



**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación**

“ANÁLISIS DE LA CALIDAD DE SERVICIO PARA  
MODELAR EL PROBLEMA DEL SERVICIO DE VOIP Y  
VIDEO EN REDES DE ACCESO INALÁMBRICAS  
LOCALES PARA LA CIUDAD DE GUAYAQUIL BASADO  
EN DINÁMICA DE SISTEMAS ”

**TRABAJO DE TITULACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**MAGISTER EN TELECOMUNICACIONES**

Presentada por:

**HECTOR RUBEN FIALLOS LOPEZ**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**AÑO: 2017**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco, a mis padres Rubén y Lourdes, quienes me enseñaron los valores de perseverancia y ética a mi hermano Douglas por compartir parte de mí. A mi esposa por estar estos últimos años y a forjar el camino del trabajo y dedicación con la esperanza de un porvenir lleno de muchas expectativas. A mis suegros quienes me dieron su asistencia. A mis maestros de la Maestría, en especial a Álvaro y Boris quienes guiaron este camino para culminar con éxito este gran reto.

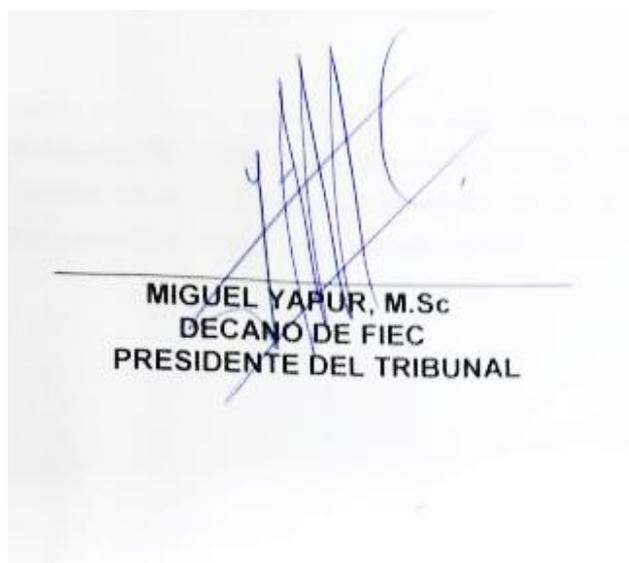
**Héctor Rubén Fiallos López**

## **DEDICATORIA**

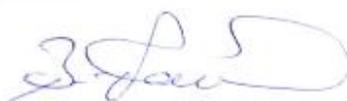
Dedico estas palabras a mi hijo Bruno y mi hija Isabelle y los que vendrán para que aprendan y forjen su camino, que está lleno de altos y bajos pero que ante todo siempre hay un nuevo día por vivir y trabajar por nuestros ideales.

**Héctor Rubén Fiallos López**

## TRIBUNAL DE EVALUACIÓN



**MIGUEL YAPUR, M.Sc**  
**DECANO DE FIEC**  
**PRESIDENTE DEL TRIBUNAL**



**BORIS RAMOS, Ph.D.**  
**DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN**



**FREDDY VILLAGO, Ph.D.**  
**MIEMBRO PRINCIPAL DEL TRIBUNAL**

## DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad y la autoría del contenido de este Trabajo de Titulación, me corresponde exclusivamente; y doy mi consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and vertical strokes, positioned above a horizontal line.

**Héctor Rubén Fiallos López.**

## RESUMEN

La tesis consiste en desarrollar y elaborar una hipótesis dinámica usando la teoría de Sistemas Dinámicos para modelar al problema del servicio de Voz sobre Internet Protocol en redes de acceso locales inalámbricas.

Se analizaron pruebas de campos realizados sobre redes de acceso inalámbricas locales y se usaron equipos de una empresa de Telecomunicaciones llamada Telconet que prestó sus recursos para llevar a cabo esta tesis.

En el Capítulo 1 se presentan los requerimientos que debe tener el servicio de Voz sobre Internet Protocol basado en estudios previos. También se justifica la problemática del servicio de Voz sobre Internet Protocol en tiempo real muy brevemente y se plantea una posible solución analizándolo bajo la Teoría de Sistemas Dinámicos. .

En el Capítulo 2 se analiza ampliamente la tecnología de redes de acceso inalámbrico locales y sus aplicaciones con la respectiva métricas en servicios de tiempo real como lo es Voz sobre Internet Protocol.

En el Capítulo 3 se muestra la problemática de calidad de servicio y calidad de experiencia en redes de acceso inalámbrico locales, revisando el estándar IEEE 802.11 y su implantación práctica como el de los teléfonos inteligentes y los parámetros de desempeño para obtener una adecuada evaluación de la calidad de experiencia, con los problemas de servicios en tiempo real a la que son expuestos.

En el Capítulo 4 se confecciona la hipótesis dinámica para el problema de Voz sobre Internet Protocol en redes inalámbricas usando Sistemas Dinámicos: Identificando el problema, definiéndolo preliminarmente y colocando los límites del problema, incluyendo los stocks, extrapolando tendencias históricas para obtener un modelo referencial y elaborando finalmente la hipótesis dinámica.

En el Capítulo 5 se valida el modelo con los datos obtenidos de la red de Telconet. Finalmente se presentan las Conclusiones y Recomendaciones del presente estudio.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
TRIBUNAL DE EVALUACIÓN.....	iv
DECLARACIÓN EXPRESA.....	v
RESUMEN.....	vi
CAPÍTULO 1.....	1
1. ANTECEDENTES.....	1
1.1 Descripción del Problema.....	1
1.2 Justificación.....	3
1.3 Objetivos.....	4
1.4 Metodología.....	5
1.5 Solución Propuesta.....	7
CAPÍTULO 2.....	8
2. TECNOLOGÍA DE REDES WIRELESS FIDELITY PARA USO DE VOIP.....	8
2.1 Revisión Breve de Redes WiFi.....	8
2.2 Tipos de redes WiFi: Infraestructura, malla y ad hoc.....	11
2.3 VoIP sobre la última milla en WiFi.....	17
2.4 Uso y Aplicaciones de redes WIFI como plataforma de servicio para VoIP.....	18
CAPÍTULO 3.....	20
3. LA PROBLEMÁTICA DE CALIDAD DE SERVICIO QOS Y CALIDAD DE EXPERIENCIA QOE EN REDES WIFI.....	20

3.1 Calidad de Servicio –QoS- de VoIP en WiFi y su problemática .....	20
3.1.1 Versiones de WiFi: IEEE 802.11e y su implantación práctica .....	20
3.1.2 Descripción de Problemas Actuales.....	23
3.1.3 Equipos WiFi para VoIP: Teléfonos Inteligentes .....	25
3.1.4 Comparación de la QoS de WiFi vs redes celulares de la VoIP .....	26
3.1.5 Problemática de la QoS en WiFi de la VoIP .....	28
3.2 Calidad de Experiencia –QoE- y su problemática en redes WiFi.....	28
3.2.1 KPI y KQI para la definición de QoE en redes WiFi.....	29
3.2.2 Metodología de Evaluación y las métricas de QoE en las redes WiFi .....	30
3.2.3 Descripción de la QoE para redes WiFi de VoIP .....	32
3.2.4 Los problemas que afronta la QoE en redes WiFi.....	33
3.3 Análisis de Series de Tiempo de variables relacionadas a QoS y QoE de la red de Telconet .....	34
3.3.1 Pruebas de datos oficina-hogar .....	34
3.3.2 Pruebas de campo en Guayaquil .....	35
3.3.3 Análisis de la señal recibida por sectores en Guayaquil.....	41
3.3.4 Análisis de la señal recibida oficina-hogar .....	42
3.3.5 Análisis de resultados .....	42
CAPÍTULO 4.....	43
4. MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS DEL PROBLEMA DEL SERVICIO DE VOIP EN REDES INALÁMBRICAS .....	43
4.1 La identificación de los límites del problema.....	43
4.2 Definición de los límites preliminares del Sistema .....	47
4.3 Definir límites preliminares del modelo .....	49
4.4 Inclusión de stocks no presentes en los datos históricos.....	51

4.5 Extrapolación de tendencias históricas para Obtener el Modelo Referencial.....	52
4.6 Inclusión de flujos relacionados a políticas y estrategias para el servicio .....	52
4.7 Definición del tipo de comportamiento del modelo.....	53
4.8 Inspeccionar el diseño de posibles estrategias tecnológicas usando el modelo dinámico .....	54
4.9 Descripción y desarrollo por etapas del modelo básico .....	55
4.10 Elaboración del modelo para implementar las relaciones definidas identificadas en el Modelo Referencial .....	56
CAPÍTULO 5.....	62
5. VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DISEÑADAS EN EL MODELO CON PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN TELCONET .....	62
5.1 Estrategias tecnológicas para mejorar el comportamiento observado en el modelo del sistema .....	62
5.2 Descripción de las posibles estrategias tecnológicas en Telconet.....	62
5.3 Pruebas de campo del modelo en la red de Telconet.....	68
5.4 Análisis de resultados .....	70
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	72
BIBLIOGRAFÍA.....	75

## CAPÍTULO 1

### 1. ANTECEDENTES

En los últimos años, las redes WiFi se han desplazado desde un selectivo mercado hacia la principal tecnología de flujos de datos en tiempo real y se han convertido en las redes ampliamente usadas en el mundo. De esta manera, tenemos una plataforma tecnológica para servicios como *Voz sobre Internet Protocol (VoIP)* [1].

El amplio uso de *VoIP* en redes *Wireless Fidelity (WiFi)* [2] ha resultado de varias extensiones al estándar del *Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)* [3] 802.11 para mejorar las capacidades de servicios en tiempo real. La mayor de las redes *WiFi* operan en modo de infraestructura por lo que el análisis central de la mayoría de los estudios es basado en dicho modo de operación y mejoras sustanciales en calidad de servicio para *VoIP* en redes *WiFi* se vienen planteando desde hace años. Aunque se han presentado ligeras mejorías en el tratamiento de alguna métrica de requisito en la calidad de Voz sobre Internet Protocol, las restantes siguen sin obtener dichas mejoras. Las redes WiFi que operan en modo Ad-Hoc han sido objeto de estudio profundo en los últimos años; pero su despliegue práctico ha sido muy escaso o nulo a nivel mundial. Aunque se ha propuestos mejoras muy interesantes en encaminamiento y Calidad de Servicio (QoS del inglés, *Quality of Service*) [4], éstas no han sido trasladadas a la práctica con el nivel de despliegue que hubiera sido deseable. El modo de operación en Malla de WiFi si ha tenido un mayor nivel de despliegue (aunque reducido) que el de las redes Ad-Hoc.

El presente estudio pretende en base a la teoría de la Dinámica de Sistemas dar una luz sobre un nuevo enfoque de elementos que aún no se hayan podido tomar en cuenta en redes WiFi con modo de operación en Malla en la red del operador *Telconet* en la ciudad de Guayaquil. Estableciendo pruebas de campos se implementaría una hipótesis dinámica que valide el modelo del problema del servicio de *VoIP*.

#### 1.1 Descripción del Problema

Las redes que siguen la tecnología *Wireless Fidelity (WiFi)* son ampliamente usadas en todo el mundo debido a que suponen un ahorro económico

importante al usuario y utilizan de forma nativa la familia de Protocolos de Internet (*IP*, del inglés *Internet Protocol*) [5].

El volumen de tráfico en las redes WiFi es muy elevado actualmente. El tipo de tráfico que circula por estas redes es muy variado; pero en los últimos años se muestra una tendencia creciente del tráfico multimedia (*video streaming*, *videoconferencia* y *VoIP* principalmente). Es conocido ampliamente que estos dos tipos de servicios demandan que la red disponga de mecanismos poderosos QoS y que el usuario quede contento con el servicio proporcionado experimentando una buena experiencia de usuario (QoE del inglés *Quality of Experience*) [6]. Aunque las redes WiFi son ampliamente usadas para VoIP, presentan diversos problemas que dificultan la provisión de QoS y QoE debido entre otras cosas a:

- Los canales inalámbricos tienen un comportamiento caótico que derivan en pérdidas excesivas de paquetes y errores [7].
- Los protocolos de nivel de Transporte de Internet (*User Datagram Protocol (UDP)* y *Transmission Control Protocol (TCP)*) no soportan bien este tráfico sobre WiFi [8].
- Las aplicaciones dejan de funcionar cuando se produce una inesperada interrupción del servicio multimedia durante un tiempo no superior a 1 minuto [9]

Los principales modos de operación de WiFi son tres:

- *Infraestructura*: los terminales se comunican entre ellos a través de un elemento de red intermedio llamado Punto de Acceso (AP, del inglés *Access Point*). Este modo es el más utilizado en la práctica (hogares, comercios, lugares públicos restringidos).
- *Ad Hoc*: los terminales se pueden comunicar entre ellos directamente sin mediar un AP en la comunicación. Prácticamente no se han desplegado mucho menos en la práctica, aunque existen variantes el *WiFi Direct* [10] que permiten su uso muy específico, siendo no aplicable a VoIP.

- *Malla*: Existen AP fijados en lugares determinados donde se despliega la Red y también pueden haber comunicaciones directas entre nodos terminales. Este tipo de redes son *multisalto* porque la comunicación entre dos terminales puede incluir el traspaso de la comunicación entre varios AP [11]. Existen algunas redes desplegadas, sobre todo en las *smart cities* [12]. Un ejemplo de este tipo de redes es la que despliega *Telconet* en la ciudad de Guayaquil [13]. Por su interés centramos nuestra atención en este tipo de redes, ya que existen problemas de despliegue de VoIP que aún no se han resuelto eficazmente en este tipo de redes.

## 1.2 Justificación

La QoS, varía de acuerdo a la tecnología empleada. La QoS en VoIP depende de varias características del medio y de la tecnología a emplearse, tales como: el ancho de banda de la conexión, hardware, el servicio que provee el proveedor de conexión, el destino de la llamada, entre otros.

En el proceso de transmisión, conectividad y recepción de VoIP, la voz es tratada como datos y por tal razón debe ser comprimida y transmitida, para luego ser descomprimida y entregada al usuario. Este proceso debe ejecutarse en un corto tiempo y si tomara milisegundos demás (retraso excesivo), la QoE se reduciría. En redes Wifi se debe cuidar que algunos parámetros básicos se mantengan dentro de intervalos de funcionamiento adecuado:

- *Retraso*: puede agravarse debido al comportamiento caótico de los canales inalámbricos, el traspaso de la llamada entre dispositivos de la red (handoff) y las ráfagas de comunicación producidas por el funcionamiento básico del WiFi [14] [15].
- *Jitter*: (retraso entre datos de voz digitalizados que deben llegar en secuencia, dentro de un intervalo de tiempo reducido): afectado por el canal físico dado y por el funcionamiento básico del WiFi. Según las recomendaciones de la *International Telecommunication Union (ITU)* [15] debe ser hasta 150 ms. En redes WiFi que operan bajo el estándar del *IEEE 802.11 (WiFi)*, el retraso de una vía entre el cliente y el punto

de acceso, usualmente esta alrededor de 10 a 20 ms [14].

- *Tasa de pérdida de datos digitalizados*: es aceptable hasta pérdidas de 1% [15] [1]. En WiFi se producen mayormente debido a las colisiones en el acceso al canal radio físico compartido por los terminales de comunicación. Con una política adecuada de retransmisión de datos en WiFi se reduce la cantidad de datos perdidos considerablemente [16] [17] a costa de provocar mayor jitter y retraso de llegada de datos.

Como se puede deducir implantar la VoIP sobre WiFi es un problema difícil, porque no se pueden optimizar todos los parámetros de forma separada. Por este motivo, en los últimos años se ha recurrido a métodos de optimización heurística que se implantan en distintas versiones del estándar IEEE 802.11 sobre todo para el modo de operación en infraestructura. Se ha investigado mucho para redes ad hoc y redes en malla; pero sin un despliegue práctico importante.

Nosotros estamos interesados en una optimización heurística holística en la que se tengan en cuenta, la arquitectura de comunicación (IP/WiFi) y del comportamiento del usuario para la red de *Telconet* en Guayaquil. La novedad es que aplicamos la teoría de Dinámica de Sistemas [18] para analizar la calidad de servicio del servicio de VoIP sobre redes WiFi.

### 1.3 Objetivos

Objetivo General: estudiar el comportamiento a nivel de Dinámica de Sistemas del servicio de VoIP sobre WiFi

Los Objetivos Específicos son:

- Analizar el comportamiento de los servicios de VoIP sobre redes de acceso WiFi determinando las relaciones causales que lo producen y formular un modelo básico para inspeccionar soluciones tecnológicas del comportamiento de estos servicios.
- Examinar técnicas y pruebas de campo para medir los efectos que ocurren en los servicios de VoIP sobre redes WiFi, mediante la teoría de Dinámica de Sistemas.

- Diseñar estrategias a través de la metodología Dinámica de Sistemas para mejorar la QoS de la VoIP sobre redes WiFi..
- Validar las estrategias diseñadas para implementarlas dentro de la red de Telconet.
- Desarrollar un informe técnico a manera de ensayo con la formulación de hipótesis dinámica y un modelo básico de Dinámica de Sistemas para transferir el conocimiento desarrollado y sus anexos

#### **1.4 Metodología**

Analizar el tráfico VoIP en WiFi y del comportamiento integral mediante la formulación de la hipótesis dinámica de la metodología Dinámica de Sistemas.

Analizar las interrupciones de servicios VoIP en redes de acceso WiFi reflejando, a distintos niveles, los problemas que existen y como la teoría de Dinámica de Sistemas por medio de la formulación de hipótesis dinámica los pondría de manifiesto para explorar soluciones imaginativas integrales a dichos problemas.

Previo al proceso del planteamiento de la hipótesis dinámica vamos primeramente a la identificación de los límites del problema el cual consiste en identificar escenarios o condiciones actuales de la VoIP en redes de acceso inalámbrico para identificar variables relevantes presente en dicha problemática, graficando datos de series de tiempo históricas y describiendo cualitativamente tendencias pasadas que preceden a la condición actual. Seleccionando un subgrupo de tendencias que mejor represente la historia del problema de VoIP en redes WiFi y eliminar los datos no relacionados. Seguido llegamos a la formulación de los límites preliminares del sistema que no es más que la descomposición de cada grupo de patrones complejos en partes más simples. Para luego graficar los componentes de cada grupo y sintetizar los patrones relacionados de todos los grupos en subgrupos. Seleccionamos un subgrupo de tendencias que representan el comportamiento de la VoIP en redes WiFi, eliminando lo que no interese de la calidad de servicio y calidad de experiencia de VoIP en WiFi. Definiendo así los límites del Sistema. Para definir los límites preliminares del modelo el subgrupo de patrones seleccionados en el límite

Preliminar del Sistema. Se combina variables desagregadas para obtener un nivel de agregación para la problemática de la QoS y QoE en VoIP en redes WiFi. Incluso creando variables abstractas no presentes en los datos originales. Se grafica el comportamiento histórico inferido de las variables abstractas y agregadas. Se unifica los patrones históricos de acuerdo al propósito del modelo, el horizonte de tiempo de interés con las estrategias y regulaciones que el modelo de la explicación de la problemática de VoIP para mejorar la QoS y QoE en redes WiFi. El horizonte de interés será el IEEE 802.11 de los últimos 2 años en adelante.

Una vez finalizado la etapa anterior, que es la más crítica de los sistemas dinámicos se incluye stocks (*traducido al español como variables de estado o nivel*) no presentes en los datos históricos de tal manera que se infiere el comportamiento de stocks para luego graficar el comportamiento de las nuevas variables adicionadas. Ensamblamos patrones históricos de datos descompuestos y variables inferidas en una fábrica de variables del modelo para VoIP sobre la red WiFi de Telconet. Una clave para este proceso es obtener stocks de experiencias y conceptos relacionados ya que no pueden estar presentes en datos históricos o series de tiempo. Finalmente llegamos a la etapa de extrapolación de tendencias históricas para obtener el modo referencial para la problemática de VoIP de QoS o QoE en redes WiFi, en este proceso se realiza proyecciones del comportamiento futuro de las variables del modelo se ensambla tendencias pasadas y futuras incluso inferidas y se anexa las variables tipo flujos que representan políticas y estrategias que confirman una secuencia lógica. Los flujos deben estar relacionados a políticas y estrategias. Toda esa sección será detalladamente explicada en el capítulo 4 junto con la hipótesis dinámica y explorar nuevas estrategias tecnológicas para mejorar el comportamiento de VoIP en redes WiFi en el capítulo 5 [18].

La Dinámica de Sistemas es una metodología causal, siendo cualitativa por la descripción de la hipótesis dinámica y es cuantitativa por el modelo que se realiza.

## 1.5 Solución Propuesta

Se propone alcanzar de esta tesis lo siguiente:

- Formular un modelo básico de la Dinámica de Sistemas del comportamiento del servicio de VoIP sobre redes WiFi con topología en malla de la empresa *Telconet* en Guayaquil. Se ponen de manifiesto relaciones entre variables de diversa índole que no se han podido encontrar en modelos existentes (que no aplican la Dinámica de Sistemas). De esta manera se espera tener un avance exploratorio para una posible mejora en la QoS.
- Inspeccionar la importancia de las inter-relaciones de los elementos y variables técnicas realizadas con la formulación de la hipótesis dinámica y de ser posible el desarrollo de un modelo básico a nivel exploratorio que pueda inducir la identificación de posibles mejoras en la QoE.
- Al menos un artículo científico-técnico de impacto a nivel Mundial con los resultados que se obtengan, por un lado y por otro un informe a nivel Empresarial de tipo exploratorio para un hipotético servicio de este tipo y mejorar la QoS y QoE con ventajas competitivas a la empresa *Telconet*

## CAPÍTULO 2

### 2. TECNOLOGÍA DE REDES WIRELESS FIDELITY PARA USO DE VOIP

Existen varias razones para usar radio frecuencia para la tecnología *Wireless Local Area Network (WLAN)* [19] y que son fundamentados en los estándares del IEEE 802.11. Describimos los tipos de arquitectura de redes WiFi (tipo de WLAN), y como éstas son empleadas para la VoIP. Comprendiendo las características, capacidades y limitaciones de las redes WiFi.

#### 2.1 Revisión Breve de Redes WiFi

La tecnología WiFi tiene varios orígenes:

- La extensión de las WLAN estandarizadas por el IEEE 802.11 a finales del siglo 20 [3]. El objetivo era reemplazar los cableados internos de un ambiente corporativo y simplificar dicha estructura de cables de cobre; para ser reemplazado por un medio inalámbrico para proveer conexiones IP. Define dos niveles:
  - *Físico*: canales infrarrojos o radio usando las técnicas: Espectro Ensanchado de Secuencia Directa (*DSSS* del inglés *Direct Sequence Spread Spectrum*); como en Espectro Ensanchado de Salto de Frecuencia (*FHSS* del inglés *Frequency Hopping Spread Spectrum*). Con las cuales se lograba alcanzar hasta 1 Mbps de velocidad pico teórica, aunque en la práctica no se llegaba a alcanzar los 750 Kbps. La frecuencias de trabajo para los canales de radio se definió la banda Industrial, Científica y Médica a 2,4 GHz (*ISM 2,4 GHz*, del inglés *Industrial, Scientific and Medical*) que no necesita licencia de comunicación.
  - Control de acceso al medio (*MAC* del inglés *Medium Access Control*): que ofrece servicios a un nivel denominado Control de Enlace Lógico (*LLC* del inglés *Logical Link Control*).

Definen originalmente dos tipos de modos para ser configurado: infraestructura y ad hoc. Y se diseñó especialmente para trabajar con protocolos de Internet de forma nativa.

La WiFi Alliance [20], que era una alianza de empresas dedicadas a estandarizar la implantación comercial del IEEE 802.11. Aunque en la WiFi Alliance se refiere al Wireless Fidelity como Wi-Fi, nosotros en el documento lo denominaremos como WiFi siguiendo indicaciones que se hacían originalmente.

El WiFi por tanto, es un estándar comercial *de facto* surgido a partir de especificaciones técnicas elaboradas originalmente por el IEEE 802.11 y modeladas por la *WiFi Alliance*.

Existe una amplia variedad de versiones (b, g, a, n, ac, e, i, f...) a que ha dado lugar el IEEE 802.11 para adaptarse a nuevos servicios de Internet (WiFi ha redefinido de acuerdo a estas versiones su funcionamiento) [6]:

- *b*: ISM 2,4 GHz, 1 mW, DSSS y 11 Mbps.
- *g*: ISM 2,4 GHz, 1 mW, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)* y 54 Mbps.
- *a*: ISM 5 GHz, 1 mW, OFDM y 54 Mbps.
- *n*: ISM 5 GHz, 1 mW, OFDM con tecnología de antenas Múltiple entrada- Múltiple salida (*MIMO* del inglés *Multiple Input – Multiple Output*) para mejorar la recepción y envío de señales aprovechando la multitrayectoria [7] y el fading [8] y 100 Mbps. Modifica el MAC para ofrecer QoS para VoIP.
- *ac*: es una mejora de la versión n que usa *256 Quadrature Amplitude Modulation (256 QAM)* que le permite alcanzar hasta 500 Mbps. A nivel MAC incluye parte de la especificación IEEE 802.11e, así como la IEEE 802.11i.

La razón por la que se han ido generando nuevas versiones es para aprovechar cada vez mejor las características de propagación de la señal en los canales de comunicación radio y el MAC:

- *Reflexión y absorción*: son propiedad intrínseca de los materiales.
- *Pérdida de la trayectoria y pérdida de dispersión geométrica*: la propagación disminuye cuadrática en la relación a la distancia. Relacionado con estos fenómenos está el problema de la cobertura radio de un dispositivo WiFi. Esto es, un dispositivo con una antena (o antenas MIMO) determinada solamente podrá recibir información de otros que se encuentren a una cierta distancia (definiendo mediante esa distancia un circunferencia virtual de cobertura).
- *Multitrayectoria (multipath)*: se aprovecha al máximo las reflexiones en interiores mediante MIMO, el cual es un sistema de antenas que sirve para nivelar las distorsiones producidas por la multitrayectoria incrementando la eficiencia espectral.
- *Interferencias inter-símbolo*: se produce cuando existe una diferencia en tiempo entre las ondas de radio que llegan de una misma señal; la cuál es conocida como retraso de propagación (*delay spread*), que es suficiente para originar superposición de símbolos en transmisiones de datos digitales.
- *Manejo de múltiples colas para manejo de comunicación multimedia*: dando prioridad a los paquetes para categorizarlos según la aplicación y destino que tengan, tal como hace el IEEE 802.11e
- *Mejoras en el manejo de handoff*: actualmente existe el nuevo estándar IEEE 802.11r que hace avances significativos al momento de la adopción de usuarios bajando los tiempos de escaneos para que los trasposos sean más planos.
- *Mejoras en la seguridad*: al momento de autenticación parte de las claves de seguridad al momento de la adopción ya se encuentran en el cache de la WiFi.

Con las mejoras introducidas en las distintas versiones de WiFi es posible desplegar sobre esta tecnología el servicio de VoIP. Ahora bien, hay problemas insalvables como el de la cobertura. Además de este problema existen otros

como el del terminal oculto [21] que agrava considerablemente las interferencias a nivel físico. A nivel MAC existen problemas importantes para manejar la VoIP simultáneamente con varios flujos multimedia en un AP utilizando varias colas. Aunque hay trabajos recientes que tratan de solucionar este problema de forma holística usando varios niveles de la arquitectura IP/WiFi [22], el problema está lejos de ser solucionado eficientemente. Por esta razón cobra fuerza nuestra propuesta de buscar soluciones holísticas alternativas empleando la teoría de Dinámica de Sistemas.

## 2.2 Tipos de redes WiFi: Infraestructura, malla y ad hoc

A lo largo de los años se han re-definido o reinventado los modos de operación originales del IEEE 802.11 que el WiFi aprovecha magistralmente. Hacemos una pequeña revisión de estos modos a continuación:

- *WiFi Direct*: son dispositivos que soportan una tecnología que los habilita para conectarse directamente, usando WiFi. Permitiendo a esos dispositivos conectarse sin unirse a una red tradicional de hogar, oficina o hotspot.
- *WiFi Tethering* [23]: es una capacidad que poseen los teléfonos inteligentes y dispositivos que permiten que actúen como un hotspot móvil para proporcionar acceso a Internet a computadoras, tabletas y otros dispositivos.

Estos modos de operación se pueden considerar como casos particulares de los modos de operación tradicionales (infraestructura, malla y ad hoc), pero ninguno de ellos es apropiado para VoIP. A continuación presentamos algunas características de estos modos de operación haciendo énfasis en el modo de operación en malla, por ser de este tipo la red de Telconet.

El modo de operación con infraestructura [19] define a su vez varios tipos de sistemas:

- Conjunto de Servicio Básico (*BSS*, del inglés *Basic Service Set*): en este modo existe un solo AP al que se conectan todos los terminales WiFi. El Tethering puede considerarse un caso particular de BSS en el que un

teléfono móvil es el AP. Esta es la configuración que predomina en hogares, en ciertos comercios pequeños.

- BSS ampliada (*EBSS*, del inglés *Extended BSS*): también denominado sistema de distribución, los distintos AP se conectan entre ellos mediante cable o fibra óptica. Esta configuración predomina en comercios o empresas con varias oficinas y en universidades u organismos públicos. La red que conecta a los AP puede llegar a tener una extensión enorme.

El AP de la BSS o cualquiera de los AP de la EBSS puede proveer acceso a Internet por cable o fibra óptica.

Las ventajas de este modo de operación son:

- Las BSS hacen uso eficiente de la potencia de la señal de transmisión ya que de forma simultánea (*broadcast*) la señal llega a todos los terminales en cobertura (si el AP se coloca en un lugar de forma estratégica).

Las desventajas son:

- Los retrasos de la red, porque toda comunicación entre terminales debe necesariamente pasar a través del AP por lo que el proceso de retraso y reenvío de paquetes.
- No funciona en un ambiente de recuperación operativa de desastre (*Disaster-Recovery*).
- La ocupación del canal (Hz/s) o también llamada Ancho de Banda por Tiempo [19] no es elevada. Básicamente esto mide el ancho de banda común entre múltiples usuarios lo cual mide el volumen de frecuencia que está siendo ocupado en cada transmisión.

El modo de operación ad hoc es multisalto porque en general para llegar desde un terminal a otro habría que pasar por otro intermedio. Las redes de un solo salto no tienen esta característica. Un ejemplo de redes unisalto sería WiFi

Direct. Normalmente uno de los terminales dispone de acceso a Internet (vía inalámbrica) canalizando las comunicaciones a Internet del resto de terminales.

Los puntos principales a tomar en cuenta cuando se diseña una red Ad Hoc son consideraciones relacionadas a:

- *Control de la Topología*: las consultas que debemos hacernos son el método para buscar a los vecinos y sus posiciones, la creación de nuevos enlaces con el vecino o un grupo de vecinos, y el ahorro de potencia cuando no hay datos transmitiéndose a lo largo de la red.
- *Dificultad asociada a la transmisión de datos*: manejo de la potencia entre el origen y destino con la menor carga de tráfico posible y consumo de energía. Así estas redes se convierten en las más complicadas para proveer diferente QoS a los usuarios [19].

Las ventajas de este modo de operación son:

- Retraso bajo de las comunicaciones porque los terminales se comunican sin elemento intermedio de comunicación (AP) [19].
- No tienen un único punto de fallo, lo que les confiere buenas características desde el punto de vista de la tolerancia a fallos.
- El ancho de banda por tiempo es 2 veces más elevado que en el modo de operación con infraestructura.

Las desventajas son:

- El uso ineficiente de la potencia de la señal de transmisión ya que la señal no llega a todos los terminales en broadcast (ya que algunos de ellos no estarán a un salto de comunicación).

Las redes en malla, definidas en el estándar IEEE 802.11s [11], son multisalto (por definición), en las que los saltos de comunicación se producen entre los AP fijados a un lugar geográfico concreto. La potencia de la señal se aprovecha como en las BSS pero hay un coste adicional del encaminamiento de los datos entre AP. Normalmente cualquier AP tiene acceso a Internet vía inalámbrica.

Las características básicas del IEEE 802.11s son:

- Define un protocolo que soporta unicast y multicast por medio de métricas sobre topologías de autoconfiguración.
- Introduce tramas inalámbricas de reenvío y encaminamiento en el nivel MAC juntamente con niveles de seguridad para integrar una malla.
- Soporta autenticación sin preinscripción a la red por usuarios desconocidos sin ninguna comunicación anterior.

Actualmente las redes WiFi definen grandes áreas de coberturas. En esas redes, la acumulación de mensajes transmitidos con tramas de control conlleva a altas tasas de procesamiento y reenvío.

Una vez revisados los modos de operación de WiFi, ahora planteamos el problema de descubrir cuáles de esos modos es el más apropiado para desplegar una red de gran extensión geográfica capaz de cubrir parte de una ciudad como Guayaquil.

Para ello existen alternativas como las siguientes [19]:

- *Despliegue realizado por el usuario*: lo hace intentando obtener valores del Indicador de Fuerza de la Señal Recibida (*RSSI*, del inglés *Received Signal Strength Indicator*) que se lo puede medir en una localidad específica. Este método da como resultado redes WiFi con niveles pobres de cobertura y áreas de superposición entre celdas adyacentes con un riesgo muy alto de corte. En resumen cuando el usuario implementa una red WiFi, lo realiza por simple conveniencia de una posición disponible para instalar los AP, sin tener que realizar revisiones de la estructura o espacios de los sitios. Este método no es operativo para ciudades.
- *Despliegue en malla (grid)*: los AP se despliegan cada 20 m a 30 m dentro de edificios en lugares convenientes como corredores, y en largas áreas abiertas, donde el mayor tráfico es esperado [19]. Las instalaciones tipo rejilla para lugares al aire libre (*outdoor*), la demarcación de zonas tipo grid son más grandes y los AP se instalan en los postes de servicios públicos, en el techo de los edificios.

- *Usar técnicas de optimización matemática:* que tienen en cuenta temas como Interferencia entre celdas con diferentes AP, y se usan para el despliegue en ciudades. Además se debe optimizar el despliegue de las EBSS en la ciudad o bien las redes en Malla porque hace falta manejar logística con los municipios, empresas de servicios para la instalación de los AP; y especialmente con los proveedores de acceso a Internet para conectar los AP a Internet (*backbone*).

El manejo eficiente de las interferencias en las redes desplegadas para ciudades es clave: al no necesitar licencia de comunicación, no se pueden manejar sin tener en cuenta que cualquier persona puede irradiar WiFi en cualquier momento usando un AP, un teléfono móvil o incluso sensores. Por lo tanto se convierte en un desafío el análisis para la cobertura con lo cual deberíamos realizar mediciones junto con modelos algorítmicos. Este parámetro está enfrentado a la cobertura de la red: por ejemplo, en los centros comerciales existen una gran densidad de usuarios que causa un proceso agresivo de sombra y esto da como resultado, relativamente hablando, en un bajo promedio de rendimiento de ancho de banda por usuario. Para edificios con varios pisos es necesario utilizar técnicas de despliegue que incluyan técnicas de análisis de cobertura en 3 dimensiones [19]. Estos problemas no forman parte del análisis a realizar en esta tesis: entendemos que ese proceso ya lo ha hecho la empresa *Telconet*.

Otro problema importante es el de las comunicaciones en ráfagas que se producen en WiFi con una extensión de una ciudad o parte de ella [19]. Tampoco forma parte de nuestro trabajo solucionar este problema.

Por otro lado, tanto las interferencias como las comunicaciones a ráfagas podrían salir a la luz en el caso que detectemos, con nuestra metodología que existen problemas de comunicación.

Para la capacidad de la transmisión de datos del estándar IEEE 802.11, a medida que el usuario se aleja del AP, la velocidad de transmisión disminuye, por lo tanto para diseñar una cobertura se la realiza por círculos alrededor del AP al que pertenece dicha área con diferentes tasas de transmisiones de datos [19].

Así la probabilidad de que un usuario se encuentre en un área de cobertura determinada a una tasa de transmisión de datos requerida, está dada por la relación del área de la velocidad de datos específicos para el área de la cobertura total es:

$$P_n = \frac{A_i}{\pi D^2} \quad (2.1)$$

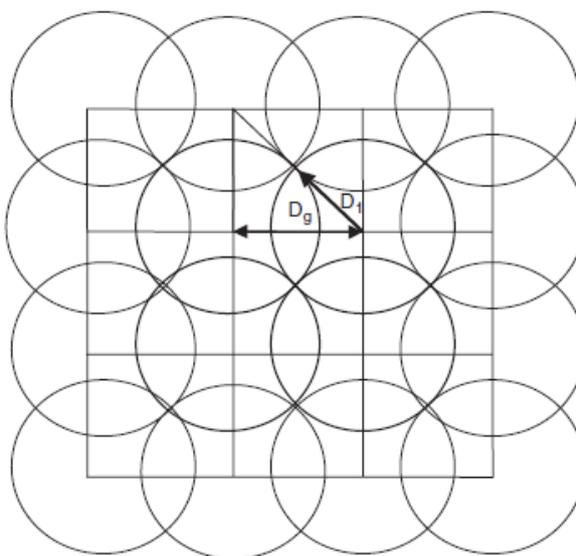
Para poder definir la capacidad para un sistema con múltiples tasas de transmisión de datos se debe definir lo que se conoce como capacidad espacial (viene del inglés, *spatial capacity*) que no es más que el promedio de tasas de datos observados por un usuario que se encuentra situado de manera aleatoria en el área de cobertura, cuya fórmula sería [19]:

$$R_{av} = \sum_{n=1}^N P_n R_n \quad (2.2)$$

Dónde  $R_{av}$  es la tasa promedio de datos espaciales,  $R_n$  una de las multi-tasas disponibles, y  $P_n$  la probabilidad de ocurrencia de esa tasa de datos, dónde para calcular dicha probabilidad se requiere de la relación entre la tasa de datos específicos para el área total de cobertura del AP.

Lo más idóneo para realizar un despliegue de red WiFi sobre una gran área es tener coberturas superpuestas de alcance, esto es, tener AP lo suficientemente cerca de tal manera que la experiencia del usuario tenga accesibilidad a altas velocidades de datos, como una instalación tipo rejilla. El tópico de las coberturas es importante porque justificamos en los próximos capítulos el problema de la falta de cobertura de la red de Telconet. Por lo tanto idealmente se requiere calcular una distancia mínima entre los diferentes puntos de acceso o AP, el cual sería el tamaño de la rejilla, de tal manera que podamos acomodar la máxima diversidad espacial ( $D_g$ ), la cual está dada por la ecuación (2.3) [19], donde  $D_1$  es la cobertura máxima de la tasa de datos, como se muestra en la Figura 2.1. Por consiguiente conforme la distancia entre punto de accesos aumenta más allá de  $D_g$ , las velocidades de datos empiezan a tener tasas más bajas. Por lo tanto el rendimiento espacial mínimo de una instalación tipo rejilla no podría ser menor que el rendimiento espacial de un único punto de acceso.

$$D_g = \sqrt{2} D_1 \quad (2.3)$$



**Figura 2.1: Despliegue de red con capacidad óptima [19].**

Recordamos que entendemos que la red de Telconet ya está diseñada y por lo tanto nosotros sólo estudiamos los problemas derivados del servicio de VoIP en dicha red.

### 2.3 VoIP sobre la última milla en WiFi

WiFi, no fue diseñado específicamente para la comunicación en tiempo real aunque con los años se han propuesto enmiendas al estándar IEEE 802.11 para mejorar la prestación en tiempo real.

La implantación del servicio de VoIP sobre WiFi debe optimizar la QoS, esto es, se debe optimizar los parámetros: retraso de paquetes, jitter y tasa de pérdida de paquetes. Así como observar la relación que existe con los distintos parámetros de las redes WiFi para grandes extensiones geográficas de una ciudad: interferencias, cobertura, handoff, ráfagas de tráfico y acceso a Internet en distintos puntos geográficos.

A continuación introducimos esta problemática y en el siguiente capítulo profundizamos en el problema:

- *Paquetes Perdidos por Handoff*: la QoS de VoIP se ve afectada cuando se supera el 1% de paquetes perdidos [1] y produce interrupciones, a pesar que el IEEE 802.11 tiene estrategias de retransmisiones

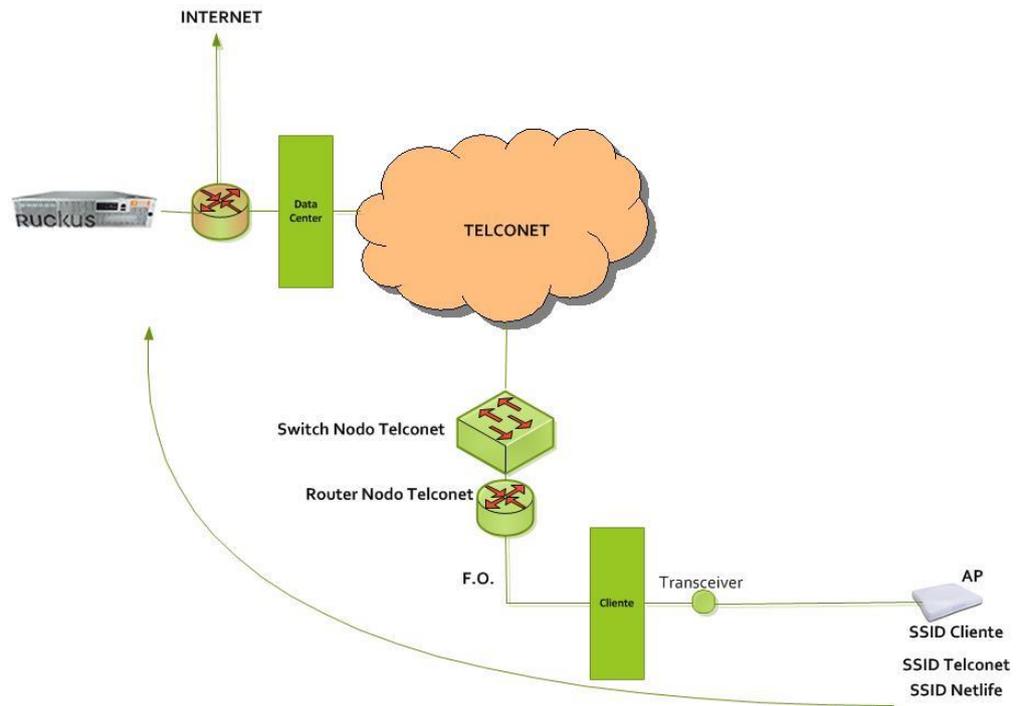
automáticas [17]. La red WiFi de Telconet no soporta movilidad. El proceso de Handoff por lo general se basa en los valores de RSSI [24].

- *Rendimiento* (viene del inglés, *Throughput*) y *Capacidad de la Red*: el establecimiento de un solo canal de comunicación de VoIP requiere en la práctica menos ancho de banda que el rendimiento nominal de capacidad requerida en el IEEE 802.11. Sin embargo la complejidad radica en el uso del mismo AP para mantener múltiples llamadas de VoIP simultáneamente.
- *Interferencias*: en una red tipo malla como lo es la de Telconet una de las principales desventajas que tiene es la proliferación de los puntos de acceso consecutivos pudiendo producir interferencia cuando no exista canales dentro del espectro al cual se deba conmutar, perjudicando a la VoIP.

#### **2.4 Uso y Aplicaciones de redes WIFI como plataforma de servicio para VoIP**

Actualmente las redes WiFi tienden a crecer en uso de llamadas con VoIP por ser IP nativo en redes WiFi, permitiendo una experiencia diferente al suscriptor. Los usuarios ejecutan sus requerimientos hacia los AP de manera asimétrica. Sin embargo, no existe manera anticipada de que el usuario pueda conocer a cual AP pueda ejecutar una excelente llamada con VoIP. Las capacidades de las redes modernas WiFi permiten hacer un rápido traspaso o handoff entre los usuarios que hacen el uso de la plataforma para hacer llamadas VoIP entre los AP cuando se mantiene en cache la MAC de dispositivos que manejen multiestación de acuerdo al IEEE 802.11ac. Los usuarios de *Telconet* generalmente usan la red WiFi para navegar y hacer llamadas de VoIP ante el alto costo comercial de 3G y 4G. Una solución típica lo podemos ver en la Figura 2.2.

Como un valor agregado, los proveedores de servicio celular pueden implementar redes WiFi para brindar servicios de llamadas mediante VoIP ante los altos costos de aprovisionamiento de 4G.



**Figura 2.2: Bosquejo general conexión usuario Telconet.**

## CAPÍTULO 3

### 3. LA PROBLEMÁTICA DE CALIDAD DE SERVICIO QoS Y CALIDAD DE EXPERIENCIA QoE EN REDES WIFI

Actualmente se ha realizado esfuerzos en la QoS que se brindan a los usuarios, mediante correlaciones entre la QoS y la QoE objetiva y subjetivamente con métricas para entregar vídeo y VoIP en redes WiFi.

Analizamos la problemática para implementar una adecuada QoS y verificación de las variables con series de tiempo de los datos tomados de la red de Telconet.

#### 3.1 Calidad de Servicio –QoS- de VoIP en WiFi y su problemática

A medida que pueda aumentar el rendimiento de la red WiFi con múltiples usuarios realizando VoIP y ejecutando videos en línea, se hace indispensable equilibrar y sostener en un rango tolerable de las fluctuaciones o jitter, las latencias y las pérdidas para ciertos flujos de tráfico seleccionados. Normalmente las redes WiFi son implementadas sobre redes IP, del tipo mejor esfuerzo (del inglés, *best-effort*) y por lo tanto no soportan QoS. Sin embargo la VoIP necesita que se garantice el jitter, latencias y pérdidas, con técnicas de priorización de tráfico.

La QoS de las redes WiFi se enfoca en dar prioridades al tráfico del usuario final desde el punto de vista de la bajada de los paquetes. Por lo tanto para entregar VoIP sobre una red WiFi tipo malla como la red de Telconet y con QoS, se debe tener control sobre la congestión y reducir las pérdidas de las tramas IP sobre el paquete de VoIP entregado. Para lo cual en los siguientes apartados, analizamos y recopilamos durante 9 meses (desde enero a septiembre de 2016) información de los parámetros y componentes de la QoS que afectan a la VoIP dentro de la red WiFi de Telconet.

##### 3.1.1 Versiones de WiFi: IEEE 802.11e y su implantación práctica

El IEEE 802.11e es un tipo de estándar que puntualiza los mecanismos usados para poder brindar una mejorada QoS en una WLAN para

aplicaciones en tiempo real como VoIP y video. No obstante, este estándar ha sido redefinido en los nuevos estándares IEEE 802.11 n y IEEE 802.11 ac en los cuales ya vienen integrado con QoS. Así el IEEE 802.11ac es una especificación que puede llegar a tener un rendimiento multiestación de 1Gbps. Con MIMO multiusuario de hasta 4 clientes y modulaciones de hasta 256 QAM [25].

Los mecanismos de mejora se realizan por medio de variaciones al nivel de Control de Acceso al medio o MAC [26] (viene del inglés, *Media Access Control*).

Las dos funciones de MAC son:

- *Función de Coordinación Distribuida* o *DCF* (viene del inglés, *Distributed Coordination Function*): usa un procedimiento de acceso que es constituido por el *Acceso Múltiple por Detección de Portadora con prevención de colisiones* o *CSMA/CA* (viene del inglés, *Carrier Sense Multiple Access with Collisions Avoidance*), la función principal de la *DCF* es compartir el medio entre estaciones.
- *Función de Coordinación de Punto* o *PCF* (viene del inglés, *Point Coordination Function*): uso alternativo y requiere de un punto central que lo administre para un proceso continuo de control y revisión denominado Punto de Coordinación o PC (viene del inglés *Point Coordination*), siendo el AP dicho punto de coordinación en modo de infraestructura o malla.

La DCF y la PCF tienen limitaciones en el momento de que muchas estaciones pretenden transmitir en el mismo tiempo, ocurren colisiones que bajan el rendimiento y causa congestión. No brinda garantía de QoS ni prioridad de tráfico.

La manera en que las redes WLAN soportan QoS, en el IEEE 802.11e [4] es por medio de una función adicional de coordinación:

- *Función de Coordinación Híbrida* o *HCF* (viene del inglés *Hybrid Coordination Function*): dispone de dos procesos de acceso al canal: *Acceso de Canal Controlado HCF* o *HCCA* (viene del inglés, *HCF Controlled Channel Access*), y *Acceso Mejorado a Canales Distribuidos* o *EDCA* (viene del inglés, *Enhanced Distributed Channel Access*), juntas especifican categorías de tráfico, tales como *Categorías de Acceso* o *AC* (viene del inglés, *Access Categories*) y *Flujos de Tráfico* o *TS* (viene del inglés, *Traffic Stream*).

De esta manera el funcionamiento del nivel HCF es el siguiente:

- Cierta tipo de aplicaciones como http se le asigna prioridad baja y a la VoIP una clase de prioridad alta. Así el paquete es etiquetado cuando llega desde los niveles superiores al nivel de MAC, mediante un *Identificador de Prioridad de Tráfico* o *TID* (viene del inglés, *Traffic Identifier*). El paquete es etiquetado con los valores del TID de 0 a 7 usa el proceso del *EDCA* para acceder al canal y con tipos de categoría de acceso o *AC*. Usa el método *HCCA* para acceder al medio, cuando toma valores de 8 a 15, manteniendo el paquete almacenado en la cola del *TS* que pertenece a un *TID*.
- El *EDCA*, añade un parámetro denominado *Oportunidad de Transmisión* o *TXOP* (viene del inglés, *Transmission Opportunity*), y hace que una estación esté autorizada para enviar paquetes. Limitando el tiempo en que una estación pueda transmitir sin que otra estación use el canal.

El *EDCA* usa dos procesos:

- Proceso de tiempo de espera llamado *Espacio por Arbitraje Inter Tramas* o *AIFS* (viene del inglés, *Arbitration InterFrame Space*), el cual es usado para distinguir las diferentes *AC*.

- Proceso de *Ventanas de Contención* o CW (viene del inglés, *Contention Window*) por cada AC, existe un CW mínimo y máximo. Una ventana más grande para categorías con tráfico pesado.

Posiblemente para CW máximos haya descarte de paquetes por lo que no se recomienda su uso [27].

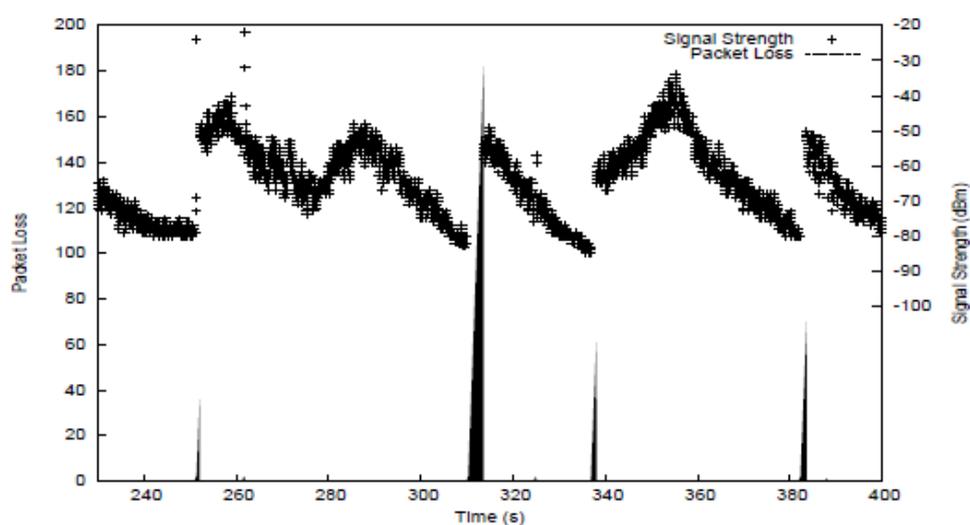
Para el análisis la red de *Telconet* tipo malla, cuenta con soporte hasta el IEEE 802.11n (el cual es el más apropiado para soluciones al aire libre), cuya problemática es explicada en los siguientes apartados. Siendo las más importantes el rendimiento, las interferencias y por ende la relación señal/ruido, debido al número de usuarios por el tráfico total que cursan sobre la red WiFi de *Telconet* de alrededor 3,000 AP.

### 3.1.2 Descripción de Problemas Actuales

Los principales problemas que experimenta la VoIP en redes WiFi son:

- *Periodos de Handoff prolongados*: los trasposos ocurren cuando el servicio de comunicación se traslada de un AP a otro, porque la potencia de la señal recibida está con una calidad por debajo de los umbrales. Dentro de la red WiFi tipo malla de *Telconet* existen varias centenas de APs que están disputándose por establecer una conexión hacia los dispositivos. En la práctica el trasposo no es tan suave. La Figura 3.1, nos muestra el funcionamiento del tráfico tanto con paquetes perdidos como con retraso y como la intensidad de la señal durante el desplazamiento empieza a decaer. Cuando sucede el brinco el retraso y los paquetes perdidos aumentan. La razón es que a medida que nos movemos existe un brinco y lo que la red WiFi realiza en ese momento es el proceso de adopción del usuario a un nuevo AP. En base al proceso de handoff [28] se ha corroborado 2 parámetros claves: el Tiempo de duración del handoff depende del ambiente. Y que cada Handoff toma más de 1 segundo. Esto no es aceptable para la VoIP. El handoff puede durar entre 1 segundo a 2 segundos. El proceso de adopción está compuesto de 4 subprocesos: escaneo,

autenticación, asociación y re-asignación y de todos estos el que toma más tiempo en la adopción llegando a ser hasta un 90% en la etapa de escaneo [29] el cual influye en el handoff. De acuerdo a la información obtenida de la red de Telconet existen en promedio entre los meses de enero a septiembre un flujo de usuarios entre 900 y 1,400. Así se eleva la problemática actual en los procesos de handoff por mucho que dispongamos del IEEE 802.11n que ya tiene niveles de MAC para la QoS.



**Figura 3.1:** Típica gráfica de handoff en VoIP [29].

- *Interferencia y la capacidad de la red:* las redes WiFi sufren interferencias porque operan en la frecuencia de 2,4GHz coincidiendo con otros dispositivos tales como equipos de radio, dispositivos con Bluetooth, teléfonos inalámbricos, produciendo efectos de retraso y paquetes perdidos. Por esta razón el IEEE 802.11 ha ido evolucionando para que opere en frecuencias de 5GHz. Pero no solo esto afecta a la intensidad de la señal con interferencias sino también las condiciones climáticas e incluso el efecto de multi trayectoria y la disposición de la antena [30]. El efecto de interferencia se manifiesta en la red tipo malla de Telconet debido a la gran cantidad de usuarios conectándose al

mismo tiempo. Así los niveles promedios de la relación señal/ruido para la red de Telconet en la ciudad de Guayaquil alcanza un mínimo de 17.81dB y un máximo de 21.06dB entre los meses de enero y septiembre.

- *Picos de ráfagas de tráfico* (viene del inglés, *Burst Traffic*): se ha corroborado que los paquetes de VoIP en llamadas múltiples son bloqueados entre 200 a 300 ms para ser después entregados al dispositivo receptor al mismo tiempo como una ráfaga de tráfico y con paquetes perdidos [31], debido al tamaño del buffer del dispositivo en sus interfaces. Afectando la VoIP por ser una aplicación en tiempo real y sensible a cualquier fallo en la red WiFi. En la red tipo malla de Telconet el tráfico total promedio de los usuarios dentro del período de análisis de 6 meses (enero-junio de 2016) es de más de 145Mbytes, aumentando la problemática con respecto a los retrasos y paquetes encolados.

### 3.1.3 Equipos WiFi para VoIP: Teléfonos Inteligentes

Los teléfonos inteligentes (viene del inglés, smartphones), equipados con interfaz inalámbrica para WiFi, están siendo usados por usuarios empresariales para soluciones con VoIP. La descarga del tráfico de voz de las redes celulares por medio de redes WiFi, ha surgido como forma efectiva para reducir la carga de tráfico tolerante a retrasos en las redes móviles.

Las principales características de los teléfonos inteligentes y como se integran con los avances en la QoS:

- Puntos de acceso sincronizados en el tiempo (AP) pueden proporcionar una mejor QoS, a través de la utilización del *Real-Time Transport Control Protocol (RTCP)* para calcular con más exactitud los retrasos. Esto se logra para sesiones múltiples de VoIP, a partir de valores de retraso que se calculan usando *RTCP* [32].

- Con la banda ISM de 2,4GHz (*WiFi*) y el uso de 3 canales no superpuestos permite soportar llamadas simultáneas de VoIP, minimizando las interferencias. Sin embargo existen estudios que prueban la asignación de 4 canales adicionales con una ligera degradación tolerable en la QoS para la VoIP y permitiendo una ligera movilidad al usuario [33].
- *Antenas adaptativas*: para mantener el nivel de modulación y garantizar la tasa de transferencia de datos, reduciendo la fluctuación de la señal, paquetes perdidos y retransmisiones de tramas. Incrementando el rendimiento y mejorando la QoS.

La red de Telconet acepta todo tipo de teléfonos inteligentes. En el período de 6 meses el 90% de los dispositivos conectados a la red de Telconet son teléfonos inteligentes, de los cuales el tráfico total por usuarios y tomando en cuenta los principales fabricantes tenemos niveles de 20,393 Gbytes. Los teléfonos inteligentes de la marca Samsung tienen el 65% del tráfico, y representan el 55% de teléfonos inteligentes en la red de Telconet. Adicionalmente, cerca del 17% del tráfico total lo tienen Apple, Nokia, Huawei y Motorola.

#### **3.1.4 Comparación de la QoS de WiFi vs redes celulares de la VoIP**

Establecemos las diferencias de QoS entre ambas:

- La red celular utiliza espectro radioeléctrico licenciado mientras que la red WiFi usa y comparte una banda no licenciado, por lo que la red celular no debe de sufrir de interferencias provocadas por terceros.
- Las redes celulares fueron diseñadas exclusivamente para soportar tráfico de voz y no VoIP, mientras que las redes WiFi funcionan sobre Protocolos IP, habiendo mejoras en los trasposos cuyas MAC deben estar declaradas previamente sobre la red WiFi.

- En redes WiFi con QoS, debe estar implementado la HCF, basada en el acceso de canal por contención o EDCA que ya está añadido a los últimos estándares del IEEE 802.11n y IEEE 802.11ac.

Parámetros de la QoS que debemos tomar en cuenta para ambas redes:

- El rendimiento promedio dentro de Telconet es un parámetro importante para mantener la QoS, y entender la problemática del sistema. Así durante el período de evaluación de enero a junio de 2016, el rendimiento promedio por usuario mensual oscila entre 7,90Mbps a 8,76Mbps, siendo su pico más alto en el mes de abril, donde existe el segundo valor más alto de la relación mensual promedio de la señal/ruido cuyo valor es de 20,4dB y hay un decremento de los usuarios con respecto al mes anterior, cuyo valor porcentual de decrecimiento es de alrededor del 11%. Por lo tanto podemos indicar que las interferencias disminuyeron y por ende el rendimiento subió.
- Plan de flujo de tráfico: para la red de Telconet el flujo de tráfico promedio mensual en el período de análisis y por usuario es de menos de 5 MB, donde el tráfico total durante el mismo período y por los usuarios es de 258MB.
- Tasas de congestión (especialmente red tipo malla) y retrasos: a nivel de transporte de red deben soportar Puntos de Código de Servicio Diferenciados (viene del inglés, *Differentiated Services Code point (DSCP)*) [34].

Ambas redes tiene sus parámetros de manejo de la QoS, sin embargo la QoS de la red celular tiene mejores prestaciones para la telefonía nativa; mientras que la red WiFi en temas de VoIP tiene limitaciones en trasposos y coberturas.

### 3.1.5 Problemática de la QoS en WiFi de la VoIP

Existen elementos diferenciadores [5] para la arquitectura de red con QoS y que representan el principal problema para la red tipo malla de Telconet. Así los más importantes son:

- El equilibrio de la carga de tráfico por medio de la monitorización en cada AP teniendo que adaptarse métodos de encaminamientos *Optimized Link State Routing (OLSR)* para evitar AP con carga de tráfico elevados en las rutas, mejorando significativamente el rendimiento hasta un 3,5Mbps y 50ms en tiempos de retraso; siempre que las cargas de tráfico en la red eran un tercio de la velocidad de transmisión en WiFi y entre AP IEEE 802.11g [35].
- Problemas en las retransmisiones de datos en VoIP de varios saltos en redes IEEE 802.11s, causando retrasos de procesamiento en el desempeño de la VoIP [36].
- La QoS es afectada por la cantidad de retrasos de cola que se ha acumulado por medio de varios saltos dentro de la red WiFi debido a que al continuo encolamiento de paquetes de VoIP por salto [37].
- En la red de Telconet durante el período de evaluación, analizamos los parámetros tales como: el número de usuarios con su incremento o decremento, la duración de la sesiones promedio mensual por usuario, rendimiento promedio mensual por usuario, tráfico total mensual, tráfico promedio mensual por usuario, y el nivel de la relación señal ruido, que depende de las interferencias. Dentro del sistema de reportes de la red de Telconet no se puede extraer las interferencias que sufren los AP, por lo tanto lo inferimos con el parámetro de la relación señal ruido.

### 3.2 Calidad de Experiencia –QoE- y su problemática en redes WiFi

La calidad es un requisito primordial para brindar un servicio de VoIP y de video coherente con disponibilidad para que los usuarios adquieran los servicios. La QoE es la opinión que tienen los clientes de que tan bueno es el servicio que

está recibiendo de su Proveedor de Servicios. Es decir de cuan bueno es el trabajo de este proveedor. Así los proveedores de servicios deben estar evaluando constantemente a sus clientes la QoE para tomar acciones correctivas.

En el caso de la red de Telconet aún no se define un parámetro significativo para medir la QoE sin embargo uno de los objetivos de la tesis es realizar las respectivas recomendaciones basadas en la red tipo malla de Telconet.

### 3.2.1 KPI y KQI para la definición de QoE en redes WiFi

Con la QoE se cuantifica mejoras en la calidad y controlando la calidad se puede anticipar cuando existe un problema previo a la queja de un cliente en una red WiFi. Existen varias propuestas para medir el *Indicador de Desempeño* o *Key Performance Indicator (KPI)* de la QoE. Sin embargo los criterios objetivos y subjetivos están involucrados en la QoE, el inconveniente es que no se pueden correlacionar adecuadamente los KPI objetivos con la apreciación humana, porque la percepción humana está influenciada por el rendimiento de la red, el cual es un parámetro definido en la QoS. Una propuesta aceptada de KPI es basada en los siguientes factores [6]:

- *La calidad del equipo*: cuyos parámetros de medición son la codificación y decodificación desde y hacia la red WiFi. Controlan la pérdida de calidad y están relacionados con la tasa de bits, y la relación Señal Ruido. Este último parámetro dentro de Telconet varía en promedio mensual desde 17 a 21 dB ya que dependen de las posibles interferencias que sufren por uso de la banda ISM dentro de la ciudad de Guayaquil.
- *La calidad del transporte*: con parámetros de medición de la forma de entrega de los paquetes en la red WiFi. Es un compendio del flujo de tráfico y la forma de transmisión de los paquetes en la red WiFi, tal como la Tasa de Paquetes Perdidos, el retraso, las fluctuaciones, el ancho de banda y el rendimiento. Al final de nuestro estudio de la Dinámica de Sistemas relacionamos el

rendimiento promedio por usuario mensual con la QoS promedio mensual inferida como una función del rendimiento entre los valores de 0 a 20Mbps vs la QoS entre 0 y 1.

- *Factores ambientales*: mide el entorno donde está instalado la red WiFi. Para el caso del estudio es la red de Telconet en la ciudad de Guayaquil. Nos limita el nivel de interferencias y por ende los valores de la relación señal/ruido.
- *Factores humanos*: establece el desempeño de la red WiFi usando métricas bajo el punto de vista del usuario final, donde se debe prestar atención a factores sociales y económicos. El principal parámetro es la *Puntuación de Opinión Media* (viene del inglés, *Mean Opinion Score (MOS)*), la cual ha sido propuesta por la ITU [38]. Usado para tráfico multimedia que determina la calidad percibida de la voz, siendo una medición cualitativa.

La QoE en redes WiFi se mide por unidad de tiempo. Mientras que el *Indicador de Calidad* o *Key Quality Indicator (KQI)* son parámetros de calidad, tales como: jitter, latencias, retrasos, rendimiento que ayudan a complementar a la QoE, descritos anteriormente. En especial el rendimiento bajo nuestro punto de vista, juega un rol importante en la experiencia del usuario basado en los números obtenidos del análisis a la red de Telconet. Los usuarios buscan a aquel proveedor de servicio con el mayor rendimiento posible para una red WiFi. Así, por éste último parámetro que en el modo referencial de la Dinámica de Sistemas para la QoS la hacemos depender de dicho rendimiento promedio mensual por usuario para aquellos valores de QoS entre 0 y 1 con respecto al rendimiento cuya relación no es lineal, característica nativa de los Sistemas Dinámicos.

### 3.2.2 Metodología de Evaluación y las métricas de QoE en las redes WiFi

Las principales métricas de la QoE son:

- El MOS [38] se categoriza cuando los usuarios escuchan una llamada telefónica con VoIP dentro de un rango de 1 a 5, siendo 1

la más baja y 5 la más alta. El valor mínimo con calidad aceptable es de 3,5 [6]. La percepción del usuario es subjetiva porque si una llamada dura unos 5 minutos y justo en el último minuto la calidad de la llamada es muy pobre, entonces para el usuario el QoE también sería pobre. Por lo tanto la QoE es dinámica y con factores situacionales. Así, la creación de pruebas subjetivas como el MOS es complicada por los altos costos y el tiempo consumido. Siendo indispensable la evaluación de métricas objetivas [39] que son medidas por los equipos de la red con técnicas de gestión de tráfico.

- El Índice de *Entrega de Medios* o *Media Delivery Index (MDI)* [40] y supervisa servicios de forma pasiva o activa de los flujos de VoIP en WiFi, tomando medidas de las fluctuaciones acumuladas en la VoIP y las pérdidas del medio. MDI es un factor que mide retrasos y de pérdida del paquete. Calculando la cantidad de tiempo que el flujo de datos necesita almacenarse en memoria, restando las diferencias de las velocidades de entrega vs la velocidad de decodificación.

La Metodología de pruebas que ejecutamos y que son analizados en los siguientes apartados son:

- Basamos nuestro análisis en la teoría de Dinámica de Sistemas por lo tanto el objetivo es obtener valores históricos de la red de Telconet para definir los límites del problema y crear el modo referencial, fundamentado con los parámetros que afectan la QoS de la red de Telconet, extraídos por medio de su plataforma de control de tráfico.
- Las variables dinámicas examinadas son formuladas mediante series de tiempo que tienen una tendencia de crecimiento y colapso, según el comportamiento del modelo realizado en los siguientes apartados.

- El período analizado es 9 meses, desde enero 2016 a septiembre 2016 con la plataforma de SmartCell Gateway 200 [41] sobre las experiencias de los usuarios al conectarse. Podemos ver en tiempo real el rendimiento, el flujo de tráfico total y promedio por usuario, la duración de la sesión, los usuarios existentes y los nuevos, la relación señal ruido, parámetros fundamentales que arman el modo referencial y la hipótesis dinámica.
- Verificación de tramas de paquetes en la oficina de Telconet con un analizador de tráfico como lo es Wireshark visualizando el comportamiento de los protocolos usados en VoIP cuando el dispositivo se aleja del punto de acceso para validar [30] [31].
- Los parámetros que hemos tomado de la red son los necesarios para armar el modelo final porque están basados en lo descrito en el presente trabajo y fundamentando mediante los trabajos científicos referenciados para la QoS [35] [36] [37] y la descripción de posibles estrategias tecnológicas.

### **3.2.3 Descripción de la QoE para redes WiFi de VoIP**

Para describir la QoE debemos conocer el tiempo de las fluctuaciones y las pérdidas de paquetes sobre cada uno de los componentes de la red WiFi, midiendo el rendimiento en ese punto en la red de Telconet, para lo cual se analiza el rendimiento entre el usuario y el AP de la red WiFi de Telconet llegando a tener hasta 300Mbps reales con el IEEE 802.11n. Por lo tanto describimos la optimización de la QoE:

- Optimización de protocolos: que nos permitan mejorar el encaminamiento en redes tipo malla, cuya principal variable es el flujo de tráfico en cada AP.
- Traspasos Inadecuados: producto de las variables en tiempo real que maneja VoIP. Necesidad en disminuir el proceso de adopción de nuevos usuarios llevando a otros problemas como el de seguridad [42].

- Flujo de tráfico: podemos determinar si los flujos están pasando correctamente sobre la red y localizar un problema siempre y cuando exista un error en la QoE [40].

### 3.2.4 Los problemas que afronta la QoE en redes WiFi

Los principales problemas que afronta la QoE tanto en VoIP y video por una red WiFi son:

- Se debe proteger las tramas más importantes ante posibles pérdidas de paquetes [43], de tal manera que al momento de presentarse congestión (dentro de los AP que conforman la malla), se permite que los paquetes con varias prioridades sean dados de baja o descartados.
- La interferencia en la ISM, aún persiste y limita el uso de llamadas múltiples de VoIP, a pesar de esfuerzos por mejorar la experiencia del usuario [33]. Para el caso de estudio en la red de Telconet hemos tomado en cuenta el parámetro de la relación señal ruido, donde en el mes de marzo tenemos 21,06dB con la segunda mejora tasa de rendimiento promedio por usuario de todo el estudio en 8,69Mbps.
- En VoIP los paquetes recibidos tienen un mínimo de retraso, debiendo mantener el mismo espaciamiento entre los paquetes consecutivos y sin ninguna pérdida. Sin embargo como la red WiFi usa de transporte una red basada en IP, este es una de las mayores variables que se deben manejar.

Actualmente podemos monitorear el flujo de tráfico que puede manejar cada AP dentro de la red de Telconet cuyo valor acumulado promedio es de 258 MB para mantener la QoE y así predecir con la información de control, para evitar problemas con la QoE.

### **3.3 Análisis de Series de Tiempo de variables relacionadas a QoS y QoE de la red de Telconet**

Basado en la red tipo malla de Telconet, se ha tomado valores históricos de las principales variables que afectan la QoS y QoE usando la herramienta SmartCell Gateway 200 que maneja el control de supervisión de los diferentes AP en la ciudad de Guayaquil para un cliente importante, tanto en la calle, oficina y hogar. Los valores históricos han sido tomados durante 9 meses desde enero a septiembre de 2016, primero han sido evaluados los promedios diarios por al final extraer los promedios mensuales de cada variable que afecta la QoS. Realizamos con estos valores las series de tiempo y visualizamos las tendencias para crear el modelo referencial que es base para comprobar la hipótesis dinámica en la elaboración del modelo final y mostrar sus relaciones y estrategias tecnológicas. Las variables que se han tomado son:

- Número de usuarios promedio por día y mensual.
- Nuevos usuarios con respecto al mes anterior.
- Duración de servicio promedio diario y mensual por usuario.
- Rendimiento promedio diario y semanal por usuario.
- Tráfico promedio diario y mensual por usuario.
- Tráfico total de la red.
- Relación señal-ruido promedio diario y mensual por usuario.
- Para finalmente inducir la QoS en función del rendimiento.

Las series de tiempo se las ha realizado por el método de las medias móviles [44].

#### **3.3.1 Pruebas de datos oficina-hogar**

Se realizó una medición en la oficina para visualizar los protocolos mediante WireShark como lo muestra la Figura 3.2 que se usan durante una llamada de VoIP mediante una red WiFi entre un AP y el usuario. La red WiFi soporta el IEEE 802.11g (que no posee QoS) con un rendimiento

máximo de 10 Mbps a una distancia de 1m del AP y un rendimiento de 1.7Mbps a una distancia de 10 m. Una de las limitantes es la interferencia producidas por otros AP dentro del área de la oficina. La llamada VoIP se mantuvo a pesar del movimiento. La percepción del usuario fue que a veces cuando nos alejábamos se escuchaba un poco distorsionada la voz. Mientras tanto el video nunca se cortó.

No.	Time	Source	Destination	Protocol	Length	Info
1	0.000000	10.242.0.91	172.24.4.135	TCP	66	57846+13111 [SYN] Seq=0 Win=8192 Len=0 MSS=1460 WS=4 SACK_PERM=1
2	0.043476	10.242.0.91	200.93.192.148	DNS	77	Standard query 0x54cc A ocsip.verisign.com
3	0.054062	200.93.192.148	10.242.0.91	DNS	179	Standard query response 0x54cc A ocsip.verisign.com CNAME ocsip-ds.ws.symantec.com.edgekey.net CNAME e8218.ds...
4	0.056286	10.242.0.91	23.4.43.27	TCP	66	57848+00 [SYN] Seq=0 Win=8192 Len=0 MSS=1460 WS=4 SACK_PERM=1
5	0.152636	23.4.43.27	10.242.0.91	TCP	66	80+57848 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=29200 Len=0 MSS=1432 SACK_PERM=1 WS=32
6	0.152743	10.242.0.91	23.4.43.27	TCP	54	57848+00 [ACK] Seq=1 Ack=1 Win=17184 Len=0
7	0.153998	10.242.0.91	23.4.43.27	HTTP	209	GET /MFewTzBNWesw5TA3BglrDg/KCgUABBRITzR309XkZ8hEzq0eQg8PymQUUQUANhaTCXBILuLle9tuvPMXyDNECEGHSJuyLh...
8	0.236180	23.4.43.27	10.242.0.91	TCP	60	80+57848 [ACK] Seq=1 Ack=236 Win=30272 Len=0
9	0.237311	23.4.43.27	10.242.0.91	TCP	1486	[TCP segment of a reassembled PDU]
10	0.237786	23.4.43.27	10.242.0.91	OCSP	432	Response
11	0.237764	10.242.0.91	23.4.43.27	TCP	54	57848+00 [ACK] Seq=236 Ack=1611 Win=17184 Len=0
12	0.254161	10.242.0.91	23.4.43.27	HTTP	207	GET /MFewTzBNWesw5TA3BglrDg/KCgUABBRITzR309XkZ8hEzq0eQg8PymQUUQUANhaTCXBILuLle9tuvPMXyDNECEGHSJuyLh...
13	0.338061	23.4.43.27	10.242.0.91	TCP	1486	[TCP segment of a reassembled PDU]
14	0.338291	23.4.43.27	10.242.0.91	TCP	518	[TCP segment of a reassembled PDU]
15	0.338366	10.242.0.91	23.4.43.27	TCP	54	57848+00 [ACK] Seq=469 Ack=3707 Win=17184 Len=0
16	0.338469	23.4.43.27	10.242.0.91	OCSP	178	Response
17	0.548096	10.242.0.91	23.4.43.27	TCP	54	57848+00 [ACK] Seq=469 Ack=3831 Win=17060 Len=0
18	1.117865	10.242.0.91	200.93.192.148	DNS	84	Standard query 0xfcd25 PTR 91.0.242.10.in-addr.arpa
19	1.118157	10.242.0.91	200.93.192.148	DNS	85	Standard query 0x43f8 PTR 135.4.24.172.in-addr.arpa
20	1.118394	10.242.0.91	200.93.192.148	DNS	87	Standard query 0xe8ec PTR 148.192.93.200.in-addr.arpa
21	1.120788	200.93.192.148	10.242.0.91	DNS	143	Standard query response 0x43f8 No such name PTR 135.4.24.172.in-addr.arpa SOA ns1.telconet.net
22	1.121245	200.93.192.148	10.242.0.91	DNS	118	Standard query response 0xe8ec PTR 148.192.93.200.in-addr.arpa PTR srv1.telconet.net
23	1.243970	200.93.192.148	10.242.0.91	DNS	161	Standard query response 0xfcd25 No such name PTR 91.0.242.10.in-addr.arpa SOA prisoner.iana.org
24	1.663988	10.242.0.91	239.255.255.250	SSDP	139	M-SEARCH * HTTP/1.1

> Frame 1: 66 bytes on wire (528 bits), 66 bytes captured (528 bits) on interface 0  
 > Ethernet II, Src: LiteonTe\_6e:bf:ec (48:d2:24:6e:bf:ec), Dst: HewlettP\_76:95:96 (d0:7e:28:76:95:96)  
 > Internet Protocol Version 4, Src: 10.242.0.91, Dst: 172.24.4.135  
 > Transmission Control Protocol, Src Port: 57846, Dst Port: 13111, Seq: 0, Len: 0

```

0000 d0 7e 28 76 95 96 48 d2 24 6e bf ec 00 00 45 00 .*(v..H.$n....E.
0010 00 34 02 ea 40 00 00 06 3b ee 0a f2 00 5b ac 18 .4..B...;.....[.

```

**Figura 3.2: Captura de wireshark durante prueba oficina.**

La medición en el hogar se usó la red local WiFi de un solo AP que soporta el IEEE 802.11b. Con un rendimiento de 5 Mbps a 1 m del AP y de 1.1Mbps a 10 m. La percepción del usuario es que la llamada se escuchó bien, ya que no había más redes WiFi cerca del hogar a diferencia de la oficina.

### 3.3.2 Pruebas de campo en Guayaquil

Para esto se realizó el estudio de la red de Telconet en las diferentes zonas donde existe la infraestructura de la red WiFi implementada con el IEEE 802.11n. Las características principales de la red son:

- Modelos de la serie 7762 banda dual 802.11n maneja inteligencia WiFi para aplicaciones al aire libre.

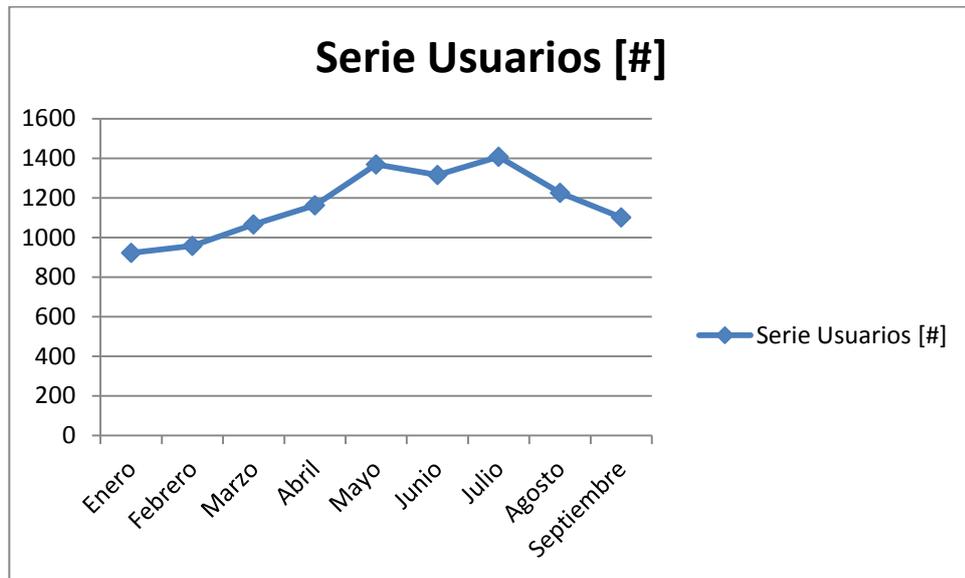
- Soporta IEEE 802.11 a/b/g/n opera en 2.4 GHz y 5 GHz.
- Tasa de datos soportada 802.11n: 6,5 Mbps-130 Mbps (20 MHz) y 6,5 Mbps-300 Mbps (40 MHz).
- Cadenas de radio: 3x3:2 y BSSID: de hasta 8 por radio (16 totales).
- Banda de frecuencia: IEEE 802.11n: 2.4 - 2.484 GHz y 5.15 – 5.85 GHz.
- Capacidad de estaciones concurrentes: 256.
- Clientes simultáneos VoIP: hasta 20.
- Antena adaptativa: conjunto interno de antenas de banda dual configurables por software con elementos de alta ganancia tanto direccional y omnidireccional, que proporcionan 4,000 patrones únicos de antena.
- Ganancia antena: 3 dBi (2.4 GHz) y 3 dBi interna y hasta 5 dBi externa (5 GHz).
- Potencia de Salida RF: 28 dBm (2.4 GHz) y 26 dBm (5 GHz).
- Mitigación de Interferencia: hasta 15 dB.
- Sensibilidad mínima de recepción: hasta -95 dBm.
- Puertos Ethernet: 2 puertos auto MDX y auto detección. 1000 Mbps y 100 Mbps.
- Sistemas de gestión: Zone Director 5000, Smart Zone Scg, Smart Cell Gateway 200. Permite automatizar y clasificar la priorización de paquetes por tráfico sensible a los retrasos con QoS avanzado. Manejo de redes malla y balanceo de cargas.
- Topología: malla con conectividad de Backbone 1000 Mbps.

Los valores fueron tomados desde la Controladora de Gestión de Tráfico de la red de Telconet. Se adquirieron 63 archivos con información en cada

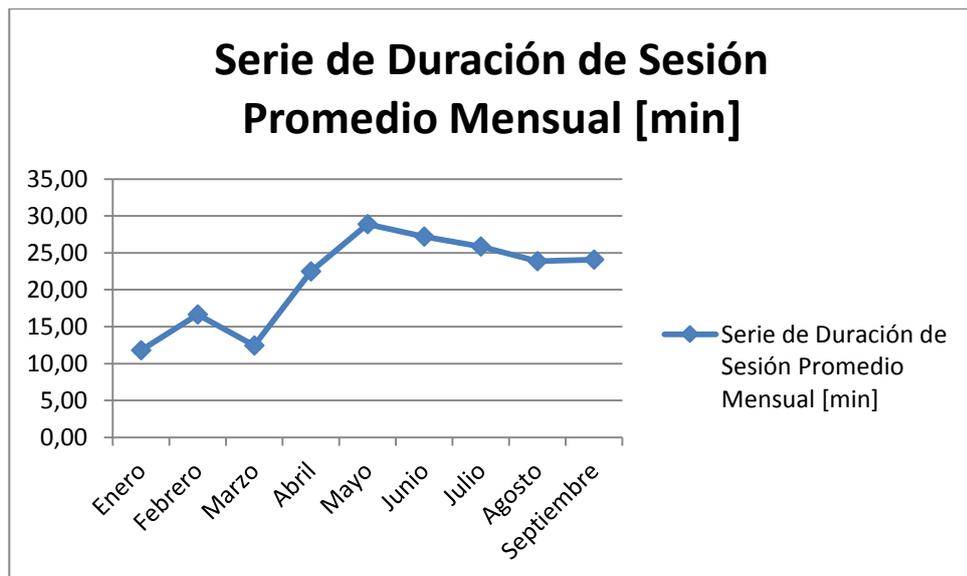
uno de hasta más de 60,000 campos. Y todas las variables mencionadas al inicio del apartado. Procedimos a obtener el promedio o media por cada día y por usuarios, medido durante los 9 meses. Con esos valores promediados por día y por usuario se obtuvieron valores promediados mensuales por usuario. Dichos valores con su respectiva variable dinámica que afecta la QoS fue ajustada cada variable a una serie de tiempo con una tendencia creciente y colapso. En la Tabla 1 mostramos los valores promediados mensuales de la red de Telconet y en las figura 3.3, figura 3.4, figura 3.5, figura 3.6, figura 3.7, figura 3.8 y figura 3.9 mostramos las gráficas de cada una de las series de las variables dinámicas. Bajo este principio iniciamos el análisis del modo referencial en el siguiente capítulo.

Mes Año 2016	Promedio Mensual Usuarios [#]	Delta de Promedio Nuevos Usuarios Mensuales [#]	Duración Sesión Promedio / Mes [min]	Rendimiento Promedio/Usuario/Mes [Mbps]	Tráfico Promedio Usuario/Mes [MB]	Tráfico Total [Mbytes]	SNR (Interferencia) Promedio Mes [dB]
Enero	922		11,79	7,90	2,52	17,66	17,81
Febrero	957,14	35,14	16,64	8,24	2,47	17,29	20,48
Marzo	1065,57	108,43	12,47	8,69	3,69	25,85	21,06
Abril	1163	97,43	22,48	8,76	4,16	29,12	20,4
Mayo	1368,86	205,86	28,88	8,06	3,93	27,49	20,1
Junio	1316,14	-52,71	27,2	8,57	4,4	30,78	19,45
Julio	1408	91,86	25,87	8,53	5,37	37,56	20,2
Agosto	1225,29	-182,71	23,87	8,5	5,11	35,77	19,29
Septiembre	1101,86	-123,43	24,09	8,22	5,22	36,51	19,51

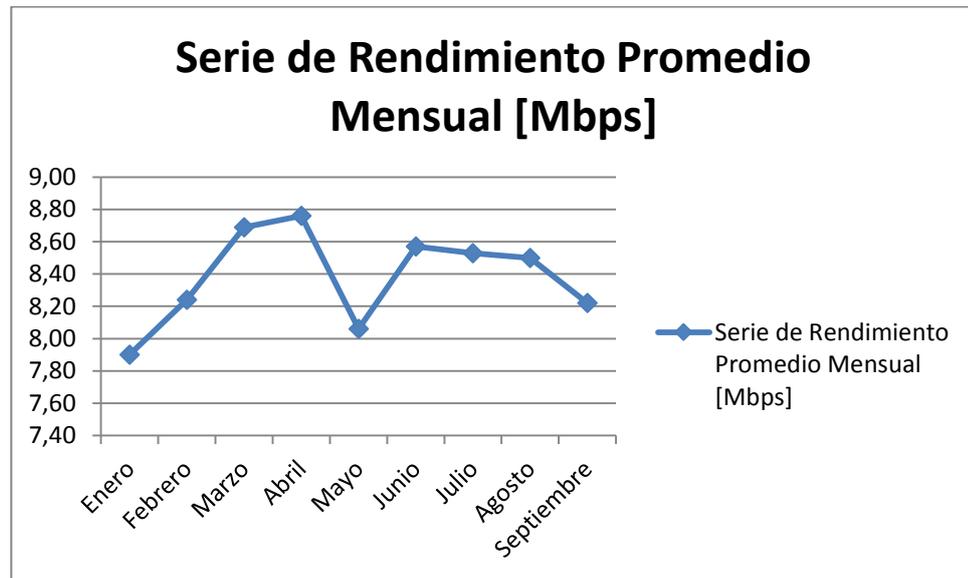
**Tabla 1: Valores promedios mensuales de datos red Telconet.**



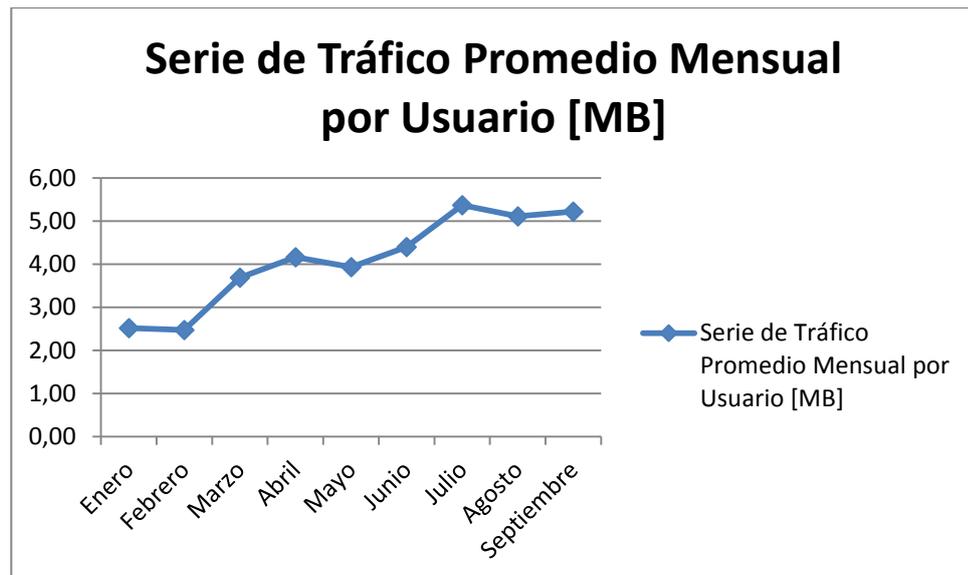
**Figura 3.3: Serie de usuarios datos red Telconet.**



**Figura 3.4: Serie de duración sesión promedio mensual Telconet.**



**Figura 3.5: Serie de rendimiento promedio mensual Telconet.**



**Figura 3.6: Serie de tráfico promedio mensual usuario Telconet.**

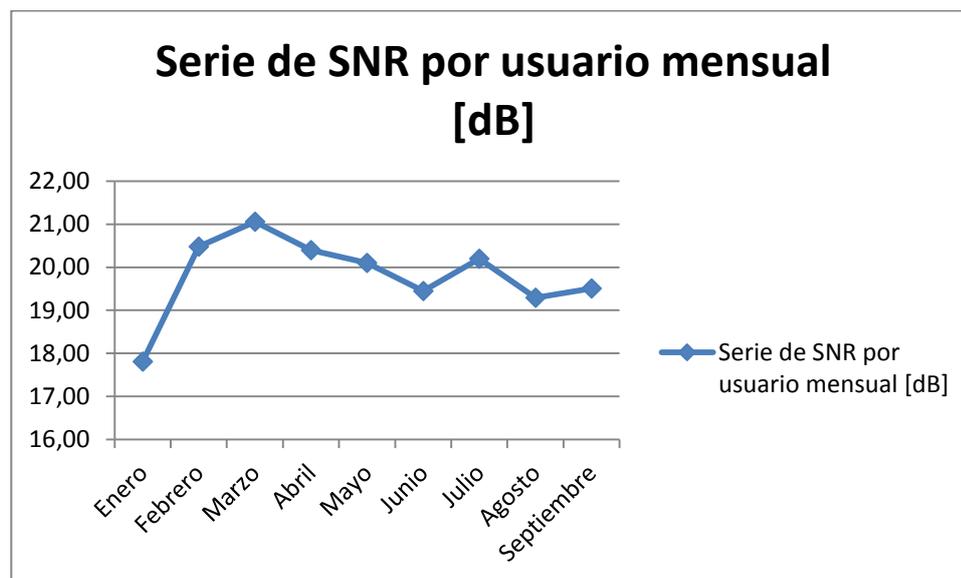


Figura 3.7: Serie de relación señal ruido promedio mensual usuario Telconet.

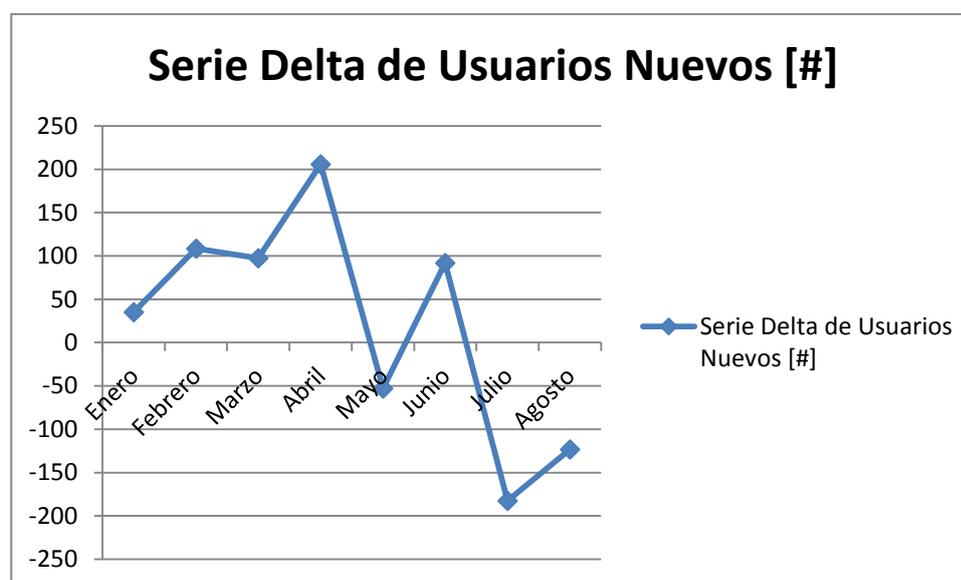
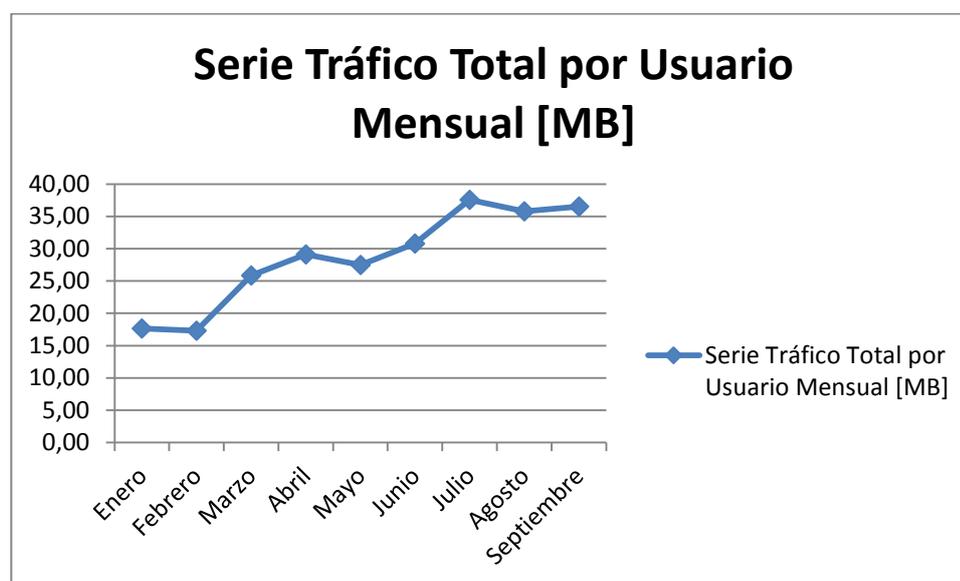


Figura 3.8: Serie incremento o decremento usuario mensual Telconet.



**Figura 3.9: Serie tráfico total usuario mensual Telconet.**

### 3.3.3 Análisis de la señal recibida por sectores en Guayaquil

Los valores obtenidos en diversos sectores de la ciudad de Guayaquil en la red de Telconet nos muestran promedios mensuales y por usuarios. Todos los sectores de Guayaquil donde se encuentran instalados los AP son los más apropiados para soportar las condiciones al aire libre. Por lo tanto el rendimiento promedio está basado en función del tiempo para poder aplicar luego el modelo de la Dinámica de Sistemas. Los niveles de rendimiento promedios mensuales por usuario nos indican que a pesar que existen usuarios que pueden llegar hasta más de 300 Mbps en ciertas zonas de Guayaquil, la media no llega más de 9 Mbps. Este resultado se fortalece con los niveles promedios de la relación señal ruido que llegan a menos de 22 dB el cual es bueno teniendo en cuenta que el nivel de ruido en Guayaquil es muy alto. Con estos niveles de calidad de la señal podemos tener tasas promedio de 8,76 Mbps que para las aplicaciones de VoIP es suficiente pero no para la movilidad del usuario. Por lo tanto debemos con el modelo dinámico encontrar herramientas tecnológicas que nos ayuden a mejorar los parámetros de calidad.

### **3.3.4 Análisis de la señal recibida oficina-hogar**

Basado en los datos del rendimiento de la oficina que esta entre 7 Mbps y 1.7Mbps siendo los equipos IEEE 802.11g la señal recibida es muy pobre ya que el estándar permite un rendimiento más alto. El principal problema presentado en la oficina es que existen otros AP que funcionan muy cerca del área de cobertura, traslapando la zona de alcance. Por esta razón los niveles de interferencia son altos y perjudica la relación señal ruido y por ende las tasas de rendimiento son más bajas que el promedio, siendo el único usuario conectado y con la calidad de voz con cierta distorsión a medida que nos alejamos del AP debido a los cambios de modulación para mantener la conexión durante la llamada por VoIP.

En el caso del rendimiento en el hogar siendo la red 802.11b y con un rendimiento entre 5 Mbps a 1.1 Mbps significa que los niveles de la relación señal ruido son altos y por ende la interferencia es muy baja. La razón fundamental es que en el hogar solo existe una red WiFi funcionando al mismo tiempo a diferencia que la red de la oficina donde existen varias redes WiFi.

### **3.3.5 Análisis de resultados**

Los resultados obtenidos en los apartados anteriores nos indican que los meses de crecimiento de la QoS están entre los meses de abril a junio, donde los valores del rendimiento promedio por usuario oscilan entre 8,69 Mbps a 8,57 Mbps. Por otro lado, los mejores niveles promedios de la relación señal ruido son entre marzo a julio. Lo cual nos indica que mientras la relación señal ruido se mantenga estable, tenemos las más altas tasas de rendimiento. Por esta razón el tráfico promedio por usuario mejora desde abril y se logra mantener en buenos niveles aun en septiembre entre 4,16 MB a 5,22 MB. Esta tendencia se repite con el tráfico total mensual entre 29,12 MB a 36,51 MB.

Para mejorar y aumentar la adopción de usuarios de VoIP y los niveles de QoS del servicio, se aplican estrategias tecnológicas enunciadas en los siguientes capítulos una vez obtenido el modelo dinámico para la red.

## CAPÍTULO 4

### 4. MODELO DE DINÁMICA DE SISTEMAS DEL PROBLEMA DEL SERVICIO DE VOIP EN REDES INALÁMBRICAS

Articulamos el problema, según el patrón interno del sistema que hemos analizado para la red de Telconet, estableciendo las causas que producen los problemas en la red WiFi para el servicio de VoIP, en Telconet, puesto que el problema es sistemático porque es basado sobre un servicio de Telecomunicaciones que se produce al momento de la adopción de los usuarios debido a la cobertura. Por tal motivo examinamos los comportamientos de la tendencia de cada variable dinámica en el tiempo, para crear el modo referencial.

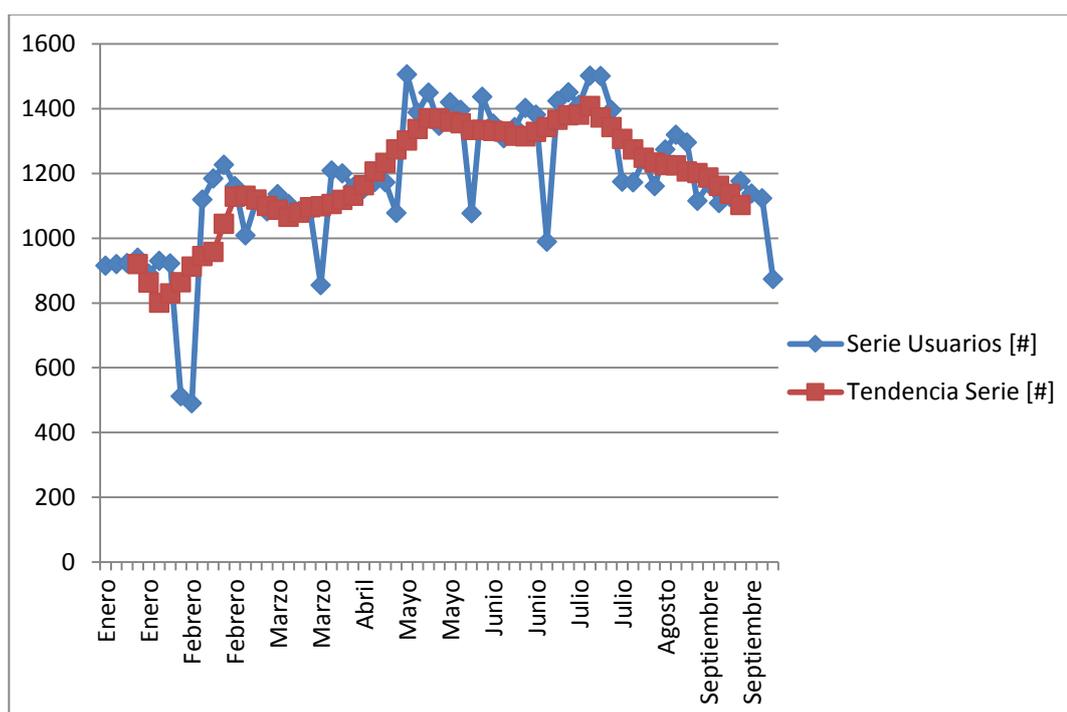
#### 4.1 La identificación de los límites del problema

Los patrones de comportamiento y de cambios en la red de Telconet, están implícitos en las series de tiempo analizadas en el capítulo anterior y que preceden a una condición existente y que son el modelo referencial, base para definir la problemática de VoIP en WiFi. El modo referencial para la ciudad de Guayaquil es la representación gráfica del problema y nos basamos en la información histórica por 6 meses (los 3 últimos meses servirán para validar el modelo). Para identificar los límites del problema hemos empleado lo siguiente:

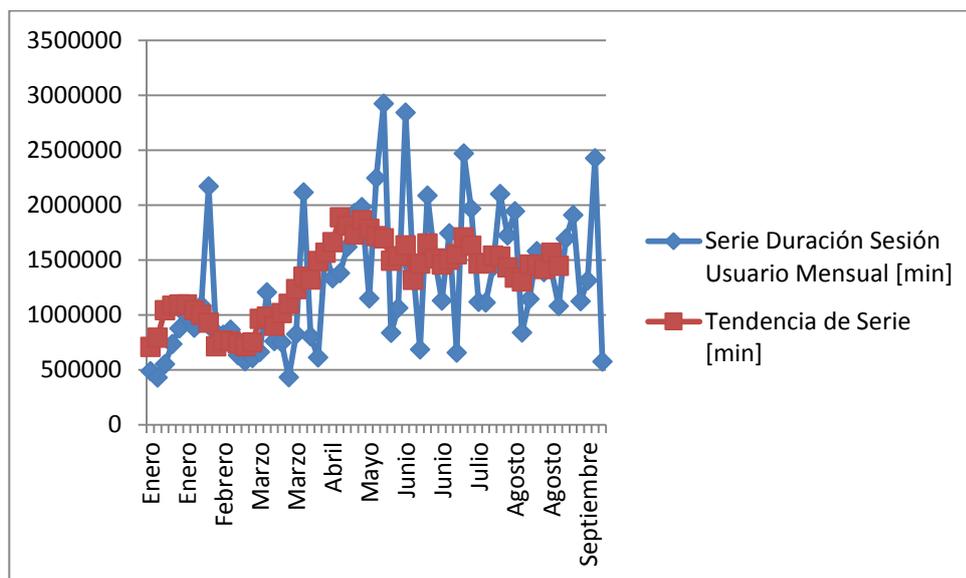
- Examinamos todas las descripciones y referencias científicas del problema con escenarios en varias partes del mundo. Bajo condiciones actuales tomamos los parámetros que afectan a la QoS en la red de Telconet en Guayaquil.
- Identificamos las variables relevantes del problema y distinguimos entre stocks y flujos. Para la red de Telconet serían: número promedio mensual de usuarios, promedio de nuevos usuarios mensuales, duración de la sesión promedio por usuario, rendimiento promedio mensual por usuario, tráfico promedio mensual por usuario, tráfico total mensual, relación señal ruido promedio mensual, nivel de piso de ruido promedio, tipos de fabricantes de teléfonos inteligentes por usuarios, bajada y

subida de flujos de tráfico por usuarios, indicadores de la recepción de la señal recibida promedio por usuario, que explican el nivel de la QoS, con sus respectivos polaridades de flujos.

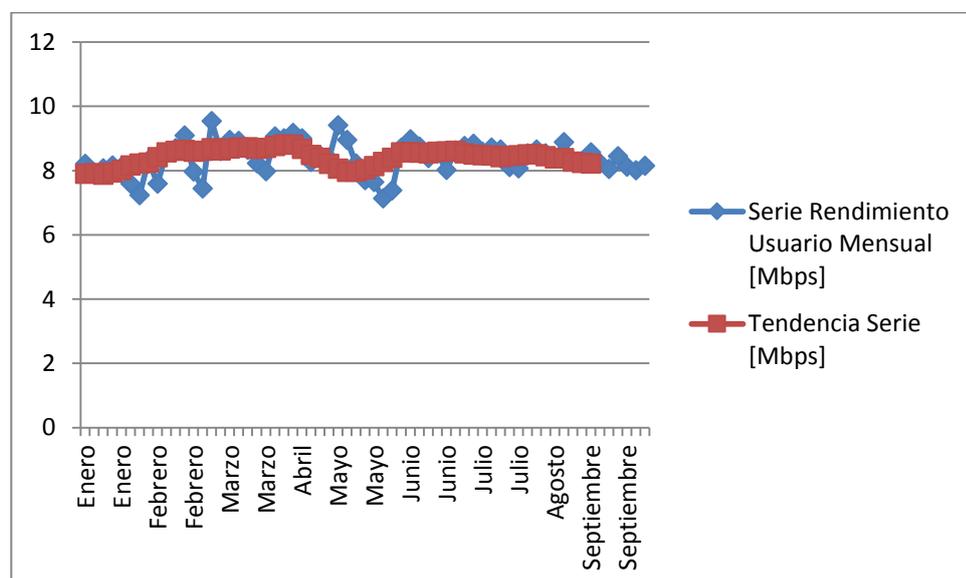
- Recolectamos los datos sobre la red de Telconet, para luego graficarlos en series de tiempo, los cuales se muestran en el capítulo 3. Luego que analizamos las tendencias de las series de tiempo buscamos las que mejor representan la historia del problema y eliminamos las variables que no están relacionadas con la problemática de la VoIP, manteniendo las ya descritas en este apartado. A continuación mostramos cada una de las tendencias de las series de tiempo de las variables de la red de Telconet en la figura 4.1, figura 4.2, figura 4.3, figura 4.4, figura 4.5, y figura 4.6.



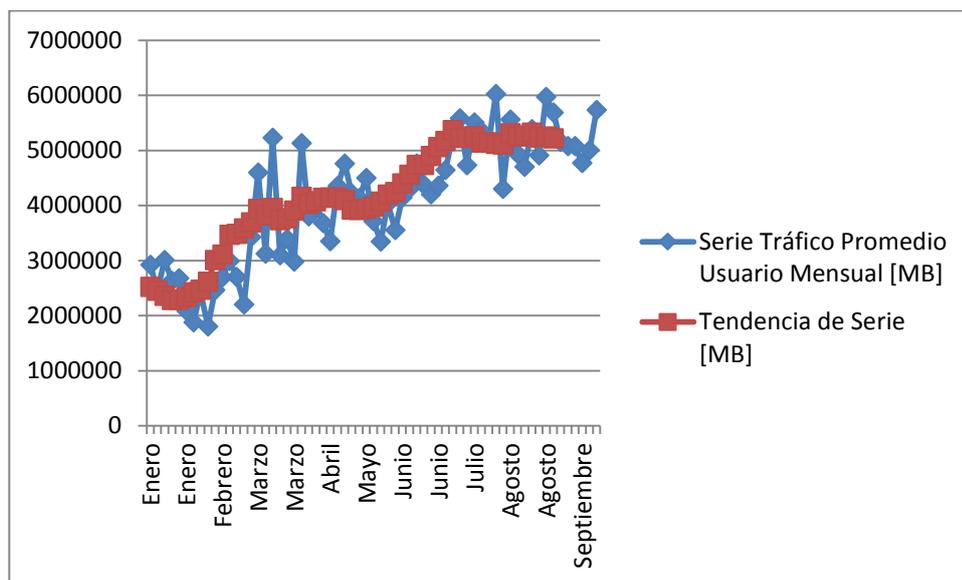
**Figura 4.1: Tendencia de la serie usuarios de Telconet.**



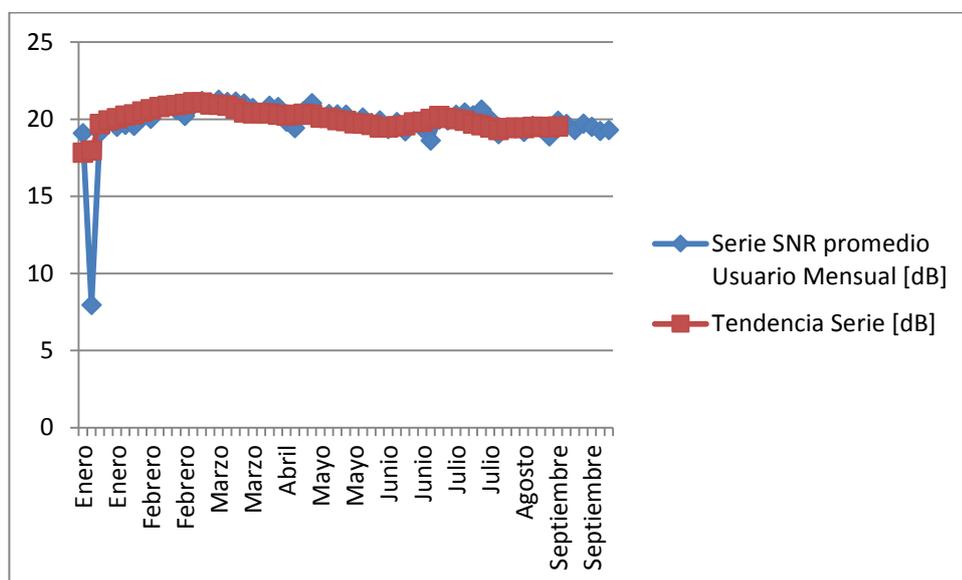
**Figura 4.2: Tendencia de la serie duración sesión usuario mensual de Telconet.**



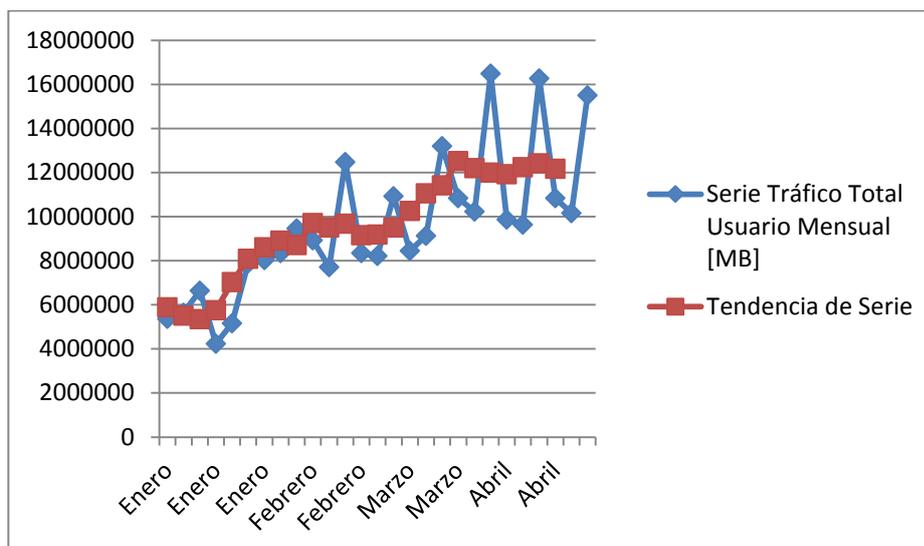
**Figura 4.3: Tendencia de la serie rendimiento usuario mensual de Telconet.**



**Figura 4.4: Tendencia de la serie tráfico promedio usuario mensual de Telconet.**



**Figura 4.5: Tendencia de la serie relación señal ruido usuario mensual de Telconet.**

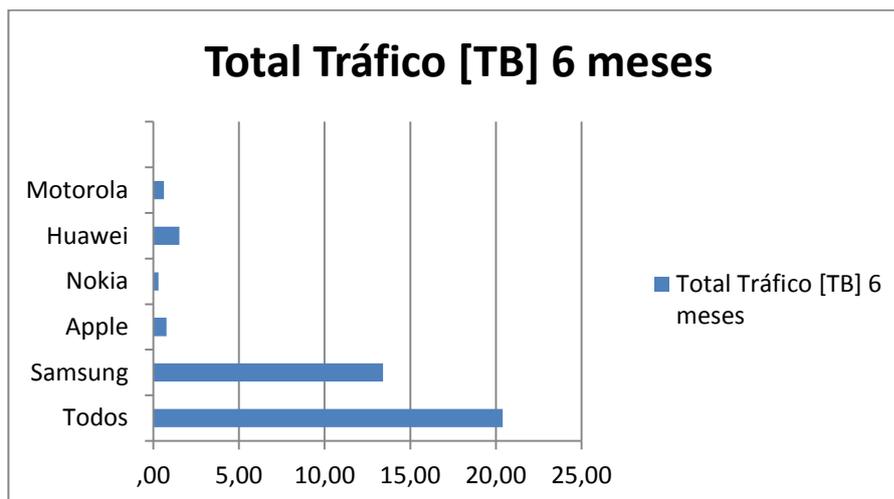


**Figura 4.6: Tendencia de la serie tráfico total usuario mensual de Telconet.**

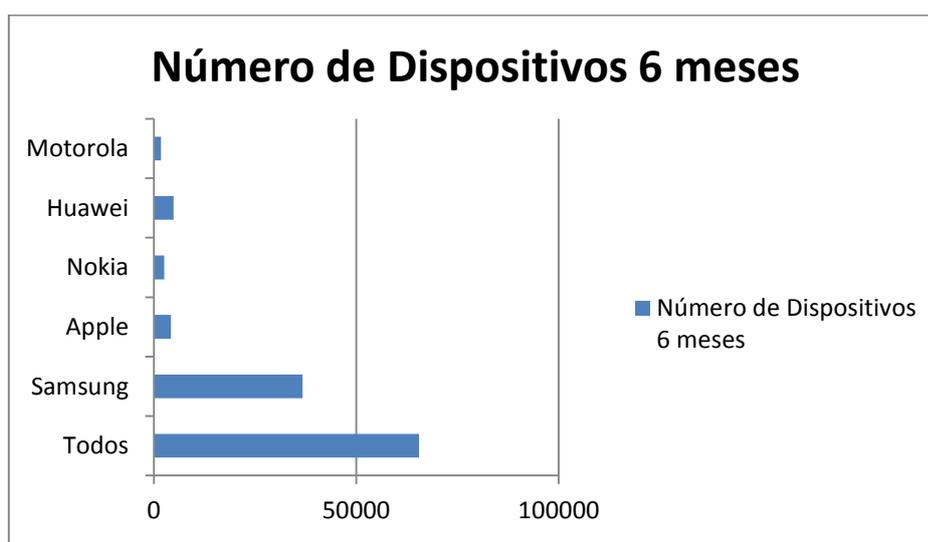
#### 4.2 Definición de los límites preliminares del Sistema

Examinamos parámetros de grupos complejos de series de tiempo históricas y descripciones cualitativas que representa la historia del problema, para el caso de la VoIP en Guayaquil. Seguidamente los descomponemos en partes más simples y los graficamos para observar las tendencias manifestadas en el problema, la cual es creciente con sobre paso y con oscilación. Para las redes WiFi el nivel cualitativo del grupo que examinamos es la interferencia, la cual depende del espectro radio eléctrico (mencionado en el capítulo 3) y es una de las limitantes del sistema, debido a que cumple con la tendencia de interés para Guayaquil por el alto piso de ruido en el sector céntrico y norte de la ciudad por su crecimiento comercial y financiero. Mantenemos cuantitativamente las variables: número promedio mensual de usuarios, promedio de nuevos usuarios mensuales, duración de la sesión promedio por usuario, rendimiento promedio mensual por usuario, tráfico promedio mensual por usuario, tráfico total mensual, relación señal ruido promedio mensual, nivel de piso de ruido promedio, bajada y subida de flujos de tráfico por usuarios, indicadores de la recepción de la señal recibida promedio por usuario. La variable de los fabricantes de teléfonos inteligentes es eliminada, porque históricamente está

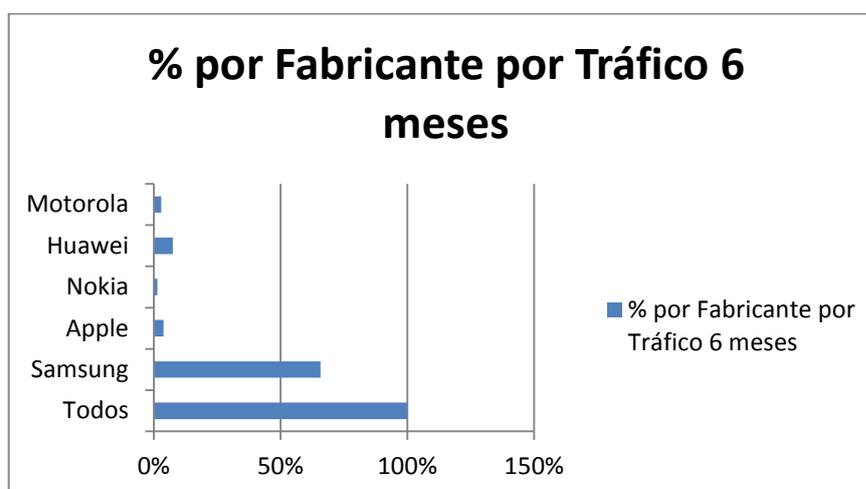
demostrado que los usuarios cambian proveedores según las bondades del producto así hace 5 años el proveedor dominante era Nokia y ahora es Samsung. Mostramos en la figura 4.7, figura 4.8, figura 4.9 y figura 4.10, un análisis de tendencias del uso de los teléfonos inteligentes y porcentajes de tráfico.



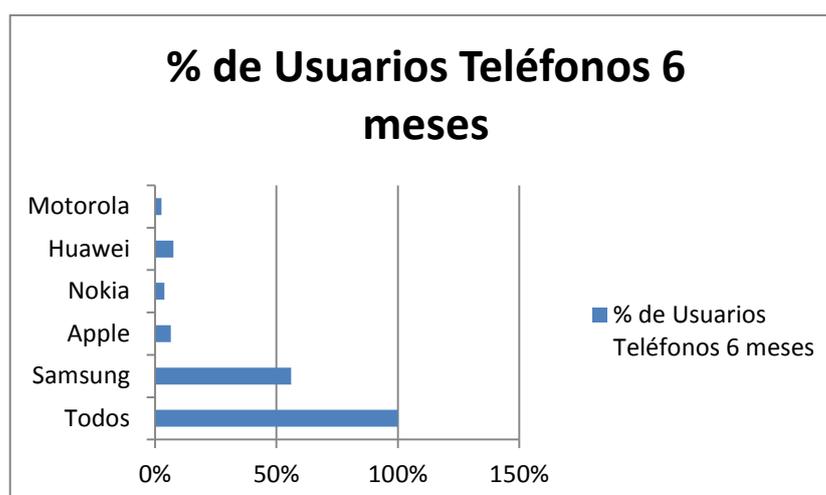
**Figura 4.7: Tendencia total de tráfico por fabricante de uso de teléfonos inteligentes en red de Telconet.**



**Figura 4.8: Tendencia número de teléfonos inteligentes por fabricante en red de Telconet.**



**Figura 4.9: Tendencia porcentaje por fabricante de teléfonos inteligentes en red de Telconet.**



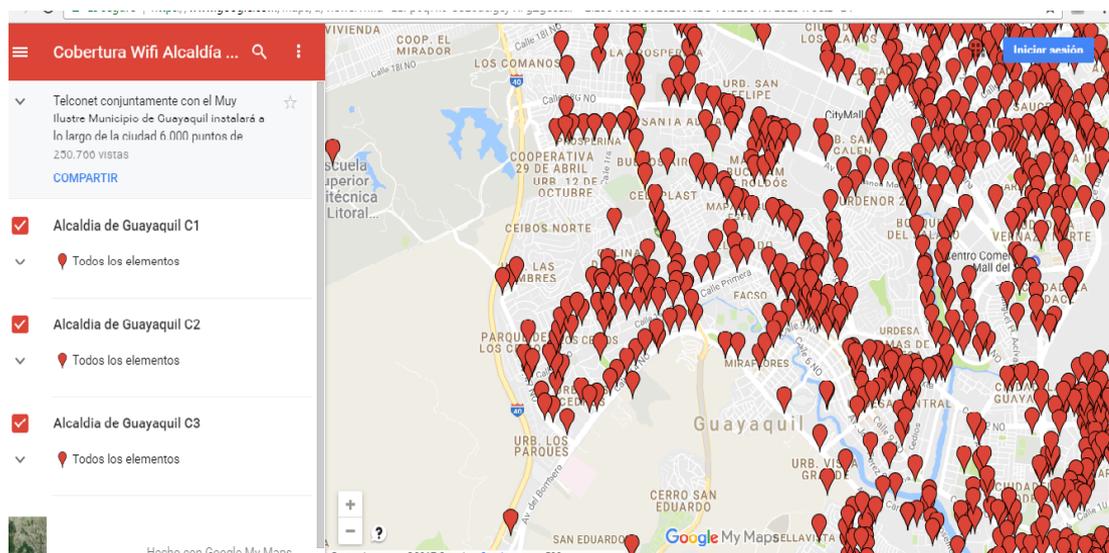
**Figura 4.10: Tendencia porcentaje de usuarios de teléfonos inteligentes por fabricante en red de Telconet.**

### 4.3 Definir límites preliminares del modelo

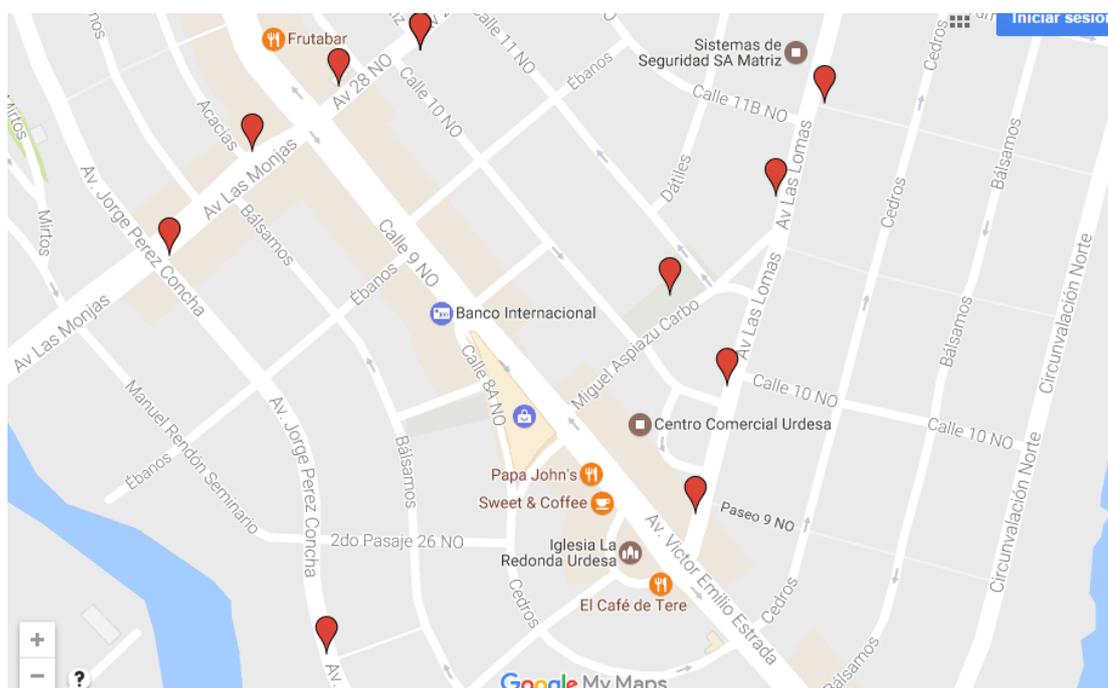
Exploramos los patrones que hemos seleccionado de los Límites Preliminares del Sistema, combinando las variables con un nivel de agregación para el propósito del modelo. Lo cual nos permite visualizar una variable abstracta

como lo es la posible eficacia de la cobertura, visualizando el mapa de AP montado sobre Google Earth como lo muestra la Figura 4.11, donde al realizar un zoom podemos ver que no existe una distribución equidistante entre los AP y además hay sobrepoblación de AP en ciertas zonas y carencia de AP en otras como lo vemos en la figura 4.12. La distancia teórica entre los AP es de promedio 80 m para instalar los AP en la ciudad de Guayaquil, sin embargo observamos en la figura 4.12 que en una avenida principal del norte de Guayaquil hay una gran zona aun no cubierta y así el caso se repite en varios sectores de la ciudad. Hasta el cierre del presente estudio existen más de 3,000 AP instalados en Telconet y el objetivo es de instalar 6,000, por lo que al ensamblar los patrones en una fábrica de variables para delinear los límites, nos quedamos con las siguientes variables cuantitativas:

- Número usuarios diarios.
- Promedio de nuevos usuarios mensuales.
- Rendimiento promedio mensual.
- Tráfico promedio mensual por usuario.
- Cobertura.



**Figura 4.11: Captura de la cobertura de los AP del Municipio de Guayaquil de la red de Telconet [13].**



**Figura 4.12: Zoom de carencia de cobertura de los AP del Municipio de Guayaquil de la red de Telconet [13].**

#### **4.4 Inclusión de stocks no presentes en los datos históricos**

Inspeccionamos los patrones seleccionados de los límites preliminares del modelo para inferir comportamientos de stocks que no se encuentran presentes en los datos históricos. Basados en que la red de Telconet debe crecer, introducimos el stock de Usuarios Potenciales como una forma para medir el rendimiento de la red, así planteamos que si la red tiene buenos niveles de rendimiento y cobertura, entonces habrá en el futuro cercano más usuarios potenciales que se conectan. Para lo cual en el modelo final validamos este principio.

Finalmente los Límites del Modelo luego de revisar las tendencias graficadas y al introducir el stock Usuarios Potenciales, tenemos:

- Número usuarios mensuales.
- Promedio de nuevos usuarios mensuales.

- Cobertura.

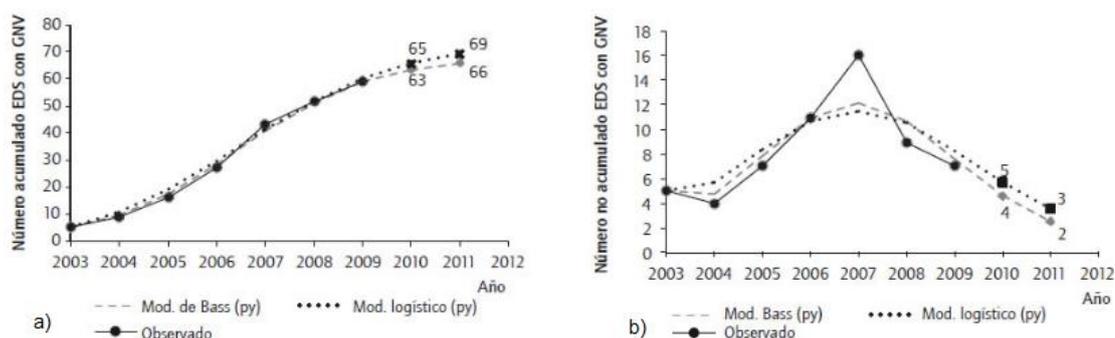
#### **4.5 Extrapolación de tendencias históricas para Obtener el Modelo Referencial**

Indagamos en el comportamiento histórico de las variables definidas en el anterior apartado para luego realizar proyecciones inteligentes del comportamiento futuro de esas variables. Como vemos en la figura 3.5 el rendimiento tiende a crecer empezando desde 7.90 Mbps hasta 8.57 Mbps durante los 6 meses de datos históricos. Sin embargo al ver el comportamiento futuro del rendimiento vemos que éste debería haber bajado drásticamente para visualizar problemas en la QoS. Debido a que la red de Telconet tiene 3,000 AP y el número de usuarios diarios no sobrepasa los 2,000 usuarios y tomando en cuenta las características técnicas del modelo de equipo de radio como el de 250 usuarios concurrentes que para temas de calidad en Telconet se lo configura a 100 usuarios para que no sobrepase el ancho de banda por AP, eliminamos el rendimiento del modo referencial por las razones expuestas, por lo tanto la QoS no está siendo afectada como lo habíamos descrito. Por lo que el modelo debería expresar los problemas de cobertura y adopción, como lo analizamos en los siguientes apartados.

#### **4.6 Inclusión de flujos relacionados a políticas y estrategias para el servicio**

En un principio al realizar el estudio de la problemática de la VoIP, lo más probable era que el modelo tenga un crecimiento de forma S con rebosamiento y oscilación, sin embargo cuando llegamos a este punto, nos dimos cuenta que la red de Telconet mantenía buenos niveles de QoS dado que el promedio mínimo por usuario por diseño tecnológico es de 4 Mbps y el promedio de la tendencia de la serie de tiempo de rendimiento es de 8,76 Mbps en el mejor caso y 7,90 Mbps en el caso extremo. La tendencia futura es que el rendimiento baje hasta 8.22 Mbps, aun por encima del promedio mínimo de 4 Mbps. Por lo tanto al relacionar las políticas y estrategias para incluir flujos es que faltaría el tema del Mejoramiento de la Cobertura, dada la coyuntura que aún no están siendo usados al 100% cada uno de los 3,000 AP de la red de Telconet, afectando la demanda. Por lo tanto tenemos un problema de crecimientos simple al inicio de nuevos productos como es el caso de la red WiFi de Telconet

demostrado con los datos históricos y los stocks cualitativos mencionados en los anteriores apartados. Dentro de la Metodología de Sistemas Dinámicos este problema es explicado mediante el Modelo de Bass [45], el cual es usado para crecimiento de nuevos productos o problemas de crecimiento o problemas de adopción, asumiendo que los potenciales adoptantes toman conciencia del nuevo producto por medio de la innovación a través de fuentes de información externa cuyas magnitudes pueden ser constantes en el tiempo. La figura 4.13 nos muestra un ejemplo de la tendencia de estos modelos, en a) la tendencia tiende a estabilizarse en un valor mientras que en b) la tendencia es crecer y luego colapsar a un valor determinado. Por lo tanto, usando el modelo de Bass sobre la red de Telconet, detectamos un flujo externo de Mejoramiento de la Cobertura que no es más que el despliegue de red o network roll-out.



**Figura 4.13: Ejemplos de modelos de Bass [45].**

#### 4.7 Definición del tipo de comportamiento del modelo

Basados en los análisis realizados a las diferentes tendencias, stocks, flujos, hemos determinado que en primera instancia el modelo que más se aproximaba a explicar la problemática de la VoIP en la QoS era de forma tipo S con rebosamiento y oscilación, pero dado que los números y las razones expuestas anteriormente nos han arrojado que la red aún no tiene problemas de QoS porque aún no está saturada de usuarios y que además existe áreas sin cobertura como lo muestra la figura 4.13 y otras con concentración de AP. Entonces hemos enfocado la problemática de la red a un modelo de Bass, un



- *Mejoramiento del despliegue o network roll-out*: una limitante es la geografía, pero colocando más AP de tal manera que cubran de una manera más efectiva el rango de cobertura de 80 m definidos y así de esta manera optimizar el despliegue por algoritmos especiales que si existen para realizar estudios de cobertura, de tal manera que en el futuro no tengamos problemas con la QoS, detectando a tiempo con los modernos sistemas de gestión de errores, las componentes de la calidad de VoIP. Así, tanto el aumento de AP como aplicar despliegues más optimizados por algoritmos, demandan de altos costos de capital pudiendo ser una nueva limitante al problema.
- Primero *Cobertura* luego controlar la QoS: para la red de Telconet una estrategia es que se debe mejorar la cobertura que nos permitan centrarnos en los problemas futuros, debido a que aún existen muchas islas dentro del mapa de Guayaquil. Al aumentar los usuarios potenciales tenemos indicios que vamos a tener problemas en la QoS, pero aun debido al bajo número de usuarios que se conectan por la información histórica presentada no podemos aún concluir el tema de QoS y más aún que la QoS está por encima del promedio.
- En el futuro la red de Telconet puede tener problemas de QoS cuando la adopción de potenciales usuarios crezca; para evitar un colapso por el espectro radioeléctrico limitado podemos usar una estrategia de brindar servicios en la banda de los 900MHz que ha sido liberada en otros países, en Ecuador parte de ésta banda la están asignando a operadores para servicio fijo. El único impedimento tecnológico sería la flexibilidad de los dispositivos que se conectan a la red WiFi.

#### **4.9 Descripción y desarrollo por etapas del modelo básico**

Describimos el desarrollo por etapas del modelo a continuación:

- Recopilación de datos históricos de variables que afectan el servicio de la red de Telconet.

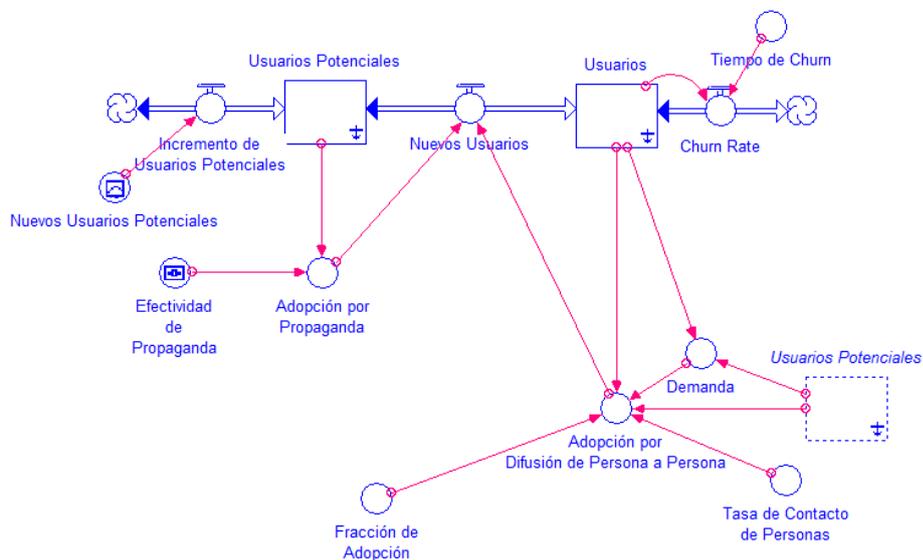
- Graficar las tendencias de los datos históricos en series de tiempo para luego analizar por el método científico la creación de las limitantes del Modelo Básico, en el orden de primero observarlo como problema, luego como sistema y luego como un modelo específico a la red de Telconet.
- Comparar tendencias y eliminar patrones que no ayudan a explicar dichas tendencias.
- Crear la hipótesis dinámica mediante las variables dinámicas que siguen el comportamiento deseado de la problemática de la QoS para la red de Telconet; sin embargo las evidencias numéricas nos hizo actualizar la perspectiva del problema hacia un problema que en principio era de rendimiento hacia la cobertura de la red.
- En base a la hipótesis se desarrolló el Modelo Básico que explica la problemática encontrada en los datos de la red de Telconet que en nuestro caso es un tema de cobertura previo a la problemática de la QoS que se pueda desarrollar a futuro.

#### **4.10 Elaboración del modelo para implementar las relaciones definidas identificadas en el Modelo Referencial**

La figura 4.15 muestra el Modelo básico de la hipótesis dinámica basado en el Modelo de Bass. Se elaboró el modelo con el software ithink. El modelo de Bass aplicado a la red de Telconet nos explica que existen dos stocks: usuarios potenciales y usuarios. Existe un flujo interno del modelo el cual es el de nuevos usuarios. Las variables dinámicas son la adopción de la propaganda, la demanda, la adopción por difusión de persona a persona. El modelo explica que:

- Los adoptadores potenciales del modelo declinan como la población de adoptadores crece a medida que se introduce un mejoramiento tecnológico, en nuestro caso el mejoramiento de la cobertura y cuyas estrategias ya fueron analizadas.
- Con el modelo podemos hacer validaciones tanto del pasado como del futuro de varios meses en el tiempo. Al ejecutar el modelo básico nos

muestra que el número de los usuarios potenciales disminuye en el tiempo. Por lo que la estrategia debe ser diferente.

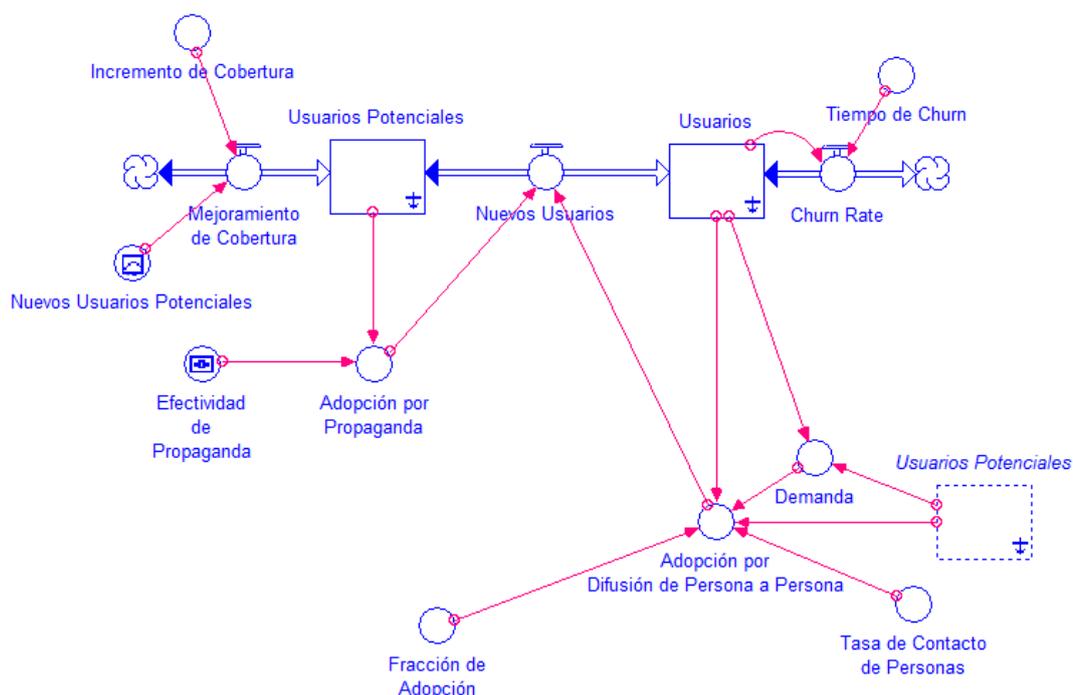


**Figura 4.15: Modelo básico con hipótesis dinámica basado en modelo de Bass.**

Introducimos un flujo externo al modelo básico debido a los problemas de cobertura de la red WiFi, por lo que el nuevo flujo es mejoramiento de la cobertura por medio del incremento de la misma. Finalmente el modelo mejorado se lo muestra en la figura 4.16.

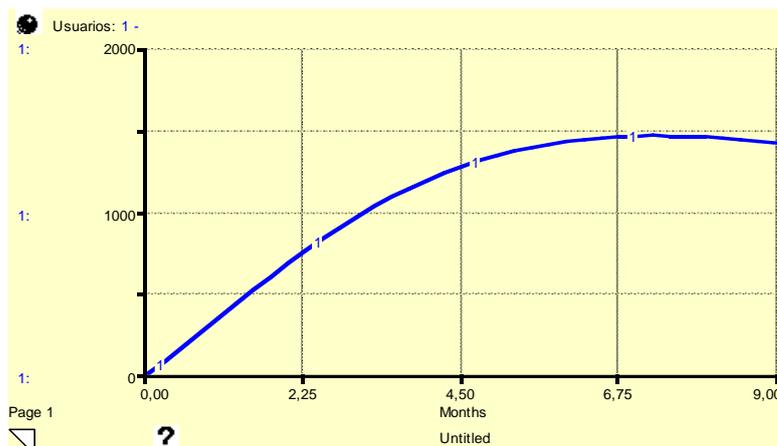
Los datos obtenidos con el modelo final son los siguientes:

- El modelo final funciona con ciertas características que explican el comportamiento de la problemática de la cobertura y la adopción de los usuarios en la red WiFi. Ejecutamos simulaciones desde el mes de octubre de 2015 a julio de 2016 a nivel de los usuarios que usan la red de Telconet y los resultados son muy aproximados a los datos recopilados desde enero a junio de 2016 de la red de Telconet. Por lo tanto este modelo final funciona para la problemática expuesta.



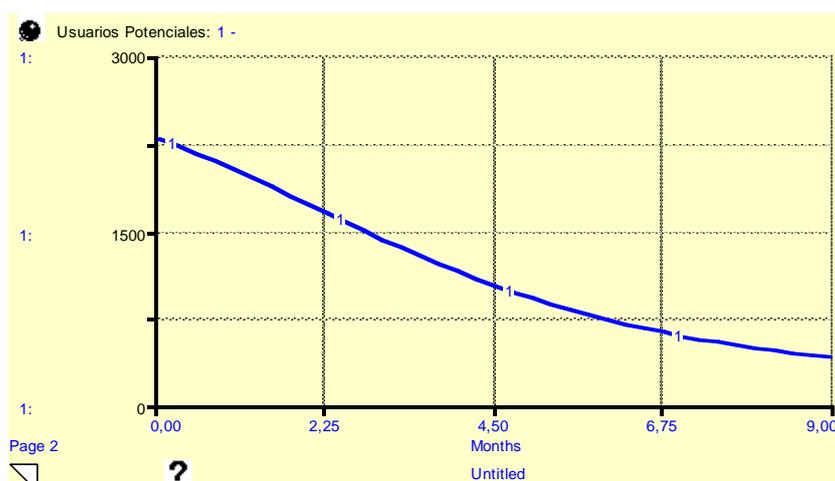
**Figura 4.16: Modelo final basado en modelo de Bass.**

- Mostramos en la figura 4.17 el comportamiento de los usuarios, los cuales son todos aquellos dispositivos que se han autenticado en la red WiFi de Telconet y han sido autorizados el acceso, durante el periodo de octubre 2015 a julio 2016. Así, en el modelo empezamos con un nivel de usuarios igual a 1 en un día del mes de octubre de 2015 y teniendo un valor de 1400 usuarios para el mes de julio de 2016, siendo una aproximación casi perfecta al valor real obtenido promedio en el mes de julio de los datos de Telconet.



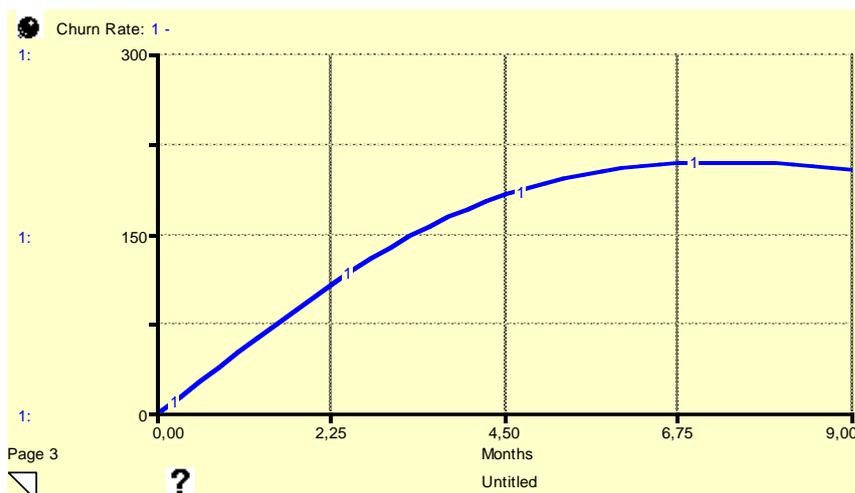
**Figura 4.17: Tendencia de usuarios en el modelo para Telconet.**

- La figura 4.18 nos muestra el comportamiento de los usuarios potenciales, y la tendencia de su caída en el tiempo al mes de julio de 2016 luego de lo cual tendrá una tendencia constante de crecimiento pero baja en magnitud. Los usuarios potenciales son todos aquellos dispositivos que en algún momento se autentifican y obtienen autorización de acceso a la red de Telconet y que no son los usuarios que corrientemente se conectan. El valor de los usuarios potenciales en el modelo es de 2,300. Los usuarios potenciales dependen de un diferencial en el tiempo más el mejoramiento de la cobertura y la sustracción de los nuevos usuarios.



**Figura 4.18: Tendencia de usuarios potenciales en el modelo para Telconet.**

- La figura 4.19 nos muestra la tasa de churn o tasa de decepción de los clientes que tiende a tener la misma forma que la curva de los usuarios. La tasa churn toma un valor 7 en el modelo. La tasa depende de la relación de usuarios con el tiempo churn. La tasa de churn es el ratio en que los clientes dejan de usar el servicio con respecto al tiempo.



**Figura 4.19: Tendencia de la tasa churn en el modelo para Telconet.**

- El mejoramiento de la cobertura es una variable que depende del incremento de la cobertura, tal como se muestra en la tabla 2 sobre las ecuaciones y parámetros de la entrada del modelo de Bass aplicado a la red de Telconet.
- Los nuevos usuarios dependen de la adopción por propaganda más la adopción por difusión de persona a persona, mientras que la demanda depende de la variable usuarios más los usuarios potenciales.
- No hemos usado aún ninguna estrategia en el incremento de la cobertura para mejorarlo. Las estrategias las validamos en el siguiente capítulo.

Tabla con las ecuaciones y parámetros de entrada del modelo para Telconet
$Usuarios(t) = Usuarios(t - dt) + (Nuevos\_Usuarios - Churn\_Rate) * dt$
INIT Usuarios = 1
INFLOWS:
Nuevos_Usuarios = Adopción_por_Propaganda+Adopción_por_Difusión_de_Persona_a_Persona
OUTFLOWS:
Churn_Rate = Usuarios/Tiempo_de_Churn
$Usuarios\_Potenciales(t) = Usuarios\_Potenciales(t - dt) + (Mejoramiento\_de\_Cobertura - Nuevos\_Usuarios) * dt$
INIT Usuarios_Potenciales = 2300
INFLOWS:
Mejoramiento_de_Cobertura = Incremento_de_Cobertura+Nuevos_Usuarios_Potenciales
OUTFLOWS:
Nuevos_Usuarios = Adopción_por_Propaganda+Adopción_por_Difusión_de_Persona_a_Persona
Adopción_por_Difusión_de_Persona_a_Persona = Usuarios*Usuarios_Potenciales*Fracción_de_Adopción*Tasa_de_Contacto_de_Personas/Demanda
Adopción_por_Propaganda = Usuarios_Potenciales*Efectividad_de_Propaganda
Demanda = Usuarios+Usuarios_Potenciales
Efectividad_de_Propaganda = 0.01
Incremento_de_Cobertura = IF(TIME >24)THEN(0)ELSE(0)
Nuevos_Usuarios_Potenciales = GRAPH(100)
(0.00, 100), (2.40, 100), (4.80, 100), (7.20, 100), (9.60, 100), (12.0, 100), (14.4, 100), (16.8, 100), (19.2, 100), (21.6, 100), (24.0, 100)
Tasa_de_Contacto_de_Personas = 1
Tiempo_de_Churn = 7

**Tabla 2: Valores de las ecuaciones y parámetros de entrada del modelo sin aplicar estrategias.**

## CAPÍTULO 5

### 5. VALIDACIÓN DE ESTRATEGIAS DISEÑADAS EN EL MODELO CON PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS EN TELCONET

Basados en el modelo final con el flujo de mejoramiento de la cobertura realizamos las validaciones y pruebas del modelo con los datos de Telconet obtenidos en 3 meses desde julio a septiembre de 2016 y mostramos la validación junto con estrategias que podemos seguir y que bien pueden ser analizadas a profundidad con otro estudio de tesis.

#### 5.1 Estrategias tecnológicas para mejorar el comportamiento observado en el modelo del sistema

Las estrategias para el sistema son:

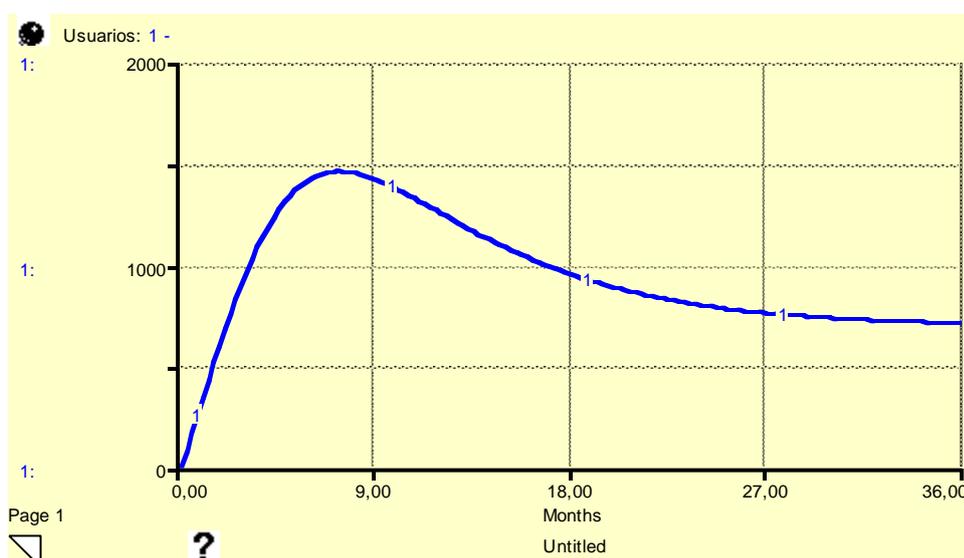
- Optimización en el despliegue de la red para cubrir zonas pocas cubiertas cercanas de zonas con sobrepoblación de AP, usando mejores algoritmos de distribución para que los parámetros de radiación tengan un mayor alcance incluso ante factores ambientales como las lluvias severas.
- Verificar la regulación del espectro radio eléctrico en el Ecuador y el mundo, pues está relacionado con el ancho de banda. Para el IEEE 802.11 disponemos a ciertas tasas de rendimiento hasta de 40MHz de ancho de banda. La estrategia seria aprovechar nuevas frecuencias libres en bandas como la de 900MHz y hacer estudios de inversiones y si los dispositivos actuales se integran sin problemas.

#### 5.2 Descripción de las posibles estrategias tecnológicas en Telconet

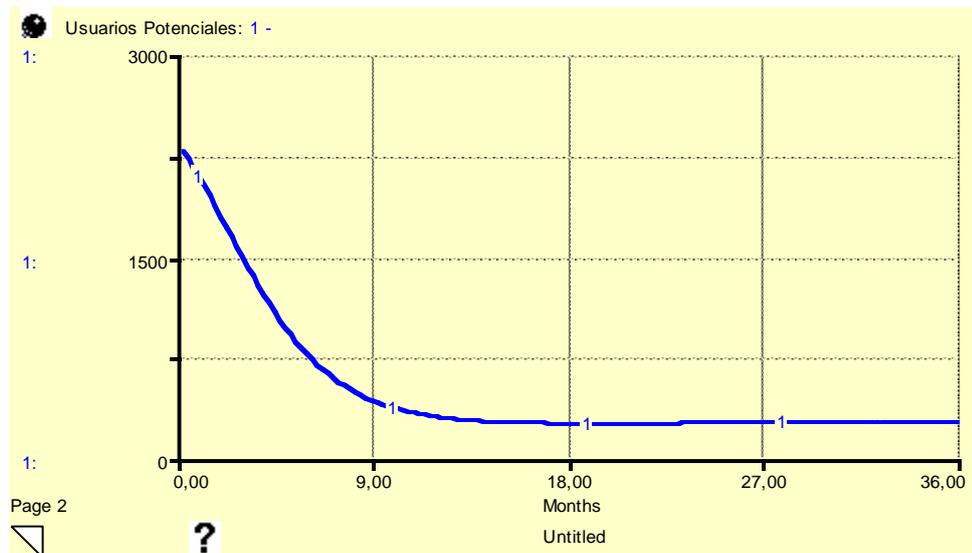
La descripción de las estrategias tecnológicas para la red de Telconet la realizamos con profundidad en el capítulo 4 apartado 8. Sin embargo, hacemos énfasis en el incremento de la cobertura como una estrategia real que

aplicamos al modelo en el mejoramiento de la adopción de los usuarios en el tiempo. Así de esta manera proyectamos el modelo final a 2 años sin aplicar estrategias y mediante la ejecución de estrategias. Describimos cada una a continuación:

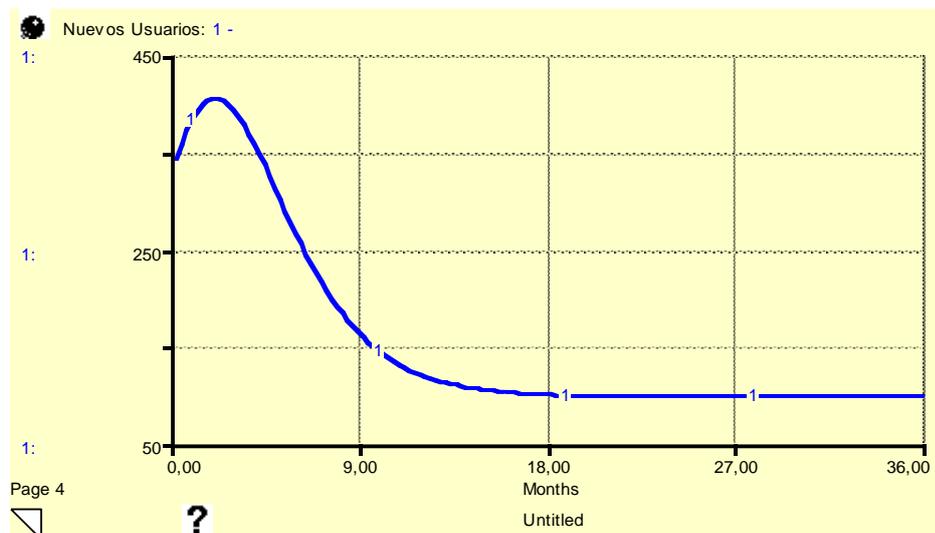
- Proyección del modelo a 2 años sin estrategias: a partir de octubre 2015 empieza la proyección sin realizar ningún cambio a ninguna variable en función del tiempo tenemos que al final del tercer año el número de usuarios disminuye con una tendencia a mantenerse en aproximadamente 800 usuarios en el tiempo como lo muestra figura 5.1. Con respecto a los usuarios potenciales de 2,300 cae a una magnitud de 100 en el décimo octavo mes manteniendo esta tendencia a lo largo del tiempo hasta el tercer año, como lo muestra la figura 5.2. Los nuevos usuarios también caen en magnitud en el décimo octavo mes manteniendo la tendencia hasta el tercer año en 100 usuarios, como lo muestra la figura 5.3. Por otro lado, la tasa de churn mantiene la misma forma que la variable de los usuarios manteniéndose en el valor de 100, como lo muestra la figura 5.4.



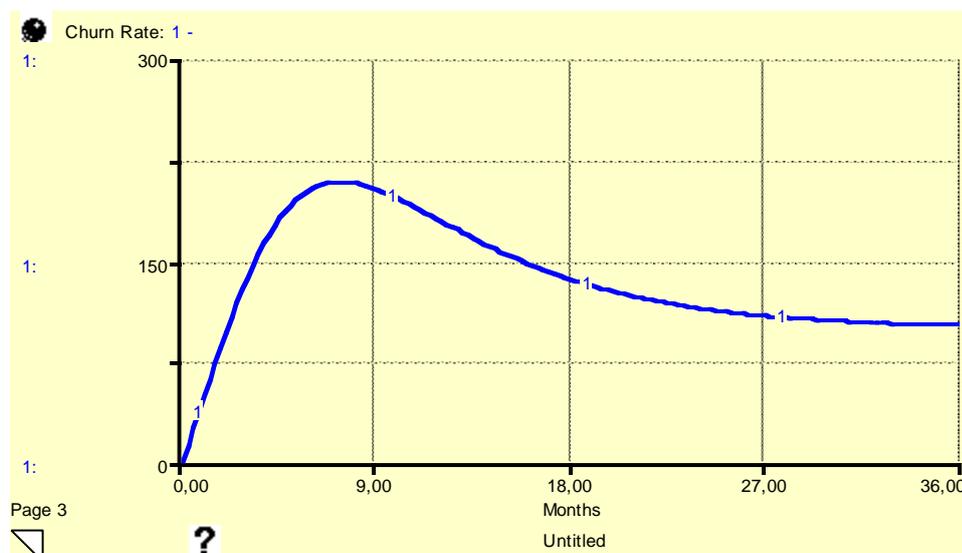
**Figura 5.1: Proyección de usuarios a 2 años para Telconet sin aplicar estrategia.**



**Figura 5.2: Proyección de usuarios potenciales a 2 años para Telconet sin aplicar estrategia.**



**Figura 5.3: Proyección de nuevos usuarios a 2 años para Telconet sin aplicar estrategia.**



**Figura 5.4: Proyección de tasa churn a 2 años para Telconet sin aplicar estrategia.**

- Proyección del modelo a 2 años con estrategias: la manera cómo podemos simular el incremento de la cobertura es colocando una variable condicional que se incremente en 200 a partir del segundo año y mensualmente, vemos el cambio de la estructura del modelo y la configuración de la variable expuesta en la tabla 3, a la cual se debe añadir la estructura ya presentada en la tabla 2 del capítulo anterior. Por lo tanto proyectamos a partir de octubre 2015 y podemos apreciar en la figura 5.5 como el número de usuarios empieza a crecer a partir del mes número 25 hasta llegar en aproximadamente a 1,800 usuarios hasta el tercer año. Con respecto a los usuarios potenciales empezamos con 2,300 cae a una magnitud de 100 hasta el mes 25 y a partir de ese mes empieza a crecer hasta el tercer año llegando a 800 manteniendo esta tendencia, como lo muestra la figura 5.6. Los nuevos usuarios también crecen a partir del mes número 25 hasta llegar al tercer año en 280 usuarios, como lo muestra la figura 5.7. La tasa de churn mantiene la misma forma que la variable de los usuarios empezando a crecer desde

el mes 25 hasta el tercer año para llegar a 250, como lo muestra la figura 5.8.

Tabla con los valores que se modifican del Modelo para Telconet
Incremento_de_Cobertura = IF(TIME >24)THEN(200)ELSE(0)
Nuevos_Usuarios_Potenciales = GRAPH(100)

Tabla 3: Valores de las variables en el modelo aplicando estrategias.

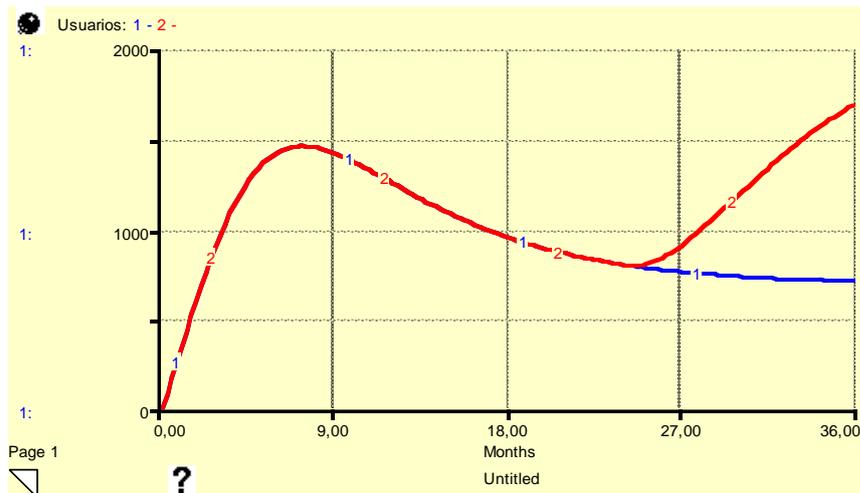


Figura 5.5: Proyección de usuarios a 2 años para Telconet aplicando estrategia.

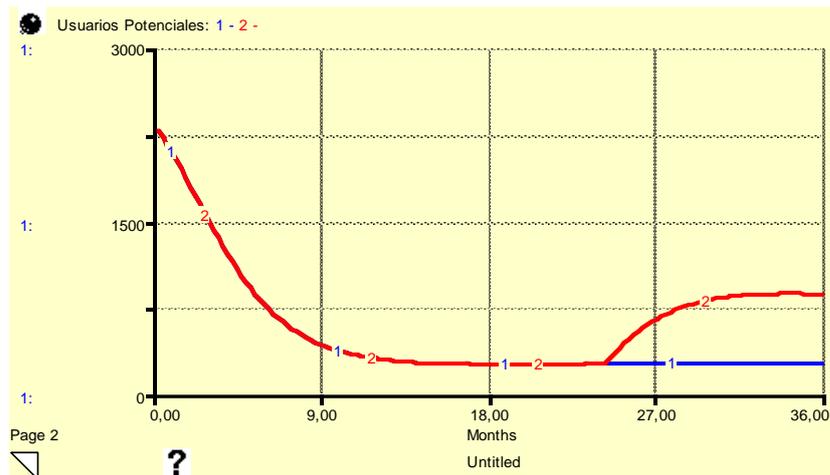
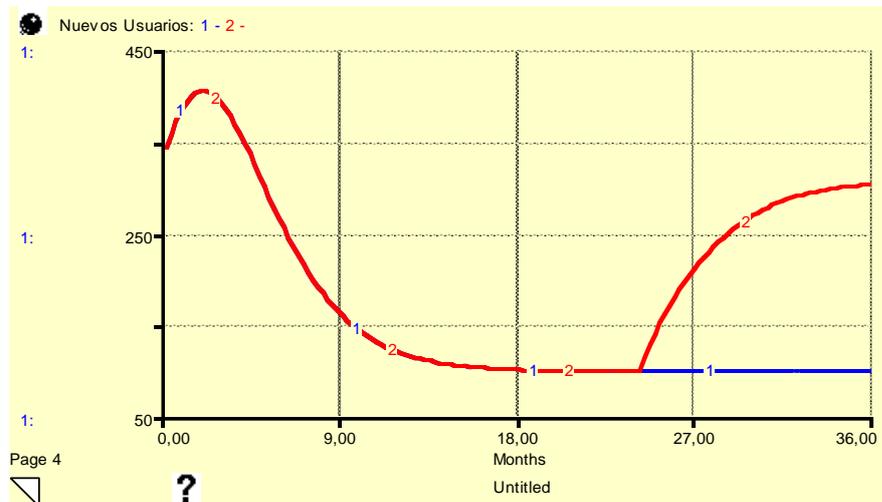
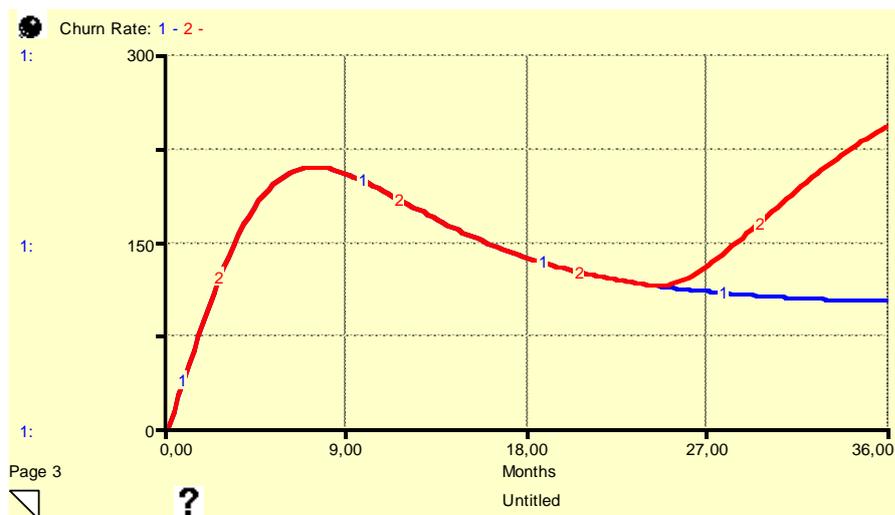


Figura 5.6: Proyección de usuarios potenciales a 2 años para Telconet aplicando estrategia.



**Figura 5.7: Proyección de nuevos usuarios a 2 años para Telconet aplicando estrategia.**

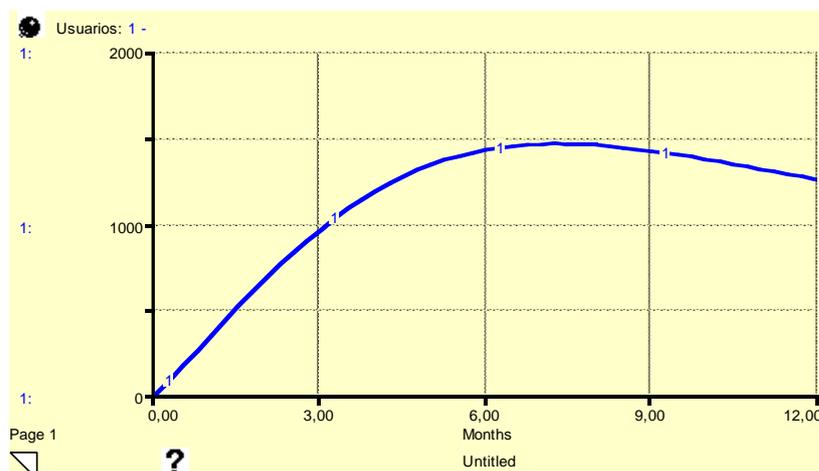


**Figura 5.8: Proyección de tasa de churn a 2 años para Telconet aplicando estrategia.**

### 5.3 Pruebas de campo del modelo en la red de Telconet

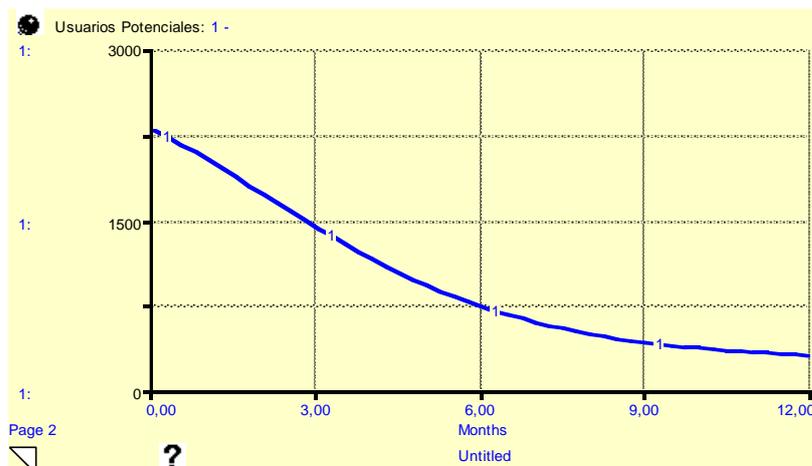
Hemos validado durante los últimos 3 meses de los datos recopilados de la red de Telconet con respecto a los resultados que nos muestra el modelo en esos mismos meses desde julio a septiembre de 2016. Tenemos los siguientes resultados, tomando en cuenta que en cada una de las figuras de este apartado los meses julio a septiembre representan el mes 10, 11 y 12 respectivamente:

- En la figura 5.9 apreciamos los usuarios en el mes décimo cuyo valor es 1,400 mientras que en los datos recopilados el promedio es 1,408, tal como lo mostramos en la tabla 1. Así en el mes doceavo el valor usando el modelo es 1,200 y con los datos de la red de Telconet es 1,101.



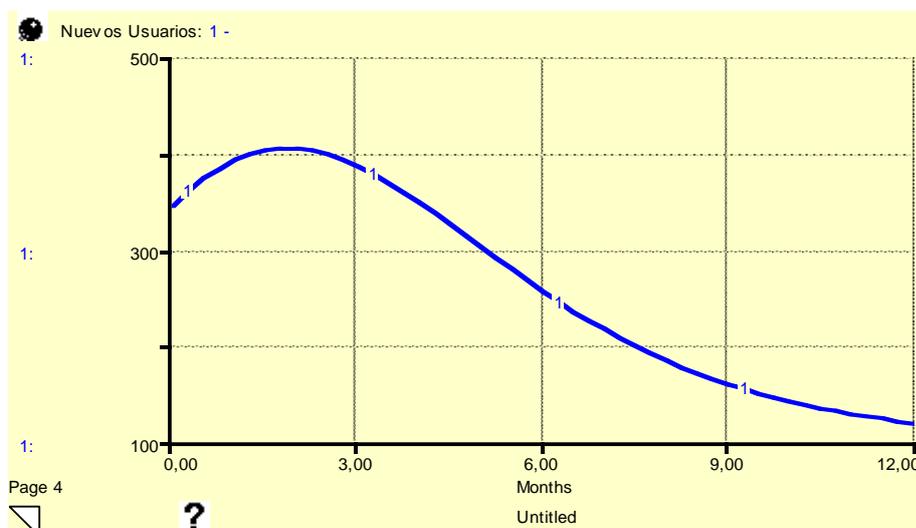
**Figura 5.9: Validación de usuarios con el modelo para Telconet.**

- En la figura 5.10 validamos los usuarios potenciales hay una sustracción de los usuarios con respecto a la tendencia cuyo valor en magnitud en el mes según el modelo es 220, mientras que con los datos de la red de Telconet es 183.

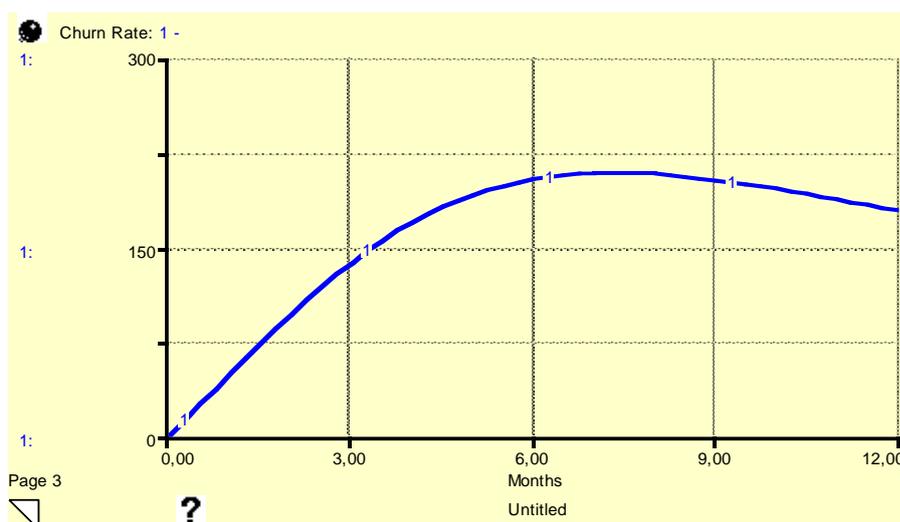


**Figura 5.10: Validación de usuarios potenciales con el modelo para Telconet.**

- Los nuevos usuarios son mostrados en la figura 5.11, validamos con el modelo que en el mes 12 la magnitud es 120, mientras que con los datos de la red de Telconet es 123.
- La curva de tasa de churn es mostrada en la figura 5.12 en el modelo al mes 12, esto es septiembre de 2016, llega a un valor de 180 y es la que no muestra e indica la velocidad con que los usuarios dejan de adoptar la red. Mientras que con los datos recopilados de la red de Telconet al mes de septiembre de 2016 existe un decremento de usuarios de la misma forma que nos muestra el modelo. El promedio de usuarios en el mes de agosto de 2016 fue 1,225 y en septiembre de 2016 fue de 1,102 usuarios.



**Figura 5.11: Validación de nuevos usuarios con el modelo para Telconet.**



**Figura 5.12: Validación de la tasa de churn con el modelo para Telconet.**

#### 5.4 Análisis de resultados

Los resultados expuestos en los apartados del presente capítulo nos demuestran:

- Las estrategias tecnológicas que se pueden aplicar al modelo en el mejoramiento de la cobertura es el incremento de la cobertura que nos indica que a partir del segundo año (octubre 2017) que empezó la red a

funcionar tenemos un mejoramiento de la adopción de los usuarios que se mantiene en el tiempo con incrementos de 200 por mes. Por lo tanto indicamos que podemos hacer un mejor despliegue de AP a zonas que aún no lo disponen. En la práctica la red está al 50% actualmente construida y con los AP que hacen falta se estima el mejoramiento de la cobertura para luego verificar problemas en la QoS.

- El modelo ha sido validado en el campo dado que se han tomado 3 meses de datos (julio a septiembre de 2016) y lo hemos comparado con los resultados del modelo. Por lo tanto el modelo es válido porque replica el comportamiento del modo referencial. Así el modelo es totalmente aplicable al estudio de la problemática de la adopción de los usuarios.
- Los resultados de las gráficas que se muestran en las diferentes figuras luego de validar el modelo nos muestran que sin estrategias la tendencia de los usuarios es que se mantenga diariamente a un nivel de 800 al final del tercer año de operación de la red, algo que está muy por debajo de la media que la red puede soportar. Mientras que al aplicar estrategias al final del tercer año mantenemos usuarios por encima de 1,800 y con tendencia a seguir creciendo si se aplica adecuadamente las estrategias para en el futuro inspeccionar nuevos problemas.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Uno de los objetivos del estudio es el análisis de la problemática de QoS para los servicios de la VoIP en las redes WiFi para lo cual hemos confirmado que los principales problemas que tienen las redes son: La cobertura, el encaminamiento de los paquetes, el handoff que están relacionadas con las métricas de retrasos, jitter, rendimiento y paquetes perdidos. Esto ha sido ya demostrado en varios ensayos científicos y que ninguna red WiFi no está exenta de tenerlos.

Basados en los datos recopilados sobre la red de Telconet y luego de analizarlos mediante la Dinámica de Sistemas y haber creado los límites tanto del problema, sistema y del modelo podemos indicar que la red de Telconet aún no tiene evidencias de problemas de la QoS en el servicio de VoIP. Esto debido a que el rendimiento promedio por usuario mensual en base a los datos históricos es de 8,76Mbps y está por encima del promedio mínimo que soporta la red el cual es de 4Mbps. Tampoco al momento la red de Telconet tiene problemas con la sobreescripción de usuarios debido a que existen más de 3,000AP con un promedio diario de no más de 1,500 usuarios, mientras que cada AP puede tener 256 estaciones concurrentes, por lo tanto en este momento tampoco existen problema de ancho de banda de los 40MHz que disponen. Dado que el nivel de la relación señal ruido es muy estable a lo largo del periodo de análisis no tienen mayores problemas de interferencias y el IEEE 802.11n los corrige automáticamente. Con respecto a la QOS no se evidencia que la red de Telconet tenga problemas en los actuales momentos. Esto queda plenamente demostrado dado que el tráfico total promedio en el tiempo continúa creciendo.

Mediante la dinámica de sistemas hemos mostrado que la verdadera problemática antes de tener errores en la QoS sobre la red de Telconet es en el mejoramiento de la cobertura y que la red actualmente tiene un comportamiento basado en el modelo de Bass. Al mejorar la cobertura con incrementos mensuales podemos concluir que el nivel de usuarios diarios mejora en el tiempo y al llegar al tercer año pueden existir hasta 1,800 usuarios diarios y nuevos usuarios potenciales siempre que exista una adecuada difusión de la red. El modelo plenamente puede indicarnos exactamente que para tener el número de usuarios que soporta la red, cual y como

debe ser la estrategia de incrementar la cobertura, cambiando las ecuaciones del modelo final. Ha sido validado con las pruebas de campo durante 3 meses (julio a septiembre de 2016). Por lo tanto es válido el modelo para la red de Telconet.

La red de Telconet tiene en los próximos años un importante desafío con el 50% de AP que falta por instalar de tal manera que se puede ejecutar un despliegue optimizado de tal manera que los usuarios diarios pueden incrementarse a nivel que no afecten la QoS sobre la red WiFi con el servicio de VoIP. Podemos concluir que la red de Telconet al proyectarse su demanda de usuarios en el mediano plazo a 2 años no tendría aun problemas de QoS dado las evidencias y estrategias tecnológicas que aún pueden implementarse como el incremento de cobertura.

Podemos también concluir que debido a que la red de Telconet aun dispone de suficiente capacidad de servicios a usuarios bien puede explotar su infraestructura para hacer trafico roaming con los operadores celulares en sectores de Guayaquil donde existe poca cobertura celular o hay saturación de usuarios. Debido a que las redes WiFi el IP es nativo puede brindar sin problemas el servicio de VoIP mediante nuevas aplicaciones con las que los teléfonos inteligentes estan implementándose ahora el denominado WiFi calling o llamadas por WiFi, que bien puede ser el inicio de un próximo estudio que se puede implementar en la red de Telconet y sacar nuevos servicios para la sociedad, asi como el offloading de una red celular hacia la red WiFi de Telconet.

En una primera instancia nuestro estudio estuvo enfocándose en que la red de Telconet tenía problemas con la QoS. En el momento que esto hubiera pasado el modelo dinámico hubiera sido totalmente diferente al que se propone en el presente estudio. Por lo tanto podemos concluir que no existen recetas ni modelos generales para una red de Telecomunicaciones sin antes no se analizan el comportamiento de sus parámetros. El cual sería también tema de un siguiente estudio para una red saturada de usuarios y ver los mecanismos para resolver aplicando la dinámica de sistemas.

Los datos tomados de la oficina no formaron parte cuantitativa del presente estudio, debido a que sus resultados son iguales a los recopilados en la red de Telconet, sin embargo nos sirvió de una manera cualitativa la verificación de que para desplegar

una red WiFi debemos diseñarlos mediante topología de rejilla o por medio de algoritmos, para minimizar interferencias y por ende hacer uso adecuado del ancho de banda disponible dentro del espectro radio eléctrico.

Sería consecuente que la empresa Telconet estudie el presente proyecto para tomar criterios estratégicos y poder tomar correctivos en base al estudio, en caso de ameritarlos.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. H. James, et al. "Implementing VoIP: a voice transmission performance progress report". *IEEE Communication Magazine*, pp. 36–41, July 2004.
- [2] K. Tan, et al. "SAM: Enabling Practical Spatial Multiple Access in Wireless LAN". In ACM MobiCom, China, 2009.
- [3] IEEE-SA Standards Board. (2012, Marzo 29). Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications [Online]. Disponible en: <http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.11-2012.pdf>.
- [4] IEEE Computer Society, "Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Medium Access Control (MAC) Quality of Service (QoS) Enhancements", New York, April 2005.
- [5] CISCO NETWORKS. (2012). "Internetworking Tech". Handbook. [Online]. Disponible en: <http://www.cisco.com/en/US/docs/internetworking/technology/handbook/QoS.html>.
- [6] F. Kuipers, et al, "Tech. for Measuring QoE". Book Series: Lecture Notes in Comp. Science Ed. Springer ISSN 0302-9743 Pag 216-227, May 2010. [Online] Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/5028804658914365>.
- [7] K. Pahlavan and A. H. Levesque, "Distributed Contention-Based Access Control" en el *Wireless Information Networks*, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley-Interscience, 2005, pp. 557.
- [8] S. Garg and M. Kappes. "An experimental study of throughput for UDP and VoIP traffic in IEEE 802.11b networks", en *IEEE Wireless Communications and Network Conference (WCNC)*, New Orleans, USA, 2003, pp. 1748–1753.
- [9] A. Suárez, et al, "Automatic resumption of streaming sessions over WiFi using JADE" en *IAENG International Journal of Computer Science*, 2007
- [10] Wifi Alliance, (2017). WiFi Direct [Online]. Disponible en: <http://www.wi-fi.org/discover-wi-fi/wi-fi-direct>.
- [11] G. R. Hiertz, et al. "IEEE 802.11s: The WLAN Mesh Standard", en *IEEE Wireless Communications*, 2010. © IEEE. doi: [10.1109/MWC.2010.5416357](https://doi.org/10.1109/MWC.2010.5416357).

- [12] A. Zanella, et al. "Internet of Things for Smart Cities", en IEEE Internet of Things Journal, 2014 © IEEE. doi: 10.1109/JIOT.2014.2306328
- [13] M. Guayaquil, (2014). Internet Gratis. [Online]. Disponible en: <http://www.guayaquil.gob.ec/internet-gratis>
- [14] M. Arranz, et al. "Behavior of UDP-based applications over IEEE 802.11 wireless networks". en 12<sup>th</sup> IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), San Diego, USA, 2001, volume 2, pp. F-72-F-77.
- [15] ITU-T Recommendation G.114. One-way transmission time, may 2003.
- [16] M. S. Gast. 802.11 Wireless Networks. The definitive Guide. O'Reilly, 2002.
- [17] A. F. da Conceicao and F. Kon. "Adaptacao de fluxos continuos UDP sobre redes IEEE 802.11b", en el Workshop de comunicacao sem fio e computacao movel (WCSF), Sao Lourenco-MG, Brasil, 2003, pp. 91-101.
- [18] J. D. Sterman. "System Dynamics in Action" en el libro Business Dynamics, McGraw-Hill, 2000, pp. 41-79.
- [19] K. Pahlavan and A. H. Levesque, "Topology, Medium Access, and Performance" en el Wireless Information Networks, 2<sup>nd</sup> ed. Wiley-Interscience, 2005, pp. 501-572.
- [20] Wifi Alliance, (2017). WiFi Certification [Online]. Disponible en: <http://www.wi-fi.org/>
- [21] V. Cea. "Desarrollo de Experiencias de Laboratorio en torno al Protocolo IEEE802.11b". Tesis de Ingeniero Electrónico. Universidad Téc. F. Santa María, Valparaíso, Chile, 2004.
- [22] D. M. Marrero, "Caracterización y modelado de prestaciones en redes inalámbricas para aplicaciones con calidad de servicio", Tesis Doctoral, Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, España, 2016.
- [23] B. Nadel, (2011, Noviembre 4). Wi-Fi tethering 101: Use a smartphone as a mobile hotspot [Online]. Disponible en: <http://www.computerworld.com/article/2499772/mobile-wireless/mobile-wireless-wi-fi-tethering-101-use-a-smartphone-as-a-mobile-hotspot.html>

- [24] C. Brunner, et al, "Inter-System Handover Parameter Optimization". en Proceedings of IEEE Vehicular Technology Conference. (VTC Fall '06). Montreal, Canada, September 2006.
- [25] K. Vivian. (2014, Enero 11). "New IEEE 802.11ac™ Specification Driven by Evolving Market Need for Higher, Multi-User Throughput in Wireless LANs". [Online]. Disponible en: [http://standards.ieee.org/news/2014/ieee\\_802\\_11ac\\_ballot.html](http://standards.ieee.org/news/2014/ieee_802_11ac_ballot.html).
- [26] LAN MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, ANSI/IEEE Std 802.11, "Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications", 1999.
- [27] M. Benveniste, "Tiered Contention Multiple Access' (TCMA), a QoS-Based Distributed MAC Protocol", en Proceedings PIMRC, Lisboa, Portugal, 2002.
- [28] H. Velayos and G. Karlsson. "Techniques to reduce IEEE 802.11b handoff time", en IEEE International Conference on Communications (ICC), 2004, pp.3844-3848.
- [29] I. Ramani and S. Savage. "SyncScan: Practical fast handoff for 802.11 infrastructure networks", en IEEE INFOCOM, Miami, FL, 2005, pp. 751-760.
- [30] T. M. Abdulmonem, et al, "Adaptive Antenna for Wi-Fi System Enhancement", Potentials IEEE, vol. 30, no. 1, pp 30-34, Enero, 2011.
- [31] T. Friedman. (2009, Noviembre). "RFC 3611. RTP Control Protocol Extended Reports (RTCP XR)" [Online]. Disponible en: <https://tools.ietf.org/html/rfc3611#section-4.7.1>.
- [32] P. O. Flaithearta, et al, "A QoS enabled WiFi AP", en Network Operations and Management Symposium (NOMS), 2014 © IEEE. doi: 10.1109/NOMS.2014.6838396.
- [33] R. Chavez-Santiago, et al, "VoIP transmission in Wi-Fi networks with partially-overlapped channels", en Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2015 © IEEE. doi: 10.1109/WCNC.2015.7127493.
- [34] M. Molina, "Análisis de la utilización de la calidad de servicio (QoS) en redes de nueva generación (NGN) en el Ecuador", Tesis de Maestría, Fac. Ing. Elect. Y Comp. ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 2013.

- [35] K. Yamaguchi, et al, "A routing based on OLSR with traffic load balancing and QoS for Wi-Fi mesh network", en International Conference on Information Networking (ICOIN), 2016 © IEEE. doi: 10.1109/ICOIN.2016.7427096.
- [36] C. Hepner, et al, "Influence of Processing Delays on the VoIP Performance for IEEE 802.11s Multihop Wireless Mesh Networks: Comparison of ns-3 Network Simulations with Hardware Measurements" en Proceedings of the 9th EAI International Conference on Simulation Tools and Techniques, 2016, pp. 86-95.
- [37] C. Olariu, et al, "A delay-aware packet prioritisation mechanism for voice over IP in Wireless Mesh Networks", en Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2016 © IEEE. doi: 10.1109/WCNC.2016.7564956.
- [38] Quality of Experience Requirements for IPTV Services, ITU FG-IPTV.DOC-0814, 2007.
- [39] S. Winkler, and P. Mohandas, "The Evolution of Video Quality Measurement: from PSNR to Hybrid Metrics," IEEE Trans. Broadcasting, Vol. 54, N. 3, pp. 660-668, Diciembre, 2008.
- [40] IneoQuest, "MDI / QoE for IPTV and VoIP Quality of Experience for Media over IP", unpublished.
- [41] Ruckus. (2013). "The World's Most Scalable 3GPP WLAN Platform", [Online]. Disponible en: <https://www.ruckuswireless.com/es/products/system-management-control/smartzone/smartcell-gateway>
- [42] A. Wahab, et al, "Performance analysis of VoIP client with integrated encryption module", en 1st International Conference on Communications, Signal Processing, and their Applications (ICCSPA), 2013 © IEEE. doi: 10.1109/ICCSPA.2013.6487300.
- [43] D. Jat, et al. "Throughput Performance of an IP Differentiated-Services Net. for Video Comm". PCM 2008, Springer Verlag, 2008 pp. 218-227.
- [44] G. A. Pérez. (2008). Series de Tiempo [Online]. Disponible en: <http://eio.usc.es/eipc1/BASE/BASEMASTER/FORMULARIOS-PHP/MATERIALESMATER/Tema1.pdf>

[45] J. D. Sterman. "S-Shaped Growth: Epidemics, Innovation Diffusion, and the Growth of New Products" en el libro *Business Dynamics*, McGraw-Hill, 2000, pp. 332-347.