



DESARROLLO DE UN MODELO DE TRÁFICO DE UNA RED DOMÓTICA  
BASADA EN TECNOLOGÍA POWER LINE COMMUNICATIONS EN BANDA  
ANGOSTA.

**AUTORES**

LIZETH DAYANE CORTÉS HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
DICIEMBRE 2018**



DESARROLLO DE UN MODELO DE TRÁFICO DE UNA RED DOMÓTICA  
BASADA EN TECNOLOGÍA POWER LINE COMMUNICATIONS EN BANDA  
ANGOSTA.

**AUTORES**

LIZETH DAYANE CORTÉS HERNÁNDEZ

**Trabajo para optar al título de  
Magister en Ingeniería Electrónica**

**DIRECTOR**

JOHN JAIRO PADILLA AGUILAR  
Doctor en Ingeniería Telemática  
Docente Interno

**GRUPO DE INVESTIGACIÓN – INTELEC**

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA SECCIONAL BUCARAMANGA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS  
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA  
BUCARAMANGA  
DICIEMBRE 2018**

Nota de Aceptación

---

---

---

---

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## **DEDICATORIA**

Alcanzar esta meta que un día anhele en mi vida, me hace sentir honrada, orgullosa y llena de satisfacción, por tal motivo y con mucha alegría quiero dedicar este trabajo de maestría a Dios, quien supo guiarme en este proceso, darme la fuerza y sabiduría necesarias para seguir adelante y no desfallecer frente a las dificultades que se presentaron durante el camino, porque “con él todo, sin él nada”. Hoy puedo decir ¡misión cumplida!

## **AGRADECIMIENTOS**

A la primera persona que le quiero agradecer, es a mi director de proyecto Jhon Jairo Padilla, que sin su ayuda y conocimiento no hubiese sido posible realizar este proyecto. Gracias por su paciencia, dedicación, palabras de aliento en los momentos que más lo necesite y por su apoyo incondicional, para que pudiera cumplir con esta meta.

A mi esposo, que fue el mejor regalo que Dios me pudo dar. Gracias por cambiar mi vida, por su apoyo incondicional, su comprensión en los días que no podía dedicarle tiempo, por sus palabras de motivación que permitieron que no desmayara en el intento, por sus consejos y recomendaciones para que sea cada día mejor en todos los ámbitos. Eres mi orgullo y mi modelo a seguir. ¡Gracias por tanto!

A mis padres, gracias por haberme dado la vida, por enseñarme con su ejemplo los valores de perseverancia, disciplina, constancia y sacrificio. Gracias por todos los esfuerzos realizados, para que nunca me faltara nada y poder formar en mí, la persona y profesional que soy hoy en día. Dios los bendiga siempre.

A mis profesores, que siempre estuvieron compartiéndome sus conocimientos y experiencias en las diferentes áreas, aportando a mi desarrollo profesional, en especial quiero agradecer, al profesor Alex Monclou a quien respeto y admiro por su gran profesionalismo, humildad y cualidades humanas a la hora de ejercer su labor docente.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO .....</b>	<b>10</b>
<b>GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE .....</b>	<b>11</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>12</b>
<b>PUBLICACIONES .....</b>	<b>14</b>
<b>1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>15</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	15
1.2. JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3. OBJETIVOS.....	17
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	17
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
<b>2. MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>19</b>
2.1. REDES POWER LINE COMMUNICATIONS.....	19
2.1.1. DEFINICIÓN.....	19
2.1.2. FUNCIONAMIENTO.....	20
2.1.3. PLC DOMICILIARIA.....	21
2.1.4. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA PLC.....	21
2.1.5. COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA PLC.....	22
<b>2.2. NORMATIVIDAD DE LOS SISTEMAS PLC DE BANDA ANGOSTA .....</b>	<b>24</b>
2.2.1. CENELEC.....	24
2.2.2. PROTOCOLO X.10.....	25
<b>2.3. ANÁLISIS DE RED.....</b>	<b>29</b>
2.3.1. ANÁLISIS DE SEÑALES.....	29
2.3.2. INGENIERÍA DE TRÁFICO.....	32
2.3.3. SOFTWARE PARA MEDICIÓN DE TRÁFICO EN REDES.....	39
<b>2.4. EQUIPOS DOMÓTICOS INSTEON.....</b>	<b>40</b>
2.4.1. EQUIPOS INSTEON X.10 EN EL COMERCIO.....	41
2.4.2. SOFTWARE PARA EL MANEJO DE EQUIPOS INSTEON.....	42
<b>2.5. COMANDOS X.10 EN EQUIPOS INSTEON.....</b>	<b>45</b>
<b>2.6. APLICACIONES DE LAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES.....</b>	<b>46</b>
2.6.1. HOGARES INTELIGENTES (SMART HOME).....	46
2.6.2. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES (SMART GRID).....	47
<b>2.7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE REDES.....</b>	<b>47</b>
2.7.1. DISTRIBUCIÓN DE POISSON.....	48
2.7.2. ALOHA PURO.....	53
<b>2.8. TRABAJOS RELACIONADOS.....</b>	<b>55</b>
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>59</b>
3.1. CONSTRUCCIÓN DE LA RED DOMÓTICA X.10.....	61

3.1.1.	EQUIPOS .....	61
3.1.2.	CONFIGURACIÓN .....	63
3.1.3.	TOPOLOGÍA .....	64
<b>3.2.</b>	<b>RED DOMÓTICA ANTE TRÁFICO DE COMANDOS X.10.....</b>	<b>65</b>
3.2.1.	SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE MEDICIÓN. ....	65
3.2.2.	INTERVALO DE TIEMPO MÍNIMO ENTRE COMANDOS.....	66
3.2.3.	DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y TOMA DE MUESTRAS. ....	66
3.2.4.	ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED.....	68
<b>3.3.</b>	<b>PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL MODELO TEÓRICO.....</b>	<b>70</b>
3.3.1.	CÁLCULO DEL THROUGHPUT DEL SISTEMA .....	74
3.3.2.	VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO PARA EL THROUGHPUT.....	75
<b><u>4.</u></b>	<b><u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....</u></b>	<b><u>83</u></b>
<b><u>5.</u></b>	<b><u>CONCLUSIONES .....</u></b>	<b><u>86</u></b>
<b><u>6.</u></b>	<b><u>RECOMENDACIONES .....</u></b>	<b><u>88</u></b>
<b><u>7.</u></b>	<b><u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</u></b>	<b><u>89</u></b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema de aplicación PLC en una casa.....	19
Figura 2. Red PLC domiciliaria. ....	21
Figura 3. Componentes Básicos de un sistema PLC. ....	22
Figura 4. Salida del modulador PLC. ....	23
Figura 5. Filtro pasa altos ideal a 300Hz. ....	24
Figura 6. Bandas de transmisión, según la norma CENELEC EN 50065. ....	25
Figura 7. Sincronización de los pulsos con AC. ....	27
Figura 8. Códigos de transmisión.....	28
Figura 9. Ingeniería de tráfico. ....	33
Figura 10. Tráfico ofrecido en transmisión de datos.....	37
Figura 11. Pantallazo de Serial Monitor Device.....	40
Figura 12. Equipos Insteon X.10.....	41
Figura 13. Insteon Serial Modem Interface. ....	41
Figura 14. Pantallazo <i>HouseLinc</i> de <i>Insteon</i> . ....	42
Figura 15. Pantallazo del software Docklight. ....	44
Figura 16. Datos X.10 en Insteon.....	45
Figura 17. Proceso de Poisson. ....	49
Figura 18. Diagrama de estados de transición en Poisson. ....	50
Figura 19. Tráfico transportado usando Aloha puro. ....	54
Figura 20. Interruptores y botoneras. ....	61
Figura 21. Tomas eléctricas.....	62
Figura 22. Centro de control. ....	62
Figura 23. HouseLinc de Insteon instalado. ....	63
Figura 24. Topología física.....	64
Figura 25. Montaje real implementado. ....	65
Figura 26. Probabilidad de éxito con los datos medidos. ....	69
Figura 27. Proceso de llegadas de Poisson. ....	71
Figura 28. Diagrama de estados del tráfico de una red domótica X.10. ....	71
Figura 29. Comparación del tráfico experimental y el tráfico teórico ....	81
Figura 30. Comparación del throughput experimental y teórico. ....	82
Figura 31. Comparación de la probabilidad de éxito experimental y teórica.....	84

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Toma de datos de tráfico en paq/seg.	67
Tabla 2. Cálculo de la probabilidad de éxito estimada.	69
Tabla 3. Prueba de bondad Kolmogorov-Smirnov para la probabilidad de éxito.	70
Tabla 4. Cálculo del tráfico teórico.	76
Tabla 5. Valores experimentales del número de paquetes transmitidos con diferente número de dispositivos.	77
Tabla 6. Cálculo del tráfico exitoso experimental.	78
Tabla 7. Cálculo del tráfico ofrecido.	79
Tabla 8. Resultados experimentales y teóricos.	80
Tabla 9. Prueba Chi Cuadrado.	81

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** DESARROLLO DE UN MODELO DE TRÁFICO DE UNA RED DOMÓTICA BASADA EN TECNOLOGÍA POWER LINE COMMUNICATIONS EN BANDA ANGOSTA.

**AUTOR(ES):** Lizeth Dayane Cortés Hernández

**PROGRAMA:** Maestría en Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR(A):** Jhon Jairo Padilla Aguilar

### RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolla un modelo de tráfico para redes de datos domóticas en banda angosta sobre las líneas de potencia eléctrica con el fin de poder planificar este tipo de redes y dimensionar el apropiado límite de dispositivos domóticos que un usuario puede usar sobre ellas. Para conseguir el objetivo se construye inicialmente un modelo de red usando equipos INSTEON, después se realiza un estudio de estrategias de medición, con lo cual se diseña y ejecuta una toma de datos experimentales. Mediante el análisis de los datos medidos se propone un modelo de tráfico, el cual es verificado y validado mediante argumentación matemática. Como resultado del trabajo de investigación se obtuvo un modelo matemático del comportamiento de las redes domóticas. Esto se logró usando la teoría de distribución de Poisson, siendo este modelo el que más se ajustaba a este tipo de redes, lo cual se validó mediante el uso de pruebas de bondad del ajuste, y de la comparación final del modelo con los resultados obtenidos de manera experimental. Este resultado permite predecir el funcionamiento de una red de datos que funcione con comandos X.10 para una cantidad específica de dispositivos antes de realizar la instalación real de los equipos.

### PALABRAS CLAVE:

Redes, domótica, modelo, tráfico, Poisson, Insteon, protocolo X.10, PLC.

## **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A TRAFFIC MODEL OF A HOME AUTOMATION NETWORK BASED ON POWER LINE COMMUNICATIONS TECHNOLOGY IN NARROW BAND.

**AUTHOR(S):** Lizeth Dayane Cortés Hernández

**FACULTY:** Maestría en Ingeniería Electrónica

**DIRECTOR:** Jhon Jairo Padilla Aguilar

### **ABSTRACT**

In the present work, a traffic model for domotic data networks in narrowband over electric power lines is developed in order to be able to plan this type of networks and to obtain the appropriate limit of domotic devices that a user can use on them. To achieve the objective, a network model is initially built using INSTEON equipment, then a study of measurement strategies is carried out, with which an experimental data collection is designed and executed. Through the analysis of the measured data a traffic model is proposed, which is verified and validated by mathematical argumentation. As a result of the research work, a mathematical model of the behavior of domotic networks was obtained. This was achieved using the Poisson distribution theory, this model being the one that best suited this type of networks, which was validated through the use of goodness-of-fit tests, and the final comparison of the model with the results obtained experimentally. This result allows to predict the operation of a data network that works with X.10 commands for a specific number of devices before performing the actual installation of the equipment.

### **KEYWORDS:**

Networks, Home automation, model, traffic, Poisson, Insteon, X.10 protocol, PLC.

## INTRODUCCIÓN

El Internet de las cosas (*Internet of Things-IoT*), en la actualidad, es un tema de especial interés para la comunidad científica. IoT surgió debido al cambio tecnológico que hubo al pasar de IPv4 a IPv6, pues con IPv6 se permite tener un número muy elevado de direcciones ( $2^{128}$ ). Por esta razón se impulsó la idea de poner direcciones IP a objetos que usamos en la vida cotidiana tales como electrodomésticos e incluso ropa. La domótica es una de las áreas con mayor desarrollo en IoT, a través de servicios que brindan comodidad a sus usuarios entre los que se destacan el monitoreo y control de los aparatos eléctricos de un hogar. Una de las tecnologías más utilizadas en la Domótica son las redes PLC (*Power Line Communication*), la cual utiliza las instalaciones eléctricas ya existentes en todas las construcciones (redes de baja tensión) para controlar dispositivos como controladores de luces, sensores de apertura de puertas, motores para cortinas, televisores, etc.

A su vez, algunas redes PLC de baja tensión en banda angosta usan comúnmente el protocolo X.10 [1], el cual usa técnicas que permiten enviar pequeños comandos para el control de las funciones básicas de algunos dispositivos, como lo son, el encendido o apagado de los mismos. Aunque hoy en día se habla bastante del uso de nuevas tecnologías para banda ancha con redes PLC de baja tensión, es claro que las redes más ampliamente difundidas en la actualidad son las redes PLC de banda angosta debido a que llevan más tiempo de desarrollo y ya tienen mayor madurez tecnológica. Sin embargo, a pesar de llevar varios años en el mercado, son pocos los estudios que se han realizado sobre el modelado de tráfico, pues la mayoría de estudios se han centrado en el rendimiento de la capa física, especialmente las señales y cómo las afecta el ruido, la interferencia y las distancias.

El presente trabajo de investigación pretende desarrollar un modelo matemático del tráfico de una red domótica basada en redes PLC de banda angosta y se presenta organizado de la siguiente manera: En el capítulo 1 se hace una descripción general de la investigación realizada. En el capítulo 2 se presenta un marco teórico que abarca los temas necesarios para comprender los procedimientos realizados en el desarrollo de la investigación. En el capítulo 3 se muestra el desarrollo por secciones acordes con la ejecución directa de los objetivos planteados en el primer capítulo. Al final se plantean los resultados obtenidos, las conclusiones y las recomendaciones.

## PUBLICACIONES

Los resultados parciales de este proyecto fueron presentados a manera de ponencia en el congreso de la IEEE ANDESCON 2018 mediante la presentación del siguiente artículo.

Cortés Lizeth y Padilla Jhon. "TRAFFIC MODEL FOR NARROW BAND POWER LINE COMMUNICATIONS NETWORKS". IEEE ANDESCON 2018 Cali-Colombia.  
**ISBN: 978-1-5386-8371-2.**

Este evento se llevó a cabo en la ciudad de Cali entre el 22 y 24 de agosto del año 2018.

## 1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN.

### 1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Las telecomunicaciones en la actualidad se han abierto a la existencia de múltiples tecnologías, una de ellas es la que se encarga de las comunicaciones a través del cable eléctrico, tecnología conocida como *Power Line Communication* (PLC) y en el caso de las redes de banda ancha como *Broadband Power Line* (BPL) [1]. La cobertura de estas redes puede llegar a superar la que logran las tecnologías tradicionales, tales como WiFi y ethernet, redes híbridas HFC o ADSL, las cuales no ofrecen servicio en todas las zonas de una población, a diferencia del servicio ofrecido por empresas que se encargan de la provisión de electricidad.

Poco a poco en Colombia se ha venido implementando servicios PLC con algunos equipos domóticos, o creación de puntos de acceso a Internet dentro del hogar, sin embargo, no se tiene certeza del funcionamiento ante redes de alto tráfico ya que la mayoría de módems PLC en el mercado se ofrecen en pares para ser utilizados en redes punto a punto.

Es inevitable pensar que en un futuro cercano la exigencia de las redes PLC va a ser mayor ya que la tendencia es que todos los equipos de un hogar o empresa tengan conexión a red, se construirán redes inteligentes e incluso se colocaran equipos que permitan que la red eléctrica sea también inteligente informándole al usuario el consumo eléctrico y estrategias de ahorro energético. Dado que el flujo de datos a futuro será mayor con respecto a lo que se tiene hoy en día, es difícil garantizar un correcto funcionamiento de las redes si ellas no soportan dicho tráfico.

En el caso de redes para el hogar, resulta útil poseer modelos de tráfico para redes domóticas en operación normal y conocer las características de los equipos que

intervienen en dicha red, para de esta manera, poder pronosticar el funcionamiento de la red en operación de alto tráfico.

En la actualidad existen muchos trabajos [2] [3] [4] [5] enfocados a verificar el rendimiento de las redes PLC en banda angosta, probando distancias y sometiendo las redes a ruidos eléctricos, pero son pocos los que han saturado las redes con múltiples equipos para modelar el funcionamiento de dicha red ante diferentes niveles de tráfico.

Esta ausencia de análisis y modelos de tráfico es un problema científico que está latente. Realizar mediciones de parámetros de tráfico sometiendo una red PLC a diferentes cantidades de dispositivos, ayudará a crear un modelo de tráfico para las redes PLC en banda angosta, el cual permitirá hacer un dimensionamiento y análisis más completo de las redes que utilizan las líneas de potencia eléctrica de baja tensión.

## **1.2. JUSTIFICACIÓN.**

Al realizar una búsqueda de artículos y proyectos sobre redes PLC se puede identificar que se han realizado muchos proyectos de investigación [2] [3] [4] [5] enfocados en verificar características de rendimiento con los cuales se ha comprobado el éxito que se obtiene en cuanto a transmisión de datos punto a punto usando dicha tecnología.

En la actualidad ya se ha superado la etapa de comprobación de funcionamiento y uno de los usos más típicos de los equipos PLC es en el campo de la domótica. Un tema que poco se ha tenido en cuenta es de cómo será el comportamiento de estas redes cuando existan muchos dispositivos domóticos de este tipo.

La Universidad Pontificia Bolivariana través del grupo de investigación INTELEC y su línea de investigación en telecomunicaciones, pretende contribuir a través de proyectos como el presente, en el análisis del comportamiento de las redes domóticas que utilicen tecnología PLC, ante la presencia de tráfico producido por la cantidad de equipos conectados a ella. Con el resultado de este estudio se pretenderá tener como producto el planteamiento de un modelo de tráfico PLC en banda angosta, que permita predecir el rendimiento de la red dependiendo de la cantidad de dispositivos a utilizarse antes de realizar el montaje.

El desarrollo de proyectos como estos permitirá el fortalecimiento en las investigaciones en el área de las telecomunicaciones y del desarrollo del Internet de las cosas, ofreciendo un conocimiento que aporta al desarrollo científico de un producto utilizado en la actualidad a nivel local, regional, nacional e internacional.

### **1.3. OBJETIVOS.**

#### ***1.3.1. OBJETIVO GENERAL.***

Desarrollar un modelo de tráfico para redes de datos domóticas en banda angosta sobre las líneas de potencia eléctrica el cual permita planificar la red y dimensionar el apropiado límite de dispositivos domóticos del usuario.

#### ***1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.***

- Construir una red domótica de pruebas basada en tecnologías PLC (Power Line Communications) en banda angosta, que permita la conexión de múltiples dispositivos capaces de generar tráfico de datos sobre la red.

- Estimar el comportamiento de una red domótica PLC en banda angosta, al usar diferentes cantidades de dispositivos conectados a ella, mediante la realización de mediciones de parámetros de tráfico.
- Desarrollar un modelo de tráfico sobre redes PLC en banda angosta que permita predecir su rendimiento ante una cantidad de usuarios con un comportamiento típico de aplicaciones domóticas.

## 2. MARCO TEÓRICO.

### 2.1. REDES POWER LINE COMMUNICATIONS.

#### 2.1.1. DEFINICIÓN.

El Power Line Communications (PLC) o comunicación por la línea eléctrica [2], es un sistema de transmisión de información y datos que usa como medio la red eléctrica de baja tensión (ReBat). La señal de datos PLC comparte la línea eléctrica con la señal eléctrica, aunque hay que destacar que utiliza un bajo ancho de banda.

Figura 1. Esquema de aplicación PLC en una casa.



Fuente: [http://farm4.static.flickr.com/3622/3640495765\\_4fb56326c4.jpg](http://farm4.static.flickr.com/3622/3640495765_4fb56326c4.jpg)

Esta tecnología usa el cableado de red eléctrico doméstico como medio de transmisión para la información a través de señales. Esto es muy utilizado en la automatización y domotización de hogares como, por ejemplo, el control remoto de iluminación y electrodomésticos, todo esto sin necesidad de instalar cableado adicional. La tecnología PLC ha adquirido mayor relevancia, debido al uso de la

infraestructura más compleja y proliferada que se ha creado en todos los lugares y hogares del mundo llamada red de suministro eléctrico.

A diferencia de otras tecnologías que también tienen y presentan gran extensión y cobertura, la red de suministro eléctrico tiene como característica, el hecho de estar presente en casi todos los rincones del mundo donde exista civilización, aun en regiones en donde no se cuenta ni con líneas telefónicas, ni con acceso a internet; entre otros servicios.

El PLC es considerado hoy en día una tecnología probada, viable y competitiva frente a otras opciones como el cable, apoyada por las mayores empresas de energía y fabricantes de equipos a nivel mundial, con una gran contribución al desarrollo a la sociedad y a la reducción del margen tecnológico en los países en vía de desarrollo.

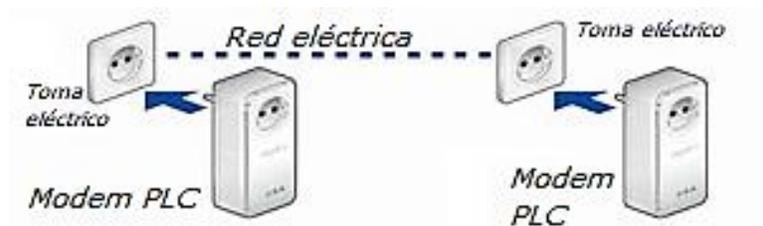
### **2.1.2. FUNCIONAMIENTO.**

Para lograr la comunicación es necesario el uso de módems PLC [6], que brindan una interfaz para la transmisión y para la recepción de datos de la red eléctrica. Estos módems son diseñados de acuerdo a los parámetros de la red, puesto que ésta red eléctrica fue creada para el envío de energía y no de datos. Esta razón hace que PLC sea una alternativa no favorable debido a las pérdidas producidas por atenuaciones inherentes al cableado eléctrico y a las interferencias por diferentes tipos de ruido. Dentro de estas clases de ruido existen dos agrupaciones definidas por su duración; ruido de fondo generalizado y ruido impulsivo [3]. Las redes PLC trabajan en frecuencias por encima de los 60Hz usados para la transmisión eléctrica [6].

### 2.1.3. PLC DOMICILIARIA.

Usada comúnmente para el control de dispositivos domiciliarios y conectividad dentro de una casa. Emplea un modem PLC con el cual se extrae la señal de datos; este usa el cableado interno de la casa para conducir la señal de energía de 60Hz. Ver la Figura 2.

Figura 2. Red PLC domiciliaria.



Fuente: Autor.

Gracias a que el cableado interno de una casa no es extenso, se puede hacer uso de estas frecuencias ya que las pérdidas por atenuación a altas frecuencias se ven compensadas por la corta distancia de los cables. La señal de energía pasa por un filtro de tipo pasa bajos y la señal de datos atraviesa un filtro de tipo pasa altos para ser demodulada ofreciendo conectividad entre los dispositivos PLC domiciliarios.

### 2.1.4. CARACTERÍSTICAS DE UN SISTEMA PLC.

Entre las principales características de un sistema *Power Line Communications* se tienen [6]:

- No es necesario de alguna remodelación de los inmuebles para poder disfrutar es esta tecnología, al utilizar la propia red eléctrica para la transmisión de datos y voz.

- No tiene los inconvenientes de otros sistemas como en el caso del ADSL o sistemas tradicionales de TV por cable los cuales no llegan en muchos casos hasta el usuario final, ya que la red eléctrica permite llegar a cualquier punto del mundo.
- La conexión se mantiene de manera continua durante las 24 horas del día.
- La instalación es rápida y sencilla tanto para los proveedores como para los mismos clientes, pues solo requiere tener dos modems en los extremos de comunicación conectados a la red eléctrica.
- En banda angosta su principal uso es en la domótica.

### **2.1.5. COMPONENTES BÁSICOS DE UN SISTEMA PLC.**

En la Figura 3 se puede apreciar de manera general los componentes básicos de un sistema PLC [6].

Figura 3. Componentes Básicos de un sistema PLC.



Fuente: Autor.

A continuación, se describe cada uno de ellos:

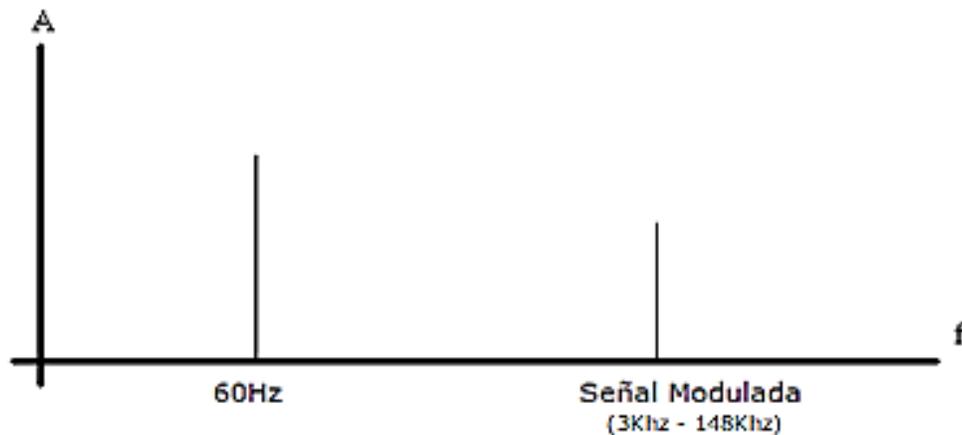
a) Red Eléctrica:

Es el medio de transmisión utilizado por los sistemas PLC. En las redes de baja tensión en el caso de Colombia transmite la energía eléctrica a un voltaje promedio de 120VAC con una frecuencia de 60Hz.

b) Modulador PLC:

Es el encargado de la transmisión de datos usando la red eléctrica. Básicamente se encarga de utilizar una señal portadora y hacer que sobre ella se altere alguno de sus parámetros por otro valor de acuerdo con las variaciones de la señal mensaje que se desea transmitir. En un sistema PLC se modula la señal mensaje para separarla en frecuencia lo más posible de la corriente eléctrica que se encuentra a 60 Hz. Ver la Figura 4.

Figura 4. Salida del modulador PLC.



Fuente: Autor.

c) Demodulador PLC:

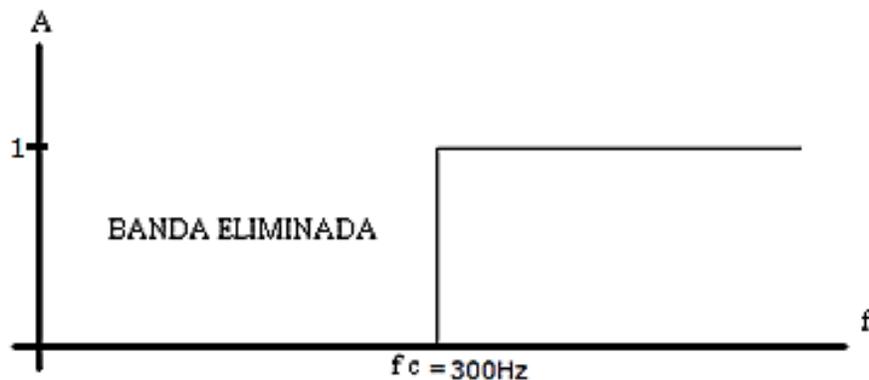
Permite la recepción de datos a través de la red eléctrica.

La demodulación es utilizada para recuperar la información que es transportada por una señal modulada previamente. Este término es el opuesto a modulación.

d) Filtro pasa altos:

En las redes PLC, el cable eléctrico además de la señal de 60Hz, lleva la información entre los dispositivos. Para bloquear la señal de 60Hz, se efectúa una configuración de filtros pasa altos localizados en el receptor que se encargan de dejar pasar el rango de frecuencias comprendidas entre los 300Hz en adelante, tal y como se visualiza en la Figura 5.

Figura 5. Filtro pasa altos ideal a 300Hz.



Fuente: Autor.

## 2.2. NORMATIVIDAD DE LOS SISTEMAS PLC DE BANDA ANGOSTA

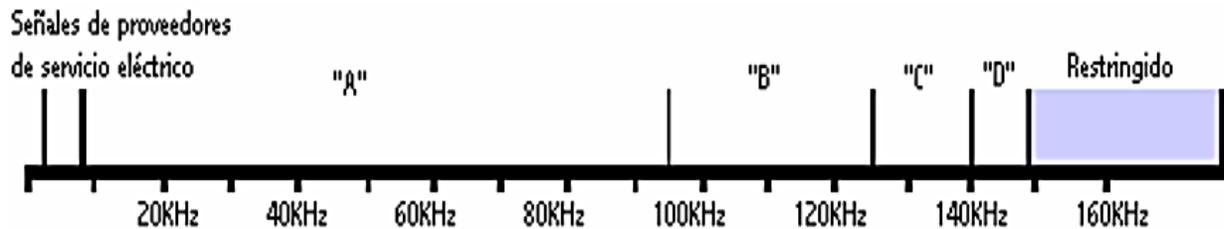
Entre las principales normatividades sobre las cuales se rigen los sistemas PLC, se destacan:

### 2.2.1. CENELEC.

Los sistemas PLC iniciales basaban su teoría en banda angosta y se formalizó bajo la norma europea CENELEC EN 50065 denominada "Señalización en instalaciones eléctricas de bajo voltaje" [7]. En esta norma se asignó la banda de 3 a 148.5Khz

como rango principal de operación para esta tecnología. Dicha banda de frecuencia se encuentra dividida en cuatro sub bandas, que se encuentran representadas en la Figura 6.

Figura 6. Bandas de transmisión, según la norma CENELEC EN 50065.



Fuente: <http://revistas.fuac.edu.co/index.php/clepsidra/article/view/208/194>

En las frecuencias inferiores a la Banda A se localizan todas las señales provenientes de los proveedores del servicio de energía eléctrica, los cuales usan normalmente señales de 50Hz para el caso de Europa y en el caso colombiano se usan 60Hz que es la frecuencia generalmente utilizada en América.

Dentro de la Banda A se encuentran muchas aplicaciones de utilidad eléctrica. La Banda B usada para la transmisión de señales de seguridad y privacidad. La Banda C usada para aplicaciones sobre los usuarios, ya sea en la vivienda o en la industria.

### **2.2.2. PROTOCOLO X.10.**

El protocolo X.10 [8] es utilizado para la transmisión y para la recepción de información en banda angosta a través de la red eléctrica.

Esta tecnología fue creada entre los años 1976 y 1978 entre varias empresas, entre las cuales se destaca Pico Electronics Ltd en Glenrothes Escocia y fue utilizada como parte de trabajos de investigación realizados en unos proyectos llamados Series X.

Entre las ventajas de usar esta tecnología se encuentran:

- Instalación rápida y sencilla de equipos de automaticen de hogares evitando cableados externos adicionales.
- Reducción de costos al comparar el uso de otras tecnologías que requerirían instalaciones adicionales.
- Compatibilidad al ser un estándar de gran antigüedad.

Entre las desventajas se tienen:

- Velocidades de transmisión y anchos de banda pequeños.  
Por este motivo no es utilizado en la actualidad para transmisiones de banda ancha en Internet. Sin embargo, es una tecnología ideal aun para dispositivos domóticos ya que funcionan con comandos de pequeño tamaño.
- Comunicación en la mayoría de casos unidireccional.  
La mayoría de los dispositivos X.10 utilizan comunicación unidireccional, sin embargo, se consiguen bidireccionales. En caso de querer construir una red donde se requiera conocer el estado de encendido o apagado de los dispositivos, se requiere verificar que los equipos instalados posean comunicación bidireccional.

### 2.2.2.1 Transmisión en X.10.

#### a) Representación de los bits.

Para realizar una transmisión X.10 se utilizan señales de 120KHz, las cuales se inyectan sobre la red eléctrica y se sincronizan con los cruces por cero en la señal de 60Hz.

Los transmisores y receptores deben ser sincronizados para detectar exactamente los cruces por cero y de esta manera saber el dato transmitido.

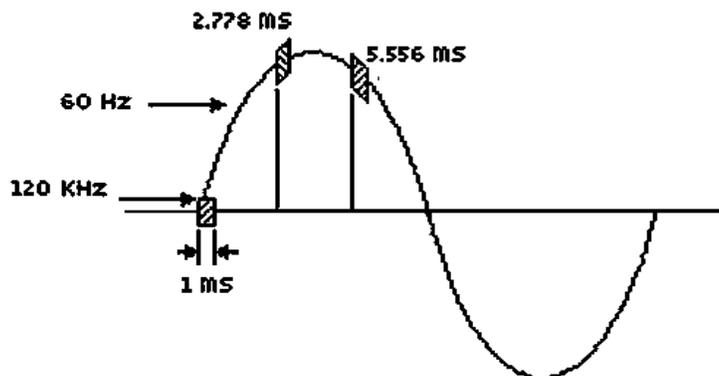
1 lógico = señal de 120KHz

0 lógico = Ausencia de señal de 120KHz

Para el caso de sistemas trifásicos se requiere que la señal se transmita aparte de los cruces por 0, a los 1/3 y 2/3 del semiperiodo, haciendo que coincida con los cruces por ceros de las otras fases eléctricas como se observa en la Figura 7.

El hecho de transmitir en el cruce por cero garantiza la menor cantidad de ruido posible en el momento de la transmisión.

Figura 7. Sincronización de los pulsos con AC.

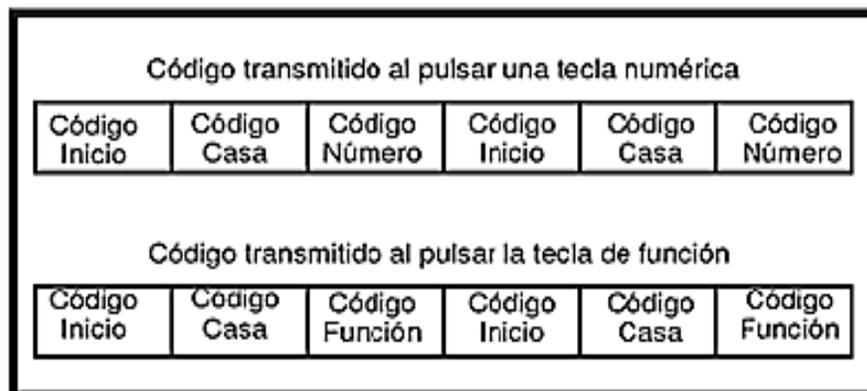


Fuente: Autor.

b) Direccionamiento.

Los dispositivos X.10 poseen dos direcciones, una de ellas es la dirección de la casa y la otra es una dirección particular que identifica el dispositivo. Una transmisión típica basada en el protocolo X.10 utiliza diferentes tipos de códigos de transmisión, que incluyen, un código de salida o de inicio que representa que se va a enviar una solicitud, un código de casa que representa la red y las direcciones del dispositivo, un código número que representa un valor a transmitir y finalmente un código de función el cual se encarga de dar la orden (Encender, Apagar, Aumento de Intensidad, etc.). Lo anterior se puede apreciar en la Figura 8.

Figura 8. Códigos de transmisión.



Fuente: Autor.

En el protocolo X.10 se utilizan códigos redundantes, en los cuales cada bit es enviado dos veces, primero con su valor original y de manera inmediata se envía otro con el valor negado, esto se hace para garantizar una mejor transmisión y verificación de la detección y corrección de errores debido a que las redes eléctricas no son el medio más eficiente para la transmisión de datos.

## **2.3. ANÁLISIS DE RED.**

### **2.3.1. ANÁLISIS DE SEÑALES.**

Para realizar el análisis de señales se requiere tener en cuenta factores como lo son el ruido, las interferencias y las atenuaciones las cuales se describen a continuación.

#### **2.3.1.1 Ruido.**

Se entiende por la palabra ruido [9] a toda señal que no es deseada pero desafortunadamente que se encuentra superpuesta o al lado de una señal útil. Se puede suponer, por ejemplo, si en un ambiente se encuentra un locutor dando una información y a la vez alguien coloca música, para una persona que se encuentra interesada en la información, puede considerar la música como ruido o viceversa, para aquel que desee escuchar la canción considerará que el hombre hablando es un generador de ruido. Todo esto se puede sintetizar en que existen señales deseables e indeseables, considerando ruido la señal indeseable.

Existen dos clases de ruido, el correlacionado y el no correlacionado. El ruido correlacionado implica una relación entre la señal y el ruido, el cual no es relevante en este estudio ya que se desea averiguar es el funcionamiento de una red de datos, no la generación de ruidos desde el origen.

El ruido no correlacionado está presente dentro de un medio de transmisión y es independiente a la señal transmitida. A continuación, se presentan los diferentes tipos de ruidos correlacionados que pueden afectar directamente transmisiones de datos por la red eléctrica.

- El ruido hecho por el hombre: es aquel que no es natural, como por ejemplo el producido por las chispas de automóviles, los conmutadores en los motores eléctricos y en los equipos de conmutación de potencia. Dentro de esta gama se encuentran los “ruidos impulsivos” el cual es un ruido con una intensidad que aumenta bruscamente durante una señal impulso. La duración de este impulso es pequeña si se compara con el tiempo que transcurre entre un impulso y otro. Según varios autores este tipo de ruido influye en la transmisión de datos PLC, se debe básicamente a grandes inducciones electromagnéticas consecuencias de conmutaciones eléctricas. Una forma de generarla intencionalmente es mediante el encendido y apagado continuo de equipos eléctricos.
- El ruido térmico: es totalmente eléctrico y es producido por la energía interna que posee la materia. Este ruido se encuentra relacionado con el movimiento browniano de las partículas, esto produce una energía que se difunde a manera de calor. En la mayoría de casos el calor producido causa movimiento de partículas que se comportan como interferencia eléctrica. Nyquist, en sus trabajos dentro de los laboratorios Bell, encontró en el año 1928 que la interferencia eléctrica se relacionaba directamente con la alteración de electrones provenientes de “energía browniana”, y estableció la base para el cálculo.

Con lo anterior se determinó que el ruido térmico:

- ✓ Es ruido aleatorio dado que los electrones agitados por la energía browniana tienen un movimiento aleatorio.
- ✓ Es ruido blanco, por analogía con la luz blanca, al estar presente en todas las frecuencias
- ✓ Es ruido resistivo, porque depende lineal y directamente de la resistividad del material.

El ruido térmico recibe el nombre alternativo de ruido plano, porque su respuesta es plana.

- El ruido de disparo: es todo aquel que es causado por la llegada aleatoria de portadoras en el elemento de salida de un equipo electrónico. Fue visualizado por primera vez en la corriente del ánodo de los amplificadores de tubo de vacío por W. Schottky en 1918. También se le conoció como ruido de transistor.
- Ruido de tiempo de tránsito: Cualquier cambio de corriente o voltajes conforme pasa desde la entrada hasta la salida de un equipo electrónico produce una variación irregular en la calidad original de la red eléctrica. Este tipo de señales son consideradas ruido y se les denomina transitorias.

#### **2.3.1.2 Interferencia.**

Se produce interferencia [10] cuando varias ondas o señales provenientes de diferentes fuentes, coinciden en frecuencia y llegan a estar en el mismo medio de transmisión por el que se propagan.

#### **2.3.1.3 Atenuación.**

Un factor importante a tener en cuenta en la transmisión de información sobre la red eléctrica son los factores de atenuación [11]. Una dificultad en estos casos es la variabilidad de la impedancia. La impedancia representa la influencia de los parámetros distribuidos entre los conductores y en los equipos de la red, que afectan el flujo de corriente que porta los datos, es decir, se oponen al paso de corriente a través del medio conductor. Se encuentra compuesta por una componente real llamada resistencia y una componente imaginaria llamada reactancia generalmente

provocada por efectos inductivos o capacitivos dentro de la red provocados por bobinas y condensadores y en la mayoría de los casos por efectos parásitos.

### **2.3.2. INGENIERÍA DE TRÁFICO.**

#### **2.3.2.1 Teletráfico.**

##### a) Definición

Teletráfico [12] es la aplicación de la teoría de probabilidades utilizada en la solución de problemas enfocados a la planeación, evaluación del rendimiento, operación y mantenimiento de los sistemas de telecomunicaciones.

La teoría de teletráfico puede verse como una disciplina de planificación donde se hace uso de herramientas como procesos estocásticos, teoría de colas, simulación por computador y mediciones de tráfico, tomadas de la disciplina de investigación. En áreas como las redes de datos y de voz se aplica el concepto de teletráfico, sin embargo, las herramientas que este ofrece son aplicables a otras áreas del conocimiento tales como: tráfico de carreteras, tráfico aéreo, manufactura, líneas de ensamble, distribución, almacenamiento y todo tipo de sistemas de servicio.

##### b) Objetivo del teletráfico

La finalidad del teletráfico es poder diseñar sistemas que requieran costo mínimo y tengan una capacidad tal que puedan cumplir eficientemente con un grado de servicio pre-definido y de esta manera satisfagan la demanda de tráfico futura. Para lograr lo anterior, es fundamental obtener modelos que representen eficientemente la relación entre calidad de servicio, tráfico ofrecido y los recursos de red, tal como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Ingeniería de tráfico.



Fuente: Autor.

Además, la ingeniería de teletráfico especifica métodos para controlar que el grado real de servicio cumpla con los requisitos, y también especifica acciones de emergencia cuando los sistemas están sobrecargados o se producen fallas técnicas. Esto requiere métodos para pronosticar la demanda (por ejemplo, basado en mediciones de tráfico), métodos para calcular la capacidad de los sistemas, y especificación de medidas cuantitativas para el grado de servicio.

Al aplicar la teoría en la práctica, se produce una serie de problemas de decisión relativos a arreglos tanto a corto como a largo plazo.

Las decisiones a corto plazo incluyen, por ejemplo, la determinación del número de canales en una estación base de una red celular, el número de operadores en un centro de llamadas, el número de carriles abiertos en el supermercado y la asignación de prioridades a los trabajos en una computadora sistema.

Las decisiones a largo plazo incluyen decisiones sobre el desarrollo y la extensión de redes de datos y telecomunicaciones, extensión de cables, enlaces de radio, establecimiento de una nueva estación base, etc.

La aplicación de la teoría para el diseño de nuevos sistemas puede ayudar a comparar diferentes soluciones y así eliminar las que no son óptimas en una etapa temprana sin tener que implementar prototipos.

### **2.3.2.2 Tráfico.**

El objetivo al planificar un sistema de telecomunicaciones es ajustar la cantidad de equipos para que las variaciones en la demanda de uso de los dispositivos para que puedan satisfacerse sin inconvenientes notables, mientras que los costos de las instalaciones sean lo más pequeños posible.

En este caso, la ingeniería de teletráfico, se ocupa de la optimización de la estructura de la red y el ajuste de la cantidad de equipos que dependen de la cantidad de tráfico.

En la teoría de teletráfico, generalmente usamos la palabra tráfico para indicar la intensidad del tráfico, es decir, el tráfico por unidad de tiempo. El término tráfico proviene del italiano y significa negocio. Según ITU-T (1993) [13] tenemos la siguiente definición:

La intensidad del tráfico instantáneo en un conjunto de recursos es la cantidad de recursos ocupados en un instante dado.

Dependiendo de la tecnología considerada, el conjunto de recursos corresponde a un grupo de servidores, líneas, circuitos, canales, troncales, computadoras, etc. Los

momentos estadísticos (valor medio, varianza) de la intensidad del tráfico pueden calcularse para un período dado de tiempo  $T$ .

La unidad de intensidad de tráfico es el Erlang y es adimensional, de manera abreviada se denota E o Erl. Fue dado en 1946 en honor al matemático Danes A.K. Erlang fundador de la teoría de tráfico telefónico.

### **2.3.2.3 Tráfico ofrecido.**

En los modelos matemáticos usamos el concepto de tráfico ofrecido que se define de las dos maneras siguientes que son equivalentes:

- El tráfico ofrecido es el tráfico realizado cuando no se rechazan los intentos de llamada debido a la falta de capacidad, es decir, cuando la cantidad de servidores es ilimitada.
- El tráfico ofrecido es el número promedio de intentos de llamada por tiempo medio de espera:

$$A = \lambda * S \quad (1)$$

donde  $\lambda$  es la intensidad de la llamada, es decir, el número medio de llamadas ofrecidas por unidad de tiempo, y  $S$  es el tiempo medio del servicio.

Los parámetros deben especificarse usando la misma unidad de tiempo. De esta ecuación se ve que la unidad de tráfico no tiene dimensión.

El tráfico ofrecido es una cantidad teórica que no se puede medir [12]. Solo se puede estimar a partir del tráfico transportado. Una definición de tráfico ofrecido debe ser independiente del sistema real.

#### **2.3.2.4 Tráfico ofrecido en sistemas de transmisión.**

En los sistemas de transmisión de datos no hablamos de tiempos de servicio, sino de las demandas de transmisión que pueden ser denominados como trabajos o tareas puestas en colas para darles servicio. Un trabajo o tarea puede ser, por ejemplo, un paquete de datos de L unidades (por ejemplo, bits o bytes).

La capacidad del sistema  $\varphi$ , la velocidad de señalización de datos, se mide en unidades por segundo (por ejemplo, bits / segundo).

El tiempo de servicio para tal trabajo, es decir, el tiempo de servicio, se encuentra dado por:

$$t_s = \frac{L}{\varphi} \quad (2)$$

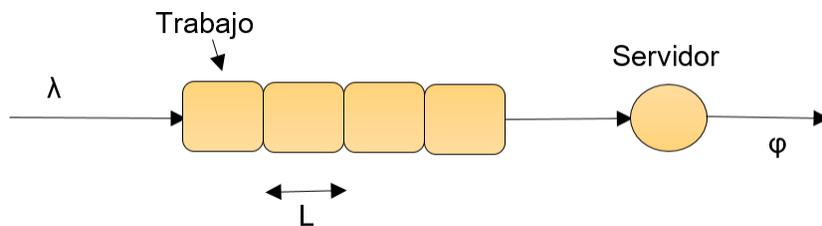
Su unidad de medida es la unidad de tiempo (por ejemplo, segundos), es decir, dependientes de  $\varphi$ .

Si en promedio se atienden  $\lambda$  trabajos por unidad de tiempo, entonces la utilización del sistema (tráfico en Erlangs) es:

$$\rho = \lambda t_s = \lambda \frac{L}{\varphi} \quad (3)$$

En la Figura 10 se aprecia un esquema representativo del tráfico ofrecido en sistemas de transmisión de datos.

Figura 10. Tráfico ofrecido en transmisión de datos.



Fuente: Autor.

### 2.3.2.5 Congestión.

Las redes de comunicaciones poseen recursos limitados que pueden manejarse estadísticamente dado que todos los usuarios no utilizan los canales de transmisión al mismo tiempo y sus comunicaciones no duran lo mismo.

La congestión se lleva a cabo cuando el número total de comunicaciones que se transmiten en un mismo medio de transmisión, comienza a acercarse al límite de la capacidad máxima de dicho canal. Esto trae como consecuencia que disminuya la calidad en la prestación del servicio.

### 2.3.2.6 Parámetros de evaluación de tráfico.

Los parámetros de evaluación de tráfico más representativos son:

- a. Ancho de banda [14]: Se define como la medición de la cantidad total de datos o bits, que pueden pasar por el medio de transmisión (sea cable coaxial, par trenzado, fibra óptica o aire, entre otros.) de tal forma se puede afirmar que mientras mayor sea el ancho de banda se obtendrá la información en el receptor

de manera más rápida, y a su vez se tiene mayor posibilidad de transmisión de datos en un mismo periodo de tiempo, esto sin contar con la distancia máxima de cobertura. La unidad para este tipo de parámetro está dada en bit por segundo (bps).

Para medir el ancho de banda se debe tener en cuenta la capacidad de transmisión bits por un medio en relación con el tiempo que los bits demoran en llegar al receptor.

- b. Throughput (tasa real efectiva) [14]: Es la cantidad efectiva y real de datos por unidad de tiempo que se entrega mediante la conexión de dos puntos en una red en determinado periodo de tiempo. Se diferencia del ancho de banda por que el dato obtenido es en tiempo real. El throughput trabaja con las mismas unidades que el ancho de banda (bits por segundo) o bytes por segundo. Para su cálculo solo se tiene en cuenta la carga efectiva del paquete.
  
- c. Latencia [14]: Este parámetro corresponde al intervalo de tiempo que transcurre desde el instante en que un determinado paquete se envía (desde el transmisor) hasta que todos los usuarios (receptores) lo reciben correctamente. La latencia se puede definir entonces como el retardo experimentado por los datos cuando viajan desde un host a otro, el tiempo que ese demoran en recorrer la conexión de la red que les permite comunicarse en un solo sentido (descarga o downstream), o tiempo que demora el paquete en ir desde el equipo que se comporta como transmisor hasta el equipo que se comporta como receptor. Esta medida se da en unidades de tiempo.
  
- d. Probabilidades de bloqueo y de retardo [13]: Estas probabilidades son parámetros de la ingeniería de tráfico que indican que posibilidad tiene la existencia de bloqueos o de retardos en una red. De allí depende el grado de servicio ofrecido.

### **2.3.3. SOFTWARE PARA MEDICIÓN DE TRÁFICO EN REDES.**

Para la medición del tráfico en redes se pueden utilizar las siguientes herramientas computacionales.

#### **2.3.3.1 Serial Monitor Device.**

*Serial Monitor Device* [15] es un *software* desarrollado por la empresa HHD SOFTWARE, y permite que sus usuarios controlen y analicen el tráfico de información a través del puerto serial de un equipo.

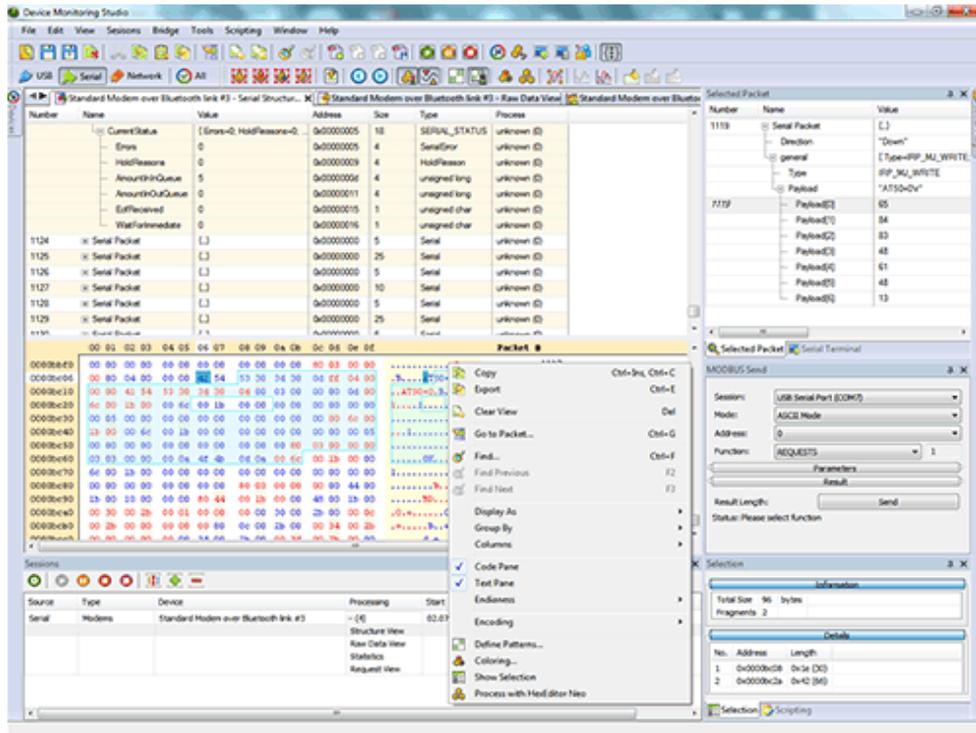
*Serial Monitor* es una herramienta invaluable para todos que analicen *software* y *hardware* que trabajen usando el puerto serie. El conjunto completo de funciones y la funcionalidad máxima del producto ahorra mucho tiempo mientras trabaja con datos y protocolos de puerto serie.

Permite capturar, visualizar, analizar, grabar y reproducir todos los datos del puerto serie intercambiados entre la aplicación de Windows y el dispositivo serie. Se puede utilizar con éxito en el desarrollo de aplicaciones para el control de dispositivos o el desarrollo de *hardware* con puertos seriales y ofrece una potente plataforma para una codificación, prueba y optimización efectivas.

Es compatible con protocolos personalizados. Y puede ser usado como un rastreador de puerto serie para capturar y analizar cualquier paquete de datos de protocolo en serie de acuerdo con sus propias definiciones de protocolo.

En la Figura 11 se visualiza un pantallazo de la vista general del *software*.

Figura 11. Pantallazo de Serial Monitor Device.



Fuente: <https://www.hhdsoftware.com/serial-monitor/screenshots>

*Free Serial Port Monitor* es la versión de evaluación gratuita descargable de la página oficial del producto.

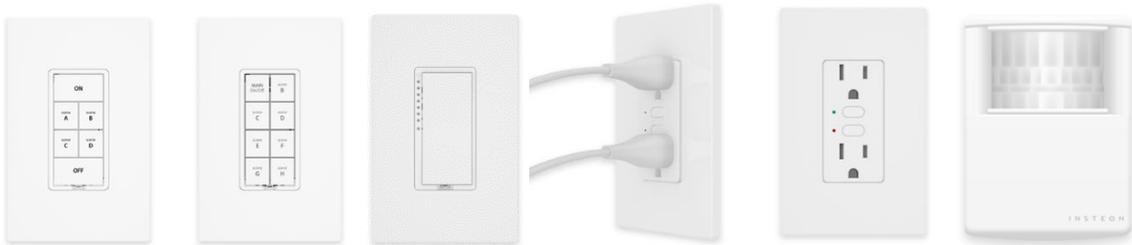
## 2.4. EQUIPOS DOMÓTICOS INSTEON.

INSTEON es una empresa que fabrica productos para el control y la supervisión de hogares y oficinas. Ofrece tecnologías de automatización que utilizan tanto la red eléctrica mediante X.10 como señales inalámbricas usando Wifi para comunicar sus dispositivos entre sí.

### 2.4.1. EQUIPOS INSTEON X.10 EN EL COMERCIO.

Entre los productos que ofrece Insteon [16] que trabajan a través de la red eléctrica usando el protocolo X.10 se destacan teclados de pared, Interruptores sencillos o dimerizables y Tomacorrientes, sensores, etc.

Figura 12. Equipos Insteon X.10.



Fuente: <http://www.insteon.mx/productos/>

Para el control y configuración se ofrecen diferentes tipos de módems entre los cuales se destaca el *INSTEON SERIAL MODEM INTERFACE* que permiten la conexión a sistemas de cómputo a través del puerto serial.

Figura 13. Insteon Serial Modem Interface.



Fuente: <https://www.smarthome.com/powerlinc-modem-insteon-2413s-serial-interface-dual-band.html>

## 2.4.2. SOFTWARE PARA EL MANEJO DE EQUIPOS INSTEON.

Para el manejo y configuración de los equipos *Insteon* existen dos programas recomendados dentro de los mismos manuales de la marca, estos son: *HouseLinc* y *Docklighth*.

### 2.4.2.1 HOUSELINC DE INSTEON.

*HouseLinc* [16] es un programa desarrollado para administrar a través de un PC el funcionamiento de las redes construidas con dispositivos de la marca INSTEON.

A través de *HouseLinc* se pueden enlazar los dispositivos entre ellos mediante un modem PLC, el cual posee un puerto serial para la conexión con equipos de Cómputo. Esto permite controlar el encendido o apagado de los elementos de la red domótica a través de un PC de manera directa o de manera programada para crear eventos temporizados.

En la Figura 14 se puede visualizar un pantallazo del software *houseLinc*

Figura 14. Pantallazo *HouseLinc* de *Insteon*.



Fuente: <https://www.smarthome.com/houselinc.html>.

Entre las características generales de *HouseLinc* se pueden destacar:

- Controla y programa sus dispositivos INSTEON desde su computadora.
- Crea escenas en minutos: no es necesario programar o vincular individualmente cada dispositivo.
- Activa temporizadores y eventos siempre que su computadora permanezca encendida con *HouseLinc* ejecutándose.
- Mantiene registros de todos los enlaces y pistas cuando cada dispositivo / escena está activado o desactivado.
- Realiza funciones avanzadas para sus dispositivos INSTEON que pueden no estar disponibles a través de la programación manual (Varía de acuerdo al dispositivo).
- Comprueba automáticamente si hay actualizaciones en la interfaz de *HouseLinc*.
- Garantía de dos años para el hardware.

Para su correcto funcionamiento requiere de la Interfaz de computadora INSTEON, también conocida como *PowerLinc Modem* o PLM y de un computador con el sistema operativo Windows 2000, XP, Vista (32 bits o 64 bits), Windows 7 (32 o 64 bits), Windows 8 (32 o 64 bits) o Windows 10 (32 o 64 bits).

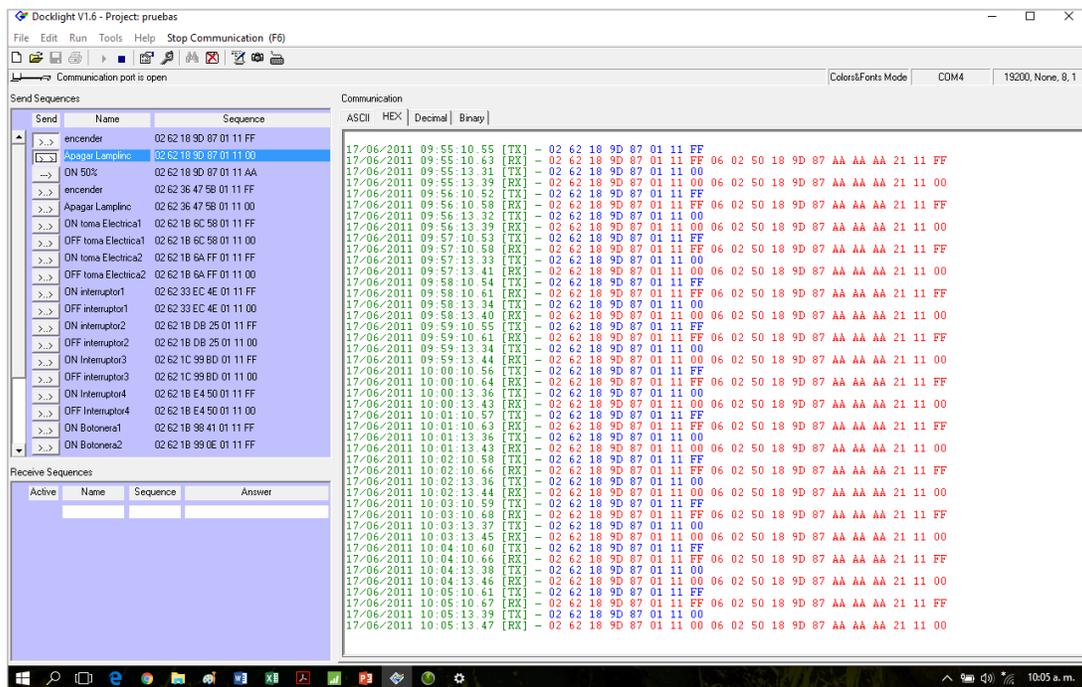
El computador debe poseer mínimo 15 MB de espacio libre en el disco y 128 MB de RAM, sin embargo, para el proyecto se recomienda el equipo más potente posible para evitar latencias provocadas por el equipo. Es decir que si existen retardos sean provocados por el tráfico mas no por baja velocidad en el equipo de cómputo. No sobra agregar a lo anterior los dispositivos INSTEON adicionales para poderlos controlar.

## 2.4.2.2 DOCKLIGHT.

*Docklight* [17] es un software con protocolos de transmisiones seriales, permite enviar secuencias de comandos definidas por el usuario de acuerdo con el protocolo utilizado y puede reaccionar a las secuencias entrantes.

Usando *Docklight* se hace posible simular el comportamiento de un dispositivo de comunicación en serie, que es particularmente útil para generar condiciones de prueba que son difíciles de reproducir con el dispositivo original (por ejemplo, condiciones de tráfico extremas).

Figura 15. Pantallazo del software Docklight.



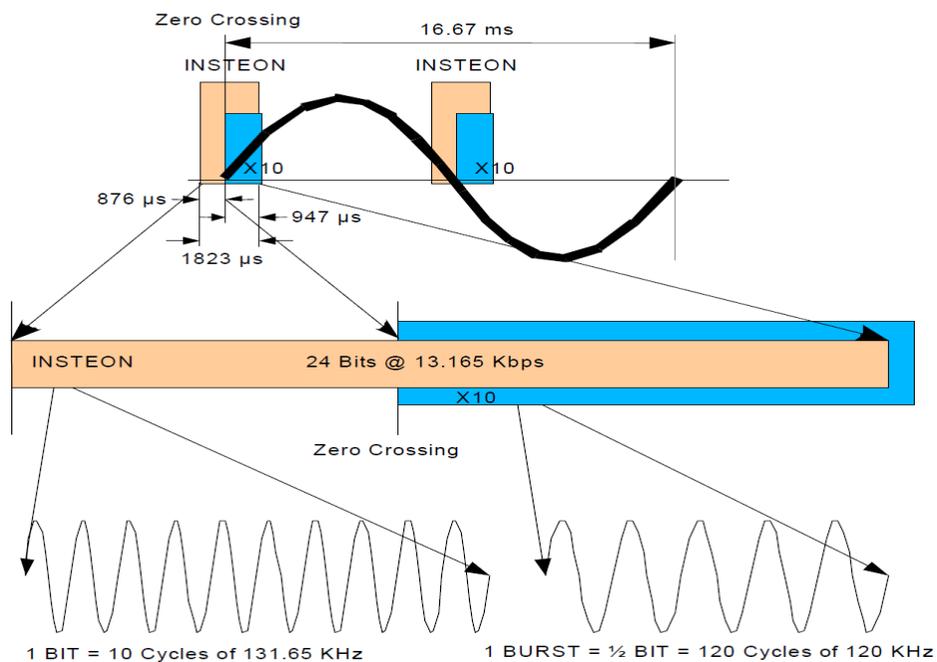
Fuente: Autor.

## 2.5. COMANDOS X.10 EN EQUIPOS INSTEON.

Todos los paquetes de los equipos *powerline* INSTEON contienen 24 bits [16]. Cada bit se representa por una señal de 131.65KHz de Portadora y sucede cada 0,01667seg que representa el periodo de una señal de 60Hz. Es decir, un paquete Insteon de 24 bits toma 24 ciclos de 0,01667seg para un total de 0,40008 seg.

El entorno de la red de baja tensión de 120 voltios es conocido por tener un ruido incontrolado, en gran medida producido por picos de corriente causados por motores, atenuadores e iluminación con bombillos fluorescente. Estos ruidos son mínimos durante el tiempo en que la corriente en la línea eléctrica invierte la dirección, este tiempo es conocido como el cruce por línea eléctrica. Por lo tanto, los paquetes INSTEON son transmitido durante el tiempo de silencio de cruce por cero, como se muestra en la figura siguiente.

Figura 16. Datos X.10 en Insteon.



Fuente: Insteon developer`s guide 2nd edition

## **2.6. APLICACIONES DE LAS REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES.**

### **2.6.1. HOGARES INTELIGENTES (SMART HOME).**

Una casa inteligente [18] son los hogares diseñados con el uso de tecnología avanzada. Todo se encuentra integrado y tiene como finalidad la comodidad total de quienes la habitan.

La aplicación final es resultado de la mezcla de los sistemas eléctricos, el uso de la electrónica y del manejo eficiente de la informática

Estos hogares inteligentes son capaces de distribuir información entre los electrodomésticos, la red eléctrica y demás dispositivos de la casa, permitiendo un control automático o manual a través de una computadora, haciendo posible por ejemplo ordenar el cierre de cortinas, controlar la calefacción, entre otras actividades. Mediante el uso de esta tecnología el usuario puede interactuar con la vivienda, incluso a través de un celular.

Este tipo de viviendas inteligentes ofrecen la opción de realizar actividades sin la necesidad de que el residente esté presente como:

- Abrir y cerrar puertas, ventanas y portones eléctricos.
- Controlar los sistemas de alarmas.
- Lograr el encendido y apagado de luces y aparatos eléctricos.
- Manejar la temperatura de la vivienda.
- Visualizar imágenes en vivo del hogar y escuchar lo que allí suceda.

Todo esto permitirá tener a los usuarios seguridad propia del hogar y de cada uno de los integrantes de la vivienda, Ahorro de energía al tener el control de los electrodomésticos y probablemente datos del consumo de los mismos. Control a

gran distancia por medio del acceso a la red de Internet que permitirá la intercomunicación con los dispositivos que existan dentro de la vivienda, y muchas cosas más que permitan los diferentes desarrollos y aplicaciones avanzadas.

### **2.6.2. REDES ELÉCTRICAS INTELIGENTES (SMART GRID).**

Una red eléctrica inteligente [19] es un tipo de automatización de la red de distribución eléctrica que tiene como fin ofrecer servicios a los clientes tales como:

- Aumentar la fiabilidad y calidad del servicio de energía eléctrica.
- Facilitar sistemas para la optimización del consumo eléctrico.
- Contribuir a la sostenibilidad ambiental, mediante la integración al sistema de servicios generadores de energía alternativa.
- Mejorar la eficiencia en la distribución de los flujos de energía.

### **2.7. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE REDES.**

El tráfico en las redes [12] tiene como unidad de medida el Erlang, la cual representa la cantidad de dispositivos por unidad de tiempo. La fórmula de Erlang's B se basa en un modelo compuesto por tres componentes básicos:

- Estructura: sistemas con N canales idénticos.
- Estrategia: Por cada servicio aceptado se utiliza un canal.
- Tráfico: El comportamiento es muy similar a los procesos de Poisson.

Como el caso de estudio es precisamente el tráfico, se procesa a analizar la distribución de Poisson.

## **2.7.1. DISTRIBUCIÓN DE POISSON.**

### **2.7.1.1 DEFINICIÓN.**

En un experimento de Poisson se pueden obtener observaciones para una variable aleatoria  $X$ , la cual representa un número específico de ocurrencias de un evento en particular, algunos ejemplos de estos eventos son las llamadas telefónicas por hora que se recibe en una oficina, fallos de una máquina durante un mes, etc.

Un experimento de Poisson se deriva del proceso de Poisson y tiene las siguientes propiedades:

Propiedades del proceso de Poisson [20]

1. El número de resultados ocurridos en un intervalo o región específica es independiente al número que ocurre en otro intervalo de tiempo o región del espacio disjunta. De esta forma vemos que el proceso de Poisson no tiene memoria.
2. La probabilidad de que ocurra un resultado en un intervalo de tiempo corto o en una región pequeña es proporcional a la longitud del intervalo o al tamaño de la región, y no depende del número de resultados que ocurren fuera de este intervalo de tiempo o región.
3. La probabilidad de que ocurra más de un resultado en tal intervalo de tiempo corto o que caiga en tal región pequeña es insignificante.

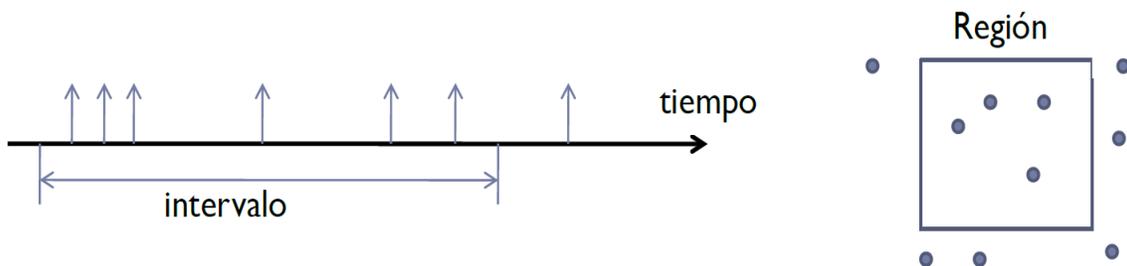
El número  $X$  de resultados que suceden durante un experimento de Poisson se llama variable aleatoria de Poisson y su distribución de probabilidad se llama

distribución de Poisson. El número medio de resultados se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$\mu = \lambda t \quad (4)$$

Donde  $t$  es el intervalo de tiempo, distancia, área o volumen específicos de interés (ver Figura 17). Como las probabilidades dependen de  $\lambda$ , denotaremos la tasa de ocurrencia de los resultados con  $p(x; \lambda t)$ . El intervalo de tiempo utilizado para dicho experimento puede ser de cualquier duración, como un segundo, un día, una semana, un mes o un año [20].

Figura 17. Proceso de Poisson.



Fuente: <http://jpadilla.docentes.upbbga.edu.co/Estadistica/7-Distribuciones%20de%20probabilidad%20discretas.pdf>

La siguiente fórmula se utiliza para calcular probabilidades de Poisson.

$$p(x; \lambda t) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^x}{x!} \quad \text{para } i = 0, 1, 2, \dots \quad (5)$$

donde  $\lambda$  es el número promedio de resultados por unidad de tiempo, distancia, área o volumen y  $e = 2.71828\dots$

### 2.7.1.2 APLICACIONES.

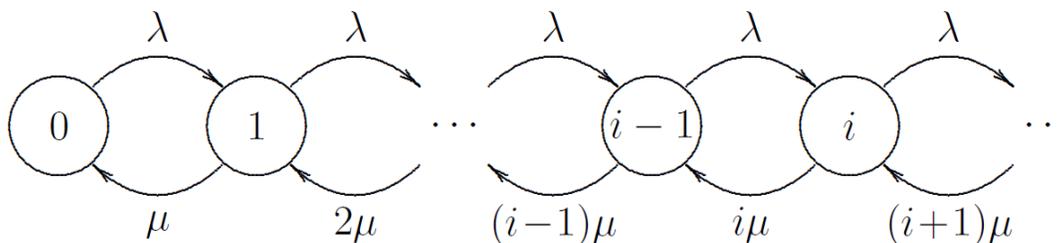
Los siguientes son ejemplos de situaciones reales que pueden utilizar la distribución de Poisson. [21]

- Solicitudes de documentos en un servidor de Internet.
- Número de accidentes de tránsito en una zona específica.
- Goles anotados en un partido de futbol
- El número de coches que pasan por una autopista.
- Las oportunidades para que las empresas ajusten los precios de nómina.
- La cantidad de clientes que entran a una tienda.
- La llegada de personas a una fila de espera.
- La llegada de innovaciones en investigación y desarrollo.
- La solicitud de llamadas telefónicas en conmutadores.

### 2.7.1.3 PROCESOS DE LLEGADA

Si suponemos que un proceso de llegada es un proceso de Poisson y que los tiempos de espera son exponencialmente distribuidos, podemos decir que el número de canales es infinito y que nunca se observa congestión. Esto se puede representar mediante diagramas de estados tal y como se observa en la Figura 18.

Figura 18. Diagrama de estados de transición en Poisson.



Fuente: [12]

Donde:

- La variable  $i$  representa el número de canales del sistema.
- La variable  $\mu$  representa la tasa de servicio de cada estado.
- Los estados se representan como un círculo en el diagrama de transición de estados.
- La transición es representada por flechas de llegada y de salida.
- Una llegada hace que el sistema pase al estado siguiente y una salida hace que el sistema pase al estado anterior.
- Las transiciones solo ocurren entre estados vecinos.
- El estado se encuentra en equilibrio estadístico, es decir, estará en el estado  $i$  una porción de tiempo  $p(i)$ .
- $P(i)$  es la probabilidad de observar el sistema en el estado  $i$  en un instante de tiempo aleatorio.
- Cuando el sistema se encuentra en el estado  $i$ , saltará  $\lambda$  veces al estado siguiente y saltará  $\mu_i$  veces el por unidad de tiempo al estado anterior.
- EL sistema tiene falta de memoria, es decir, no depende de estados anteriores sino de un estado actual.

Las ecuaciones que describen los estados bajo el equilibrio estadístico son las ecuaciones de nodo y de corte los cuales se describen a continuación:

### **Ecuaciones de nodo:**

Usadas cuando el número de transiciones de llegada por unidad de tiempo es igual al número de transiciones de salida.

$p(i)$  equivale a la proporción de tiempo que el proceso pasa por el estado  $i$

Por lo tanto se puede decir que el número de saltos desde el estado 0 al estado 1 es  $\lambda * p(0)$  y el número de saltos desde el estado 1 al estado 0 es  $\mu * p(1)$ .

Con lo anterior se tiene la primera ecuación para el estado cero:

$$\lambda p(0) = \mu p(1) \quad \text{para } i = 0 \quad (6)$$

y esto se puede generalizar para los demás estados de la siguiente manera:

$$\lambda p(i - 1) + (i + 1) \mu p(i + 1) = (\lambda + i\mu)p(i) \quad \text{para } i > 0 : \quad (7)$$

Estas ecuaciones son aplicables a cualquier diagrama de transición e involucran tres estados

#### **Ecuaciones de corte:**

Existen algunos diagramas de estados bastante simples, lo que hace que las ecuaciones se simplifiquen.

Para esto se asume un corte transversal entre los estados  $i-1$  y el estado  $i$  y se logra obtener la siguiente ecuación generalizada:

$$\lambda p(i - 1) = i\mu p(i) \quad \text{para } i = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

Estas ecuaciones son aplicables solo para diagramas de estados unidimensionales, involucran solo dos estados y son más fáciles de aplicar.

Como los sistemas siempre se encontrarán en algún estado se tiene la siguiente restricción de normalización

$$\sum_{i=0}^{\infty} p(i) = 1 \quad \text{para } p(i) \geq 0 \quad (9)$$

Esta ecuación se debe usar junto con la de distribución.

Para la obtención de las probabilidades de estado usando las ecuaciones de corte se puede obtener.

$$\lambda p(0) = \mu p(1) \quad (10)$$

$$\lambda p(1) = 2\mu p(2) \quad (11)$$

$$\lambda p(2) = 3\mu p(3) \quad (12)$$

$$\lambda p(i - 2) = i\mu p(i - 1) \quad (13)$$

$$\lambda p(i - 1) = i\mu p(i) \quad (14)$$

$$\lambda p(i) = (i + 1) * \mu p(i + 1) \quad (15)$$

Estas expresiones son la base para obtener la fórmula de probabilidad de una variable de Poisson descrita en la Ecuación 5. El procedimiento completo se describe en la sección 3.3 donde se obtiene el modelo matemático usado para este proyecto.

### **2.7.2. ALOHA PURO.**

Aloha puro es un método simple de acceso a un medio de transmisión compartido entre varias estaciones. La regla a seguir para transmitir una trama consiste en transmitir cuando se necesite sin tener en cuenta si el medio está ocupado o no [22].

El modelo de rendimiento del protocolo Aloha puro es un ejemplo aplicado del proceso de Poisson Puro. Para este caso se deben tener en cuenta las siguientes características:

- Los usuarios transmiten paquetes de un tamaño de longitud fija  $h$  donde la tasa de servicio respectivamente sería  $1/h$ .
- La tasa media a la que llegan los paquetes al medio es  $\lambda$ .
- La intensidad de tráfico es  $A = \lambda/\mu = \lambda h$ .
- Los paquetes se transmitirán completamente si:

- ✓ El medio no tiene paquetes para transmitir (estado 0)
- ✓ No llegan otros paquetes en ese mismo instante (proceso de Poisson)

Dado lo anterior se tiene:

$$P_{correcto} = p(0) e^{-\lambda h} = e^{-2A} \quad (16)$$

$$A_{correcto} = AP_{correcto} = A e^{-2A} \quad (17)$$

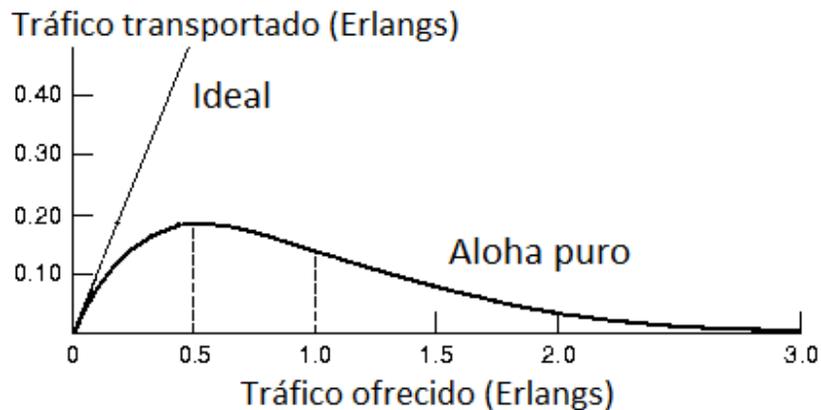
Para hallar la máxima cantidad de tráfico que se puede transportar, se deriva y se iguala a cero.

$$\frac{dA_{correcto}}{dA} = e^{-2A} (1 - 2A) \quad (18)$$

$$\max\{A_{correcto}\} = \frac{1}{2e} = 0,1839 \quad (19)$$

Esto quiere decir que se obtiene un máximo del 18% de tráfico transportado ver Figura 19.

Figura 19. Tráfico transportado usando Aloha puro.



Fuente: Autor.

## **2.8. TRABAJOS RELACIONADOS.**

A continuación, se muestra una serie de estudios realizados en cuanto al análisis de tráfico y QoS de la tecnología *Power Line Communications* (PLC).

YU-JU LIN en su artículo “***A power line communication network infrastructure for the smart home***” [23] por medio de simulación de tráfico UDP y TCP bajo programación en C y de medidas reales utilizando equipos *power line* comerciales con el protocolo *HomePlug* logra demostrar que se puede garantizar la calidad de servicio para comunicaciones en tiempo real y se puede prestar un buen servicio para aplicaciones domóticas. Este proyecto plantea una serie de escenarios bajo diferentes condiciones y cantidades de usuarios y los resultados presentados en tablas, motivan al uso de estas redes como infraestructura básica para la construcción de casas inteligentes integradas.

TSOKALO en su artículo “***Influence of the channel instability on the PLC QoS***” [5] realiza un análisis de los diferentes ruidos existentes dentro de las redes eléctricas y a partir de esta información deduce que el entorno del PLC como estructura de cables, aparatos eléctricos, etc, pueden inducir efectos especiales en la propagación de la señal de información sobre el medio de comunicación. Como resultado a la investigación se tiene que el mejor ataque a la inestabilidad de canales PLC es el estudio de los diferentes ruidos posibles en la red con el fin de construir mecanismos para evitarlos.

YICHAO JIN en su artículo “***Content centric routing in IoT networks and its integration in RPL***” [24] ante el excesivo crecimiento de la cantidad de datos transmitidos en redes de datos, propone un modelo de tecnología de enrutamiento centrado en el contenido (CCR), donde el enrutamiento se determina por el contenido. Este tipo de enrutamiento por contenidos permite organizar mejor la cantidad de bits en las tramas, reduciendo de esta manera el tráfico en la red. Como

resultado, se puede lograr una reducción significativa de la latencia. Por otra parte, las transmisiones de datos redundantes también pueden ser eliminadas después de la agrupación de datos y así se puede reducir el consumo de energía gastada en su mayor parte en la comunicación inalámbrica.

REDUAN en su artículo "***A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network***" [25] ofrece una revisión en profundidad sobre las características y los requisitos de tráfico de varias aplicaciones de redes inteligentes emergentes. Su trabajo fue más que todo investigativo y a base de argumentos y diagramas estructurales logró demostrar que las infraestructuras de comunicación en las redes actuales son bastante insuficientes y no son capaces de cumplir con los requisitos de comunicación para crear una red inteligente. Por lo tanto, los servicios públicos de todo el mundo se enfrentan ahora al reto fundamental de la búsqueda de la tecnología más adecuada que puede satisfacer sus necesidades de comunicación futuras. Con el fin de evaluar adecuadamente el paisaje de tecnologías de la comunicación, arquitecturas y protocolos, es muy importante adquirir un conocimiento detallado de las aplicaciones actuales y potenciales de la red inteligente.

FARIBA en su artículo "**Viability of Powerline Communication for the Smart Grid**" [26] para investigar sobre el funcionamiento del PLC sobre redes inteligentes, ha estudiado los requisitos de la red de comunicación en redes inteligentes. Para esto, clasificó el tráfico de datos de redes inteligentes en dos clases generales, una de ellas es el tráfico de datos en *home area network* y la otra es el tráfico de las redes de *distribution automation*. Luego, utilizando MATLAB como emulador de red, simuló una red *Powerline* y una red inteligente. Para tener una mejor comprensión de la viabilidad de *Powerline Communication* en la construcción de redes eléctricas inteligentes, considera algunas aplicaciones avanzadas de redes inteligentes en el futuro. Demuestra que la latencia y la fiabilidad son los principales requisitos a tener

en cuenta en comunicaciones de redes *Smart Grid*. En su trabajo, calculó mediante simulación, el retardo de las diferentes clases de tráfico bajo diferentes infraestructuras de red y aplicaciones de tráfico. Algo interesante es que al final propone una infraestructura de red *Powerline Communication* viable para la red de comunicaciones en redes eléctricas inteligentes.

SUK LEE en su artículo “***Performance evaluation of MAC layer of LnCP and LonWorks protocol as home networking system***” [27]. Desarrolló un modelo de simulación usando el diagrama de estado de *LonWorks* y *LnCP*, y las condiciones de simulación a través del análisis del mensaje que se genera en el hogar inteligente. Además, se evaluó el rendimiento, tales como máximo retardo de transmisión y retardo de transmisión.

STEFANO en su artículo “***Performance analysis of power line communication in industrial power distribution network***” [4] presenta un instrumento multi-protocolo para la estimación del rendimiento del PLC. La solución propuesta es capaz de caracterizar y decodificar varios sistemas PLC con diferentes modulaciones físicas utilizando una arquitectura definida por software. Para lograr esto se implementó toda una estructura de comunicación PLC en una planta industrial real con el fin de estudiar los posibles elementos dentro de una empresa que pueden afectar el PLC. Como plataforma del desarrollo se utilizó el *Labview* y las correspondientes tarjetas de adquisición de datos.

HALID HRASNICA en su artículo “***Modeling MAC Layer for Powerline Communications Networks***” [28] en primer lugar, analiza una estructura de red y un sistema PLC dentro de una red eléctrica con perturbaciones. Después de eso, define una estructura lógica de la capa MAC para trabajar bajo la línea eléctrica. Esto permite una mejor utilización de la red y permite dar garantías de calidad de servicio que puede hacer que las redes PLC sea más competitiva a otras tecnologías de acceso. Las propuestas de protocolo se consideran para hacer

posible tanto la transmisión de datos y voz con una mayor prioridad para las conexiones de voz. La capacidad de la red restante se utiliza para transmisión de datos que se espera que sea el tráfico de Internet como un servicio típico aplicado a las redes de acceso PLC. Implemento un modelo de simulación desarrollado con la herramienta YATS con la cual logró investigar la capa MAC PLC que incluye también la modelización de diferentes escenarios de perturbación. Se utilizó una red sin perturbación y una red afectada por las perturbaciones para dos diferentes variantes de protocolos MAC para medir los retrasos en el acceso y el rendimiento para diferentes tamaños de paquetes de transmisión. El aporte de este proyecto es la técnica de modelamiento de redes para diferentes tipos de tráficos.

### 3. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta la metodología usada para el desarrollo de la investigación acorde con los objetivos planteados. Como metodología para la ejecución de la investigación se desarrollaron las siguientes actividades:

#### **Actividad 1.** Construcción de la red domótica

En esta etapa se construyó una plataforma de pruebas con diferentes dispositivos domóticos usando botoneras, *switches*, enchufes, sensores de presencia, controles de cortinas, *hub* de gestión centralizada, entre otros. Esta plataforma de pruebas utilizó algunos elementos previamente construidos, tales como tableros de pruebas, pertenecientes a los laboratorios de la Facultad.

#### **Actividad 2.** Estudio de herramientas de medición.

Se estudió el *Software Serial Monitor* en su versión de prueba, utilizado para el escaneo de los parámetros de tráfico de la red domótica mediante el puerto serial, así mismo herramientas como Houselink y *Docklight* permitieron configurar los dispositivos domóticos y generar tráfico. Tanto para la medición como para la generación de tráfico se requirió de un modem PLC que permitió interconectar un computador que contiene estas herramientas a la red PLC y de esta manera realizar finalmente pruebas básicas de medición de tráfico y análisis de las tramas.

#### **Actividad 3.** Diseño de experimento.

Se estudiaron los diversos escenarios para los diferentes experimentos. Además, se determinaron los factores controlables y no controlables con sus respectivos valores, y las variables que se midieron como salida del experimento. Se aumentó la cantidad de usuarios mediante la incorporación de dispositivos domóticos y se

sometió a pruebas de transmisión de datos típicos entre dichos dispositivos con el fin de simular una red de alto tráfico de datos. Se utilizó el módem PLC para generar tráfico desde una computadora e inyectarlo a la red.

#### **Actividad 4.** Ejecución del experimento

En esta etapa se utilizaron las estrategias de medición para llevar a cabo la toma de los datos lo cual brindó información acerca del comportamiento de la red sometida a un tráfico alto de datos.

#### **Actividad 5.** Análisis de resultados.

Con la ayuda de las mediciones realizadas en la etapa anterior, se evaluó el comportamiento de la red domótica PLC al ser sometida a tráfico alto. En esta etapa se estudió el comportamiento aleatorio del tráfico y las posibles distribuciones que reflejan su comportamiento.

#### **Actividad 6.** Propuesta de un modelo de tráfico.

Con el resultado obtenido del análisis, se propuso un modelo de tráfico para predecir el rendimiento de una red PLC ante una cantidad de usuarios, usando modelos probabilísticos.

#### **Actividad 7.** Verificación del modelo

Se realizaron simulaciones utilizando el modelo obtenido para compararlas con las mediciones que se obtuvieron en el experimento de la etapa 4. Con esto se pudo verificar que el comportamiento teórico era similar a la red real.

#### **Actividad 8.** Elaboración de informe final.

Se documentó el desarrollo del trabajo y del análisis final del mismo.

### 3.1. CONSTRUCCIÓN DE LA RED DOMÓTICA X.10.

#### 3.1.1. EQUIPOS

Como primer objetivo se planteó la construcción de una red domótica de pruebas basada en tecnologías PLC (Power Line Communications) usando banda angosta. Esta red debe permitir la conexión de múltiples dispositivos con la finalidad de generar tráfico de datos sobre la red.

Se seleccionaron los equipos marca INSTEON para realizar las pruebas debido a que permiten su control mediante comandos X.10 cumpliendo así los requerimientos del proyecto.

En la Universidad Pontificia Bolivariana seccional Bucaramanga ya se cuenta con una serie de interruptores dimerizables (*switchlinc*), interruptores de solo apagado y encendido (*dimmer-on/off*) y botoneras de 6 botones (*6 botton keypad dimmer*) tal y como se observan en la Figura 20.

Figura 20. Interruptores y botoneras.



Fuente: Autor.

De igual manera se tiene tomas eléctricas (*Lamplinc dimmer-on/off* y *On/Off Outlet*), las cuales se observan en la Figura 21.

Figura 21. Tomas eléctricas.



Fuente: Autor.

Y para controlar la red se posee un centro de control *Powerlinc modem (dual band) USB*, el cual se puede visualizar en la figura Figura 22.

Figura 22. Centro de control.

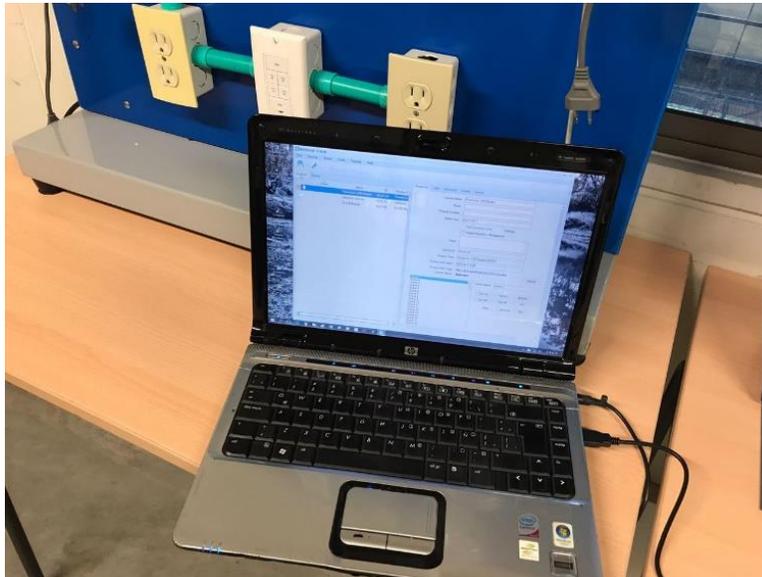


Fuente: Autor.

### 3.1.2. CONFIGURACIÓN

Para la configuración de la red se usó el *software* llamado *houseLinc* el cual permite asociar los dispositivos al modem principal.

Figura 23. HouseLinc de Insteon instalado.



Fuente: Autor.

Para la configuración se conectó el modem al computador portátil a través del puerto serial. En este caso el modem fue detectado por el puerto de comunicaciones COM4.

El siguiente paso fue iniciar la configuración de escena, lo cual en Insteon representa un ambiente de equipos domóticos dentro de una casa u oficina.

Se debe conectar uno a uno los dispositivos, para ello se procede a presionar el botón de configuración que trae cada uno de ellos y en seguida se le da la orden al software *Houselinc* que detecte y añada dispositivos.

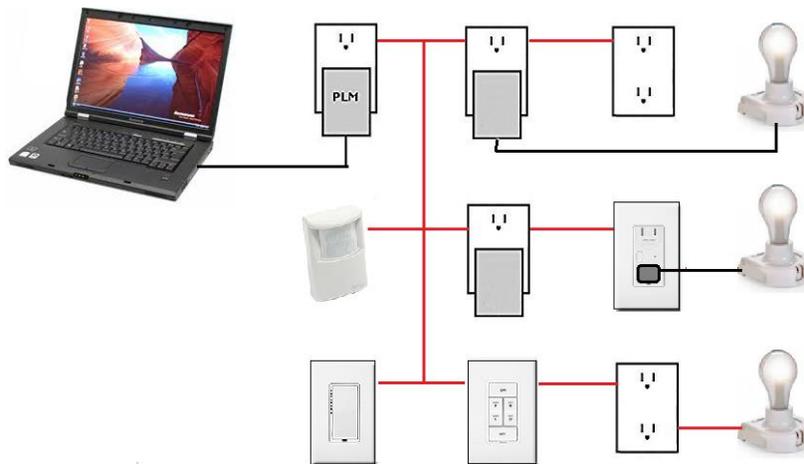
La conexión se debió realizar dentro de la misma fase eléctrica para no tener problemas en que el ID del dispositivo fuera reconocido inmediatamente por el software *Houselinc*.

El paso anterior se repitió con todos los dispositivos a utilizar.

### 3.1.3. TOPOLOGÍA

La red presentó una topología tipo árbol ya que así es que se encuentran conectados los módulos de trabajo utilizados. Esto se visualiza en la Figura 24.

Figura 24. Topología física.



Fuente: Autor.

Para el experimento se usaron los módulos que poseía la Universidad Pontificia Bolivariana y se conectaron en serie para asegurar que todos formaran parte de la misma red eléctrica. En la Figura 25 se visualiza el montaje real implementado para el proyecto.

Figura 25. Montaje real implementado.



Fuente: Autor.

### **3.2. RED DOMÓTICA ANTE TRÁFICO DE COMANDOS X.10**

En este capítulo se realizó la toma de medidas de parámetros de tráfico de la red domótica planteada anteriormente para poder estimar correctamente el comportamiento de dicha red al usar diferentes cantidades de dispositivos conectados a ella.

#### **3.2.1. SELECCIÓN DEL SOFTWARE DE MEDICIÓN.**

Para la medición de los datos se utilizó *Serial Monitor* en su versión de prueba la cual es una herramienta invaluable para todos los desarrolladores de *software* y *hardware* que trabajan con el puerto serial.

Aunque el computador debe poseer mínimo 15 MB de espacio libre en el disco y 128 MB de RAM según la recomendación de sus fabricantes, para el proyecto se utilizó un equipo más potente para poder así evitar latencias provocadas por la capacidad de dicho equipo. Es decir que si existen retardos sean provocados por el tráfico mas no por baja velocidad en el equipo de cómputo utilizado.

### **3.2.2. INTERVALO DE TIEMPO MÍNIMO ENTRE COMANDOS.**

Como primer paso se procedió a encontrar el tiempo mínimo entre comandos al cual los dispositivos funcionaban adecuadamente, para tal motivo se configuró un equipo y se le enviaron los comandos usando diferentes tipos de tiempos de manera decremental hasta observar de manera experimental la falla en su funcionamiento. Esto se realizó con el *software docklight* el cual permite programar comandos secuencialmente con la opción de selección del tiempo de envío de paquetes de instrucciones X.10.

Al usar 5 segundos el equipo se comportó adecuadamente con el envío de comandos, se llegó sin problemas hasta un tiempo entre comandos de 1 segundo. Al usar 0,7 segundos el equipo dejo de recibir los comandos, es decir, si estaba apagado se mantenía apagado, aunque se le diera la orden de encender o viceversa.

### **3.2.3. DISEÑO DEL EXPERIMENTO Y TOMA DE MUESTRAS.**

Para la toma de datos se colocó en funcionamiento la topología de red planteada anteriormente. Como el experimento requería congestión de tráfico de datos, se iba aumentando el número de dispositivos a los cuales se les enviaba órdenes, y se

iban enviando comandos de manera más frecuente, disminuyendo así, el tiempo entre transmisiones. El experimento se inició con un dispositivo al cual se le va aumentando la frecuencia de las órdenes hasta obtener el error en la transmisión. Luego se repite este proceso con dos dispositivos, luego con tres, incrementando de uno en uno hasta llegar a la cantidad de dispositivos soportados.

Como resultado se obtuvieron las mediciones observadas en la Tabla 1. En esta tabla se observa en la primera columna el tiempo de periodicidad de las órdenes en segundos, y en las columnas siguientes el número de paquetes por segundo para diferente número de dispositivos con cada período de las órdenes. Es decir, las filas representan el período entre órdenes para cada dispositivo y las columnas representan el número de dispositivos usados para esa medición. En la tabla se resaltan en rojo las mediciones en las cuales se detectan errores en la transmisión.

Tabla 1. Toma de datos de tráfico en paq/seg.

		NÚMERO DE DISPOSITIVOS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TIEMPO(Seg)	60	91	109	109	80	93	93	77	96	109	81	107
	57	77	109	96	93	109	109	109	80	109	120	93
	54	99	109	109	93	64	109	96	77	126	108	109
	51	91	109	109	80	93	81	93	109	130	93	94
	48	81	77	109	93	109	109	128	92	109	93	80
	43	99	80	109	109	109	96	109	109	109	93	109
	38	109	93	109	109	93	93	93	101	96	96	96
	33	93	109	109	93	93	80	112	112	158	128	132
	28	93	93	109	80	109	93	128	128	128	130	142
	23	109	93	109	80	109	128	126	128	128	128	158
	18	107	80	96	109	112	160	144	128	144	192	178
	13	109	93	126	108	126	144	166	201	174	214	
	9	93	109	128	128	144	182	197	192	218		
	6	91	100	130	190	192	222	242	232			
	3	93	110	190	220	247						
	2,7	105	128	182								
	2,3	93	190	246								
1,7	142	216										
1,3	142	224										
1	160	250										
0,7	208	174										
0,5	258											
0,3												
0,1												

Fuente: Autor.

### 3.2.4. ESTIMACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE LA RED.

En las mediciones obtenidas en la Tabla 1 se observa que a medida que se va aumentando el número de dispositivos, el tiempo entre paquetes va disminuyendo, produciéndose congestión en la red. Esto se evidenció con la falta de respuesta de los dispositivos a las acciones solicitadas debido a los errores en las transmisiones realizadas, lo cual es un síntoma de la congestión generada.

Por lo anterior se pudo deducir que a medida que se aumentan los dispositivos en la red domótica, la probabilidad de tener éxito en la transmisión de datos disminuye.

Tomando el tiempo mínimo entre transmisiones exitosas ( $T_{min}$ ) soportado por la red para diferente número de dispositivos, se pudo calcular la frecuencia máxima de las transmisiones exitosas por cada dispositivo ( $F_{max}$ , unidades: transmisiones/seg), tal como se muestra en la Ecuación 20. De otra parte, una manera de interpretar una probabilidad es verla como una tasa de ocurrencias, por lo que la tasa de transmisiones exitosas que se transportan en la red se toma como la probabilidad de éxito de las transmisiones. Esta probabilidad se calculó multiplicando la  $F_{max}$  de un dispositivo por el número de dispositivos ( $N$ ), tal como se observa en la Ecuación 21. Los resultados experimentales para estas variables se observan en la Tabla 2 y fueron medidos con base en las observaciones de las condiciones ( $N, T_{min}$ ) en que empiezan a ocurrir errores en la Tabla 1.

$$F_{max} = \frac{1}{T_{min}} \quad (20)$$

$$p_{\acute{e}xito} = F_{max} * N \quad (21)$$

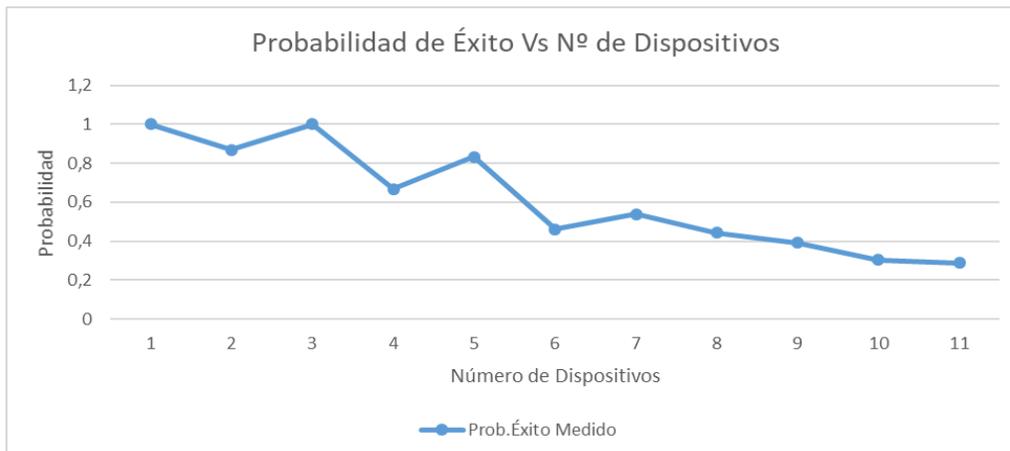
Tabla 2. Cálculo de la probabilidad de éxito estimada.

$N$	$T_{min}$ (seg)	$p_{\text{éxito}}$
1	1	1
2	2,3	0,869565217
3	3	1
4	6	0,666666667
5	6	0,833333333
6	13	0,461538462
7	13	0,538461538
8	18	0,444444444
9	23	0,391304348
10	33	0,303030303
11	38	0,289473684

Fuente: Autor.

Al graficar los datos de la Tabla 2, tal como se visualiza en la Figura 26, se observó una tendencia inversamente proporcional de la probabilidad de éxito ( $p_{\text{éxito}}$ ) con respecto al número de dispositivos ( $N$ ). El paso a seguir fue determinar una expresión para la función de distribución de probabilidad de  $p_{\text{éxito}}$ . Para esto se realizó una prueba de bondad del ajuste para diferentes tipos de distribución, la cual arrojó que una distribución exponencial negativa se ajustaba de forma bastante aproximada a la curva de la Figura 26.

Figura 26. Probabilidad de éxito con los datos medidos.



Fuente: Autor.

La prueba de bondad del ajuste que se utilizó fue la de Kolmogorov-Smirnov y los resultados se resumen en la Tabla 3. En esta tabla se observa que, con una tasa media de 0,3333 se obtiene un buen ajuste de la distribución exponencial, pues pasa la prueba con un  $\alpha$  de 0.2, lo cual quiere decir que se tiene una confianza del 80% (recordemos que entre más baja la confianza es más exigente la prueba).

Tabla 3. Prueba de bondad Kolmogorov-Smirnov para la probabilidad de éxito.

<b>Tamaño de la muestra</b>	11				
<b>Estadística</b>	0,2837				
<b>Valor P</b>	0,28181				
<b><math>\alpha</math></b>	<b>0,2</b>	<b>0,1</b>	<b>0,05</b>	<b>0,02</b>	<b>0,01</b>
<b>Valor crítico</b>	0,30829	0,35242	0,39122	0,4367	0,4677
<b>Rechazar</b>	No	No	No	No	No

Fuente: Autor.

### 3.3. PROCEDIMIENTO PARA OBTENER EL MODELO TEÓRICO.

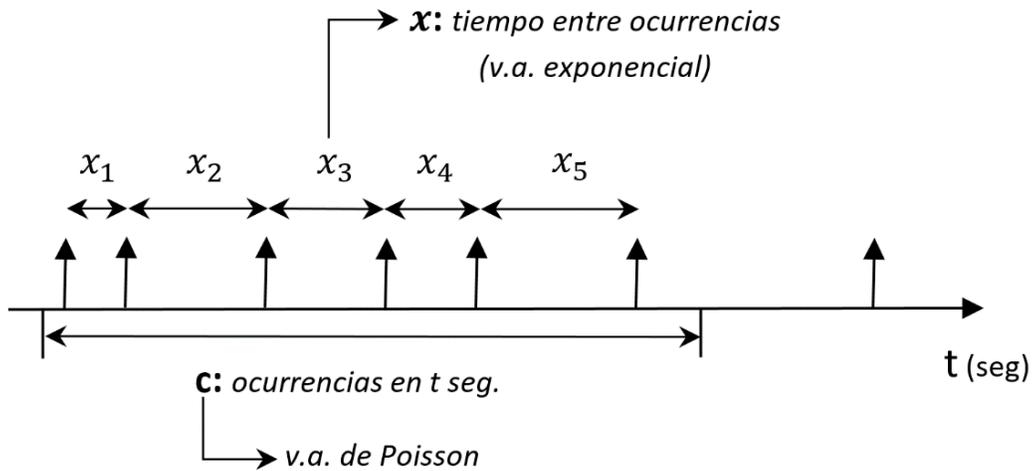
En este capítulo se describe el modelado de la red probada con tráfico X.10 con el objetivo de poder predecir el rendimiento ante una cantidad específica de usuarios.

Ya teniendo una idea del comportamiento de la red se procedió a realizar la búsqueda de un modelo matemático que se ajustara a las características obtenidas en la red doméstica construida.

En la sección anterior se concluye que el tiempo entre transmisiones exitosas tiene una distribución exponencial. Este comportamiento, ver Figura 27, se encuentra normalmente en un proceso de Poisson, en el cual el tiempo entre ocurrencias tiene

una distribución exponencial [21], por tanto se pudo asumir que las llegadas al sistema conforman un proceso de Poisson.

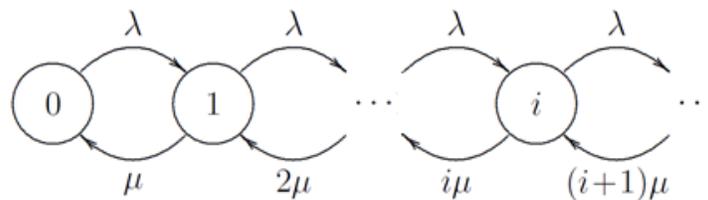
Figura 27. Proceso de llegadas de Poisson.



Fuente: Autor

Si se realiza la analogía entre el modelo de Poisson y el modelo matemático del comportamiento de la red domótica se puede decir que el modelo de tráfico de la red planteada se puede representar mediante el diagrama de estados de la Figura 28.

Figura 28. Diagrama de estados del tráfico de una red domótica X.10.



Fuente: Autor

Donde la variable  $\lambda$  representa la tasa media de llegadas de los paquetes al medio de transmisión, que en este caso basándose en observaciones experimentales será de 0.333, el cual es el valor que mejor permite ajustar la curva para la probabilidad de éxito tal como se mencionó en la sección 3.2.4.

La variable  $i$  representa el número de paquetes que transmiten los dispositivos domóticos utilizados en el experimento. ( $i = 0,1,2,3 \dots$ ).

Por último, la variable  $\mu$  representa la tasa de servicio de la red, la cual está representada de la siguiente forma:

$$\mu = \frac{1}{T_s} \quad (22)$$

donde  $T_s$  es igual al tiempo de servicio entre paquetes de comandos X.10 siendo este valor equivalente a  $h$  que es la duración en segundos de un paquete. De esta forma la ecuación anterior se puede expresar como:

$$\mu = \frac{1}{h} \quad (23)$$

A partir de esto se pudo obtener el tráfico ofrecido de la red ( $A$ ), el cual se puede expresar en la siguiente ecuación.

$$A = \frac{\lambda}{\mu} = \lambda h \quad (24)$$

Para calcular el valor de  $h$ , el cual es de longitud fija, se tuvo en cuenta el tiempo utilizado para transmitir un paquete en una red domótica X.10.

Usando una longitud de 24 bits para cada trama, y teniendo claro que en las redes X.10 se transmite un bit por cada ciclo de 60 Hz en las redes eléctricas de 120VAC (según el estándar usado en Colombia para las redes de baja tensión), se procedió

a calcular el valor de  $h$  usando la Ecuación 25, donde se multiplica el número de bits por la duración de cada bit (bit/seg) .

$$h = 24 \text{ bit} \cdot \frac{1}{60 \text{ bit/seg}} = 0,40008 \text{ seg} \quad (25)$$

Con lo anterior, se pueden expresar las diferentes probabilidades de éxito utilizando las ecuaciones de corte en equilibrio estadístico, como se observa en las expresiones 26 a 30.

$$p(0) = p(0) \quad (26)$$

$$p(1) = A \cdot p(0) \quad (27)$$

$$p(2) = \frac{A}{2} \cdot p(1) = \frac{A^2}{2} \cdot p(0) \quad (28)$$

$$\dots \quad \dots \quad \dots$$

$$p(i-1) = \frac{A}{i-1} \cdot p(i-2) = \frac{A^{i-1}}{(i-1)!} \cdot p(0) \quad (29)$$

$$p(i) = \frac{A}{i} \cdot p(i-1) = \frac{A^i}{i!} \cdot p(0) \quad (30)$$

Si se normaliza la sumatoria de todas las probabilidades se puede asumir:

$$1 = \sum_{j=0}^{\infty} p(j) \quad (31)$$

$$= p(0) \left\{ 1 + A + \frac{A^2}{2!} + \dots + \frac{A^i}{i!} + \dots \right\} \quad (32)$$

$$= p(0) \cdot e^A \quad (33)$$

$$p(0) = e^{-A} \quad (34)$$

Donde  $p(0)$  es la probabilidad de que no hayan dispositivos transmitiendo.

Se obtuvo de esta forma la expresión de la probabilidad de transmisión para  $i$  transmisiones, tal como se observa en la Ecuación 35.

$$p(i) = \frac{A^i}{i!} \cdot e^{-A} \quad \text{para } i = 0, 1, 2, \dots \quad (35)$$

### 3.3.1. CÁLCULO DEL THROUGHPUT DEL SISTEMA

El *throughput* del sistema se pudo medir mediante el porcentaje de transmisiones exitosas. A su vez, el porcentaje de transmisiones exitosas depende de la probabilidad de éxito.

Para calcular una transmisión correcta de un paquete ( $p_{\text{éxito}}$ ) se tuvo en cuenta:

1. Que el medio no tenga paquetes por transmitir (estado 0)

$$p(0) = e^{-\lambda h} = e^{-A} \quad (36)$$

2. Que no lleguen otros paquetes en ese mismo instante de tiempo, por lo que el tiempo entre transmisiones debe ser como mínimo  $h$  (duración de un paquete). Por tanto,  $t = h$  en la expresión para la  $f(t)$  exponencial:

$$f(t) = e^{-\lambda t} \quad (37)$$

y así obtener finalmente que la probabilidad de que el tiempo entre paquetes sea  $h$  es:

$$f(h) = e^{-\lambda h} \quad (38)$$

Dicho lo anterior, la probabilidad de éxito es la probabilidad resultante de que se den las condiciones 1 y 2 al tiempo, por lo que la probabilidad total es la multiplicación de las expresiones 36 y 38, así:

$$p_{\text{éxito}} = p(0) \cdot f(h) \quad (39)$$

$$p_{\text{éxito}} = e^{-\lambda h} \cdot e^{-\lambda h} \quad (40)$$

$$p_{\text{éxito}} = e^{-2\lambda h} \quad (41)$$

Con esto se pudo expresar el *throughput* ( $\rho$ ) como:

$$\rho = A * p_{\text{éxito}} \quad (42)$$

$$\rho = \lambda h * e^{-2\lambda h} \quad (43)$$

En la ecuación anterior,  $\lambda$  corresponde a la tasa media de transmisiones para un dispositivo, sin embargo, si se tienen  $N$  dispositivos, se debe tener en cuenta que  $\lambda$  se debe multiplicar por la cantidad de dispositivos disponibles en la red ( $N$ ). Por tanto,

$$\rho = N\lambda h * e^{-2N\lambda h} \quad \text{para } N \text{ dispositivos} \quad (44)$$

### **3.3.2. VALIDACIÓN DEL MODELO OBTENIDO PARA EL THROUGHPUT**

Para validar el modelo del *throughput* teórico se hizo una comparación con las mediciones del *throughput* experimental. Esta comparación se realizó mediante la prueba de bondad del ajuste Chi Cuadrado entre las dos curvas. A continuación, se explica el proceso que se siguió.

### 3.3.2.1 CÁLCULO DEL THROUGHPUT TEÓRICO

Aplicando la Ecuación 44 podemos calcular el *throughput* teórico para N dispositivos, lo que arroja los valores de la Tabla 4:

Tabla 4. Cálculo del tráfico teórico.

N	$\lambda$ (paq/seg)	h (seg/paq)	Throughput teórico $\rho = N\lambda h * e^{-2N\lambda h}$
1	0,3333	0,40008	0,102131266
2	0,3333	0,40008	0,15644629
3	0,3333	0,40008	0,179735179
4	0,3333	0,40008	0,183547462
5	0,3333	0,40008	0,175725568
6	0,3333	0,40008	0,161507525
7	0,3333	0,40008	0,144316541
8	0,3333	0,40008	0,126323636
9	0,3333	0,40008	0,108846307
10	0,3333	0,40008	0,092629165
11	0,3333	0,40008	0,078039952

Fuente: Autor.

Una vez hallados los valores teóricos usando el modelo matemático, se procedió a calcular los valores experimentales, lo que se describe a continuación.

### 3.3.2.2 CÁLCULO DEL THROUGHPUT EXPERIMENTAL

Para hallar el *throughput* experimental se tomó el número de paquetes exitosos antes de que empezaran a aparecer errores. Esto se realizó para diferentes cantidades de dispositivos (de 1 a 11 dispositivos); en la Tabla 5 se observan en color blanco las mediciones exitosas, en color rojo se observan las transmisiones

con errores, y en color gris los datos tomados para los cálculos del tráfico exitoso experimental ( $A_{exp}$ ).

Tabla 5. Valores experimentales del número de paquetes transmitidos con diferente número de dispositivos.

		NÚMERO DE DISPOSITIVOS										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
TIEMPO (Seg)	43	99	80	109	109	109	96	109	109	109	93	109
	38	109	93	109	109	93	93	93	101	96	96	96
	33	93	109	109	93	93	80	112	112	158	128	132
	28	93	93	109	80	109	93	128	128	128	130	142
	23	109	93	109	80	109	128	126	128	128	128	158
	18	107	80	96	109	112	160	144	128	144	192	178
	13	109	93	126	108	126	144	166	201	174	214	
	9	93	109	128	128	144	182	197	192	218		
	6	91	100	130	190	192	222	242	232			
	3	93	110	190	220	247						
	2,7	105	128	182								
	2,3	93	190	246								
	1,7	142	216									
	1,3	142	224									
	1	160	250									
	0,7	208	174									

Fuente: Autor.

Los valores en gris se tabularon y se multiplicaron individualmente por 0,40008 seg, que es la duración de los paquetes en el protocolo X.10 (el cálculo de h fue explicado en la sección 3.3).

De esta manera, se calcula el tráfico experimental  $A_{exp}$  en Erlangs, según la definición de tráfico para un sistema de trasmisión de datos ( $A = \lambda * h$ ). Los resultados del tráfico experimental lo podemos visualizar en la Tabla 6.

Tabla 6. Cálculo del tráfico exitoso experimental.

<b>N</b>	<b>h (seg/paq)</b>	<b><math>\lambda_{exp}</math> (paq/seg) Experimental</b>	<b><math>A_{exp}</math> (Erl) Experimental</b>
1	0,40008	160	64,0128
2	0,40008	190	76,0152
3	0,40008	190	76,0152
4	0,40008	190	76,0152
5	0,40008	192	76,81536
6	0,40008	144	57,61152
7	0,40008	166	66,41328
8	0,40008	128	51,21024
9	0,40008	128	51,21024
10	0,40008	128	51,21024
11	0,40008	96	38,40768

Fuente: Autor.

Por otra parte, el *throughput* es una medida de rendimiento expresada por un valor entre 0 y 1, (1 equivale al 100% de rendimiento).

Para obtener el *throughput* experimental ( $\rho_{exp}$ ), se parte de la definición de *throughput*, es decir:

$$\rho_{exp} = \frac{A_{exp}}{A_{ent}} \quad (45)$$

Donde  $A_{ent}$  se asume como la media del tráfico que ingresa al sistema o tráfico ofrecido. Es bien conocido en ingeniería de tráfico que el tráfico ofrecido no es medible [12], por tanto, para nuestro modelo experimental debemos asumir un valor aproximado. Para hallar este valor debemos calcular los diferentes valores del tráfico de entrada para diferente número de dispositivos ( $A_{ent(i)}$ ), que se calcula con la expresión 46.

$$A_{ent(i)} = \frac{A_{exp(i)}}{\rho(i)} \quad (46)$$

Donde  $A_{exp(i)}$  es el tráfico experimental para cada número de dispositivos; y  $\rho(i)$  es el *throughput* teórico. A continuación, se muestran en la Tabla 7 los resultados obtenidos.

Tabla 7. Cálculo del tráfico ofrecido.

$N$	$A_{ent(i)}$
1	626,7698682
2	485,8868808
3	422,9288921
4	414,1446532
5	437,1325177
6	356,7110577
7	460,1917401
8	405,3892189
9	470,4821087
10	552,8522267
11	492,1540712
<b>MEDIA</b>	<b>465,8766578</b>

Fuente: Autor.

Por tanto, el valor medio que se usara para el  $A_{ent}$  es 465.8766578, calculado a partir de la tabla anterior. De esta forma el  $\rho_{exp}$  se calcula como se muestra en la Ecuación 47.

$$\rho_{exp} = \frac{A_{exp}}{465,8766578} \quad (47)$$

En la Tabla 8 se aprecian los resultados definitivos obtenidos del *throughput* experimental ( $\rho_{exp}$ ) comparado con el *throughput* teórico ( $\rho$ ) obtenidos anteriormente.

Tabla 8. Resultados experimentales y teóricos.

$N$	$\rho_{exp}$	$\rho$
1	0,137402892	0,102131266
2	0,163165934	0,15644629
3	0,163165934	0,179735179
4	0,163165934	0,183547462
5	0,164883470	0,175725568
6	0,123662600	0,161507525
7	0,142555500	0,144316541
8	0,109922313	0,126323636
9	0,109922313	0,108846307
10	0,109922313	0,092629165
11	0,082441735	0,078039952

Fuente: Autor.

Una vez obtenidos los resultados de la Tabla 8 se aplica la prueba de Chi Cuadrado para validar si el modelo experimental obtenido de la red se ajusta al modelo teórico planteado. Para realizar dicha prueba es necesario realizarla con los valores del tráfico, ya que esta prueba requiere que los datos sean superiores a 2 [21].

En la Tabla 9 se observan los resultados obtenidos de la prueba. Se puede observar que el índice del chi cuadrado experimental ( $X_{exp}^2 = 14.6452$ ) es menor que el chi cuadrado teórico ( $X^2 = 14.6837$ ) con un  $\alpha$  de 0.1, es decir una confianza del 90%.

Por tanto, se concluye que el modelo experimental ( $A_{exp}$ ) se ajusta al modelo teórico ( $A$ ), con una prueba bastante exigente.

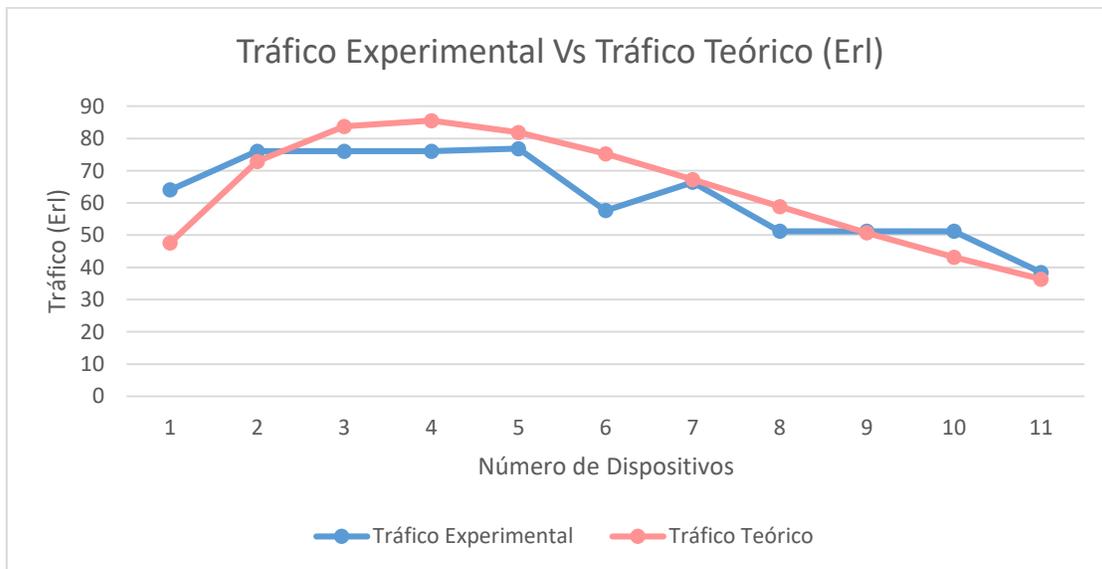
Tabla 9. Prueba Chi Cuadrado.

N	$A_{exp}$	A	$\frac{(A_{exp} - A)^2}{A}$	$X_{exp}^2$	$X^2 (0,1)$
1	64,012800	47,58057276	5,674965147	14,64521623	14,6837
2	76,015200	72,88467484	0,13446157		
3	76,015200	83,73442433	0,711612037		
4	76,015200	85,51047814	1,054377299		
5	76,815360	81,86644034	0,311646781		
6	57,611520	75,24258585	4,131363635		
7	66,413280	67,23370765	0,01001137		
8	51,210240	58,85123319	0,992073976		
9	51,210240	50,70895367	0,004955495		
10	51,210240	43,1537657	1,504081442		
11	38,407680	36,35699192	0,115667479		

Fuente: Autor.

A continuación, se muestra la gráfica que compara el tráfico experimental y el tráfico teórico, en la cual se observa un comportamiento muy similar entre las dos curvas, tal y como se observa en la Figura 29.

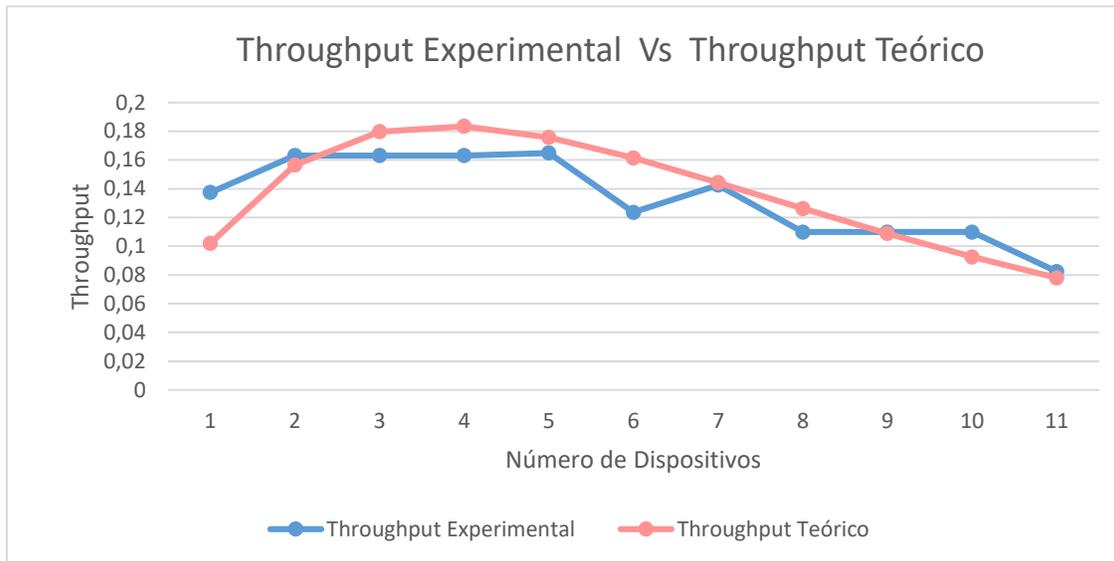
Figura 29. Comparación del tráfico experimental y el tráfico teórico



Fuente: Autor.

Finalmente, en la Figura 30 se observa la comparación del *throughput* experimental y el *throughput* teórico y la similitud que hay entre ellos.

Figura 30. Comparación del *throughput* experimental y teórico.



Fuente: Autor.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

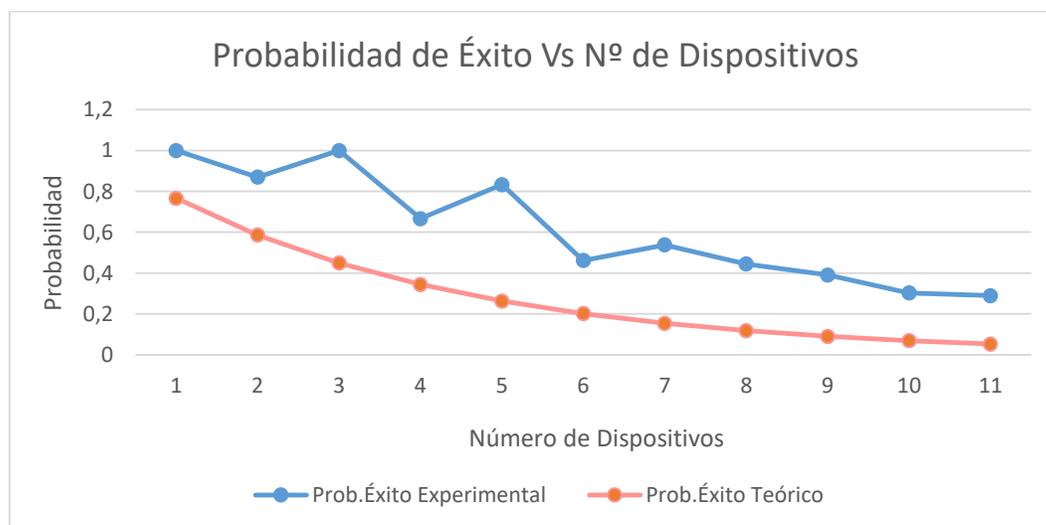
En el presente proyecto se desarrolló un modelo teórico para el *throughput* de una red domótica basada en el protocolo X.10. Para obtener el modelo fue necesario realizar un experimento en el cual se varió la cantidad de dispositivos conectados a la red y la tasa de envío de paquetes de cada uno. La red utilizada estaba en un entorno con interferencias eléctricas mínimas, es decir con condiciones similares a las de un hogar. Bajo estas condiciones se realizaron mediciones del número de paquetes transmitidos usando para ello un *modem* PLC basado en el protocolo X.10 y un *software* de medición de tráfico. Al evaluar los resultados de las mediciones se observó que la cantidad de paquetes transmitidos exitosamente tenían un comportamiento similar al de un proceso de Poisson. Esta conclusión fue obtenida al observar que el tiempo entre paquetes tenía una distribución exponencial. Además, a partir de las mediciones de los paquetes exitosos se pudo observar que el rendimiento del sistema era similar al rendimiento obtenido para un protocolo Aloha puro.

Estas observaciones llevaron a inferir que un modelo de tráfico de tipo Poisson era el más adecuado para modelar el tráfico de esta red. Por tanto, con base en las mediciones realizadas se dedujeron ciertos parámetros necesarios para verificar el modelo teórico, obteniendo así parámetros como la probabilidad de éxito, la tasa media de llegadas al sistema y el tiempo de servicio. Con base en estos parámetros calculados a partir de las mediciones, se pudo obtener el tráfico experimental y el *throughput* experimental, los cuales fueron contrastados con sus respectivos equivalentes teóricos. Para esta comparación se realizaron pruebas estadísticas de bondad del ajuste, arrojando una similitud alta entre los modelos teóricos y experimentales.

Los modelos teóricos obtenidos para la probabilidad de éxito y el *throughput* del sistema son útiles para el dimensionamiento y análisis del rendimiento de una red PLC basada en el protocolo X.10 debido a que estas expresiones relacionan el número de dispositivos y el tráfico que estos generan con la probabilidad de éxito, la cual sirve para medir el grado de servicio de la red. Por otro lado, estos modelos permiten calcular el *throughput* (rendimiento del sistema) con base en el número de dispositivos conectados a la red. Se observa en la Figura 30 que el *throughput* máximo del sistema es del 18%, es decir que como máximo se puede obtener un 18% de tráfico exitoso, lo cual es bastante bajo. Este máximo de *throughput* se obtiene con 4 dispositivos transmitiendo a una tasa de 0.3333 paq/seg. Esta baja tasa de envío de paquetes se debe a que en esta tecnología la velocidad de transmisión es muy baja (1 bit por ciclo de la señal AC, con 60 Hz de frecuencia, lo que da como resultado 60 bps).

Para realizar el dimensionamiento de la red se toma la curva teórica de la probabilidad de éxito para N dispositivos ( $p_{\text{éxito}} = e^{-2\lambda Nh}$ ), donde  $\lambda = 0.3333 \text{ paq/seg}$  y  $h=0.40008 \text{ seg}$ , ver Figura 31.

Figura 31. Comparación de la probabilidad de éxito experimental y teórica.



Fuente: Autor.

Se observa que el modelo teórico es un modelo conservador, pues sus proyecciones siempre están por debajo de las mediciones que se obtuvieron. Esto es una ventaja pues se puede estar seguro de que en la práctica siempre se obtendrá un rendimiento un poco mejor que el estimado teóricamente (debe recordarse que en la sección 3.2.4 este modelo fue comprobado estadísticamente mediante una prueba de bondad del ajuste con una confianza del 80%, la cual es una prueba bastante exigente). Como ejemplo, en la Figura 31, se observa que para dos dispositivos la probabilidad de éxito proyectada es de 0.5866, mientras que la probabilidad de éxito experimental es de 0.8695.

## 5. CONCLUSIONES

En este proyecto se dio respuesta a la pregunta de investigación acerca de cuál sería el modelo de tráfico que representara el comportamiento de una red PLC de banda angosta basada en el protocolo X.10. Esta pregunta surgió debido al vacío que se encontró en el conocimiento en cuanto a modelos de tráfico para este tipo de redes, pues en el estado del arte se evidencio que no había estudios que llevaran a este tipo de modelos que sirven para el dimensionamiento y análisis de las redes. Hallar modelos de tráfico para estas situaciones es de gran importancia en la actualidad debido al auge de las tecnologías domóticas y el desarrollo del internet de las cosas, de manera que hoy en día se pueden instalar estos dispositivos en los hogares, pero no se cuenta con modelos que permitan calcular cuántos dispositivos podría haber en un circuito o fase de manera que se puedan comunicar exitosamente entre ellos.

Para la obtención del modelo de tráfico se utilizaron dispositivos domóticos de marca INSTEON basados en el protocolo X.10. Para el experimento, fue necesario realizar mediciones de la cantidad de paquetes presentes en el medio de transmisión al variar el número de dispositivos domóticos y la periodicidad con la que transmitían. Para realizar las mediciones se utilizó un modem X.10 de INSTEON y un software de análisis de tráfico para el puerto serial de un computador conectado al modem.

Los resultados de las mediciones permitieron observar y verificar que se podía usar un modelo exponencial negativo para la probabilidad de éxito. A partir de esta observación se pudo deducir que el proceso de tráfico presente en el sistema era de tipo Poisson y se procedió a demostrar que un modelo de Poisson podía ajustarse a las mediciones. Se pudo probar estadísticamente la similitud del modelo de tráfico teórico con el modelo experimental. Por tanto, se pudo demostrar que el

máximo rendimiento de sistema (*throughput*) es del 18%. Este comportamiento es similar al método de acceso al medio de tipo Aloha puro.

Mediante este proyecto se demostró también que este tipo de sistemas se congestionan, llegando a producir errores en la comunicación debido a las colisiones en las transmisiones cuando el número de dispositivos domóticos aumenta.

El modelo obtenido para el *throughput* permite el dimensionamiento de las redes PLC basadas en el protocolo X.10, de manera que relacionan el número de dispositivos y la tasa de transmisión de paquetes de cada uno de ellos con el *throughput* deseado del sistema.

El desarrollo del modelo matemático no fue desde cero, dado que se encontró un modelo de tráfico general existente y se adaptó a una situación particular, cuyo modelo matemático no existía. Posteriormente se realizaron las pruebas estadísticas necesarias para soportar el ajuste del modelo teórico a la situación real observada en el experimento realizado.

## 6. RECOMENDACIONES

El trabajo realizado se hizo en un ambiente controlado dado que se quería verificar el comportamiento de la red domótica solo en el aspecto de tráfico. Sería interesante en futuros trabajos, evaluar el tráfico para diferentes ambientes de trabajo con diferentes ruidos eléctricos que permitan simular escenarios de operación complicados.

Sería un reto realizar nuevos proyectos en este campo que verifiquen el modelo construido con datos experimentales tomados con equipos de otras marcas.

Las redes PLC han sido blanco de muchos trabajos investigativos en cuanto a la medición de parámetros de rendimiento, sin embargo, se recomienda realizar mayores modelamientos del tráfico, tanto en banda angosta como en banda ancha, ya que, de estos resultados se puede planificar la implementación de redes con gran cantidad de dispositivos conectados simultáneamente, que es lo que se aspira en la implementación del Internet de las cosas.

## 7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. 1901-2010, «IEEE Standard for Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications,» 2010. [En línea]. Available: <https://standards.ieee.org/standard/1901-2010.html>. [Último acceso: 12 Agosto 2018].
- [2] ISSA, Goldberg. y Marthe, «Power Line Comunnications Usin Low and medium voltage network,» *IEEE, Research and Development Department*.
- [3] B. RODRÍGUEZ. y L. Salamanca, Estimación del rendimiento en la tecnología PLC frente a diversos escenarios ruidosos, Trabajo de grado de Ingeniería en Telecomunicaciones, 2008.
- [4] V. Sisinni, «Performance analysis of power line communication in industrial power distribution network.,» *Revista El sevier. Computer Standrards& interfaces*, 2015.
- [5] S. Tsokalo, «Influence of the channel instability on the PLC Qo.,» *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*., 2014.
- [6] G. Puyol y García, «La tecnología PLC en los programas de fomento de la sociedad de la información de red,» [En línea]. Available: <http://www.rediris.es/difusion/publicaciones/boletin/68-69/enfoque4.pdf>. [Último acceso: 16 Febrero 2016].
- [7] H. Páez, «SISTEMA DE COMUNICACIÓN DE DATOS A TRAVÉS DE LA RED,» [En línea]. Available: <https://ojsrevistaing.uniandes.edu.co/ojs/index.php/revista/article/download/488/669>. [Último acceso: 5 Noviembre 2016].
- [8] C. Armas, «Implementación de un sistema para automatización del hogar mediante comandos de voz y protocolo X-10, orientado a personas con discapacidad física,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.bibliotecasdelecuador.com/Record/ir-:15000-16962/Details>. [Último acceso: 18 Abril 2018].
- [9] CIDIRA, «El ruido en los sistemas electrónicos,» [En línea]. Available: [ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Instrumentacion/BK-ANGEL/06\\_Ruido\\_en\\_Sistemas\\_Electr%F3nicos/Ruido\(doc\).PDF](ftp://ftp.ehu.es/cidira/dptos/depjt/Instrumentacion/BK-ANGEL/06_Ruido_en_Sistemas_Electr%F3nicos/Ruido(doc).PDF). [Último acceso: 20 Marzo 2016].
- [10] INTERCENTRES, «Propiedades de las Ondas,» [En línea]. Available: <http://intercentres.edu.gva.es/iesleonardodavinci/Fisica/Ondas/Ondas11.htm>. [Último acceso: 10 Agosto 2016].
- [11] H. PASCUAL, J. RAPALLINI y A. QUIJANO, «Implementación de un sistema de medida de impedancia para redes eléctricas en tiempo real,» [En línea]. Available: <http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/microele/iberchip/pdfp/p24.pdf>. [Último acceso: 20 Junio 2016].
- [12] V. Iversen, TELETRAFFIC ENGINEERING and NETWORK PLANNING, 2015.
- [13] UIT-T, «Terms and definitions of traffic Engineering,» [En línea]. Available: <file:///C:/Users/Lizeth/Downloads/T-REC-E.600-199303-III!!PDF-E.pdf>. [Último acceso: 08 09 2018].
- [14] OSAKA, «Considerations of Using Power Line Communications in the AMR System,» *ampere University of Technology.*, Finland. 2012.

- [15] HHD, «Serial monitor,» [En línea]. Available: <https://www.hhsoftware.com/serial-monitor>. [Último acceso: Noviembre 2017].
- [16] Insteon, «INSTEON\_Developers\_Guide 2nd Edition,» [En línea]. Available: [http://cache.insteon.com/pdf/INSTEON\\_Developers\\_Guide\\_20070816a.pdf](http://cache.insteon.com/pdf/INSTEON_Developers_Guide_20070816a.pdf). [Último acceso: Abril 2018].
- [17] Docklight, «Información sobre docklight,» [En línea]. Available: <https://docklight.de/information/>. [Último acceso: Diciembre 2017].
- [18] A. Rodríguez, «Casas inteligentes: cómo funcionan?,» [En línea]. Available: <http://archivo.de10.com.mx/wdetalle3064.html>. [Último acceso: 22 Septiembre 2016].
- [19] Endesa, «Rdes inteligentes,» [En línea]. Available: <http://www.endesasmartgrids.com/index.php/es/las-redes-inteligentes>. [Último acceso: 21 septiembre 2016].
- [20] WALPOLE, PROBABILIDAD Y ESTADISTICA. Para ingeniería y ciencias., vol. 9na Edición, Pearson.
- [21] Montgomery y Runger, Probabilidad y estadística aplicada a la ingeniería., McGraw-Hill, 1996.
- [22] S. WILLIAM, Comunicaciones y Redes de Computadores, vol. 7, Pearson.
- [23] L. YU-JU, «A power line communication network infrastructure for the smart home.,» *Revista SMART HOMES IEEE Wireless Communications*.
- [24] SEDAT, KULKAMI y SOORIYABANDERA, «Content centric routing in IoT networks and its integration in RPL,» *ELSEVIER Computer Communications*, 2016.
- [25] K. REDUAN, «Traffic requirements for smart grid. A comprehensive review of the application characteristics and traffic requirements of a smart grid communications network.,» *Article in Computer Networks*, February 2013.
- [26] Takahara y Alamifar., «Viability of Powerline Communication for the Smart Grid.,» *Revista IEEE*, 2012.
- [27] Lee, Ha y Chang, «Performance evaluation of MAC layer of LnCP and LonWorks protocol as home networking system. ScienceDirect.,» *Revista El sevier Computer Standars & interfaces*, 2009.
- [28] A. Halid Hrasnica, «Modeling MAC Layer for Powerline Communications Networks.,» *Paper, Chair for telecommunications, dresden University of technology 01062 Dresden, Germany*.