidad que en las pruebas anteriores y que el dispositivo quedaba listo para operar, por lo que procedimos a medir corriente durante la operación. Los valores que se leyeron en 3 h de pruebas directas no superaron los 400 mAh y más bien oscilaba entre los 200 y 300 mAh.

Durante las pruebas se accedió a 14 páginas con el navegador Google Chrome y 12 con Internet Explorer, entre las cuales teníamos videos en tiempo real y videos desde Youtube. También se conectó a la red un celular que actualizó durante la conexión Youtube, Google Maps, Google Chrome, Google Play, Google Drive, software de Huawei, etc., y la corriente no superó los 300 mAh. Al inicio de las mediciones la batería tenía una carga de 13,5 V y luego de dos horas de operación había caído a 12,5 V. A su vez se procedió con la medición de datos transmitidos, obteniéndose valores que llegaban hasta los 2.000 paquetes/s, con 7 páginas de video en tiempo real, un video musical y 2 páginas de correo. La Figura 4.4 muestra la variación del volumen de datos transmitidos durante la prueba realizada.

Una vez seleccionada la batería se procedió a implantar el prototipo de un segundo circuito cargador, que acepte 48 V de entrada, pero durante la primera prueba que hicimos con la batería de 12 V el transistor del cargador empezó a calentarse, por lo que se le añadió un disipador de calor. Sin embargo, la corriente se mostraba inestable, por lo que se decidió emplear otro circuito cargador con un CI LM 2576, comentado ya en el apartado 3.1, con una entrada de hasta 60 V y salidas de hasta 15 V, con la adecuada protección contra temperaturas elevadas. El cargador o *Badt* se muestra en la Figura 4.5. Luego de ello se procedió a realizar varias pruebas de carga, midiendo el tiempo de carga y la corriente generada.

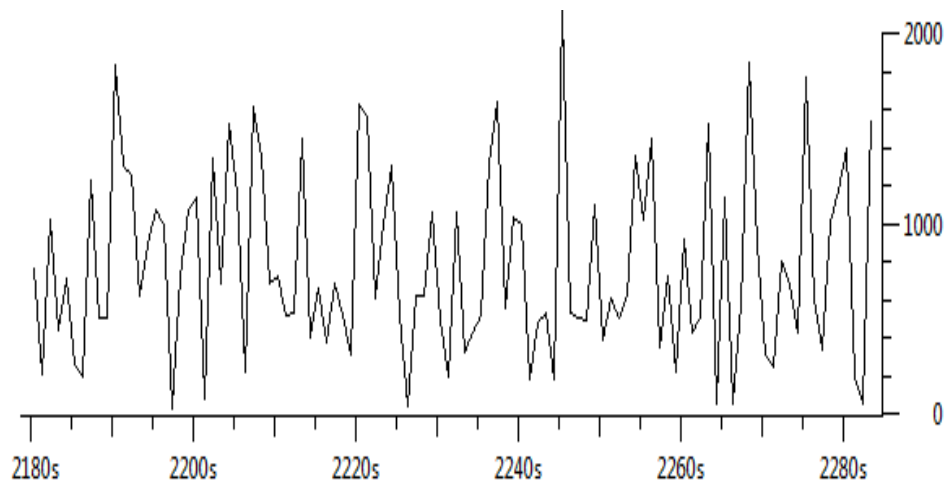


Figura 4.4: Transmisión de datos durante prueba de batería de 12 V y 5.000 mAh.



Figura 4.5: *Badt* o circuito cargador

Una vez seleccionada la batería y el *Badt*, empezamos a diseñar el circuito lógico que conmute las entradas de voltaje de PoE a la batería y viceversa. Todo este proceso y la calibración de los parámetros (w) identificados en la Sección 3.2 nos llevó alrededor de 2 meses (4 horas por día aproximadamente) porque era un proceso complejo. Ejecutamos alrededor de 20 pruebas, con diferentes tipos de baterías y adaptadores de voltaje. A continuación, realizamos mediciones del PA trabajando sin nuestro circuito. Buscamos valores de corriente y voltaje del PA Ruckus, que solo transmitía señales de conexión y balizas WiFi (sin datos del usuario). Encontramos los rangos de voltaje y corriente que se muestran en la Tabla 4.1.

Variable	Valor
$I (A)$	[0,03; 0,05]
$V (V)$	[46,2; 46,7]
$I_{\max} (A)$	0,05

Tabla 4.1: Variables de Operación del PA

En la Figura 4.6 se muestra una de las mediciones del *Voltímetro (Volt)* y *Amperímetro (Amp)* (46,5 V y 0,05 A). Si utilizamos esos valores para calcular la potencia instantánea, tendríamos un valor de 2,325 W de potencia a la entrada del PA. Si bien durante la prueba realizada no hubo transmisión de datos la potencia empleada es la que se requiere para el consumo propio del circuito y mantener la interfaz de red (radio) habilitada. En cambio, la potencia obtenida en el capítulo 3 y presentada en la Tabla 3.1 corresponde a la potencia consumida (no de entrada) por el PA y que para el caso analizado se puede comparar con las potencias que no están relacionadas con la transmisión de datos o la presencia de usuarios y es la potencia de los circuitos electrónicos del PA, que de acuerdo a la ecuación (2) es de 3,375 W.

Las mediciones se realizaron conectando las puntas de los cables rojos del *Volt* y del *Amp* al cable naranja positivo (+) del PoE. La punta del cable negro del *Volt* está conectada en la unión de los polos negativos (-) del PoE (cable lila) y el cable negativo que proviene del puerto RJ45 del PA Ruckus (marrón). La punta del cable negro del *Amp* está conectada al cable positivo que proviene del puerto RJ45 del PA Ruckus (azul).

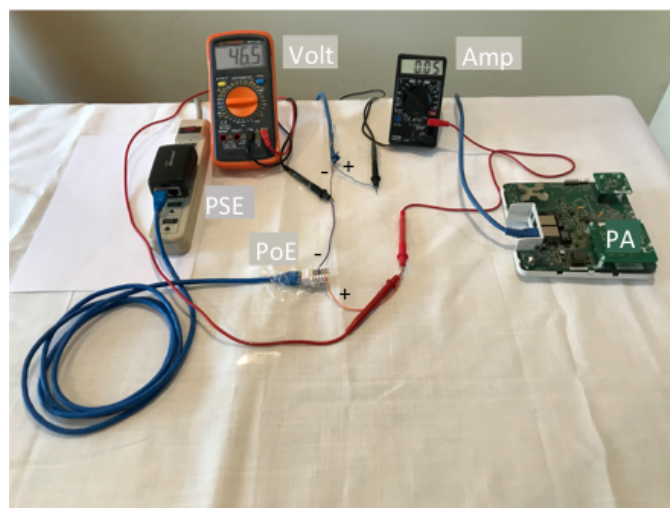


Figura 4.6: Medición del suministro de corriente y voltaje al PA solo transmitiendo balizas.

Una vez encontrados los valores de trabajo máximos y mínimos de V e I para el PA Ruckus, probamos la evolución temporal de la corriente de carga y el voltaje de la batería de manera aislada, es decir, sin emplear el PA en el proceso, conectando la alimentación PoE al *Badt* y este a la *B*. Lo hicimos para confirmar los valores teóricos encontrados en la literatura, para observar el funcionamiento correcto del proceso de carga y para observar detalles particulares de esa batería. Inicialmente, la batería tenía un voltaje de vacío (antes de comenzar la carga) de 12,15 V (Figura 4.7). Después presenta un rápido crecimiento (pendiente de 0,253), a los 3 m la corriente alcanza el valor máximo de 1,27 A. Ese valor máximo se mantiene por un período de tiempo muy corto. Luego se produce una caída prolongada hasta 240 m cuando la corriente alcanza el valor de 0,02 A. En ese período de tiempo V alcanzó los 14,19 V. Consideramos que a los 240 m la batería estaba cargada, pero continuamos midiendo V e I hasta los 360 m. En ese período, I se mantuvo constante y el V aumentó 0,03 V.

De la prueba podemos concluir que la mayor parte de la carga se realiza en los primeros minutos, con el 85% del total, mientras que el 15% restante se obtiene en las últimas horas lentamente y a baja potencia. Para que la batería funcione correctamente, requiere un tiempo de carga mínimo de 4 horas, con una corriente máxima de 1,27 A. En la Tabla 4.2 se muestran los valores medidos en una de las pruebas realizadas.

Una vez determinados los valores de V e I para el PA Ruckus durante la transmisión de balizas WiFi y las características de T_c para la batería en forma independiente, probamos los dos tipos de experimentos planificados para verificar nuestro modelo formal y que era posible conseguir un ahorro de energía:

- Análisis del T_c utilizando nuestro mecanismo.
- Análisis del T_d utilizando nuestro mecanismo.

$V_o = 12,15$ V	Batería 12 V 5000 mAh		
T (h)	I_c (A)	V_c (V)	% de carga
0,03	1,27	13,91	85,00
1	0,44	14,06	92,27
2	0,18	14,13	95,65
3	0,09	14,17	97,58
4	0,02	14,19	98,55
5	0,02	14,20	99,03
6	0,02	14,22	100,00

Tabla 4.2: Valores de Voltaje y Corriente medidos durante el proceso de carga de la batería

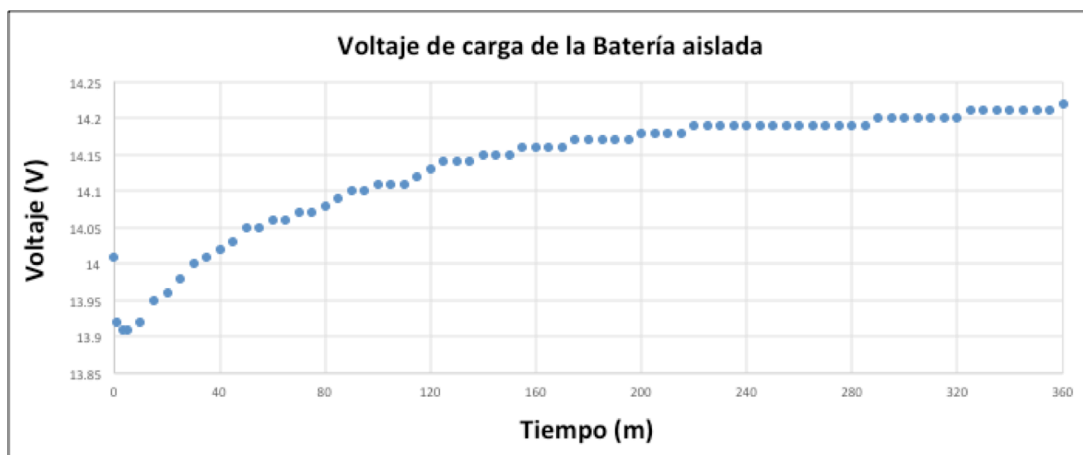
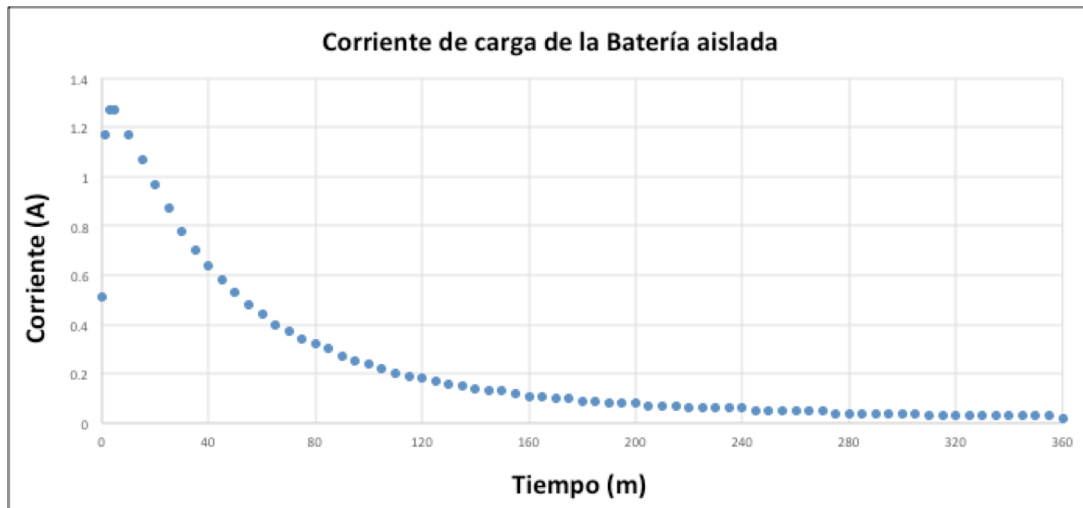


Figura 4.7: Medición de la corriente y el voltaje de carga de la batería aislada

Los experimentos se realizaron en dos formatos: a) manteniendo el PA Ruckus transmitiendo solo balizas (aproximado de 200 paquetes/s) y luego b) transmitiendo una tasa máxima de 2.500 paquetes/s. A continuación, presentamos los dos experimentos.

4.2 Análisis de resultados en modo reposo

Hacemos un análisis de cómo opera el circuito en modo reposo. Consideramos que se podrían presentar transmisiones ocasionales solo de balizas con un tamaño no mayor a 200 paquetes/s. Revisamos los parámetros y características esenciales y presentamos gráficas en función de los datos que se obtuvieron.

En este paso hicimos varias pruebas, pero presentaremos dos de ellas, (codificamos los experimentos como *OBTx-1* y *OBTx-2* de ahora en adelante).

Anteriormente presentamos las curvas de corriente y voltaje de carga de la batería aislada que dura 6 horas. Ahora presentamos las mismas curvas para *OBTx-1* y *OBTx-2*, cuando usamos la batería en nuestro mecanismo.

Proceso de carga

La Figura 4.8 muestra una foto con los elementos de hardware, las interconexiones y las mediciones en los dispositivos de *Volt* y *Amp*. El PoE está conectado (cable naranja) al *CU* (que distribuye el *V* para *Aadt* y *Badt*), al *Aadt* y *Badt* (cables lila). Hicimos mediciones para:

- Salida PoE (Figura 4.8.a):

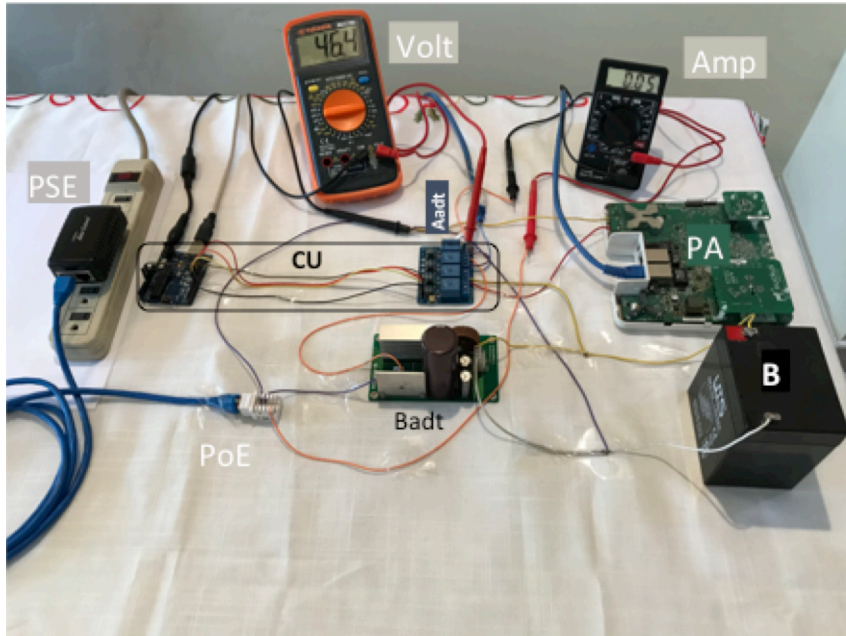
V (*Volt*): la punta de cable negro (-) de *Volt* está conectada al *Aadt* y la punta de cable rojo de *Volt* (+) a la *CU*. Finalmente, el *Volt* midió 46,4 V.

I (*Amp*): el cable naranja es interceptado por el *Amp* conectando primero su punta de cable negro (-) a la salida PoE y la punta de cable rojo (+) a la *CU*. Finalmente, el *Amp* midió 0,05 A.

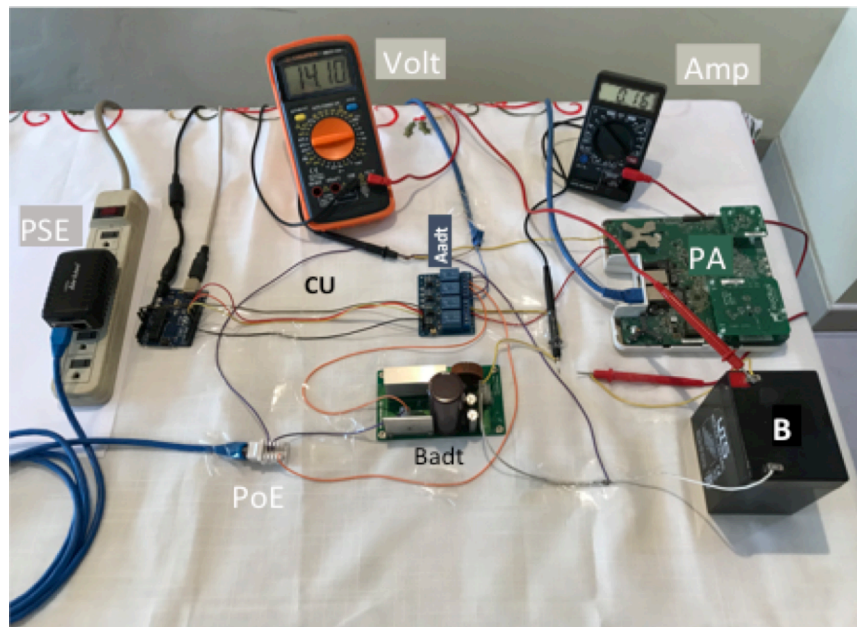
- Salida *Badt* (Figura 4.8.b):

V_c (*Volt*): la punta del cable negro (-) de *Volt* está conectada al *Aadt* y la punta del cable rojo de *Volt* (+) al terminal positivo de *B*. El V_c que se muestra en la Figura corresponde al 98,6% del voltaje total cargado, el *Volt* midió 14,1 V.

I_c (*Amp*): la punta del cable negro (-) de *Volt* está conectada a un cable amarillo conectado a la *CU* y la punta del cable rojo de *Volt* (+) a un cable amarillo conectado al terminal positivo de *B*. El I_c que se muestra en la Figura corresponde al 98,6% de la tensión total cargada, el *Amp* midió 0,16 A.



(a)



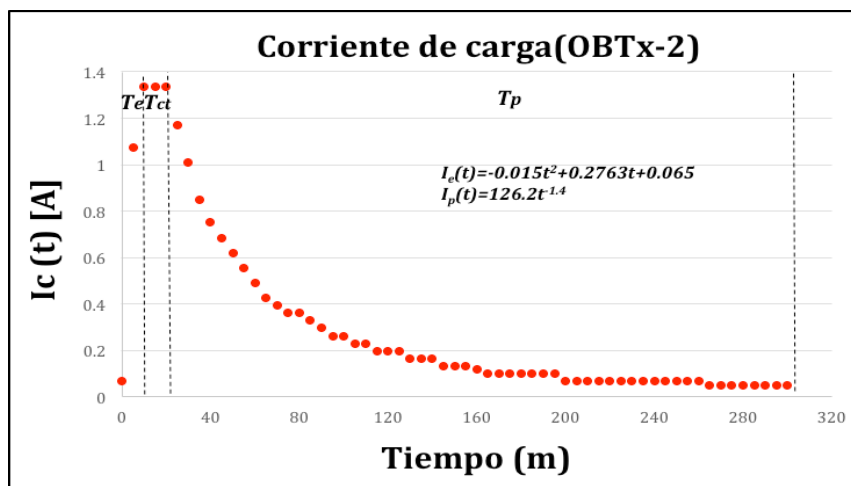
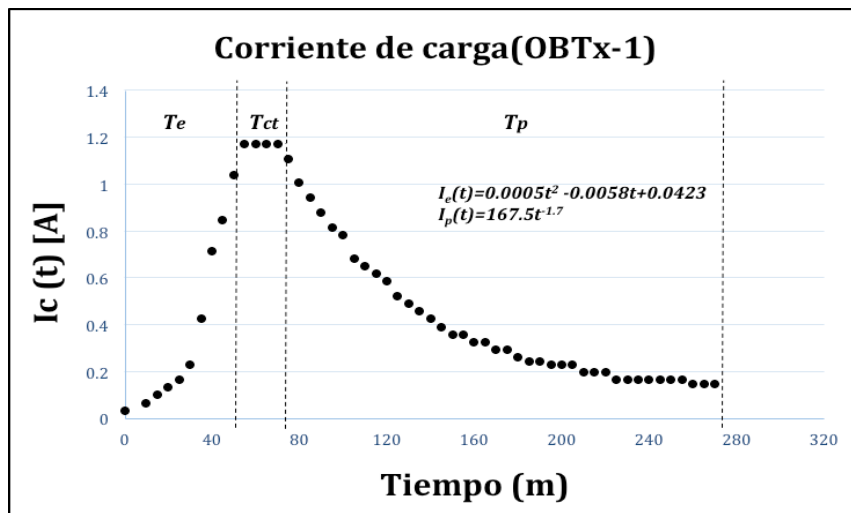
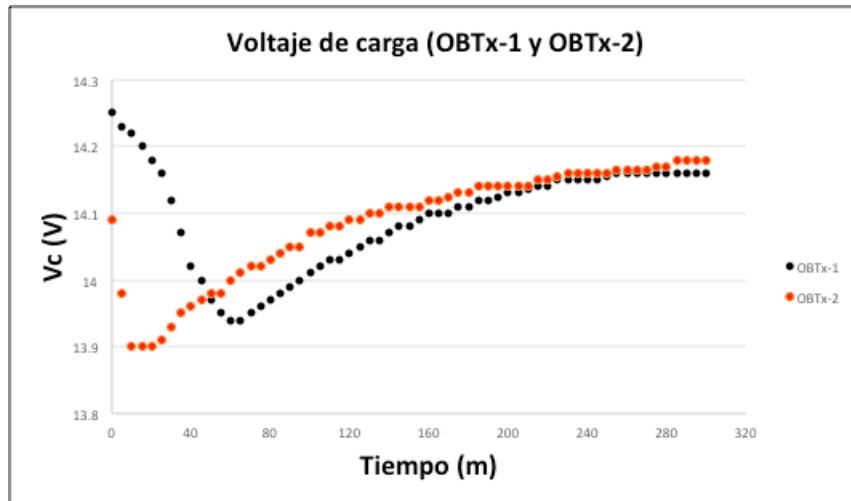
(b)

**Figura 4.8: Carga de corriente y voltaje de la batería con nuestro mecanismo:
a) la salida PoE, b) la salida Badt.**

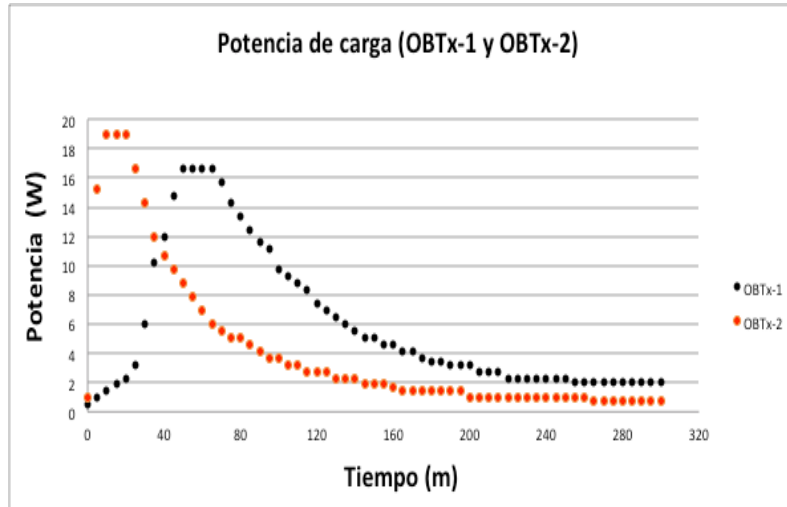
Los resultados obtenidos de I_a y V_a permiten obtener una potencia de entrada de 2,32 W, necesaria para la operación del circuito electrónico del PA y que la interfaz de red (radio) permanezca habilitada. Si comparamos con el valor calculado en la Tabla 3.1 del capítulo anterior según la ecuación que propusimos (2) resulta inferior al mismo debido a que no es la potencia de salida del PA.

Los valores de V e I fueron suficientes para mantener las interfaces WiFi de 2,4 y 5 GHz del PA Ruckus funcionando y a su vez cargando la batería de ácido de plomo (B).

Como era de esperar (según la literatura y nuestro modelo formal), los valores de V_c e I_c variaron a lo largo del tiempo, como se muestra en la Figura 4.9. Inicialmente, la batería tenía un voltaje de vacío (antes de comenzar la carga) de 3 V ($OBTx-1$) y 8,34 V ($OBTx-2$). Cuando se conectó el $Badt$ (y PoE), el V_c aumentó a 14,25 V ($OBTx-1$) y 14,09 V ($OBTx-2$). En ambas pruebas, el V_c cae a un valor mínimo (valle) y luego alcanza un valor máximo cercano a los 14,2 V, llegando a un valor de T_c de alrededor de 270 m. La diferencia más significativa ocurre en los primeros 45 m (alrededor de 0,32 V); esa diferencia se reduce a los 210 m al valor de 0,05 V y 0 V a los 320 m. Estas diferencias se deben al voltaje de vacío inicial. Encontramos el valor del coeficiente $w_v = 3,24$. Representamos por separado a I_c porque diferenciamos tres intervalos de tiempo en el gráfico (T_e , T_{ct} y T_p) con líneas discontinuas verticales. El final de T_e (inicio de T_{ct}) para $OBTx-1$ (55 m) fue mayor que $OBTx-2$ (10 m) debido a la tensión de vacío. Durante T_e la demanda de I_c aumentó al máximo (100% para $OBTx-1$ y $OBTx-2$) del proceso general; y el V_c aumentó a 98,11% ($OBTx-1$) y 95,2% ($OBTx-2$) y entonces el V_c aumentó lentamente hasta alcanzar T_c . Debido a que en T_e el $Aadt$ usó solamente 0,04 A, el $Badt$ pudo entregar suficiente corriente para cargar la batería sin la generación de energía adicional por parte del PSE. La corriente de estabilización (w_t) se alcanzaría en los valores de 1,17 A ($OBTx-1$) y 1,33 A ($OBTx-2$) con una duración de 15 y 10 m respectivamente (T_{ct}). Durante T_{ct} el V_c fue casi constante. Durante T_p , la corriente alcanzó los 0,15 A ($OBTx-1$) y 0,05 A ($OBTx-2$) como una función potencial negativa. Encontramos los valores del coeficiente $w_c = 3,25$. Las pruebas permitieron determinar que las curvas de consumo de potencia tienen la misma forma que las curvas de I_c escaladas por V_c . El consumo máximo se alcanzó en T_e y luego decayó a aproximadamente 2 W ($OBTx-1$) y 0,7 W ($OBTx-2$). Es decir, la batería consumió una cantidad limitada de la energía suministrada por el PSE.



(a)



(b)

Figura 4.9: a) Evolución de V_c e I_c en el tiempo. b) Evolución del consumo de energía en el tiempo (T_d).

Las ecuaciones de corriente para las dos pruebas son:

OBTx-1:

$$I_c(t) = \begin{cases} I_e(t) = 0,0005t^2 - 0,0058t + 0,0423; & 0 < t < 55 \\ I_{ct} = 1,17, & 55 < t \leq 70 \\ I_p(t) = 1671,5t^{-1.681}, & 70 < t \leq 270 \end{cases}$$

OBTx-2:

$$I_c(t) = \begin{cases} I_e(t) = -0,015t^2 + 0,2763t + 0,065; & 0 < t < 10 \\ I_{ct} = 1,33, & 10 < t \leq 20 \\ I_p(t) = 126,16t^{-1.38}, & 20 < t \leq 300 \end{cases}$$

Cuando la corriente I_p tiende a 0, esto es en los 270 y 300 m para las pruebas realizadas, se puede considerar que la batería se cargó correctamente y se alcanzó lo que consideramos T_c y el voltaje de carga final de la batería, medido al desconectar el cargador era 13,49 y 13,45 V (necesario para comenzar el próximo proceso de carga). Se debe tener en cuenta que la prueba se realizó con suministro simultáneo al circuito del PA, durante todo el proceso de carga, con una corriente de 40 mA en ambos casos, suficiente para mantener el equipo encendido (con las dos interfaces inalámbricas activadas, 2,4 y 5 GHz), y desplegando la transmisión ocasional de balizas. La Tabla 4.3 muestra los valores de las variables y los pesos obtenidos en las dos pruebas.

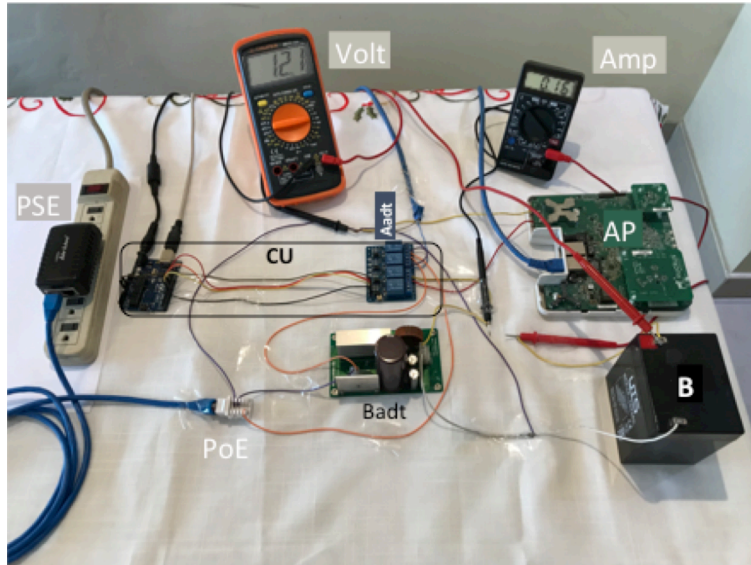
Variable	OBTx-1	OBTx-2
$I_e \text{ max (A)}$	1,17	1,33
$V_{en \text{ vacío (V)}}$	3	8,34
$V_c \text{ inicial (V)}$	14,25	14,10
$V_e \text{ (V)}$	13,94	13,90
$T_e \text{ (m)}$	55	10
W_{i0}	0,0005	-0,015
W_{i1}	-0,0058	0,2763
W_{i2}	0,0423	0,065
$T_{ct} \text{ (m)}$	15	10
W_i	1,17	1,33
$T_p \text{ (m)}$	200	280
$I_{pmin} \text{ (A)}$	0,15	0,05
W_p	1671,5	126,16
W_r	-1,681	-1,38
$V_c \text{ medido (V)}$	14,16	14,18
$V_c \text{ final (V)}$	13,49	13,45
$T_c \text{ (m)}$	270	300

Tabla 4.3: Variables medidas durante el proceso de carga sin transmisión

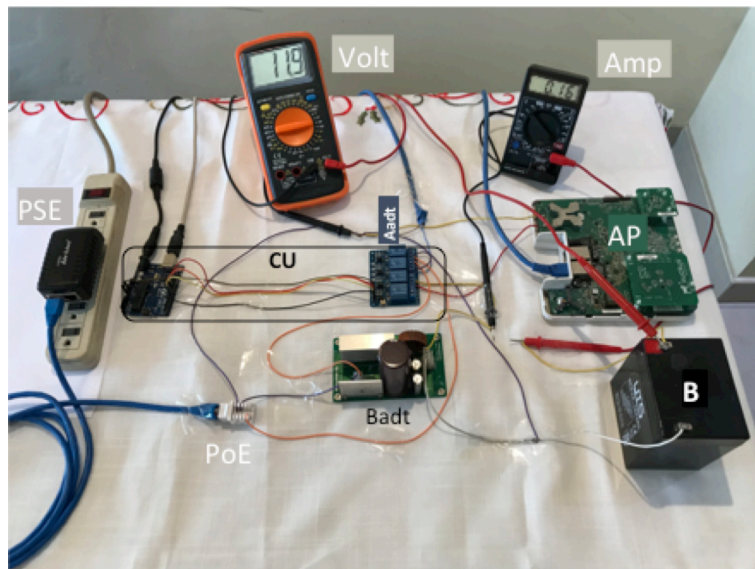
Proceso de descarga

Asumimos que la batería estaba cargada (había alcanzado el valor máximo de I_c y V_c definido en la Sección anterior) para analizar T_d . Se procedió a analizar el consumo de energía en T_d manteniendo activas las interfaces WiFi de PA Ruckus, transmitiendo solo balizas. Ahora el I_d fluye de la batería al PA Ruckus a través de $Aadt$ y $Badt$ (el PR dejó el PSE en alta impedancia). La Figura 4.10 muestra dos figuras con los dispositivos *Volt* y *Amp* para medir I_c y V_c para *OBTx-1* y *OBTx-2*. Hicimos mediciones para:

- V_d (*Volt*): la punta del cable negro (-) de *Volt* está conectada al *Aadt* y la punta del cable rojo de *Volt* (+) al terminal positivo de *B*. Finalmente, cuando el V_d ha alcanzado el 84,5% (*OBTx-1*) y 88,9% (*OBTx-2*) *Volt* midió 12,1 V (*OBTx-1*) y 11,9 V (*OBTx-2*).
- I_d (*Amp*): la punta del cable negro (-) de *Volt* está conectada a un cable amarillo conectado a la *CU* y la punta del cable rojo de *Volt* (+) a un cable amarillo conectado al terminal positivo de *B*. Finalmente, cuando el V_d ha alcanzado el 84,5% (*OBTx-1*) y el 88,9% (*OBTx-2*) el *Amp* midió 0,16 A (*OBTx-1* y *OBTx-2*).



(a)



(b)

Figura 4.10: Corriente (I_d) y voltaje (V_d) durante la descarga de la batería: a) *OBTx-1* y b) *OBTx-2*

Como era de esperar (de la literatura y nuestro modelo formal), el V_d y el I_d variaron a lo largo del tiempo, como se muestra en la Figura 4.11. Después de que V_d alcanza los 12 V, entonces disminuyó rápidamente su valor a 7 V aproximadamente. Observamos experimentalmente que por debajo de ese valor el PA Ruckus ya no trabaja bien y se apaga.

Por lo tanto, ese valor nos indica el T_d . Es decir, $T_d = 467$ m (OBTx-1) y $T_d = 412$ m (OBTx-2). Inicialmente, V_d tenía valores de 13,9 V (OBTx-1) y 13,5 V (OBTx-2), e I_d aumentó rápidamente a casi 0,18 A y luego cae y se estabiliza en un valor casi constante de aproximadamente 0,16 A hasta que V_d caiga por debajo de los 12 V. Finalmente, aumenta drásticamente hasta que V_d se acerca a los 7 V. Confirmando el valor de T_d observado para V_d . El consumo de potencia estaba en el rango de 1,5 W (OBTx-1) y 2,2 W (OBTx-2), que era un valor bajo. En ambas pruebas $w_s \rightarrow 0$ y $w_f > 0$. Eso significa que I_d puede comenzar desde un valor lo suficientemente grande como para mantener el PA funcionando dentro de sus márgenes correctos. Eso implica proporcionar un V_d adecuado.

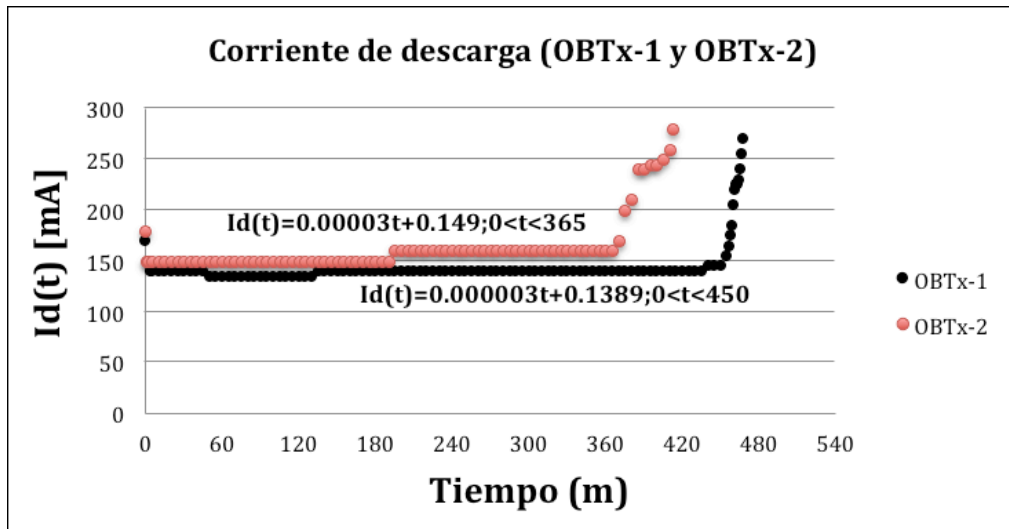
Las ecuaciones siguientes representan a las corrientes (hasta el umbral de 12 V) de las pruebas realizadas durante la descarga de la batería:

OBTx-1:

$$I_d(t) = 0,0034t + 138,93; 0 < t < 450$$

OBTx-2:

$$I_d(t) = 0,0336t + 149,04; 0 < t < 365$$



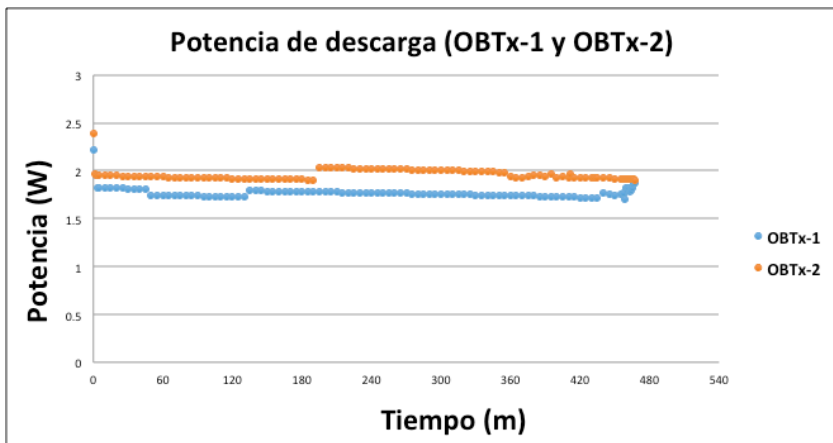
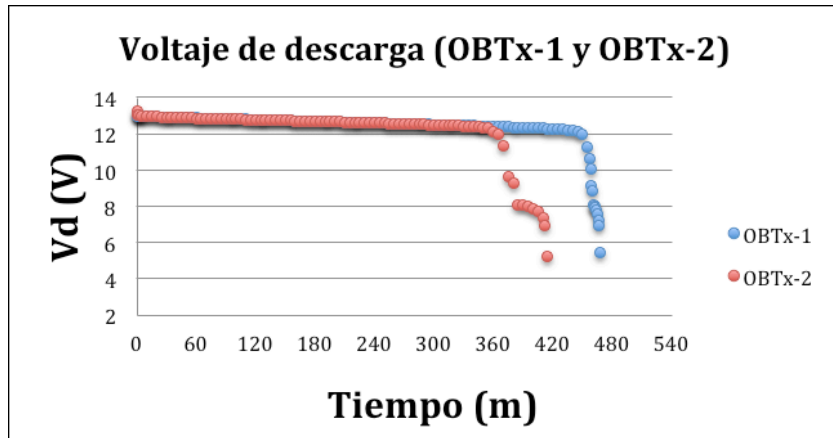


Figura 4.11: Evolución de V_d e I_d y del consumo de energía en el tiempo (T_d).

La potencia consumida por el PA al iniciar las pruebas experimentales, con la energía entregada por B , fluctuó entre 2,43 W y 2,5 W. Estos valores son aceptables y muy similares a los consumidos cuando el PA se alimenta desde el puerto PoE.

4.3 Análisis de resultados en modo activo

Analizamos cómo opera el circuito en modo activo. Revisamos los parámetros y características esenciales y presentamos los gráficos que se obtuvieron de los datos registrados. Realizamos pruebas con una transmisión de datos de volumen constante ($VDTx$). En este caso el circuito se conecta de la misma manera que en los casos de reposo, la única diferencia es que se levantan conexiones al PA WiFi desde equipos portátiles y/o móviles con una tasa de transmisión baja. La Figura 4.12 muestra la carga de la batería mientras el PA transmite datos. Se observa la medición de los valores de voltaje en la entrada $Badt$ (V) y en la batería (V_c), además de la corriente que alimenta el $Aadt$ (I'_a).

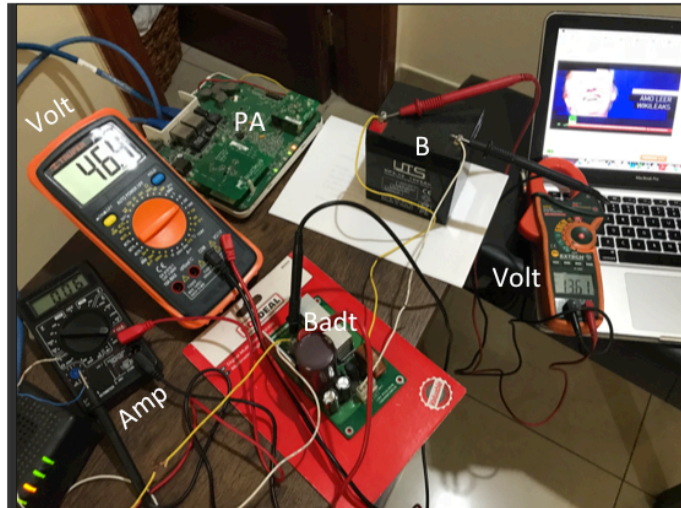


Figura 4.12: Medición del voltaje y corriente del PA con $VDTx$ mientras se carga la batería.

En este caso la corriente que alimenta al $Aadt$ es un poco mayor que cuando se trabaja a manera de reposo y alcanzar el voltaje de carga necesario para llegar a T_c toma un poco más de tiempo.

Proceso de carga

Ahora mostramos las curvas respectivas cuando el PA transmite datos constantemente ($VDTx$), considerando que T_e es insignificante ya que la corriente aumenta en fracciones de segundo al valor de I_{ct} , porque el voltaje de la batería antes del proceso de carga fue de 12,14V. En la Figura 4.13 se muestra que el valor de I_{ct} es 1,14 A, que es equivalente al peso w_t y que T_{ct} es 10 m. Una vez que se completó el tiempo de T_{ct} , el actual I'_c entregado al $Aadt$ comenzó a decaer lentamente durante T_p . El valor de la corriente de carga se aproxima lentamente a 0,16 A como una función potencial a medida que alcanza T_c , alcanzando también el valor de voltaje máximo medido de la batería de 14,07 V. El gráfico muestra los valores de T_p y T_c : que son 470 y 480 m respectivamente, pero a partir de 360 m podríamos considerar que la batería tiene suficiente carga para funcionar sola. En la prueba, la velocidad de transferencia de datos es de 320 Kbps con un volumen total transmitido durante la prueba de 9,2 Gb, donde el total de datos transmitidos y recibidos fue de 260 Mb y 8,93 Gb respectivamente. Ahora podemos emplear la ecuación planteada en el apartado 2.4 para calcular la potencia consumida por el PA según el volumen de datos transmitidos, empleando la tasa de datos constante de 320 Kbps encontrada para

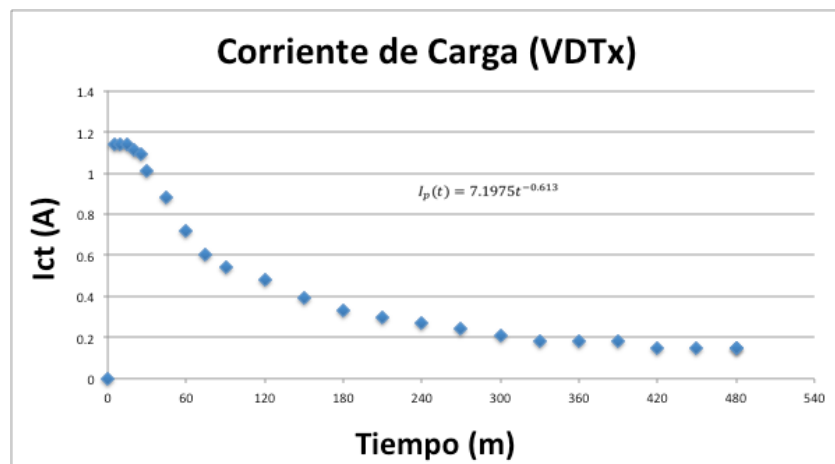
VDTx, por lo que tendríamos una potencia consumida instantánea de 5,645 W. Se aclara que la potencia calculada es independiente de la generada por la carga de B.

En la Figura también se muestra la curva de voltaje de la batería durante la transmisión de datos, destacando el valor del voltaje inicial, el valor del voltaje de estabilización, donde el voltaje comienza a crecer y el valor máximo de voltaje alcanzado durante T_c . Los valores obtenidos fueron 13,63, 13,58, 14,07 V respectivamente. La curva de potencia es similar en su caída a la de la corriente, desplazada por un factor que es V_c . Hay algunos valores máximos al principio que alcanzan un poco más de 15 W durante los primeros quince minutos, pero luego caen a aproximadamente 2,3 W hasta el final del tiempo de carga. Para nuestra prueba de carga con transmisión, el valor de w_v resultó ser 3,25 y el valor de w_c de 3,25.

Debido a la transmisión de datos, el valor de T_c aumenta en un mínimo del 20% en comparación con el estudio de caso inicial de carga sin transmisión. El PR puede calibrar algunos parámetros para que T_c sea lo más bajo posible, como maximizar el valor de voltaje de la batería con la que comienza la carga, lo que reduce el valor de T_e , I_e y T_{ct} logrando una carga inicial rápida y luego una carga suave durante T_p . Lo que se logra al optimizar los valores de los pesos que están directamente relacionados con la corriente, es decir, w_p , w_r , w_i y w_t .

La ecuación de la corriente de la curva representada en la Figura es:

$$I_c(t) = \begin{cases} I_e(t) = 0 \\ I_{ct} = 1,14, & 0 < t \leq 10 \\ I_p(t) = 7,1975t^{-0.613}, & 10 < t \leq 480 \end{cases}$$



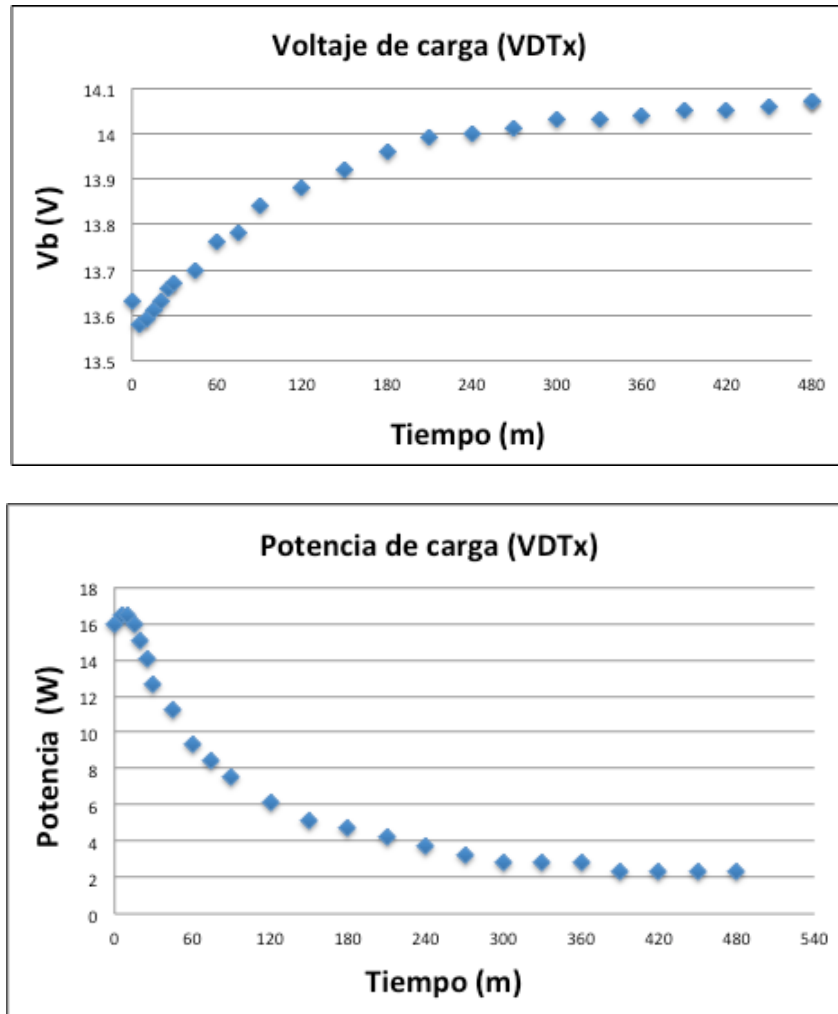


Figura 4.13: Evolución de V_c e I_c en el tiempo y evolución del consumo de energía en el tiempo (T_c).

Debido a la transmisión de datos, el valor de T_c aumenta en un mínimo del 20% en comparación con el estudio de caso inicial de carga sin transmisión (360 m con transmisión en comparación a 300 m en reposo). El PR puede calibrar algunos parámetros para que T_c sea el más bajo posible, como el valor de voltaje de la batería con la que comienza la carga, lo que reduce el valor de T_e , I_e y T_{ct} logrando una carga inicial rápida y luego una caída suave durante T_p . La Tabla 4.4 muestra los valores de las variables y los pesos obtenidos en la prueba.

Variable	Valor
$I_e \text{ max (A)}$	1,14
$V_{\text{en vacío (V)}}$	12,14
$V_c \text{ inicial (V)}$	13,63
$V_e \text{ (V)}$	13,58
$T_e \text{ (m)}$	0
$T_{ct} \text{ (m)}$	10
W_i	1,14
$T_p \text{ (m)}$	470
$I_{pmin} \text{ (A)}$	0,16
W_p	7,1975
W_r	-0,613
$V_c \text{ medido (V)}$	14,07
$T_c \text{ (m)}$	480

Tabla 4.4: Variables medidas durante el proceso de carga con transmisión de datos

Proceso de descarga

Para el caso en el que el PA transmite datos durante T_d , el I_d crece lentamente alcanzando valores de 0,21 A hasta los 420 m de operación, justo cuando la batería alcanza el umbral de 12 V. El valor de corriente que se alcanza es mayor que el del caso sin transmisión de datos por 0,05 A. Desde allí, el voltaje cae rápidamente al valor de 7 V a los 432 m, luego de ello es cuando el PA se apaga. En este caso, el voltaje con el que comenzó T_d fue de 13,56 V. El valor de w_s es muy cercano a cero y positivo y el de w_f es lo suficientemente grande como para mantener el PA operativo durante T_d , que en este caso alcanzó el valor de 7 horas, por lo que los pesos son adecuados para nuestro propósito. La Figura 4.14 muestra los valores respectivos de corriente y voltaje. La Figura también muestra que, a diferencia de los casos en que el PA no transmite, la potencia aumenta ligeramente y permanece en valores cercanos a 2,5 W durante T_d . La ecuación de corriente de la curva de descarga (hasta el umbral de 12 V) es la siguiente:

VDTx:

$$I_d(t) = 0,1848t + 142,58; 0 < t < 420$$

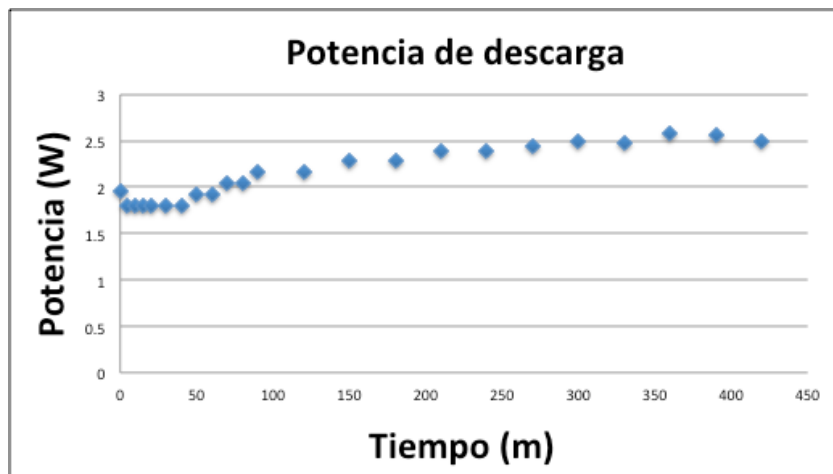
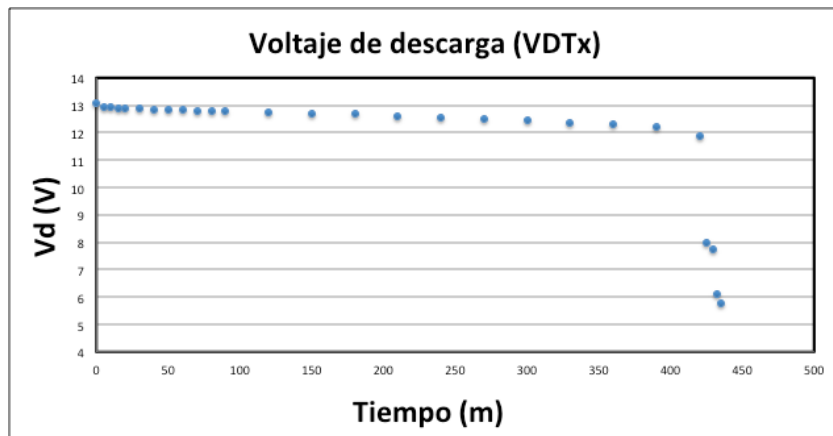
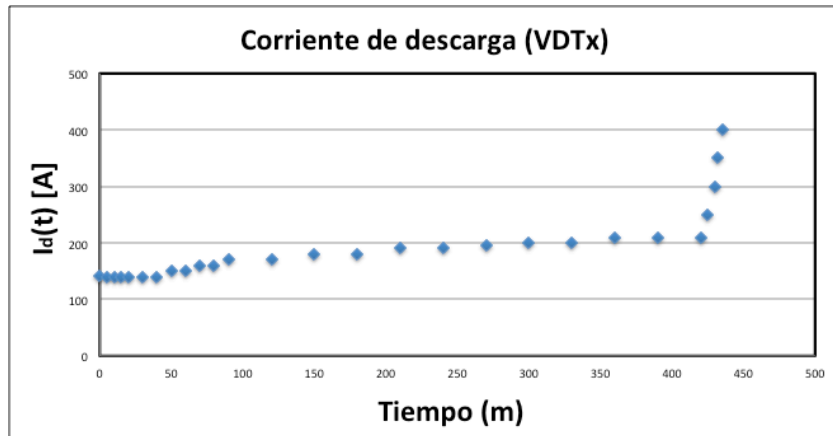


Figura 4.14: Evolución de V_d e I_d y del consumo de energía en el tiempo (T_d).

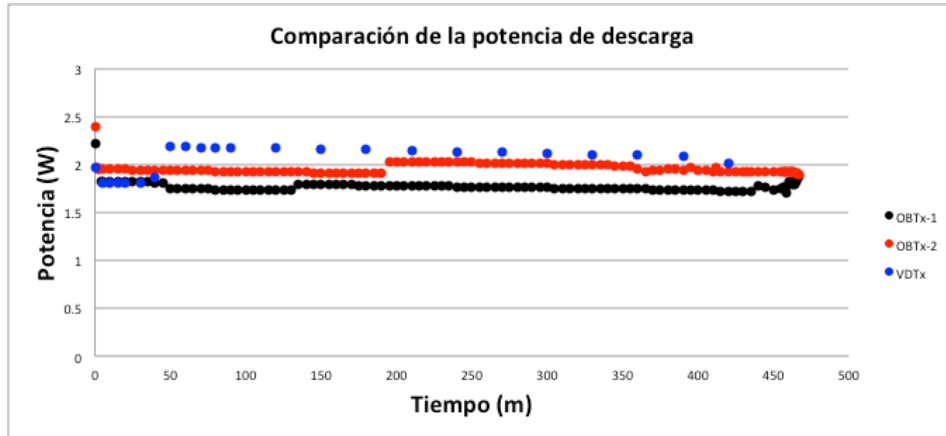


Figura 4.15: Comparación de la potencia de descarga de la batería (*OBTx-1*, *OBTx-2* y *VDTx*)

En la Figura 4.15 se muestra la comparación entre las potencias de descarga para todas las pruebas, donde se puede ver que la diferencia de potencia entre las curvas que representan solo balizas (*OBTx-1* y *OBTx-2*) y la transmisión constante de datos (*VDTx*) no es mayor que 1 W.

Dado que en las tres pruebas hubo un umbral de voltaje de batería de 12 V desde el cual el voltaje comenzó a decaer rápidamente, podemos especificar que el tiempo de uso de la batería para operar el PA normalmente es el tiempo que tarda en llegar desde el voltaje con el que el proceso de descarga comienza hasta que se obtiene un voltaje de 12 V. En nuestras pruebas, este valor fue de 450 m sin transmisión y 420 m con transmisión de datos, lo que se muestra en la Figura 4.16. Esto significa que podemos optimizar nuestro mecanismo maximizando T_d para que se acerque al ideal, de tal manera que se garantice que el PA continúa trabajando con la energía provista por la batería. Para nuestro propósito, T_d podría ser maximizado para ser mayor a 8 horas. También se descubrió que el valor de voltaje utilizado durante T_d es inferior a 2 V, este es el valor del voltaje desde el inicio de la descarga hasta el valor umbral y que en las pruebas realizadas fue entre 1,19 y 1,56 V. En todos los casos, la potencia durante T_d utilizada por el PA no excedió un promedio de 2,5 W.

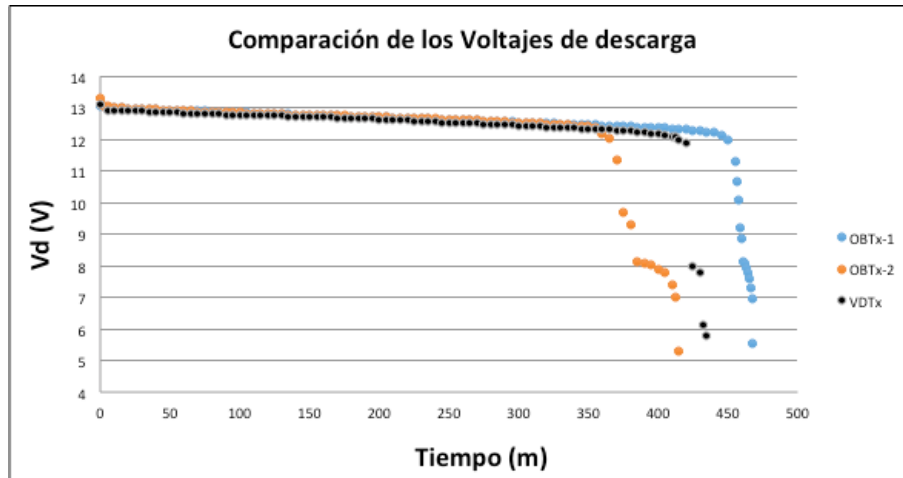


Figura 4.16: valores de T_d al alcanzar el umbral de 12 V.

4.4 Discusión de resultados

En secciones anteriores explicamos el consumo de energía para T_c y T_d para mostrar la complejidad que involucra calibrar los parámetros w de nuestro modelo. En esta sección analizamos el consumo de energía en el PA WiFi (usando o no nuestro mecanismo) en un ciclo ($k = 1$) teniendo en cuenta la energía consumida en T_c y T_d . Luego proyectamos nuestros resultados para inferir el ahorro de energía para valores mayores de k .

Siempre obtuvimos (en todas las pruebas implantadas) que $T_d > T_c$. En la prueba *OBTx-1* obtuvimos una diferencia de 3 h (7h 30m > 4h 30m), y en la prueba *OBTx-2* obtuvimos 1 h 8m (6h 8m > 5h 0m). Además, mostramos en la Sección 3.2 que si $w_v > w_c$ entonces $T_d > T_c$, en ese caso se podría lograr un ahorro de energía. En la Sección 4.2 mostramos que $w_c = 3,25$, $w_v = 3,24$ y $T_d > T_c$ para ambas pruebas. Entonces, de acuerdo con nuestro modelo formal, sí se logró el ahorro de energía en un ciclo ($k = 1$). Se muestra en la Figura 4.17 un análisis de consumo de energía, en un ciclo ($k = 1$), usando y sin usar nuestro mecanismo, se muestra que en un período de 12 h (*OBTx-1*) y 11 h (*OBTx-2*), obtenemos una diferencia de 268 W, 465 W y 523 W. Aunque no se ahorra una gran cantidad de energía, nuestro modelo está justificado.

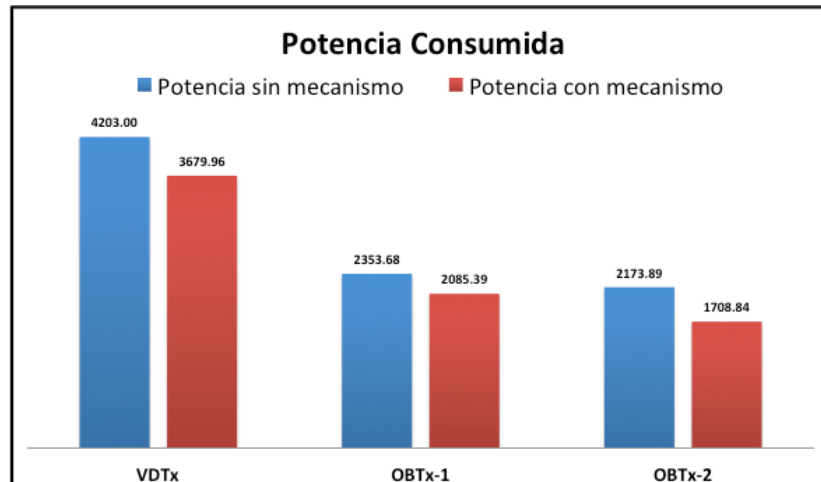


Figura 4.17: Comparación del consumo de energía durante las pruebas

Analizando el proceso de carga de una batería aislada versus los ciclos de carga y descarga de la batería utilizando nuestro mecanismo, obtenemos varias lecciones de aprendizaje:

- El voltaje de vacío debe ser lo más alto posible. Esto permite aumentar la pendiente de I_c durante T_e . Lo que significa que se obtendría una constante I_c lo antes posible. De esta manera, fomentamos el acortamiento de T_c .
- Comenzando el ciclo de descarga, el V_d debe ser lo más alto posible y la pendiente de I_d debe ser lo más pequeña posible. Esto para extender el valor de T_d .
- En todos los casos, si el PA WiFi funciona muy poco, fomentamos el acortamiento de T_c y la extensión de T_d .

Consideremos ahora que los resultados anteriores se dan en un día típico de un organismo oficial, como un edificio gubernamental ($k = 2$). Por lo general, tienen una actividad normal en un horario de trabajo de 7 h a 17 h en un día (10 h aproximadamente). Durante ese tiempo, los PA WiFi pueden estar activos transmitiendo datos. Pero en el resto del día (de 17 h 01 m a 6 h 59 m) los PA WiFi estarían inactivos solo transmitiendo balizas en la mayoría de áreas (14 h aproximadamente). Por lo tanto, tendríamos un margen de horas en un día donde nuestro mecanismo lograría ahorrar energía, con un T_d más extendido y un T_c menor. Además, en ese período de tiempo de 14 h, alrededor de unas 6 h, el PA WiFi no consumiría energía del PSE. Esto se debe a que la batería se cargaría sin el consumo de energía adicional del PSE.

Para valores mayores de k podemos usar una simulación basada en WoS a partir de nuestros valores experimentales de T_c y T_d . Ese análisis nos permitiría conocer sobre la probabilidad de ahorrar una cantidad estimada de energía. Creemos que es más interesante escalar el ahorro de energía de dos ciclos ($k = 2$) por día, por ejemplo, en un mes (la idea es expandirlo a una mayor cantidad de tiempo). La Figura 4.18 muestra que el ahorro escalado en un mes alcanzaría los 32,4 KW, lo cual es muy conveniente porque podría ahorrar 388,8 KW anualmente para cada PA en operación. En un edificio típico del gobierno, con alrededor de 50 PA WiFi, el ahorro de energía podría ser considerable.

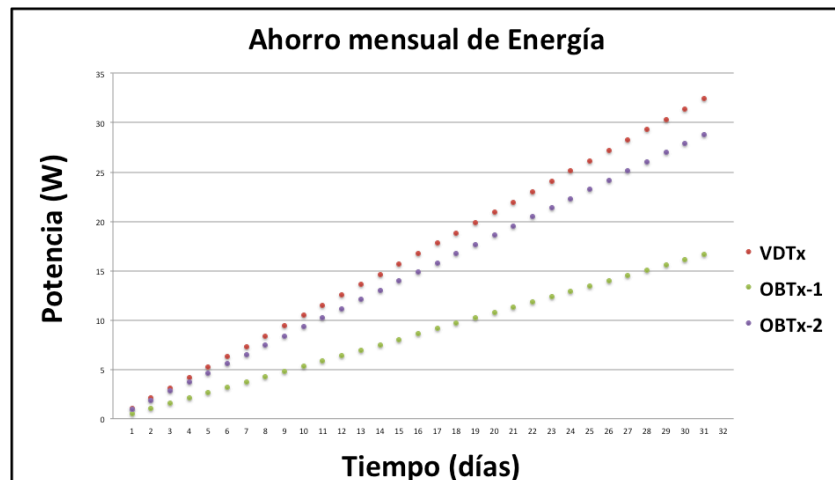


Figura 4.18: Ahorro de energía en un mes

Podemos compartir un comentario adicional sobre la optimización del ahorro de energía derivado de nuestro modelo formal. Esta observación ha sido expuesta también en los resultados experimentales presentados anteriormente. El T_c se puede minimizar si se minimiza el I_c y se maximiza el voltaje de vacío de la batería ajustando adecuadamente los parámetros implícitos (w). El T_d se puede maximizar si el voltaje de la batería sigue siendo mayor que el umbral de voltaje.

Finalmente, la ecuación planteada en función de los datos medidos de potencia consumida en algunos de los PA empleados en la entidad gubernamental, permitió determinar la potencia instantánea en la prueba de carga de $VDTx$ para una *Tasa de Bits Constante* (CBR , del inglés *Constant Bit Rate*), con un valor superior a los 5 W. Por lo tanto, la expresión matemática puede dar una idea bastante cercana de los consumos que se producen cada vez que nuestros datos pasan a través de un PA. En definitiva, el consumo de potencia aumenta de manera suave a medida que aumenta la cantidad de datos transmitidos.

Capítulo 5. Conclusiones

En este capítulo explicamos las conclusiones prácticas a las que hemos llegado según los datos que obtuvimos durante las pruebas y el desarrollo de nuestra investigación. Además, se plantea la posibilidad de otras líneas de investigación a seguir para futuros trabajos.

5.1 Conclusiones finales

Planteamos las conclusiones a las que llegamos al analizar los datos obtenidos y el comportamiento del circuito. Explicamos los resultados más destacados del estudio.

En este documento presentamos un mecanismo de hardware para el ahorro de energía en redes con alta densidad de PA WiFi. El mecanismo se puede usar con cualquier PA y cualquier suministro de voltaje. Diseñamos un modelo formal paramétrico para maximizar el ahorro de energía. Implantamos nuestro nuevo mecanismo en hardware y se verificó el modelo paramétrico formal con los resultados experimentales. Se demuestra que cuando el PA WiFi solo transmite balizas de señalización y trasmite datos con una tasa de hasta 2.500 paquetes/s se puede obtener un ahorro de energía. La proyección de la cantidad de energía ahorrada en un año es importante en caso de que se aplique a una cantidad media-alta de PA empleados en una red. Con ahorros de anuales de más de 350 KW por equipo.

El proceso para encontrar la batería adecuada para implantar el mecanismo de hardware no fue una tarea simple. Además, encontrar los circuitos rectificadores de voltaje y corriente también fue una tarea difícil. Una de las lecciones aprendidas son las condiciones bajo las cuales la batería puede ser usada para ahorrar energía, garantizando un voltaje de vacío y minimizando la corriente que consume. Otra lección es la necesidad de mantener la batería funcionando bajo ciertos rangos de voltaje y carga de corriente para garantizar el máximo ahorro de energía. Además de que los contactos de la batería en los bornes se mantengan firmes y limpios.

Es importante mantener la secuencia de carga y descarga lo mas precisa posible para evitar pérdidas de datos y fallas de operación durante la transición de estados. En este caso un rele operado por el arduino mantiene el proceso en condiciones óptimas.

Las lecturas tomadas en los Hospitales de la transmisión de datos demuestran que, salvo pocos casos, la tasa de transmisión no pasa de 10 Mbps. En estos establecimientos gubernamentales lo más importante es la disponibilidad de la señal, por ello existen varios PA distribuidos por área para mantener el servicio a disposición de los usuarios.

Otros experimentos con nuestro prototipo podrían tener las siguientes consideraciones:

- Mantener el mismo prototipo, pero aumentar la cantidad de datos que se transmiten durante los procesos de carga y descarga. Determinar la relación entre T_c y T_d .

- Diseñar un banco de baterías externa, con la capacidad de alimentar varios PA WiFi que estén dentro de una misma zona. Para ello se requiere que se concentre dicho banco en un área equidistante de los PA y que el mismo pueda recibir la energía PoE para el proceso de carga. Para ello habría que validar las capacidades de carga para más de una batería.
- Diseñar un sistema de alimentación empleando una celda solar para cargar la batería del PA WiFi. Se podrían planificar períodos de carga con la ES y otros con la alimentación PoE según sea conveniente. Durante el proceso de descarga de la batería, los sistemas de alimentación al *Badt* quedarían desconectados hasta que *B* llegue al umbral de 12 V.

Tomar en cuenta el uso de un convertidor o controlador de carga entre la batería y el panel, su función es controlar el proceso de carga, cortando el suministro de energía al momento que la batería este cargada. Además, es importante considerar la longitud del cable utilizado, ya que al ser corriente directa debe ser un cable corto para que la caída de tensión sea la mínima posible y no se presenten pérdidas energéticas.

Otro aspecto importante es analizar el uso de una batería adecuada para carga solar, es decir, carga lenta con baja corriente y por más tiempo a diferencia de las baterías normales que tienen una carga rápida al inicio.

Para el efecto se pueden emplear dos celdas solares fotovoltaicas de 10 W cada una en paralelo para mantener el mismo voltaje, pero con una corriente final que es la suma de las corrientes individuales. La salida de voltaje puede ser de 12 V y la corriente total de aproximadamente 1 A. Por lo tanto, el controlador de carga debe soportar los valores indicados.

En este caso podríamos asumir que el T_c será mayor que en el caso de carga con PoE pues maneja un proceso de carga más lenta.

5.2 Líneas de investigación abiertas

Los resultados experimentales apuntan a definir el trabajo futuro en varias líneas. Resaltamos cuatro de ellos:

Para agregar un suministro de energía limpio y gratuito al sistema, que ayude a cargar la batería junto con el suministro de energía estándar PoE (utilizado en este

documento) u otro, sería necesaria la modificación de los rectificadores y del encaminador de alimentación (*PR*).

Para estudiar la influencia de la actividad de transmisión de los datos de usuario en el PA WiFi, hicimos algunas pruebas que consideraron una CBR en el PA WiFi, obteniéndose también, un ahorro de energía. Esas pruebas deben reforzarse para inferir buenas conclusiones. Además, es difícil diseñar un modelo formal que podría explicar las condiciones realistas para obtener el ahorro de energía. Adicionalmente, Si el PA está activo (transmitiendo datos del usuario) la mayor parte del tiempo, sería necesario un estudio cuidadoso para analizar la posible pérdida de paquetes durante la transición entre los ciclos de descarga y carga.

Para determinar la influencia del canal WiFi en el ahorro de energía. En una red inalámbrica densa hay muchas interferencias entre los PA y la cantidad de terminales de PA WiFi es muy alta. Por lo general, los PA cambian de canal produciendo más consumo de energía. Formalizar condiciones realistas para el ahorro de energía es muy difícil en esas condiciones y cambiar nuestro *PR* también sería necesario.

Realizar el proceso de carga y descarga constante de la batería durante un período de tiempo prolongado (2 o más años) hace que su capacidad se reduzca considerablemente o incluso hace que deje de funcionar. Esto podría complicar que el período de carga sea más corto que el período de descarga para lograr el ahorro de energía (después de ese largo período de tiempo). Seleccionar y planificar adecuadamente un reemplazo de batería para minimizar este efecto es un factor clave. Por otro lado, el modelo de ahorro de energía debe extenderse para introducir esto correctamente.

Además, se pueden considerar otros estudios con las fuentes de alimentación también analizadas en este documento, como la recolección de la energía electromagnética y la ES o el uso de otros dispositivos de almacenamiento de energía, como un banco de baterías. De igual forma, se puede considerar emplear las baterías que se están desarrollando con bornes de materiales no contaminantes y de mayor duración, soportando una mayor cantidad de los ciclos químicos que constantemente se producen durante el proceso de carga y descarga al interior de la batería.

Bibliografía

- [1] Mentsiev, A.; Engel, M.; Tsamaev, A.; Abubakarov, M.; Yushaeva, R. The Concept of Digitalization and Its Impact on the Modern Economy. *Advances in Economics, Business and Management Research*. Volume 128. International Scientific Conference "Far East Con" (ISCFEC 2020). ATLANTIS PRESS.
- [2] Cioaca, S.; Cristache, S.; Vuta, M.; Marin, E. and Vuta M. Assessing the Impact of ICT Sector on Sustainable Development in the European Union: An Empirical Analysis Using Panel Data. *Sustainability*. MDPI. Volume 12. Issue 2. Enero 20. <https://doi.org/10.3390/su12020592>.
- [3] Pradhan, R.; Arvin, M.; Nair, M.; Bennett, S. Sustainable economic growth in the European Union: The role of ICT, venture capital, and innovation. May 2019. <https://doi.org/10.1002/rfe.1064>. *Review of Financial Economics*. Volume 38. Issue 2. Page 34-62. Enero 20
- [4] Gómez-Barroso, J.; Marbán-Flores, R. Telecommunications and economic development _The 21st century: Making the evidence stronger. *Telecommunications Policy*. Elsevier. Diciembre 2019. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2019.101905>
- [5] Chen, X.; Kwan Ng, G.; Yu, W.; Larsson, E.; Al-Dhahir, N. And Schoher, R. Massive Access for 5G and Beyond. arXiv:2002.03491v1 [cs.IT]. Cornell University. Febrero 2020
- [6] Anguís, J. Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College. Tesis de Grado. Ingeniería de Telecomunicación Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Escuela Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla. Marzo de 2008.
- [7] IEEE Standards Association. 802.11 2016 IEEE Standard for Information Technology. Telecommunications and information Exchange between systems local and metropolitan area networks. Specific requirements. Part 11: Wireless Lan Medium Access control (MAC) and Physical Layer specifications. Disponible en: https://standards.ieee.org/standard/802_11-2016.html. Accedido el 11 de marzo de 2020.

- [8] Barik, P.; Singhal, C. and Datta, R. "Energy-efficient User-centric Dynamic Adaptive Multimedia Streaming in 5G Cellular Networks,". National Conference on Communications (NCC). Febrero 2020. IEEE Xplore: April 2020. DOI: 10.1109/NCC48643.2020.9056016.
- [9] Han, B.; Hui, P.; Srinivasan, A. Mobile data offloading in metropolitan area networks. ACM SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review. Volumen 14. Issue 4. Noviembre 2010. <https://doi.org/10.1145/1942268.1942279>
- [10] Nosheen, S.; Khan, J. High Throughput and QoE Fairness Algorithms for HD Video Transmission over IEEE802.11ac Networks. International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC). Febrero 2020. IEEE Xplore: Marzo 2020. DOI: 10.1109/ICNC47757.2020.9049818.
- [11] Chakraborty, T.; Misra, I.; Prasad, R. VoIP Technology: Applications and Challenges. Springer Series in Wireless Technology. 1st ed. 2019 Edition. ISBN-13: 978-3319955933. ISBN-10: 3319955934
- [12] Cai, L.; Xiao, L.; Shen, X.; Mark, J. VoIP over WLAN: voice capacity, admission control, QoS, and MAC. International Journal of Communications Systems. Abril 2006. Special Issue:Voice Over IP–Theory and Practice. Volume 19. Issue 4. Page 491-508. <https://doi.org/10.1002/dac.801>
- [13] Gan, D.; Cai, J.; Foh, H.; Lau, C.; Ngan, K. Improving WLAN VoIP Capacity Through Service Differentiation. in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Volume 57. Issue 1. Page 465-474. Enero 2008. DOI: 10.1109/TVT.2007.905245
- [14] Lara-Cueva, R.; Simba-Herrera, M. Performance evaluation for outdoor wireless scenarios based on IEEE 802.11b/g in the presence of co-channel interference. Bulletin of Electrical Engineering and Informatics Volume 9. Issue 1. February 2020. Page 187~197. ISSN: 2302-9285. DOI: 10.11591/eei.v9i1.1649
- [15] Mayor, V.; Estepa, R.; Estepa, A.; Madinabeitia, G. Unified call admission control in corporate domains. Computer Communications. Elsevier. Volume 150. Pages 589-602. January 2020. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.11.041>

- [16] Facchini, H.; Pérez, S.; Dantiacq, A.; Hidalgo, F. Evaluation of video traffic behavior metrics in an experimental multicast network. *Enfoque UTE*. Volume 11. Issue 1. Pages 15-27. Enero 2020. <http://dx.doi.org/10.29019/enfoque.v11n1.576>
- [17] Zhou, B.; Zhang, F.; Wang, L.; Hou, C.; Fernández, A.; Vasilakos, A.; Wang, Y.; Wu, J.; Liu, Z. HDEER: A distributed routing scheme for energy efficient networking. *IEEE J. Sel. Area Commun.* 2016, 34, 1713–1727.
- [18] International Telecommunication Union, “ICTs and Energy Efficiency” 2017. Available online: http://www.itu.int/en/action/climate/Pages/energy_efficiency.aspx (accessed on 14 July 2018).
- [19] Dahal, M.S.; Shrestha, J.N.; Shakya, S.R. Energy saving technique and measurement in green wireless communication. *Energy* 2018, 159, 21–31.
- [20] Mamechaoui, S.; Didi, F.; Pujolle, G. Energy Efficiency Cross Layer Protocol for Wireless Mesh Network *International Journal of Computer Networks & Communications (IJCNC)*. Volumen 6. Issue 3. Mayo 2014
- [21] Economipedia. Empresas más grandes del mundo 2020. Disponible en: <https://economipedia.com/ranking/empresas-mas-grandes-del-mundo-2020.html>. Accedido el 11 de marzo de 2020.
- [22] Marodon, C. 802.11 Power Management with packet capture examples. dot11zen. Disponible en: <https://dot11zen.blogspot.com/2018/02/80211-power-management-with-packet.html>. Accedido el 11 marzo 2020.
- [23] Palacios, R.; Alonso, J.; Fonseca, N.; Granelli, F. Maximum Achievable Energy Efficiency of TXOP Power Save Mode in IEEE 802.11ac WLANs. In *Proceedings of the 2016 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Washington, DC, USA, 4–8 December 2016.
- [24] Nurchis, M.; Bellalta, B. Target Wake Time: Scheduled access in IEEE 802.11ax WLANs. Cornell University Library. arXiv 2018, arXiv:1804.07717.
- [25] Overcomm, Wi-Fi with 802.11ax means unprecedented capacity and better

e_iciency. Available online: <https://www.qualcomm.com/solutions/networking/features/80211ax> (accessed on 1 February 2018).

- [26] Gómez, K.; Riggio, R.; Rasheed, T.; Granelli, F. Analysing the energy consumption behaviour of WiFi networks. IEEE Online Conference on Green Communications. Septiembre 2011. IEEE *Xplore*: noviembre 2011. DOI: 10.1109/GreenCom.2011.6082515
- [27] Raura, G.; Fonseca, R.; Yoo, S.G. Smart Battery Charge: A Firmware Open Source Platform and Microcontroller Based IOT Application. Applied Technologies. ICAT 2019. Communications in Computer and Information Science, vol 1195. Springer, Cham
- [28] Cisco White Paper: Network Architecture Cisco DNA: Cisco Integrated Services Router: Reduce Power Consumption through Integrated Services Delivery. Enero 30 2018. Available online: https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/enterprise-networks/branch/net_implantation_white_paper0900aecd80716af6.html (accessed on 3 November 2018).
- [29] Hellewt Packard Enterprise. HPE Aruba OS-Switch Power Over Ethernet (PoE/PoE+): Planning and Implantation Guide. November Part Number: 5200-1195a. Available online: http://h20628.www2.hp.com/km-ext/kmcsdirect/emr_na-c04344559-9.pdf (accessed on 3 November 2018).
- [30] Microsemi Next Generation PoE: IEEE802.3bt White Paper Revision 1.0. Available online: https://www.microsemi.com/document-portal/doc_download/136209-next-generation-poe-ieee-802-3bt-white-paper (accessed on 20 March 2017).
- [31] <https://www.ulpgc.es/>. Consultado el 19 de abril de 2020
- [32] <https://www.hospitalvernaza.med.ec/>. Consultado el 19 de abril de 2020
- [33] Andrade, S.; Ruiz, E.; Granell, E.; & Lloret, J. energy Consumption of Wireless Network Access Point. Green Communication and Networking. Page 81-91. 2013
- [34] Yang, F.; Du, L.; Yu, H.; Huang, P. Magnetic and Electric Energy Harvesting

Technologies in Power Grids: A Review. *Sensors*. March 2020. Volume 20. Issue 5. <https://doi.org/10.3390/s20051496>

- [35] Pirela, R.; González, C. Fuente de voltaje DC Inalámbrica, a partir de ondas electromagnéticas, UNEXPO 2013, Puerto Ordaz, Venezuela, Universidad Ciencia y Tecnología, volumen 17, N° 67, Junio 2013.
- [36] Kawahara, Y.; Bian, X., Shigeta, R.; Vyas, R.; Tentzeris, M.; Asami, T. Power Harvesting from Microwave Oven Electromagnetic Leakage. Bunkyo-ku. UbiComp'13, Septiembre 2013. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2493500>
- [37] Kee, C.; Olule, L.; Gnanagurunathan, G. Microstrip patch antenna and Three-stage Cockcroft Walton Rectenna for WiFi Energy Harvesting. IEEE International RF and Microwave Conference. 2018.
- [38] Krakauskas, M.; Sabaawi, A; Tsimenidis, C. Suspended Patch Microstrip Antenna with Cut Rectangular Slots for RF Energy Harvesting. IEEE Loughborough Antennas and Propagation Conference (LAPC). 2014
- [39] Ho, D.; Kharrat, I.; Ngo, V.; Vuong, T.; Nguyen, O.; Le, M. Dual-Band Rectenna for Ambient RF Energy Harvesting at GSM 900 MHz and 1800 MHz. IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET). 2016.
- [40] Kurvey, M.; Kunte, A. Design and Optimization of Stepped Rectangular Antenna for RF Energy Harvesting. IEEE International Conference on Communication, Information & Computing Technology (ICCICT). 2018.
- [41] Shaker, M.; Ghali, H.; Nashet, D.; Elmonem H. Multiband coplanar monopole antenna for Energy Harvesting. IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT). 2018.
- [42] Kassan, S.; Gaber, J.; Lorenz, P. Autonomous Energy Management System Achieving Piezoelectric Energy Harvesting in Wireless Sensors. *Mobile Networks and Applications* 25. Page: 794-805. Springer. April 2020. <https://doi.org/10.1007/s11036-019-01303-w>

- [43] Ehsanul, K.; Pawan, K.; Sandeep, K.; Adedeji, A.; and Ki-Hyun, K. Solar energy: Potential and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. Elsevier. Septiembre 2017.
- [44] Abd El-Azeem, N.; Abd El-Kader, S.; & Zahra, M. Solar Energy Harvesting Protocol for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*. Marzo 2014
- [45] Saji, A.; Pandey, I.; & Pandey, R. An efficient solar energy harvesting system for wireless sensor network nodes. *Journal of Information and Optimization Sciences*. Volumen 41. Issue 1. Páginas 39-50. 2020 DOI: 10.1080/02522667.2020.1714182
- [46] Sharma, H.; Haque, A.; Jaffery, Z. An Efficient Solar Energy Harvesting System for Wireless Sensor Nodes. 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES-2018). <https://www.researchgate.net/publication/334729496>
- [47] The Mathworks Inc. <https://la.mathworks.com/products/matlab.html>. Consultado el 19 de abril de 2020
- [48] The Mathworks Inc. <https://la.mathworks.com/products/simulink.html>. Consultado el 19 de abril 2020
- [49] Ibrahim, R.; Chung, T.; Hassan, S.; Bingi, K.; & Salahuddin, K. Solar Energy Harvester for Industrial Wireless Sensor Nodes. 2016 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors. IRIS 2016. 17-20 Diciembre 2016. Elsevier. Doi: 10.1016/j.procs.2017.01.184
- [50] Chen, D.; Nixon, M.; Mok, A. *WirelessHART: Real-Time Mesh Network for Industrial Automation*. Springer, Boston, MA. 2010. Print ISBN: 978-1-4419-6046-7. Online ISBN: 978-1-4419-6047-4. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-6047-4>
- [51] Song, Y.; Ciubotaru, B.; Muntean, G. A Slow-start Exponential and Linear Algorithm for energy saving in wireless networks. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*. Junio 2011. *IEEE Xplore* Julio 2011. DOI: 10.1109/BMSB.2011.5954950

- [52] Tsao, S. y Huang, C. An Energy Efficient Transmission Mechanism for VoIP Over IEEE 802.11 WLAN. *Wireless Communications and Mobile Computing*. Páginas 1629 a 1644. Febrero 2009.
- [53] Duriez, T.; Brunton, S.; Noack, B. *Machine Learning Control – Taming Nonlinear Dynamics and Turbulence*. Springer 2017. ISBN: 978-3-319-40624-4. <https://www.springer.com/gp/book/9783319406237#aboutAuthors>. Consultado el 19 de abril de 2020.
- [54] Kelleher, J.; Mac Namee, B.; D’Arcy, A. *Fundamentals of Machine Learning for Predictive Data Analytics: Algorithms, Worked Examples, and Case Studies*. The MIT Press 2015. ISBN-13: 978-0262029445. <https://mitpress.mit.edu/books/fundamentals-machine-learning-predictive-data-analytics>. Consultado el 19 de abril 2020.
- [55] Sesto-Castilla, D.; García-Villegas, E.; Lyberopoulos, G.; Theodoropoulou, E. Use of Machine Learning for energy efficiency in present and future mobile networks. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*. Abril 2019. *IEEE Xplore*. Octubre 2019. DOI: 10.1109/WCNC.2019.8885478
- [56] Tao, R.; Liu, W.; Chu, X.; Zhang, J. An Energy Saving Small Cell Sleeping Mechanism With Cell Range Expansion in Heterogeneous Networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. Volume 18, Issue 5. Mayo 2019. DOI: 10.1109/TWC.2019.2895028
- [57] Farid, A.; Sharifi, J.; Mouhoub, M.; Barakati, M. y Egerton, S. Multiple Objective Optimizers for Saving Water and Energy in Smart House. *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC)*. Octubre 2019. *IEEE Xplore*. Noviembre 2019. DOI: 10.1109/SMC.2019.8914653
- [58] Zheng, Y.; Qu, J.; y Yu, H. Research on energy-saving power system of office building lighting based on Internet of Things. *IEEE The Journal of Engineering*. Volumen 2020. Issue 2. 2020. DOI: 10.1049/joe.2019.0825
- [59] Chen, M.; y Lin, C. Development of a smart home energy saving system combining multiple smart devices. *IEEE International Conference on Consumer*

Electronics (ICCE-TW). Taiwan. Mayo 2016. IEEE *Xplore*: 28 July 2016. DOI: 10.1109/ICCE-TW.2016.7521072

- [60] Ram, M.; Kumar, S.; Kumar, V.; Sikandar, A.; Kharel, R. Enabling Green Wireless Sensor Networks: Energy Efficient T-MAC Using Markov Chain Based Optimization. *Journal Electronics MDPI*. Mayo 2019. Volume 8, Issue 5. <https://doi.org/10.3390/electronics8050534>
- [61] Liu, Y.; Liu, A.; Zhang, N.; Liu, X.; Ma, M. y Hu, Y. DDC: Dynamic duty cycle for improving delay and energy efficiency in wireless sensor networks. Elsevier. *Journal of Networks and Computer Applications*. Volume 131. Pages 16-27. Abril 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.01.022>
- [62] Rault, T.; Bouabdallah, A.; y Challal, Y. Energy efficiency in wireless sensor networks: A top-down Survey. Elsevier. *Computer Networks*. Volumen 67. Paginas 104-122. Julio 2014. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2014.03.027>
- [63] Kumar, S.; Gautam, P.; Verma, A.; Rashid, T.; y Kumar A. An Energy-Efficient Transmission in WSNs for Different Climatic Conditions. *Wireless Personal Communications* 110. Páginas: 423–444. Springer. Enero 2020. <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06735-x>
- [64] Rezaei, Z.; y Mobininejad, S. Energy Saving in Wireless Sensor Networks. *International Journal of Computer Science & Engineering Survey (IJCSSES)*. Volumen 3. Issue 1, Febrero 2012. DOI: 10.5121/ijcses.2012.3103
- [65] Fahmy H.M.A. Energy Management Techniques for WSNs. *Wireless Sensor Networks. Signals and Communication Technology*. Paginas 103-108. Springer. Enero 2020
- [66] Roy, A.; y Sarma, N. Energy Saving in MAC Layer of Wireless Sensor Networks: a Survey. “National Workshop in Design and Analysis of Algorithm (NWDAA)”. India, 2010.
- [67] Wu, Y.; He, Y.; Shi, L. Energy-saving Measurement in LoRaWAN Based Wireless Sensor Networks by Using Compressed Sensing. *IEEE Access*. Febrero 2020. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2974879

- [68] LoRaWAN. <https://lorawan.es/>. Consultado el 19 de abril 2020.
- [69] Barrachina-Muñoz, S.; Adame, T.; Bel, A.; Bellalta, B. Towards Energy Efficient LPWANs through Learning-based Multi-hop Routing. IEEE 5th World Forum on Internet of Things (WF-IoT). 2019. IEEE Xplore. Julio 2019. DOI: 10.1109/WF-IoT.2019.8767193
- [70] Kumar, N.; Dhal, S. WSN Management Self-Silence Design and Data Analysis for Neural Network Based Infrastructure. Sensor Technology: Concepts, Methodologies, Tools, and Applications. IGI GLOBAL. 2020. DOI: 10.4018/978-1-7998-2454-1.ch06
- [71] Umapriya, A.; Nagarajan, P. Transmission of Watermarked Image in WSN Using ELSM Algorithm. Ranganatham, G.; Chen, J.; Rocha, A. (eds). Inventive Communication and Computational Technologies. Lecture Notes in Networks and Systems. Volume 89. Springer. Enero 2020. https://doi.org/10.1007/978-15-0146-3_113
- [72] Sheltami, T. An Enhanced Energy Saving Approach for WSNs. Elsevier. Procedia Computer Science. Volumen 21. 2013. Paginas 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2013.09.027>
- [73] Yan, Q.; Peng, W.; Zhang, G. Optimal Energy Consumption Tasks Scheduling Strategy for Multi-Radio WSNs. Sensors. Volumen 20. Pagina 881. Febrero 2020. <https://doi.org/10.3390/s20030881>
- [74] Nasab, M.; Shamshirband, S.; Chronopoulos, A.; Mosavi, A.; Nabipour, N. Energy-Efficient Method for Wireless Sensor Networks Low-Power Radio Operation in Internet of Things. Electronics. Volumen 9. Issue 2. Febrero 2020. <https://doi.org/10.3390/electronics9020320>
- [75] Marrero, D.; Suárez, A.; Macías, E.; Mena, V. Extending the Battery Life of the Zigbee Routers and Coordinator by Modifying Their Mode of Operation. Journal Sensors MDPI. Doi:10.3390/s20010030. Diciembre 2019
- [76] Eichner, A.; Da Silva, N.; Rizzetti, T. Definición de un protocolo de autenticación utilizando Bluetooth de baja energía para dispositivos en el concepto de IOT. ESCOLA REGIONAL DE REDES DE COMPUTADORES (ERRC). Paginas 97-104.

Enero 2020.

- [77] Sheth, J y Dezfouli, B. Enhancing the Energy-Efficiency and Timeliness of IoT Communication in WiFi Networks. *IEEE Internet of Things Journal*. Volume 6. Issue 5. Octubre 2019. DOI: 10.1109/JIOT.2019.2927588
- [78] Jin, M.; Jung, J.-Y.; Lee, J.-R. Dynamic Power-Saving Method for Wi-Fi Direct Based IoT Networks Considering Variable-Bit-Rate Video Tra_c. *Sensors* 2016, 16, 1680.
- [79] Höyhty, M.; Apilo, O.; Lasanen, M. Review of Latest Advances in 3GPP Standardization: D2D Communication in 5G Systems and Its Energy Consumption Models. *Future Internet* 2018, 10, 3.
- [80] Tirronen, T.; Larmo, A.; Susitaival, R.; Rune, J. Apparatus and method for providing power saving during idle to connected mode transitions. U.S. Patent Application 14/784, 12 June 2018. Ericsson, Estocolmo, Suecia.
- [81] Mehmood, Y.; Zhang, L.; Förster, A. Power Consumption Modeling of Discontinuous Reception for Cellular Machine Type Communications. *Sensors* 2019, 19, 617.
- [82] Liang, R.; Zhong, Y.; Xia, Q. Energy-Saved Data Transfer Model for Mobile Devices in Cloudlet Computing Environment. In *Proceedings of the 3rd IEEE International Conference on Cloud Computing and Big Data Analysis (ICCCBDA 2018)*, Chengdu, China, 20–22 April 2018.
- [83] Feng, B.; Zhang, C.; Ding, H.; y Fang, Y. Exploiting Wireless Broadcast Advantage for Energy Efficient Packet Overhearing in WiFi. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. Volumen 68. Issue 4. Page(s): 3586 – 3599. Abril 2019. DOI: 10.1109/TVT.2019.2897399
- [84] Chen, B y Zhou, X. Power Optimization of WiFi Networks based on RSSI-awareness. *EAI Endorsed Transactions on Mobile Communications and Applications*. Volumen 5. Issue 16. Enero 2019. Doi:10.4108/eai.14-12-2018.159335

- [85] Baek, S.; Choi, B. Performance analysis of power save mode in IEEE 802.11 infrastructure WLAN. International Conference on Telecommunications. June 2008. IEEE *Xplore*: October 2008. DOI: 10.1109/ICTEL.2008.4652710
- [86] Barati, C.; Dutta, S.; Rangan, S.; Sabharwal, A. Energy and Latency of Beamforming Architectures for Initial Access in mmWave Wireless Networks. Electrical Engineering and Systems Science. Signal Processing. Cornell University. Enero 2020 arXiv:2001.02034 [eess.SP]
- [87] Perkins, C.; Belding-Royer, E. y Das, S. Ad hoc On Demand Distance Vector (AODV) Routing. IETF Experimental RFC 3561. Julio 2003.
- [88] Patil, V.; Biradar, R.; Mudholkar, R. y Sawant, S. On Demand Multipath Routing Protocols for Mobile ad Hoc Networks Issues and Comparison. Journal of Wireless Communication and Simulation 2. Pages 21-38. 2010
- [89] Abd Rahman, A. y Zukarnain Z. Performance in Comparison of AODV, DSDV and DSDV Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. European Journal of Scientific Research. Volumen 31. Issue 4, page 556-576. Junio 2009
- [90] Lozano C., Camelo M., Vila P., y Donoso Y., A Multi-objective Routing Algorithm for Wireless Mesh Network in a Smart Cities Enviroments. Journal of Networks. Febrero 2015.
- [91] Porsch, M. y Bauschert, T. Aligned Beacon Transmissions to Increase IEEE 802.11s Light Sleep Mode Scalability. Conference 20th EUNICE/IFIP EG 6.2, 6.6 International Workshop on Advances in Communication Networking, Rennes France. Septiembre 2014
- [92] Porsch, M. y Bauschert, T. A Testbed Evaluation of the Scalability of IEEE 802.11s Light Sleep Mode. EUNICE 2013, Lecture Notes in Computer Science. Volumen 8115, pp. 292 – 297, Springer. 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-40552_28.
- [93] Ferro, E.; Potortì, F. Bluetooth and WiFi wireless protocols: A survey and a comparison. IEEE Wirel. Commun. 2005, 12, 12-26.
- [94] Teixidó, P.; Gómez-Galán, J.A.; Gómez-Bravo, F.; Sánchez-Rodríguez, T.; Alcina, J.; Aponte, J. Low-Power. Low-Cost Wireless Flood Sensor for Smart Home Systems.

Sensors 2018, 18, 3817.

- [95] El Jaouhari, S.; Palacios-Garcia, E.J.; Anvari-Moghaddam, A.; Bouabdallah, A. Integrated Management of Energy, Wellbeing and Health in the Next Generation of Smart Homes. *Sensors* 2019, 19, 481.
- [96] Yovanov, G.; Hasapis, G. An Architectural Framework and Enabling Wireless Technologies for Digital Cities & Intelligent Urban Environments. *Wireless Pers. Commun.* 2009, 49, 445–463.
- [97] Ain, Q.-U.; Iqbal, S.; Khan, S.A.; Malik, A.W.; Ahmad, I.; Javaid, N. IoT Operating System Based Fuzzy Inference System for Home Energy Management System in Smart Buildings. *Sensors* 2018, 18, 2802.
- [98] García, J.; Suárez, A.; Macias, E.; Salas, E. Hardware Mechanism for Energy Saving in WiFi Access Points. *Sensors* 2019. Volume 19. Page 4745.
- [99] Young, H.; Freedman, R. Sears-Zemansky. Física Universitaria. Volumen 2. Pearson Educación. 2009. ISBN: 978-607-442-304-4
- [100] Alonso, E.; García, R.; Onaindia, C. Campos Electromagnéticos y efectos en Salud. Subdirección de Salud Pública de Bizkaia. Noviembre 2012
- [101] Malvino, A.; Bates, D. Principios de Electrónica. Séptima Edición. Mac Graw Hill Education. 2007.
- [102] Electronicasi.com. (2012). Recuperado el 21 de marzo de 2020, de <http://www.electronicasi.com/ensenanzas/electronica-elemental/aprender/electronica-practicando/aprende-practicando-detector-de-llamadas-telefonicas/>
- [103] Farbod, A.; Todd, T. Resource Allocation and Outage Control for Solar-Powered WLAN Mesh Networks. *IEEE Transactions on mobile computing*, Volume 6. Issue 8. August 2007. DOI: 10.1109/TMC.2007.1079
- [104] Todd, T.; Sayegh, A.; Smadi, M.; Zhao, D. The Need for Access Point Power Saving in Solar Powered WLAN Mesh Networks. *IEEE Network*. Volume 22. Issue 3. Page 4-10. May 2008. DOI: 10.1109/MNET.2008.4519963

- [105] Ohana, E.; Feldman, S.; White Paper, Next-Generation PoE: IEEE 802.3bt, Microchip Technology. 2019.
- [106] Del Rio, E. Una solución actual inventada hace 100 años. Blog de fibra óptica y redes del CIFP Tartanga. Abril 2014. Tomado de: <http://fibraoptica.blog.tartanga.eus/2014/04/17/alimentacion-poeuna-solucion-actual-inventada-hace-100-anos/>
- [107] Andrade, S.; Ruiz, E.; Granell, E.; Lloret, J. Energy Consumption of Wireless Network Acces Point. In Green Communication and Networking, Proceedings of the 2nd International Conference, GreeNets 2012, Gandia, Spain, 25–26 October 2012; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2012; pp. 81–91.
- [108] Tang, S.; Obana, S. Energy E_icient Downlink Transmission in Wireless LANs by Using Low-Power Wake-Up Radio. *Wirel. Commun. Mob. Comput.* 2017, 2017, 1–12.
- [109] Wan, L.; Kang, S. POEM: Minimizing Energy Consumption for WiFi tethering Service. *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2016, 24, 3785–3797.
- [110] Hu, H.; Guo, J.; Zhang, H.; Wang, F. Joint Optimization of Sensing and Power Allocation in Energy-Harvesting Cognitive Radio Networks. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* 2017, 17, 1–21.
- [111] Yu, H.; Xu, C.; Liang, W. Green-Energy-Powered Cognitive Radio Networks. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* 2017, 17, 1–18.
- [112] Chen, W.; Li, Z.; Biao, J. Huawei Technologies, Shenzhen, CN. Access Point Energy Saving Method and Access Point. U.S. Patent Application 15/670,716, 8 February 2018.
- [113] Marrero, D.; Macías, E.; Suárez, Á.; Santana, J.; Mena, V. A Method for Power Saving in Dense WiFi Networks Interference. *Mobile Netw. Appl.* 2019, 24, 688–699.
- [114] Wägemann, P.; Distler, T.; Janker, H.; Ra_eck, P.; Sieh, V.; Schröder-Preikschat, W. Operating Energy-Neutral Real-Time Systems. *ACM Trans. Embed. Comput. Syst.* 2017, 17, 1–25.

- [115] Porsch, M.; Bauschert, T. Aligned Beacon Transmissions to Increase IEEE 802.11s Light Sleep Mode Scalability. In Proceedings of the 20th EUNICE/IFIP EG 6.2, 6.6 International Workshops on Advances in Communication Networking, Rennes, France, 1–5 September 2014.
- [116] Lozano, C.; Camelo, M.; Vila, P.; Donoso, Y. A Multi-objective Routing Algorithm for Wireless Mesh Network in a Smart Cities Environment. *J. Netw.* 2015, 10, 60–69.
- [117] Song, Y.; Ciubutaru, B.; Muntean, G. A Slow-start Exponential and Linear Algorithm for Energy Saving in Wireless Networks. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Nuremberg, Germany, 8–10 June 2011.
- [118] Santana, J.; Marrero, D.; Macías, E.; Mena, V.; Suárez, Á. Interference Effects Redress over Power-Efficient Wireless-Friendly Mesh Networks for Ubiquitous Sensor Communications across Smart Cities. *Sensors* 2017, 17, 1678.
- [119] Zou, H.; Zhou, Y.; Jiang, H.; Chien, S.-C.; Xie, L.; Spanos, C.J. WinLight: A WiFi-based occupancy-driven lighting control system for smart building. *Energy Build.* 2018, 158, 924–938.
- [120] Musleh, A.; Debouza, M.; Farook, M. Design and Implantation of Smart Plug: An Internet of Things (IoT) Approach. In Proceedings of the International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), Ras Al Khaimah, UAE, 21–23 November 2017.
- [121] Haratcherev, I.; Fiorito, M.; & Balageas, C. Low-Power Sleep Mode and Out-Of-Band Wake-Up for Indoor Access Points. *IEEE Globecom Workshops*. 2009. *IEEE Xplore*: December 2009. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2009.5360732.
- [122] Morshedi, M.; Noll, J. Deploying Energy Efficient WiFi Networks. Twelfth International Workshop on Selected Topics in Mobile and Wireless Computing. October 2019. *IEEE Xplore*. Diciembre 2019. DOI: 10.1109/WiMOB.2019.8923399

- [123] Kliks, A.; Dimitriou, N.; Zalonis, A.; & Holland, O. WiFi traffic offloading for energy saving. ICT 2013. *Xplore*: 17 October 2013. DOI: 10.1109/ICTEL.2013.6632151
- [124] López-Aguilera, E.; Demirkol, I.; García-Villegas, E.; & Paradells, J. IEEE 802.11-Enabled Wake-Up Radio: Use Cases and Applications. *Sensors*. MDPI. Diciembre 2019.
- [125] Silva, P.; Almeida, N.; Campos R. Energy Consumption Management for Dense Wi-Fi Networks. *Wireless Days (WD)*. Abril 2019. IEEE Xplore: junio 2019. DOI: 10.1109/WD.2019.8734187
- [126] Dwijaksara, M.; Jeon, W.; Jeong, D. User Association for Load Balancing and Energy Saving in Enterprise WLANs. *IEEE Systems Journal*. Volumen 13. Issue 3. Páginas 2700-2711. Septiembre 2019. DOI: 10.1109/JSYST.2019.2911930
- [127] Jiménez, J.; Romero, O.; Lloret, J.; & Diaz, J. Energy Savings Consumption on Public Wireless Networks by SDN Management. Springer. *Mobile Networks and Applications*. Volumen 24. Páginas 667-677. 2019. <https://doi.org/10.1007/s11036-016-0784-7>.
- [128] Tendencias globales de las energías renovables. Deloitte Insights. 2018. <https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/es/Documents/energia/Deloitte-ES-tendencias-globales-energias-renovables.pdf>
- [129] Bridges, C.; Stolar, M.; Baumgartner, T. Phosphaviologen-Based Pyrene-Carbon Nanotube Composites for Stable Battery Electrodes. *Batteries & Supercaps*. Volumen 3. Issue 3. Marzo 2020. <https://doi.org/10.1002/batt.201900164>
- [130] Zhao, E.; Liu, T.; Jónsson, E.; Lee, J.; Temprano, I.; Jethwa, R.; Wang, A.; Smith, H.; Carretero-Gonzalez, J.; Song, Q. y Grey, C. In situ NMR metrology reveals reaction mechanisms in redox flow batteries. *Nature* 579. Páginas: 224-228. Marzo 2020. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2081-7>
- [131] Team Viewer. <https://www.teamviewer.com/en-us/>
- [132] Arduino, Arduino Uno Rev 3. Available online: <https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3> (accessed on 25 January 2019).

[133] Texas Instruments Incorporated, LM2576xx Series simple switcher® 3-A Step-Down Voltage Regulator. snvs107d—June 1999—revised May 2016. Available online: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2576.pdf> (accessed on 25 January 2019).

Glosario

Amp	<i>Amperímetro</i>
ACK	<i>Acknowledgment</i>
ADS	<i>Advanced Design System</i>
AM	<i>Amplitud Modulada</i>
AODV	<i>Ad hoc On demand Distance Vector routing protocol</i>
AOMDV	<i>Ad hoc On demand Multipath Distance Vector routing protocol</i>
B	<i>Batería</i>
BF	<i>formación de haces</i>
BLE	<i>Bluetooth Low Energy</i>
BOS	<i>Bajo Equilibrio de Sistemas</i>
BS	<i>estación base</i>
Cat 5e	<i>Categoría 5e</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CPU	<i>Control Power Unit</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
CU	<i>Unidad de Control</i>
DBEAQ	<i>4,4'-((9,10-antraquinona-2,6-diol) dioxi) dibutirato</i>
DCF	<i>función de coordinación distribuida</i>
DDC	<i>ciclo de trabajo dinámico</i>
DHAQ	<i>dihidroxiantraquinona</i>
DoF	<i>grados de libertad</i>
DSC	<i>llamada selectiva digital</i>
DSDV	<i>Destination-Sequenced Distance-Vector Routing</i>
DSRMA	<i>antena monopolo rectangular de doble paso</i>
DSS	<i>Data Symbol Silence</i>
ECMA	<i>Algoritmo de Gestión del Consumo de Energía</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
ELSM	<i>algorithm Electromagnetic Level Set Methods</i>
EMH	<i>épsilon multi-hop</i>
EnOs	<i>Energy Neutral Operating System</i>
ES	<i>Energía Solar</i>
fem	<i>Fuerza electromotriz</i>
GSM	<i>Sistema Global para las Comunicaciones Móviles</i>
GPS	<i>Sistema de Posicionamiento Global</i>
HDEER	<i>distributed routing scheme</i>
HLV	<i>Hospital Luis Vernaza</i>
IC	<i>circuito integrado</i>
IEEE	<i>instituto de Ingenieros eléctricos y electrónicos</i>
IIoT	<i>Internet industrial de las cosas</i>
INC	<i>Instituto de Neurociencias</i>

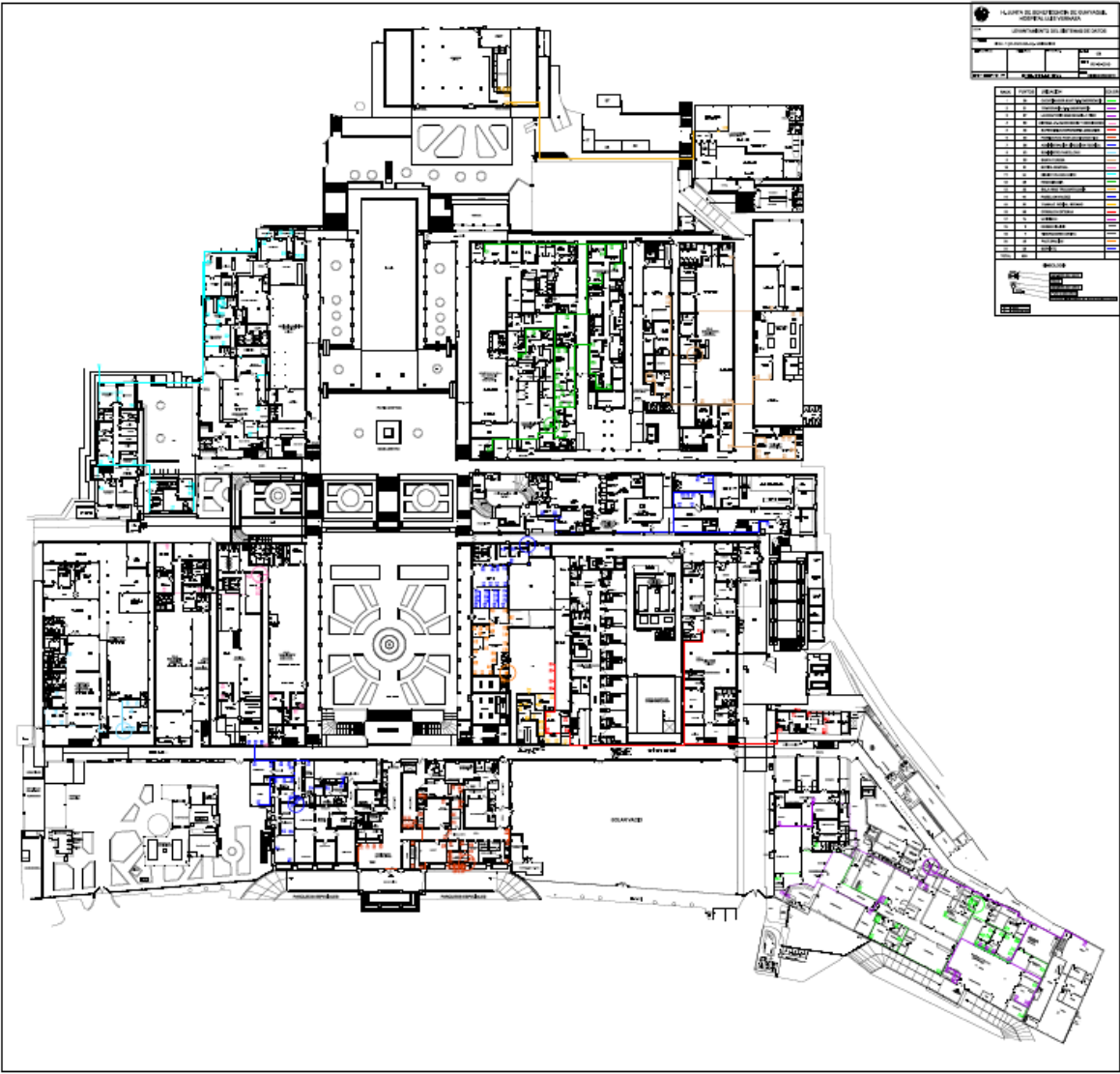
IoT	<i>Internet de las Cosas</i>
ISM	<i>Banda de radio Industrial, Científica y Médica</i>
LCD	<i>pantalla de cristal liquido</i>
LED	<i>light-emitting diode</i>
LPWAN	<i>redes de baja potencia y área amplia</i>
LW-CCA	<i>CCA liviano</i>
M2M	<i>máquina a máquina</i>
MAC	<i>Capa de acceso al medio</i>
MANET	<i>mobile and hoc networks</i>
MAP	<i>punto de acceso de malla</i>
MCU	<i>Unidad de Controlador de Microprocesador</i>
MF	<i>Frecuencia Media</i>
mmWave	<i>ondas milimétricas</i>
MOEA	<i>algoritmos evolutivos multiobjetivos</i>
MOO	<i>optimizadores de objetivos múltiples</i>
MP	<i>punto de malla</i>
MPPT	<i>seguimiento de punto de máxima potencia</i>
MR-WSN	<i>WSN multirradio</i>
MSD	<i>Mass Spring-Damper</i>
PA	<i>Punto de Acceso</i>
PD	<i>dispositivo alimentado</i>
PDR	<i>tasa de entrega de paquetes</i>
PID	<i>Derivado Integral Proporcional</i>
Plevel	<i>nivel de potencia de transmisión</i>
PLR	<i>tasa de pérdida de paquetes</i>
PoE	<i>Power Over Ethernet</i>
POS	<i>terminales punto de venta</i>
PR	<i>encaminador de energía</i>
PS	<i>Ahorro de energía</i>
PSE	<i>power sourcing equipment</i>
PSM	<i>power saving mode</i>
PSO	<i>optimización de enjambre de partículas</i>
PTZ	<i>zoom panorámico</i>
PV	<i>Fotovoltaicas</i>
Q1	<i>Primer cuartil</i>
QoE	<i>Calidad de Experiencia</i>
QoS	<i>Calidad de Servicio</i>
RDC	<i>ciclo de trabajo de radio</i>
RL	<i>refuerzo simple</i>
RF	<i>Radiofrecuencia</i>
RMA	<i>antena monopolo rectangular</i>
RMN	<i>resonancia magnética nuclear</i>
RREQS-RREP	<i>request-response</i>
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
Rx	<i>Recepción</i>
S	<i>fuentes de alimentación</i>

SDC	<i>ciclo de trabajo fijo</i>
SDN	<i>redes definidas por software</i>
SHE	<i>recolección de energía solar</i>
SHE-WSN	<i>nodos de la red de sensores inalámbricos de recolección de energía solar</i>
SLLEACH-C	<i>protocolo centralizado de jerarquía de agrupación adaptativa de baja energía solar y baja pérdida</i>
SNR	<i>relación señal / ruido</i>
SPEA	<i>Strength Pareto Evolutionary Algorithm</i>
SPT	<i>algoritmo de camino más corto</i>
STA	<i>transferencias frecuentes de estaciones</i>
SWCNT	<i>nanotubos de carbono de pared simple</i>
TCP/IP	<i>capas del protocolo de transporte y protocolo de Internet</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TIC	<i>Tecnologías de la Información y la Comunicación</i>
T-MAC	<i>control de acceso medio de tiempo de espera</i>
TU	<i>Unidades de tiempo</i>
TWT	<i>tiempo objetivo de activación</i>
Twh	<i>Tera Watts por hora</i>
Tx	<i>Transmisión</i>
UA	<i>asociación de usuarios</i>
UL	<i>enlace ascendente</i>
VoD	<i>Video on demand</i>
VoIP	<i>voz sobre IP</i>
Volt	<i>Voltímetro</i>
VoWLAN	<i>Voice over WLAN</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WiMax	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WioTap	<i>WiFi IoT</i>
WLSM	<i>métodos de mínimos cuadrados ponderados</i>
WMN	<i>Wireless Mesh Networks</i>
WSN	<i>Red de sensores inalámbrica</i>
WT	<i>terminal WiFi</i>
WuR	<i>Wake-up Radio</i>

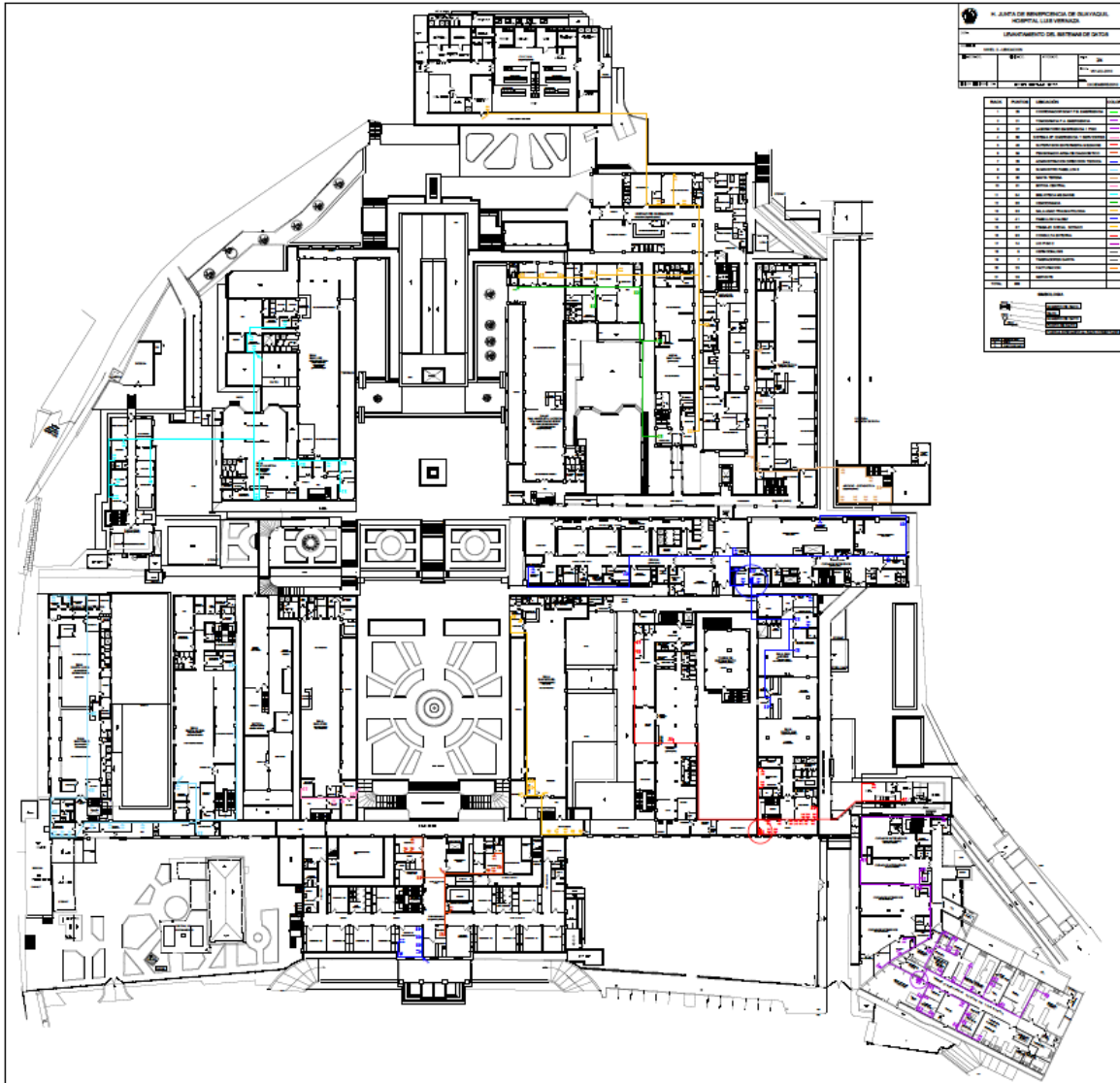
Anexo. Esquemas del Hospital Vernaza

En este anexo se recogen los planos del Hospital Vernaza de la ciudad de Guayaquil (Ecuador), en los cuáles se hizo el estudio práctico de esta tesis doctoral para dimensionar el consumo de energía de los PA WiFi de sus redes densas.

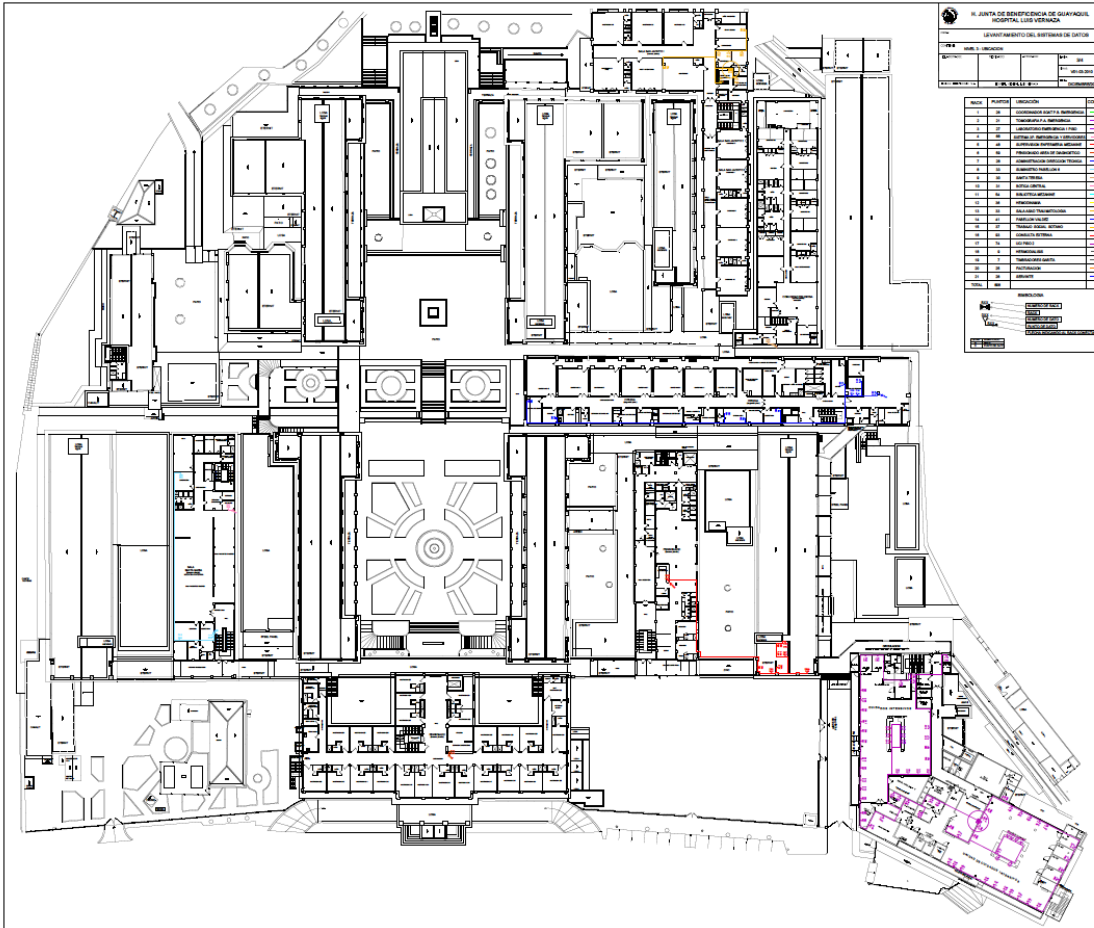
Cuartos de rack y red de la planta baja del Hospital Luis Vernaza



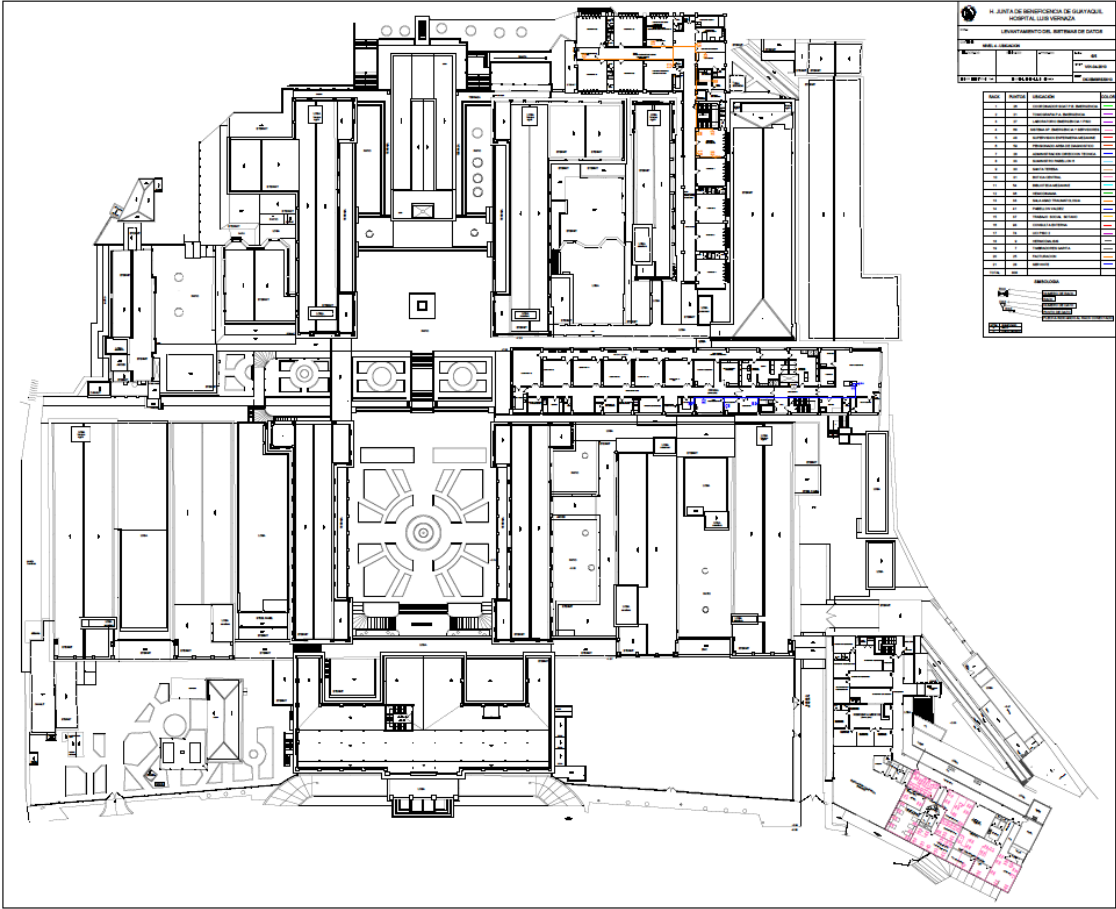
Cuartos de rack y red del primer piso del Hospital Luis Vernaza



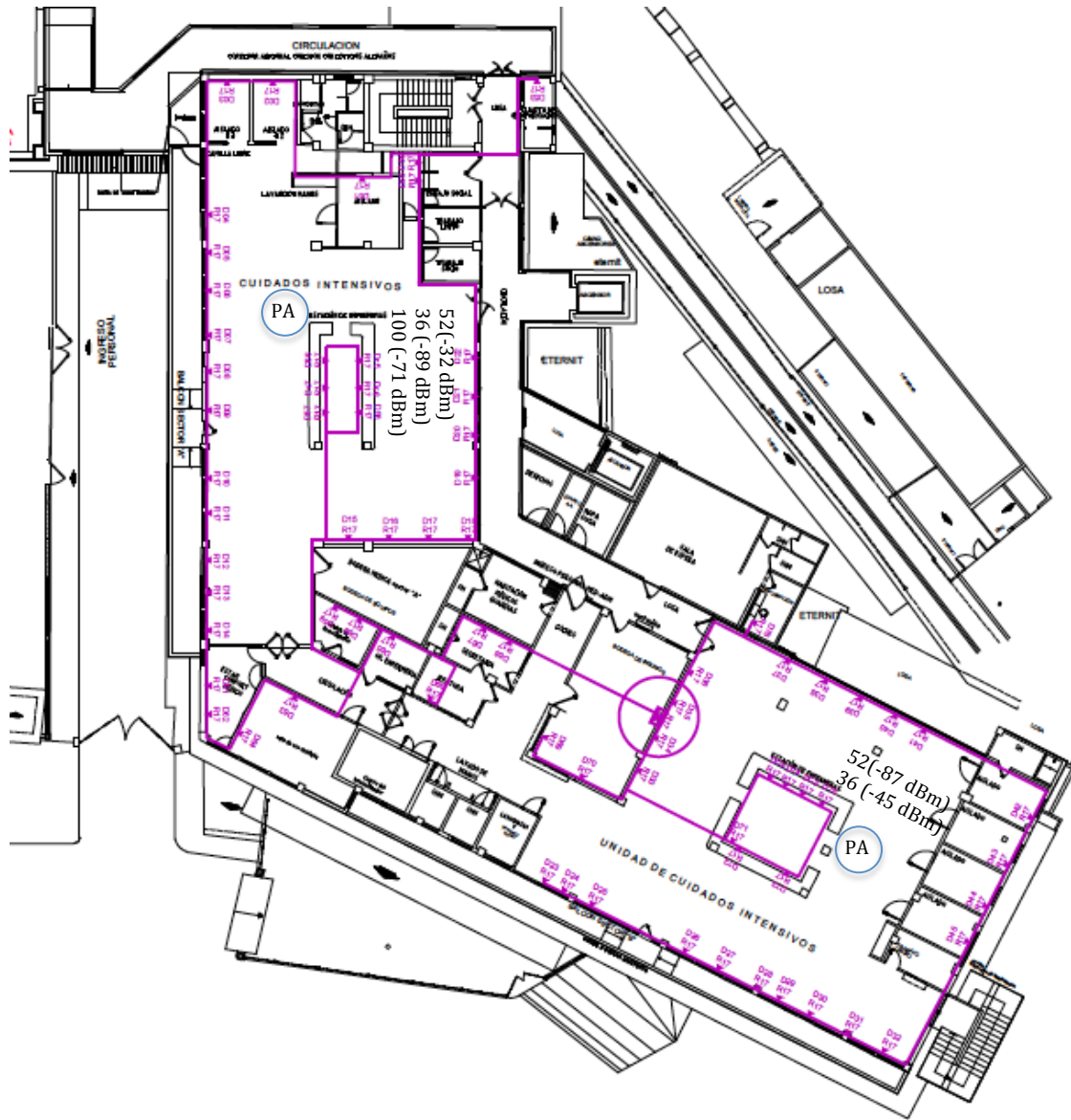
Cuartos de rack y red del segundo piso del Hospital Luis Vernaza



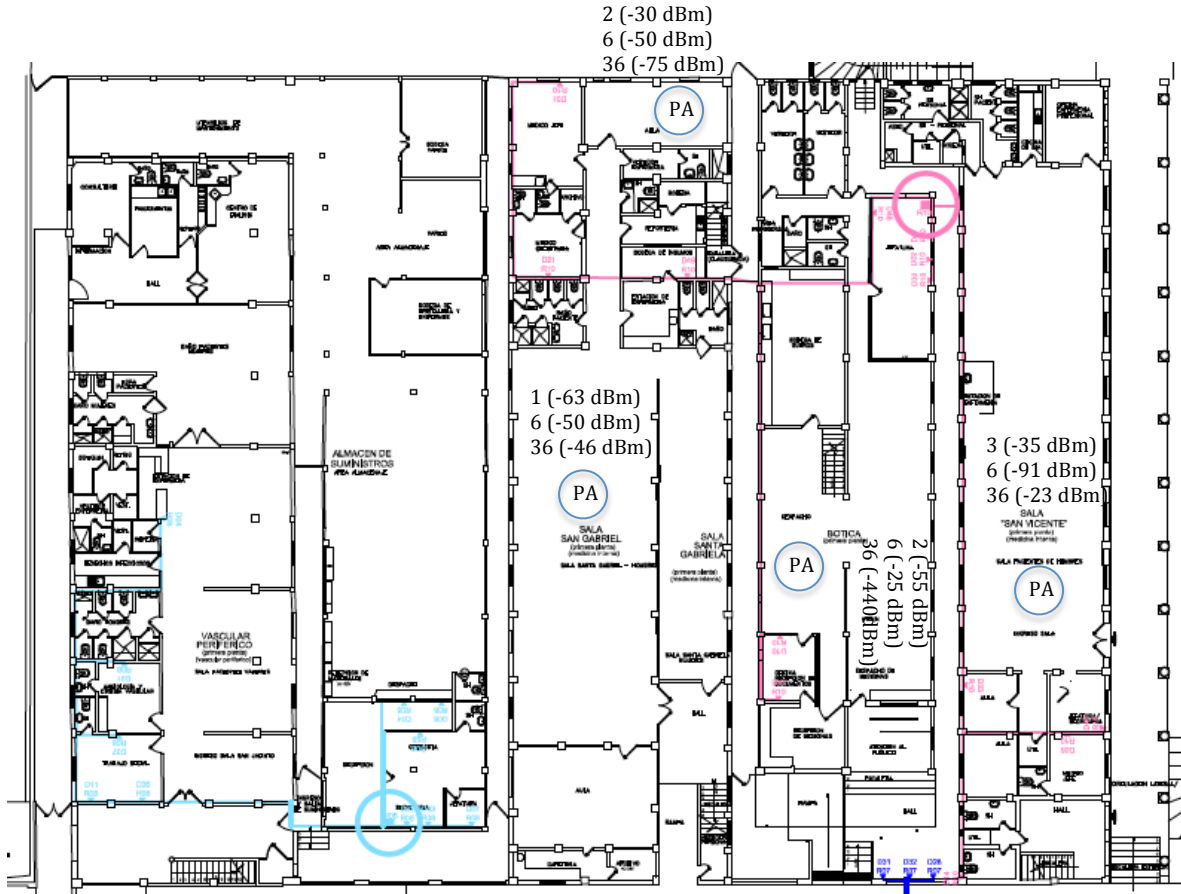
Cuartos de rack y red del tercer piso del Hospital Luis Vernaza



Ubicación de los PA en UCI Emergencia del Hospital Luis Vernaza



Ubicación de los PA en bodega bótica y salas de pensionado en planta baja del Hospital Luis Vernaza



Parte activa de la red y su distribución en el Hospital Luis Vernaza

Cantidad	Racks	Equipos	Marca	Modelo	Watts
1	DATACENTER "SISTEMAS"	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
2	MEGA-UCI	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
3	EMERGENCIA	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-24PS-L	370
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
4	UCI-SANTA-ANA	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-24PS-L	370
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
5	CAJA INTERNA	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-12S	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TS-L	740/49
6	SERVINTE	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-24PS-L	370
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
7	CLINICA-SOTOMAYOR (ADMINISTRACION)	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960G-48TC-L	740
		Central Telefon	Avaya	IP Office 500 V2	
8	BOTICA CENTRAL	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
	BOTICA RACK AEREO	SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
9	BIBLIOTECA	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47

Cantidad	Racks	Equipos	Marca	Modelo	Watts
10	HEMODINAMIA	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
11	PABELLON ASSAF	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-24PS-L	370
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960-48TC-L	740
12	PABELLON VALDEZ	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
13	CONSULTA-EXTERNA-PB	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
14	CONSULTA-EXTERNA-1P	SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
15	CONSULTA-EXTERNA-2P	SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TD-L	740/47
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48TC-L	740
16	TIMBRADORES	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740
17	CDI	SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C3750X-24P	350
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
		DVR	Hikvision		
18	QUEMADOS	SWITCH	Cisco	WS-C2960X-48FPS-L	740
19	DERMATOLOGIA	SWITCH	Cisco	WS-C2960S-48FPS-L	740