

**MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REDES DE TELECOMUNICACIÓN PARA  
MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL EN  
ZONAS URBANAS**



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Tesis previa a la obtención del título de:  
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:  
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REDES DE TELECOMUNICACIÓN PARA  
MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL EN  
ZONAS URBANAS**

**AUTOR:  
CARLOS GUILLERMO SUÁREZ POZO**

**DIRECTOR:  
ESTEBAN MAURICIO INGA ORTEGA**

**Quito, Enero de 2015**

## **DECLARATORIA DE AUTORÍA**

Yo, Carlos Guillermo Suárez Pozo autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 20 de Enero del 2015

---

**Carlos Guillermo Suárez Pozo**  
**CC: 1724544596**  
**AUTOR**

## **CERTIFICA**

Haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos del trabajo de monografía intitulado “MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REDES DE TELECOMUNICACIÓN PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA RESIDENCIAL EN ZONAS URBANAS” realizada por el Sr. Carlos Guillermo Suárez Pozo, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 20 de Enero del 2015

---

**Mstr. Esteban Mauricio Inga Ortega**  
**DIRECTOR**

## **DEDICATORIA.**

*Carlos Guillermo Suárez Pozo*

*Este proyecto es dedicado  
con mucho amor a mi familia,  
en especial a mis padres que con  
tanto esfuerzo han logrado sacar adelante  
a mis hermanos y a mi persona. Por esto y mucho  
más, Dios bendiga siempre a Ligia Pozo y a Segundo  
Suárez por ser las personas que lo han dado todo  
en esta vida. De igual forma, una especial  
mención a mis hermanos Wendy y  
Hernán por darme su calidez  
y apoyo en mi vida.*

## **AGRADECIMIENTO.**

*Carlos Guillermo Suárez Pozo*

*Es necesario reconocer el esfuerzo de las personas que me ayudaron en la realización de este trabajo, por eso agradezco al Ing. Esteban Inga Ortega M.Ed. por convertirse en el mentor principal de mi formación académica, sobre todo quiero reconocer el empeño y buen trabajo que hemos realizado en conjunto para poder sacar adelante nuestros planes de fortalecimiento formativo y humano. De igual manera, agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y sobre todo a sus docentes que colaboraron en la realización de este trabajo. Quiero agradecer también al grupo de investigación GIREI en el cual trabajé, donde se incluyen compañeros y amigos de nuestra Carrera de Ingeniería Eléctrica.*

## ÍNDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA .....	I
CERTIFICA .....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO .....	IV
INDICE GENERAL.....	V
INDICE DE FIGURAS .....	VIII
INDICE DE TABLAS .....	X
INDICE DE ANEXOS .....	XI
GLOSARIO DE TÉRMINOS.....	XII
RESUMEN .....	XV
ABSTRACT .....	XVI
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I .....	4
I. INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA USANDO REDES CELULARES .....	4
1.1 Infraestructura de medición avanzada en redes eléctricas inteligentes .....	4
1.1.1 Evolución de la red eléctrica hacia el Smart Grid .....	6
1.1.2 Segmentos, sistemas y elementos en Smart Grid .....	12
1.1.3 Infraestructuras y redes de comunicación en Smart Grid .....	17
1.2 Arquitectura de comunicación en infraestructura de medición avanzada.....	21
1.2.1 Arquitecturas de red para AMI .....	21
1.2.2 Arquitectura de comunicación AMI tradicional .....	25
1.2.3 Arquitectura de comunicación AMI con MDMSs distribuidos.....	27
1.2.4 Arquitectura de comunicación AMI totalmente distribuida .....	28
1.3 Servicios ofertados con infraestructura de medición avanzada .....	29
1.3.1 Características del servicio eléctrico actual y AMI .....	30
1.3.2 Servicios ofertados por AMI con enfoque en el cliente .....	32
1.3.3 Beneficios de AMI para el proveedor de servicios .....	35
1.4 Normativa internacional para medición inteligente.....	37
1.4.1 Estándares y protocolos de comunicación en medición inteligente .....	37

1.4.2 Estándares en medición de energía eléctrica .....	40
1.4.2 Normas adaptables a medición inteligente y AMI (Protocolos, Estándares e Iniciativas) .....	41
CAPÍTULO II .....	45
II. REDES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS PARA MEDICIÓN INTELIGENTE .....	45
2.1 Redes y tecnología de comunicaciones inalámbricas para zonas urbanas	45
2.1.1 Topologías de red en las comunicaciones.....	48
2.1.2 Tecnologías NAN en infraestructuras de medición avanzada .....	52
2.1.3 Redes Celulares .....	58
2.2 Modelos para análisis de redes inalámbricas de comunicación.....	65
2.2.1 Propagación de señal en comunicaciones inalámbricas .....	65
2.2.2 Modelos de análisis de propagación en zonas urbanas .....	70
2.3 Estado actual de las redes de comunicación inalámbricas en el Ecuador	76
2.3.1 Comunicaciones Celulares .....	78
2.3.2 Aplicaciones de MVNO en las redes celulares ecuatorianas.....	83
2.4 Caracterización de la información up/down/link de medidores inteligentes	86
2.4.1 Enlaces Ascendente/Descendente (Uplink/Downlink) .....	87
2.4.2 Perspectiva de los medidores inteligentes.....	89
CAPÍTULO III .....	92
III. MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y EMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA	92
3.1 Índice de pérdidas no técnicas en zonas urbanas y plan de reducción a través de AMI .....	92
3.1.1 Análisis de pérdidas de energía en distribución.....	93
3.1.2 Identificación de pérdidas no técnicas en el sistema .....	96
3.1.3 Planes de reducción de pérdidas a través de AMI.....	100
3.2 Caracterización de la zona urbana para implementar medición inteligente	103
3.3 Modo de tráfico de redes celulares de la infraestructura de medición avanzada .....	106

3.4 Simulación y emulación de redes celulares para infraestructura de medición avanzada .....	111
3.4.1 Optimización matemática .....	112
3.4.2 Problema de optimización de distancias para una red NAN .....	114
CAPÍTULO IV .....	124
IV. RENDIMIENTO DE UNA RED CELULAR PARA UNA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA .....	124
4.1 Análisis de cobertura de la red celular en zonas urbanas .....	124
4.2 Análisis de crecimiento óptimo de una red celular en la infraestructura de medición avanzada .....	128
4.3 Análisis económico para implementar infraestructura de medición inteligente .....	137
4.4 Plan de negocios para medición inteligente de energía eléctrica .....	144
CONCLUSIONES .....	146
RECOMENDACIONES .....	148
REFERENCIAS .....	150
ANEXOS .....	158

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Evolución Generacional de Smart Grid .....	6
Figura I.2 Evolución de Medición Inteligente .....	11
Figura I.3 Estructura de un Sistema Eléctrico de Potencia.....	13
Figura I.4 Infraestructura de Comunicación Jerárquica de Smart Grid.....	18
Figura I.5 Diferentes arquitecturas de comunicación para medición inteligente ....	22
Figura I.6 Arquitectura tradicional de comunicaciones en AMI .....	26
Figura I.7 Arquitectura de comunicaciones AMI con MDMSs distribuidos.....	27
Figura I.8 Arquitectura de comunicaciones AMI totalmente distribuida .....	28
Figura I.9 Flujo de datos de un sistema prepago de energía eléctrica .....	35
Figura I.10 Arquitectura básica de medición inteligente ANSI C12.22 .....	43
Figura II.1 Topologías de red básicas .....	49
Figura II.2 Topologías de redes inalámbricas.....	51
Figura II.3 Evolución de las comunicaciones móviles.....	60
Figura II.4 Estructura celular básica .....	64
Figura II.5 Reflexión y Refracción: Onda Plana incidente en una superficie límite	67
Figura II.6 Dispersión en una superficie áspera .....	68
Figura II.7 Difracción en filo de cuchillo .....	69
Figura II.8 Componentes de onda reflejados, difractados y dispersos .....	71
Figura II.9 Modelo de dos rayos (Two-Ray Model).....	72
Figura II.10 Modelo de diez rayos (Ten-Ray Model).....	73
Figura II.11 Escenario típico de propagación en zonas urbanas y definición de los parámetros utilizados en el modelo COST-WI .....	75
Figura II.12 Distribución del mercado de telefonía móvil, por tipo de abonado octubre-2014 .....	79
Figura II.13 Distribución del mercado de telefonía móvil, por operadora (considerando solo terminales de usuario) octubre-2014 .....	81
Figura II.14 Comparación de la zona de cobertura teórica de CNT, Movistar y Claro dentro de la provincia de Pichincha .....	82
Figura II.15 Caracterización del Enlace de datos Uplink y Downlink en una red compartida .....	88

Figura II.16 Elster REX2 .....	89
Figura II.17 Gráfica de porcentajes de marcas predominantes en el mercado de medidores inteligentes. ....	90
Figura II.18 Partes internas de un medidor inteligente elster REX2.....	91
Figura III.1 Pérdidas de energía eléctrica de distribución en el Ecuador.....	94
Figura III.2 Valores facturados y recaudados a clientes finales en el Ecuador.....	95
Figura III.3 Arquitectura AMI – Red Celular.....	105
Figura III.4 Arquitectura de medición avanzada montada en una red celular.....	106
Figura III.5 Escenario de simulación de una red celular reducida .....	121
Figura III.6 Inicio de simulación.....	122
Figura III.7 Proceso de simulación .....	123
Figura IV.1 Cobertura de 5 estaciones base a un total de 100 medidores.....	125
Figura IV.2 Cobertura de 7 estaciones base a un total de 200 medidores.....	126
Figura IV.3 Cobertura de 9 estaciones base a un total de 400 medidores.....	126
Figura IV.4 Cobertura de 7 estaciones base a un total de 400 medidores.....	127
Figura IV.5 Estimación de la intensidad de tráfico de 400 medidores inteligentes .....	129
Figura IV.6 Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (1 intervalo) .....	130
Figura IV.7 Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (Diario) .....	131
Figura IV.8 Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (Anual) .....	131
Figura IV.9 Mediciones de tráfico de voz y datos de las redes celulares a nivel mundial .....	132
Figura IV.10 Proyección de tráfico de voz y datos en las redes celulares a nivel mundial .....	133
Figura IV.11 Estimación del volumen de datos por un envío en uplink .....	133
Figura IV.12 Estimación del volumen de datos diarios en uplink .....	134
Figura IV.13 Estimación del volumen de datos anuales en uplink.....	134
Figura IV.14 Cantidad de datos enviados por cada nodo.....	135

Figura IV.15 Solicitudes de canal enviadas por cada nodo.....	135
Figura IV.16 Selecciones de celda por cada nodo.....	136
Figura IV.17 Llamadas GSM completadas.....	136
Figura IV.18 Canales Asignados por cada estación base.....	136
Figura IV.19 Estimación del costo de un número total de medidores con 3 diferentes precios .....	137
Figura IV.20 Estimación del costo con 3 planes de datos para un número total de medidores .....	138
Figura IV.21 Estructura de la cadena de procesos para AMI.....	144
Figura IV.22 Estructura organizacional funcional.....	145

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1 Comparación entre la red eléctrica actual y la futura red [15]-[16].....	10
Tabla I.2 Beneficios gracias a medición inteligente[19].....	30
Tabla II.1 Tecnologías AMI adaptables[6].....	53
Tabla II.2 Ventajas y Desventajas de WPAN[13].....	54
Tabla II.3 Ventajas y Desventajas de WiFi[13].....	55
Tabla II.4 Ventajas y Desventajas de WiMAX[13].....	56
Tabla II.5 Ventajas y desventajas de 3G/4G[13].....	56
Tabla II.6 Ventajas y desventajas de redes malladas[6] .....	57
Tabla II.7 Ventajas y desventajas de redes celulares[6] .....	59
Tabla III.1 Valores de tráfico de un solo intervalo de medición .....	108
Tabla III.2 Valores de tráfico de 8 intervalos de medición (Tráfico en 1 día) .....	109
Tabla III.3 Valores de tráfico en 1 año.....	109
Tabla III.4 Volumen de Información de 1 envío en uplink.....	110
Tabla III.5 Volumen de Información diaria en uplink.....	110
Tabla III.6 Volumen de Información anual en uplink .....	111
Tabla IV.1 Flujo de Efectivo anual.....	141
Tabla IV.2 Cálculos para tasa de interés del 12%.....	142
Tabla IV.3 Cálculos para tasa de interés del 10%.....	143
Tabla IV.4 Indicadores de la factibilidad económica .....	143

## **ÍNDICE DE ANEXOS**

Anexo 1 – Mapa de la Parroquia Urbana de la Kennedy del DMQ, Ecuador .....	159
Anexo 2 – Mapa de las Áreas de Concesión de las Distribuidoras en el Ecuador .....	160
Anexo 3 – Programa de Optimización de Distancias.....	161
Anexo 4 – Función Generadora de Datos para Optimización de Distancias .....	164
Anexo 5 – Programa de Optimización de Distancias con Datos Importados.....	165

## **GLOSARIO DE TÉRMINOS**

**AMI:** Advanced Metering Infrastructure, Infraestructura de Medición Avanzada

**AMM:** Advanced Metering Management, Gestión de Medición Avanzada

**AMR:** Automatic Meter Reading, Lectura Automática de Medidores

**ANSI:** American National Standards Institute

**BAN:** Building Area Network, Red de Área de Edificación

**BEMS:** Billing Energy Management System, Sistema de Gestión de Energía Facturada

**BPL:** Broadband Over Power Line Communications, Comunicaciones de Banda Ancha por Línea Eléctrica

**BS:** Base Station, Estación Base

**CDMA:** Code-Division Multiple-Access, Acceso múltiple por división de código

**CIS:** Customer Information System, Sistema de Información del Consumidor

**DA:** Distributed Automation, Automatización Distribuida

**DAP:** Data Aggregation Point, Punto de Agregación de Datos

**DAU:** Data Aggregation Unit, Unidad de Agregación de Datos

**DCS:** Distributed Control System, Sistema de Control Distribuido

**DER:** Distributed Energy Resources, Recursos Energéticos Distribuidos

**DG:** Distributed Generation, Generación Distribuida

**DMQ:** Distrito Metropolitano de Quito

**DMS:** Distribution Management System, Sistema de Gestión de la Distribución

**DOE:** U.S. Department Of Energy, Departamento de Energía de Estados Unidos de América

**DPS:** Digital Premise Server, Servidor de Predio Digital

**DR:** Demand Response, Respuesta a la Demanda

**DSI:** Demand-Side Integration, Integración de la Demanda

**EIA:** U.S. Energy Information Administration, Administración de Información Energética de Estados Unidos de América

**EMS:** Energy Management System, Sistema de Gestión de Energía

**ES:** Energy Storage, Almacenamiento de energía

**EV:** Electric Vehicle, Vehículo Eléctrico

**FAN:** Field Area Network, Red de Área de Campo

**FERC:** Federal Energy Regulatory Commission, Comisión Federal Regulatoria de Energía

**GIS:** Geographic Information System, Sistema de Información Geográfica

**GPRS:** General Packet Radio Service, Servicio General de Radiocomunicación por paquetes

**GSM:** Global System for Mobile, Sistema Global para Comunicaciones Móviles

**HAN:** Home Area Network, Red de Área de Hogar

**HEMS:** Home Energy Management System, Sistema de Gestión de Energía en el Hogar

**HSPA:** High-Speed Packet Access, Acceso a Paquetes de Alta Velocidad

**IAN:** Industrial Area Network, Red de Área Industrial

**IHD:** In-Home Display, Pantalla en el Hogar

**IP:** Internet Protocol, Protocolo de Internet

**ITU:** International Telecommunication Union, Unión Internacional de telecomunicaciones

**LAN:** Local Area Network, Red de Área Local

**LTE:** Long-Term Evolution, Evolución a largo plazo

**LOS:** Line-of-Sight, Línea de Vista

**MAN:** Metropolitan Area Network, Red de Área Metropolitana

**MDMS:** Meter Data Management System, Sistema de Gestión de Datos Medidos

**MS:** Mobile Station, Estación Móvil

**MSC:** Mobile Switching Center, Centro de Conmutación Móvil

**MVNO:** Mobile Virtual Network Operator, Operador Móvil virtual de Red

**NAN:** Neighbor Area Network, Red de Área Vecina

**NEMA:** National Electrical Manufacturers Association, Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos

**NIST:** National Institute of Standards and Technology, Instituto Nacional de Estándares y Tecnología

**NLOS:** Non Line-of-Sight, Sin Línea de Vista

**OLADE:** Organización Latinoamericana de Energía

**OMS:** Outage Management System, Sistema de Gestión de Interrupciones

**OSI:** Open System Interconnection, Interconexión de Sistema Abierto

**P2P:** Point-to-Point, Punto a Punto

**PDC:** Phasor Data Collectors, Recolectores de Datos Fasoriales

**PLC\*:** Power Line Communications, Comunicaciones mediante cable eléctrico

**PLC:** Programmable Logic Controller, Controlador Lógico Programable

**PMU:** Phasor Measurement Unit, Unidad de Medición Fasorial

**PPP:** Point-to-Point Protocol, Protocolo Punto a Punto

**PV:** Photovoltaic, Fotovoltaico

**QoS:** Quality of Service, Calidad de Servicio

**RTU:** Remote Terminal Unit, Unidad Terminal Remota

**SCADA:** Supervisory Control and Data Acquisition, Control de Supervisión y Adquisición de Datos

**SEP:** Sistema Eléctrico de Potencia

**SG:** Smart Grid, Red Inteligente

**Smart Meter:** Medidor Inteligente

**Smart Metering:** Medición Inteligente

**SMS:** Short Message Service, Servicio de Mensajes Cortos

**TIR:** Tasa Interna de Retorno

**TCP:** Transmission Control Protocol, Protocolo de Control de Transmisión

**UDP:** User Datagram Protocol, Protocolo de Datagramas de Usuario

**UMTS:** Universal Mobile Telecommunications System, Sistema universal de telecomunicaciones móviles

**VAN:** Valor Actual Neto

**VVO:** Volt-Var Optimization, Optimización Volt-Var

**WAMS:** Wide-Area Measurement System, Sistema de Medición de Área Amplia

**WAN:** Wide Area Network, Red de Área Extendida

**WMS:** Work Management System, Sistema de Gestión de Trabajo

**WPAN:** Wireless Personal Area Networks, Redes inalámbricas de Área Personal

**XML:** Extensible Markup Language, Lenguaje de Marcas Extensible

# RESUMEN

Carlos Guillermo Suárez Pozo

csuarezp@est.ups.edu.ec

Universidad Politécnica Salesiana

*Resumen*— El presente proyecto de tesis, nos permite analizar el comportamiento de la red de telecomunicaciones en zonas urbana; así de esta manera advertir las necesidades para implementar la infraestructura de medición inteligente de electricidad. Para lograr este propósito, se planteó un modelo de optimización matemática para la minimización de distancias como método para conglomerar-aglutinar dispositivos (medidores inteligentes) dentro de una zona de cobertura celular urbana. Para este modelamiento se debe adaptar al comportamiento de la red celular, de tal manera que nos facilite minimizar el impacto económico por la implementación de medición inteligente desde cero. Los dispositivos de medición inteligente deberán asumir el envío y recepción de datos a través de las redes celulares ofertadas por las operadoras del servicio móvil avanzado que pueden estar presentes en el mismo operador primario o reduciendo costos de infraestructura en un operador secundario a través del arrendamiento. Debido a la naturaleza de estas infraestructuras de comunicación, es importante considerar que dentro de una zona urbana intervienen factores determinantes para el comportamiento en el traslado de datos; por este motivo, se simula el comportamiento de la red en base sus parámetros de potencia de transmisión de radio base y medidores inteligentes, asignación de canales, modelos de propagación por simulador. Por lo tanto, se obtiene características de funcionamiento de la red que albergará AMI etapa de gran importancia en Smart Grid.

*Índice de Términos*—Smart grid (SG); advanced metering infrastructure (AMI); redes celulares; operador móvil virtual (OMV); optimización; k-means; uplink.

# ABSTRACT

Carlos Guillermo Suárez Pozo  
csuarezp@est.ups.edu.ec  
Universidad Politécnica Salesiana

*Abstract*— This thesis project allows us to analyze the behavior of the telecommunications network in urban areas; and thus warn the needed infrastructure to implement smart metering of electricity. To this end, a mathematical optimization model to minimize distances was raised as a method to cluster-unite devices (smart meters) within an urban area cellular coverage. For this, modeling must be adapted to the behavior of the cellular network, so that facilitates us to minimize the economic impact by implementing smart metering from scratch. Smart metering devices shall assume the sending and receiving data over cellular networks offered by operators of advanced mobile services which may be present in the same primary dealer or reducing infrastructure costs in a secondary operator through leasing. Due to the nature of these communications infrastructure is important to consider that an urban area involve determinants factors for data transfer behavior; for this reason, the network behavior parameters based on base station and smart meters transmission power, channel assignment and simulator propagation models are simulated. Therefore, operation characteristics of the network host AMI significant step to Smart Grid are obtained.

*Index Terms*—Smart grid (SG); advanced metering infrastructure (AMI); cellular networks; mobile virtual network operator (MVNO); optimization; k-means; uplink.

## INTRODUCCIÓN

En varios países de Latinoamérica y el mundo, el sistema eléctrico atraviesa varios cambios dentro de sus etapas; por este motivo, la relación comprendida entre el consumidor final y el distribuidor o proveedor del servicio, dependiendo de la estructura o esquema de mercado que imponga el sistema, ha tenido una serie de mejoras en beneficio de ambas partes. Los cambios que se han dado dentro de las redes eléctricas, se fundamentan en la resolución de problemas que se basan en las apreciaciones de la calidad y la eficiencia en las prestaciones del servicio y la tasa porcentual incómoda de las pérdidas de energía en distribución. Esto está sujeto a la inexistencia de un sistema de medición completo que permita mejorar el servicio en forma eficiente y confiable, es por eso que la nueva tendencia se basa en la migración a sistemas inteligentes en las redes de energía eléctrica; es decir, emprender investigaciones y experimentos en *Smart Metering* y *Smart Grid* de los sistemas eléctricos de un país o región.

A pesar de los esfuerzos en realizar normativas o desarrollar nuevos sistemas para lograr una red inteligente, no existe un documento estándar que defina a AMI[1]-[2] como un sistema ya consolidado en su estructura y arquitectura, dado que este concepto todavía está abierto a algún nuevo desarrollo investigativo o de aplicación. AMI es una base primordial en SG y se complementa con otros elementos dentro del sistema eléctrico, sin embargo es fundamental que se desarrolle una investigación en la que podamos poner en práctica los conceptos básicos y así dar un paso en la determinación de la factibilidad técnica y económica que conlleva realizar sistemas de medición inteligente dentro de un área específica.

El desarrollo de estándares, protocolos y tecnología que se utiliza en medición avanzada, no asegura un correcto funcionamiento del sistema de medición dentro de determinadas zonas de un sitio poblacional. Lo que representa este problema también es que ante una arriesgada implementación, no se obtendría el objetivo que implica beneficios para el cliente y las empresas de distribución. Las mejoras que prestan los sistemas inteligentes se basan actualmente en: reducción de

pérdidas no técnicas de la energía, mejoramiento en la calidad del servicio (medición, cortes y reconexiones) y nuevas modalidades de usuario en la facturación de la energía consumida (energía prepagada). Por otro lado, existe un porcentaje de pérdidas de energía eléctrica en toda la red, problema que se debe solucionar empezando por la etapa comprendida entre los consumidores finales y los comercializadores de electricidad, ya que esta es la etapa donde se generan las pérdidas por acciones ilegales (pérdidas no técnicas); sin embargo, también es necesario que el servicio de electricidad llevado de la empresa de distribución a los clientes finales, se adapte a la nueva tendencia de mejoramiento en sus prestaciones, con el fin de dar al usuario una mayor calidad del servicio y de la misma forma obtener resultados técnica y económicamente adecuados.

El trabajo de los ciudadanos de un país es también colaborar en la racionalización de energía, pero sobre todo en la legalidad de la obtención del recurso energético. El consumidor final, por ser el que determina la demanda de electricidad, es el que precisa su propio gasto en consumo[2] y por ese motivo también debe asumir su responsabilidad en el manejo de sus gastos excesivos de energía, así como la legal obtención del servicio. De una forma amigable al consumidor, la tecnología puede ayudar a que el problema de pérdidas de electricidad se disminuya y así hacer que los costos por pérdidas en el sistema se limiten. El estudio de las pérdidas no técnicas también está basado en la problemática social y económica en determinada parte de una población, es por eso que para poder determinar la vía necesaria de implementación de un sistema de medición inteligente, es necesario conocer qué zona dentro de un distrito posee altos valores de consumo y recaudaciones no proporcionales a dicha demanda de energía. Con datos obtenidos en forma estadística se tiene un primer paso necesario en la implementación de AMI. Esta información de la zona puede determinar bajo parámetros teóricos, qué tan factible sería acoplar un nuevo sistema de medición, tomando en cuenta que para el efecto se buscaría la mejor opción tecnológica adaptable al sitio poblacional. Con la ayuda de los medidores inteligentes, además de las capacidades tecnológicas y sistémicas, se puede determinar los parámetros necesarios para la caracterización del usuario o

consumidor final[2].

El desarrollo de la investigación a presentarse, está basado en la conceptualización de AMI y SG, seguido de simulaciones y modelaciones bajo software calificado que nos muestre datos que permitan asegurar una futura implementación de sistemas de medición avanzada en un sitio residencial, además de prestar una perspectiva de parámetros económicos del caso de estudio. El concepto de medición inteligente no solo comprende como tal la medición de energía eléctrica, sino también el uso de la tecnología para desarrollar soluciones a la problemática en la distribución de electricidad, problemas antes mencionados como inconvenientes de carácter social o de prestaciones del servicio.

En nuestro entorno existe teóricamente la capacidad de desarrollar sistemas de medición inteligente bajo infraestructuras de telecomunicación, es por esto que las empresas que presten el servicio del traslado de datos de medición de electricidad, se beneficiarían con un adecuado plan de negocios.

Los procesos de simulación y de modelado matemático que se realicen para una red inalámbrica podrán mostrar el comportamiento del tráfico de datos y los rangos de conglomeración de los medidores inteligentes por cada una de las radio bases o concentradores dentro de un sector residencial. Dicho esto, para una zona urbana bien podría funcionar una arquitectura AMI basada en GPRS, que bajo los parámetros de investigación enfocados en el comportamiento de las redes de comunicación celular y de los operadores móviles virtuales (MVNOs), podrán identificar los aspectos factibles necesarios para que un sistema actual de telecomunicaciones pueda tener la capacidad de brindar un servicio eficiente en el traslado de datos provenientes de medición inteligente.

# CAPÍTULO I

## I. INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA USANDO REDES CELULARES

En este capítulo se proporcionará una base fundamental en la investigación presente, determinando los conceptos primordiales de las infraestructuras de medición avanzada como un paso importante a las redes eléctricas inteligentes (SG). Se dará a conocer el aspecto fundamental de las arquitecturas existentes para AMI (infraestructura de medición avanzada), determinando así los aspectos característicos de su funcionalidad y constitución. Dentro de este apartado también se podrá conocer en detalle las propiedades ofertadas que brinda AMI para el servicio de electricidad y que beneficia tanto al consumidor final como a la empresa encargada de la distribución. Finalmente proporcionaremos una perspectiva acerca de la normativa internacional existente en torno a las aplicaciones de AMI y SG.

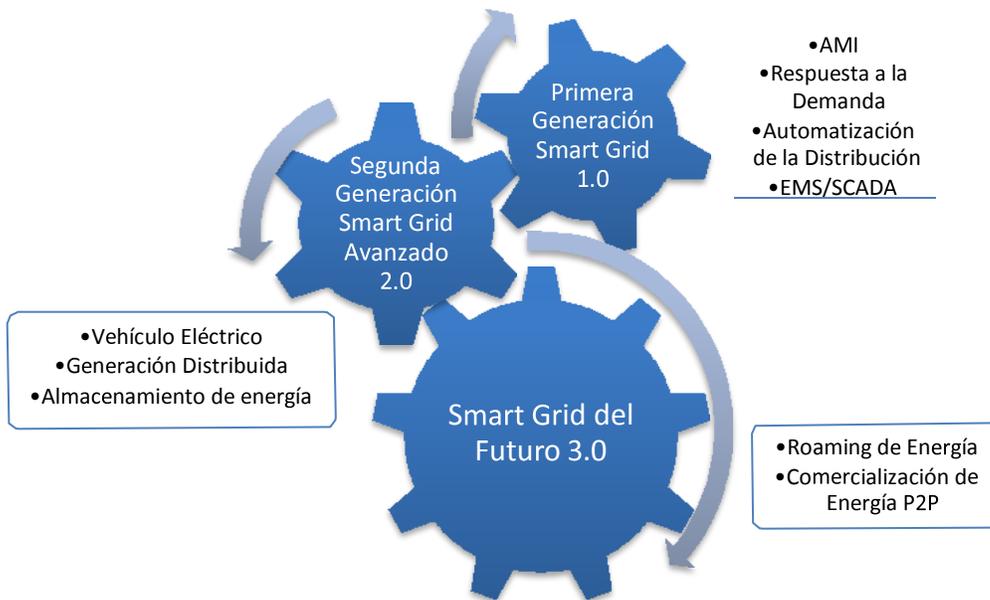
### 1.1 Infraestructura de medición avanzada en redes eléctricas inteligentes

Las redes eléctricas inteligentes, bajo conceptos determinados por la Referencia [3], consiste en la integración de una red eléctrica, red de comunicaciones, software y hardware para el monitoreo, control y manejo de la generación, distribución, almacenamiento y consumo de energía; pues en resumen, SG tiene el reto de optimizar todo el proceso que se realiza dentro del sistema eléctrico para poder brindar un servicio adecuado; además de obtener la rentabilidad o beneficio por parte de las empresas que están dentro de cualquiera de las etapas del mercado eléctrico. Es necesario mencionar también que la clave de SG recae en la red de comunicaciones; pues además de que sea bidireccional, debe diseñarse de tal manera que sea confiable y segura[4]. Actualmente el concepto proporciona una idea adecuada de lo que pretende SG, autores de libros y de documentos científicos como [5], [6], [7] y otros coinciden en que lo antes enmarcado resume el gran conjunto de conceptos de las Redes Inteligentes. Del concepto de SG, cabe mencionar que los principales objetivos son: añadir inteligencia a la red con el fin de realizar la auto-coordinación, la auto-conciencia,

la auto-curación y la auto-reconfiguración, impulsar el despliegue de fuentes de energía renovables, aumentar la eficiencia de la generación de energía, transmisión y el uso de la electricidad, además del cambio y la personalización de la demanda de energía de los consumidores mediante la gestión de los picos de carga a través de las técnicas de respuesta a la demanda[8].

En este apartado consideramos también que dentro de las redes eléctricas inteligentes se debe resolver cada una de las etapas que la integran. Smart Grid 1.0, definición de la primera generación para las redes inteligentes según [3], propone como una de las primeras bases a las infraestructuras de medición avanzadas; debido a esto el desarrollo de investigaciones han resultado en diferentes procesos de estandarización o de normativa que resolvería de manera óptima la implementación de infraestructuras de medición avanzada. AMI como tal no se propone como un concepto creado para Smart Grid 1.0, AMI en realidad tiene una evolución a través del tiempo; incluso antes de que existieran bases teóricas determinadas para SG, ya existían fundamentos para AMI que aún sigue en tendencia abierta a nuevos conceptos y aplicaciones basados en el fortalecimiento de los sistemas informáticos, tecnológicos y de gestión; es por esto que se le toma como un paso importante en las redes inteligentes. La llegada de infraestructuras de medición avanzada es gracias a que previamente hubo AMR (lectura automática de medidores), concepto determinado por los fabricantes de medidores y las empresas pioneras en realizar medición automática. La lectura automática de medidores es un proceso que nació con la digitalización de los casi obsoletos medidores análogos[9], su función únicamente era la de cumplir con la lectura sin la necesidad convencional del personal proporcionado por las respectivas empresas de distribución[10]. Según [11], AMR cumplía un objetivo de reducción de costos en la lectura de medidores, pues el costo que asumía la empresa de distribución por el despliegue de personal para medición era poco óptimo. Ahora, AMI, como un proceso de avance de las redes eléctricas, ofrece mejoras en el servicio al cliente y a las distribuidoras; sustituyendo así a AMR y dando una nueva perspectiva o promesa de futuro con la comunicación bidireccional en que se basa [11]. La Referencia [3] también muestra a modo

conceptual, una propuesta diferencial entre los modelos generacionales de Smart Grid, advirtiendo nuevas perspectivas promisorias de la red en el futuro[12]. La estructura generacional de las Redes Inteligentes se puede mostrar como en la Figura I.1, donde se especifican distintos términos concernientes a las redes eléctricas inteligentes, términos que serán detallados conceptualmente más adelante.



**Figura I.1** Evolución Generacional de Smart Grid

**Fuente:** [3] A. Carvallo and J. Cooper, *The Advanced Smart Grid: Edge Power Driving Sustainability*. Artech House, 2011, p. 269.

### 1.1.1 Evolución de la red eléctrica hacia el Smart Grid

Las redes eléctricas han comprendido uno de los principales factores de crecimiento económico y social porque gracias a la energía eléctrica se logró realizar grandes cambios en la industria y sobre todo en el modo de vida de los seres humanos. La historia de las redes eléctricas se puede remontar a los descubrimientos de Thomas Edison en Estados Unidos, ya que él fue uno de los gestores del uso de la electricidad. En el año de 1882 la energía eléctrica solo servía para encender luminarias a través de un sistema de 100 voltios en DC, logrando así el primer sistema de su tipo desarrollado por el mismo Thomas Edison en la ciudad de Nueva York, Estado Unidos. Según datos históricos del DOE (departamento de energía de Estados Unidos) y de la EIA (administración de

información energética de Estado Unidos), las entidades municipales del país norteamericano fueron regulando la industria, de tal manera que de a poco fueron asumiendo una gran participación en el mercado de la energía, de hecho estos gobiernos ya habían comenzado a proporcionar servicios de alumbrado público y de trolebuses, de este modo se llegó a formular políticas federales que beneficiaban al ente público y privado con respecto al servicio de electricidad. La necesidad de tener mayor alcance dentro de un territorio para brindar el servicio de electricidad, hizo que los investigadores buscaran la forma de que la energía sea transportada a través de kilómetros de líneas o conductores; de este modo, se pudo determinar que la electricidad debía ser producida y transportada en el mismo instante que es consumida[13]. Esto se hizo posible gracias a que en el año 1891, a través del invento del transformador, se hizo posible la transmisión en alto voltaje de AC; seguido a estos avances, en 1896 se logró desarrollar la generación hidráulica de energía eléctrica, mérito dado a George Westinghouse que empezó con el desarrollo de este tipo de generación, transmitiendo una considerable energía a más de 20 millas de distancia. De estos grandes desarrollos se pudo obtener la idea de la distribución y transmisión de la electricidad actuales, debido a que trasladaban la energía en alto voltaje desde los centros de generación hacia los centros de carga mediante transformadores que podían ya suministrar el bajo voltaje requerido para el uso de los clientes finales. Todo el siglo XX se desarrollaron roles de desempeño a través de comisiones federales que buscaban la mejor manera de la compra y venta de la energía, de igual forma se pudieron ir acoplando nuevos sistemas para la transmisión de electricidad, nueva tecnología de medición de consumo eléctrico y también nuevos modelos de seguridad, confiabilidad y eficiencia en todo el sistema. También con las comisiones federales como el FERC (comisión federal regulatoria de energía) en Estados Unidos se logró desarrollar programas de electrificación rural y leyes de uso de los recursos energéticos[14]. Con todos los antecedentes, se pudo desarrollar naturalmente una estructura de mercado verticalmente integrada, donde ya se pudo separar los roles de la generación, transmisión y distribución de la energía, lo cual representaría más adelante como la base del mercado eléctrico

que asumiría las competencias respectivas para proporcionar electricidad de calidad al menor costo posible. El mundo actual del mercado eléctrico se desempeña de tal forma que todo un país pueda acceder a este servicio imprescindible de la vida del ser humano actual, es por eso que ante las nuevas necesidades humanas se desarrollan planes de mejoramiento en las redes de energía eléctrica. De ese modo se hace necesaria la determinación de las características obsoletas de la red para poder reemplazarlas con el desarrollo de tecnologías adaptables.

Unas décadas atrás e incluso hoy en día se puede constatar dentro de las redes de energía eléctrica:

- equipos electromecánicos para el control,
- comunicaciones unidireccionales o nulas,
- generación de energía centralizada,
- topologías de red poco confiables,
- pocos sensores,
- monitoreo reducido o nulo,
- restauraciones manuales,
- equipos de chequeo manual.

Incluso se habla de características operacionales desactualizadas como:

- sistemas muy propensos a fallas o *blackouts*,
- limitado control sobre flujos de potencia,
- información limitada de tarifas y precios,
- además de poca o nula interacción del cliente en el sistema.

Lo antes expuesto es detallado por [2] y para lo cual es necesario acotar que muchas de estas particularidades han sido optimizadas o corregidas; pero todavía se pretende alcanzar niveles mayores de eficiencia y confiabilidad del sistema para mejorar la calidad del servicio hacia el cliente y también obtener mayores beneficios mediante la tecnología, así también para la adecuada administración de las empresas inmersas en el servicio de electricidad.

Las redes inteligentes son el futuro de los sistemas eléctricos actuales, que mediante su advenimiento propiciarán las óptimas prestaciones del recurso

energético. Según [2], se consideran elementos dentro del sistema inteligente a:

- equipos digitales,
- comunicaciones bidireccionales,
- capacidad de generación distribuida,
- topologías de red confiables,
- monitoreo más profundo a través de mayor cantidad de sensores,
- autocontrol,
- restauraciones semiautomatizadas y en ciertas ocasiones auto-curación,
- protecciones adaptativas y en isla,
- equipo de monitoreo remoto,
- control distribuido,
- sistemas de apoyo en decisiones con confiabilidad predictiva,
- sistemas de control globales,
- información completa de precios,
- y varias opciones para el usuario.

Con respecto a las redes eléctricas inteligentes y las actuales, se puede citar la Tabla I.1; lo cual está determinado por características de coincidencia que responden a una visión propia del autor, esta se basa en la realidad y perspectiva genéricas relativas de las redes eléctricas actuales y de la filosofía de las redes eléctricas inteligentes; es decir, que esto representa solo un enfoque general de los conceptos y verdades de las redes y sistemas eléctricos. Los puntos de vista entre países o regiones pueden diferir de ciertas características aquí expuestas y eso es debido a que para cada realidad existe un caso de estudio específico y para este caso hemos referenciado los reportes o mapas de ruta elaborados por las entidades gubernamentales de un solo país en concreto, que es Estados Unidos de América debido a que ellos han sido uno de los pioneros en el desarrollo y avance de las redes eléctricas inteligentes.

El resultado de la comparación entre las redes eléctricas del mañana y las de hoy responde a la necesidad de implementar nuevos sistemas tecnológicos en información, comunicaciones y de gestión para hacer inteligente a una red; proponiendo de manera adecuada una solución progresiva en el tiempo, enfocada

en el mejoramiento de cada una de las etapas que conforman la estructura o sistema de servicio de la energía eléctrica.

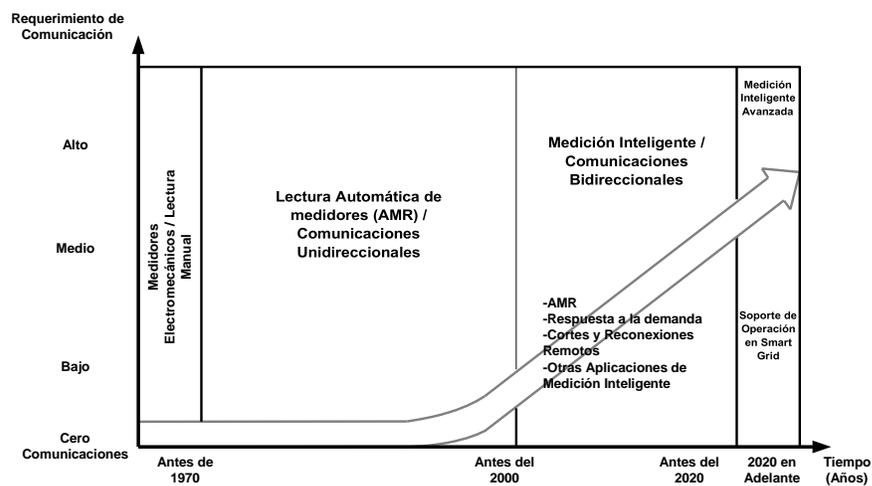
CARACTERÍSTICAS	RED ACTUAL	RED INTELIGENTE
Permite la participación activa de los consumidores.	Los consumidores están mal informados y no participan con el sistema de energía.	Informados, involucrados y activos consumidores - respuesta a la demanda y recursos energéticos distribuidos.
Tiene capacidad para todas las opciones de generación y almacenamiento.	Dominado por la generación de centrales - existen muchos obstáculos para la interconexión de recursos energéticos distribuidos.	Muchos de los recursos energéticos distribuidos con acceso plug-and-play enfocado en las energías renovables.
Habilita nuevos productos, servicios y mercados.	Mercados mayoristas limitados no bien integrados - oportunidades limitadas para los consumidores.	Mercados mayoristas maduros, bien integrados, crecimiento de nuevos mercados de electricidad para los consumidores.
Proporciona calidad de la energía para la economía digital.	Enfocado en las interrupciones del servicio – respuesta lenta a los problemas de la calidad de energía.	La calidad de energía es una prioridad con variedad de opciones de calidad/precio – resolución rápida a problemas.
Optimiza los activos y opera de manera eficiente.	Poca integración de datos operacionales con la gestión de activos – silos de procesos de negocio.	Adquisición de datos ampliados considerablemente de los parámetros de la red – se centran en la prevención, minimización del impacto a los consumidores.
Anticipa y responde a perturbaciones del sistema (auto-cura)	Responde a evitar daños mayores – se centra en la protección de los activos después de la avería.	Detecta y responde automáticamente a los problemas – se centra en la prevención, minimizando el impacto a los consumidores.
Funciona elásticamente contra ataques y desastres naturales.	Vulnerable a los actos criminales de terrorismo y los desastres naturales.	Resistente a los ataques y desastres naturales con capacidades de restauración rápida.

**Tabla I.1** Comparación entre la red eléctrica actual y la futura red [15]-[16]

Al igual que la evolución de las redes eléctricas inteligentes, se puede hablar de un avance generacional de las infraestructuras de medición avanzadas[17]. Mediante la siguiente Figura I.2 podemos resumir la evolución de la medición inteligente para poder tener una mejor perspectiva de AMI y sus funciones, sobre todo el nivel de comunicaciones que se hace necesario en la medición de la electricidad.

Como se puede apreciar en el gráfico, antes de 1970 existía solo la medición de electricidad a través de los medidores análogos y una toma de lectura manual, lo cual era ineficiente; sin embargo, a principios de los 80's los países desarrollados

como Estados Unidos y otros incursionaron en la lectura automática (AMR) que ya permitía una comunicación unidireccional entre el proveedor de servicio y el cliente. A pesar de la mejoría en el sistema de medición antes del año 2000, todavía se sentía ciertas deficiencias en las operaciones, como en cortes y reconexiones y a lo cual también se sumaba la poca información que el cliente tenía acerca de su consumo; es por esta razón que se adoptaron las comunicaciones bidireccionales a partir del siglo XXI, lo cual aún representa retos en una gran parte de la población mundial. Se pretende también que antes del año 2020 se tenga asumida una estructura consolidada de medición inteligente y a partir de este año emprender en una filosofía de medición inteligente avanzada, lo cual implica en soportes más avanzados de operaciones en SG[18].



**Figura I.2 Evolución de Medición Inteligente**

**Fuente:** [19] J. Ekanayake, N. Jenkins, and K. Liyanage, Smart grid: technology and applications. John Wiley & Sons, 2012, p. 315.

Un resultado de diferentes procesos de investigación y avance en la tecnología, permiten que AMI se conceptualice como la infraestructura capaz de realizar el enlace de comunicación entre los usuarios y los proveedores de servicio, con el fin de gestionar de manera óptima los procesos que intervienen en el consumo de energía eléctrica o de otro bien de servicio público. Se pueden determinar diferentes conceptos acerca de AMI[20], que por lo general se encuentran determinados por los institutos de investigación o de estandarización. Uno de esos institutos es el NIST, que es el instituto nacional de estandarización de Estados

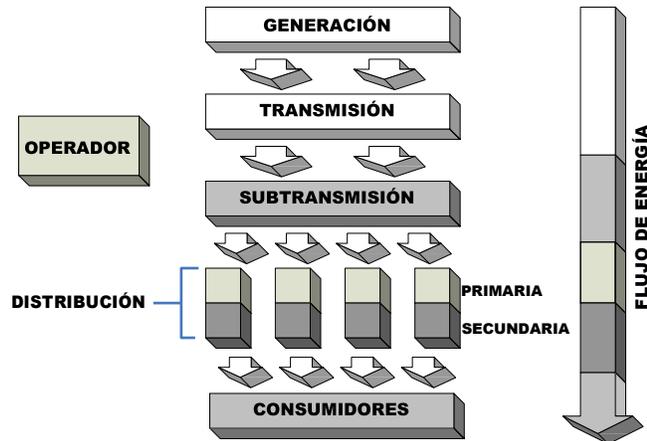
Unidos, el cual promulga un concepto más específico. Para el NIST, AMI consiste en el hardware y software de comunicaciones; y software del sistema asociado y de gestión de datos que crea una red de dos vías entre los medidores avanzados y los sistemas de negocio de servicios públicos, permitiendo la recolección y distribución de información a los clientes y otras partes (partes como el proveedor competitivo minorista o la empresa de de servicio público en sí). AMI proporciona a los clientes, en tiempo real o casi en tiempo real los precios de la electricidad; debido a esto, se puede ayudar a las empresas de servicios públicos a lograr proyecciones de carga del sistema[21].

### **1.1.2 Segmentos, sistemas y elementos en Smart Grid**

Dentro de las redes eléctricas inteligentes, se debe diferenciar que los sistemas eléctricos están determinados por un simple concepto referido a la integración de tres subsistemas[2]; que se refieren al proceso de producción, transporte y distribución de la electricidad, tal y como la Figura I.3 expone. Aunque, en realidad se debe hablar de tres elementos más dentro del sistema eléctrico, que son la subtransmisión, el consumidor final como tal y el operador del sistema, dependiendo de la perspectiva y el alcance de análisis de un SEP.

- La producción o generación corresponde a las plantas de generación encargadas de convertir las fuentes primarias de energía en electricidad. Además ciertas centrales pueden aportar con servicios adicionales como inyección de reactivos, mantenimiento de niveles de tensión, reserva de potencia, estabilidad de frecuencia, entre otros.
- El transporte o transmisión es el conjunto de líneas de alta tensión y subestaciones que se encargan de acondicionar el traslado de la electricidad entre tramos extensos de un territorio.
- La distribución también tiene una función similar a la del sistema de transmisión, pero la diferencia es el nivel de voltaje y las distancias con las que trabaja. Este sistema es el encargado de llevar la electricidad hacia las localidades donde se genera la demanda. Posee un sistema de distribución primaria que se encarga de alimentar a los transformadores

de distribución (media tensión y potencia moderada). Finalmente, mediante una red de distribución secundaria, se encarga de proporcionar niveles de baja tensión y potencia reducida para el servicio de los consumidores.



**Figura I.3** Estructura de un Sistema Eléctrico de Potencia

**Fuente:** [22] J. M. Alvarado Brito, "Servicios de medición avanzada (AMI) para redes inteligentes y su adaptabilidad en el marco de la legislación ecuatoriana," Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, 2011.

Cabe mencionar que dentro de la estructura de un sistema eléctrico se consideran dos tipos de clientes o consumidores:

- el cliente no regulado o de gran consumo, que se caracteriza por negociar el precio y la cantidad de la energía directamente en el mercado mayorista y
- el cliente regulado o de bajo consumo, el cual se ata a las políticas de una tarifa regulada, además de obtener el servicio directamente de la empresa comercializadora o de distribución.

También dentro del sistema eléctrico se debe considerar al operador, el cual actúa coordinando el despacho de las unidades generadoras, controlando los flujos de potencia, previniendo y evitando contingencias, además de ser el encargado de optimizar los procesos operativos para que el sistema mantenga operaciones estables al menor costo posible[22].

Tanto la generación, transmisión y distribución se convierten en los tres segmentos principales en la determinación de las funciones de SG; pues dentro de cada subsistema se genera un análisis que ayuda a definir parámetros normativos,

de operación, de mantenimiento y de gestión. Dentro de las primicias de la investigación en SG, está AMI enfocado en la red de distribución, pues la problemática de pérdidas, además de un servicio desactualizado hacia el cliente generan condicionamientos en la mejora de este segmento del sistema eléctrico. Una de las soluciones que se pretende presentar dentro de esta etapa es la medición inteligente, que a través de las infraestructuras de medición avanzada propician un avance en la red eléctrica; por lo tanto, llevan al objetivo que la filosofía de SG promulga.

Los sistemas y elementos que comprenden un actual SG y que según la Figura I.1 (presente al principio de este subcapítulo 1.1) corresponden a un avance generacional, pueden ser diferenciados bajo conceptos que se detallan a continuación:

El **DCS o sistema de control distribuido** se utiliza para comunicar las centrales de energía de una empresa de servicio con su centro de control de despacho de generación. Este componente de SG involucra el aprovisionamiento de conectividad de alta velocidad (en general fibra óptica) entre las plantas y el centro de control de energía; además propicia el desarrollo de aplicaciones que permitan interoperabilidad y respuesta automática, utilizando bases de datos separadas o compartidas[3].

El **EMS (sistema de gestión de energía)/SCADA** es usado para traer de vuelta los datos a partir de elementos distribuidos del sistema de transmisión y distribución para el control y monitoreo, subcomponentes incluyen RTUs (unidades terminales remotas) y PLCs (Controladores lógicos programables). Estos componentes de SG involucran el aprovisionamiento de conectividad de alta velocidad (en general fibra óptica) entre los puntos extremos de la red (RTUs, PLCs, y así sucesivamente) y el centro de control de energía; además propicia el desarrollo de aplicaciones que permitan interoperabilidad y respuesta automática, utilizando bases de datos dedicadas o compartidas[3].

**DA o automatización distribuida** incluye a un GIS (sistema de información geográfica) integrado con un OMS (sistema de gestión de interrupciones), que en última instancia será reemplazado en las redes inteligentes con un DMS (sistema

de gestión de la distribución). Estos subsistemas trabajan juntos para automatizar el monitoreo y control del sistema de distribución. Este componente de SG involucra el aprovisionamiento de conectividad de alta velocidad (en general comunicaciones inalámbricas, fibra o BPL<sup>1</sup>) entre los puntos extremos de la red (activos fijos y móviles de los servicios públicos) y el centro de control de energía; además propicia el desarrollo de aplicaciones que permitan interoperabilidad y respuesta automática, utilizando bases de datos dedicadas o compartidas[3].

**AMI** se compone de dispositivos de medición inteligente, una red de comunicación inalámbrica y una de red de retorno de datos; integrados para proporcionar intervalos de recopilación y procesamiento de datos de consumo para su uso en la medición de ingresos y realización de facturas. AMI también proporciona funcionalidad auxiliar, incluida la información de gestión de interrupciones y el encendido/apagado remotos. Este componente de SG involucra los medidores inteligentes desplegados, conectividad de red (generalmente inalámbricas, PLC\*<sup>2</sup> o comunicaciones BPL) entre los puntos extremos de la red (medidores inteligentes) y el centro de control de energía; además de la implementación de cualquier hardware o aplicaciones que permitan la interoperabilidad y respuesta automática, usando bases de datos dedicadas o compartidas[3].

**DER o recursos energéticos distribuidos** son sistemas basados en los predios, que producen, almacenan y/o administran la energía en los finales de la red. Las principales categorías DER incluyen la generación distribuida, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. Cada uno de estos elementos DER incluye una combinación de medición y submedición, portales de clientes, IHDs (Pantallas en el hogar), BEMSs (sistemas de gestión de energía facturada) y sistemas de gestión de energía del hogar (HEMSs), para brindar soporte en la funcionalidad de los extremos de los alimentadores de distribución. Este componente de SG involucra el aprovisionamiento de conectividad de alta

---

<sup>1</sup> Las Técnicas de procesamiento de señales avanzadas y los esfuerzos de estandarización realizada por el Comité Europeo de Normalización Electrotécnica han hecho posible el empleo de Power Line Communications (PLC). La evolución de esta tecnología dio a luz a los sistemas de banda ancha por líneas eléctricas (BPL). BPL ofrece comunicaciones de datos de alta velocidad con infraestructura mínima para desplegar, por lo que se convierte en tecnología viable para las comunicaciones NAN[90].

<sup>2</sup> Power Line Communication (PLC) es una técnica que utiliza las líneas eléctricas existentes para transmisión en alta velocidad (2-3 Mbps) de señales de datos de un dispositivo a otro[6].

velocidad, generalmente mediante cableados, comunicaciones inalámbricas o comunicaciones BPL; que comunica entre cada elemento individual o DPS (servidor de predio digital) y el centro de control de energía; además consta de la implementación de cualquier hardware o aplicaciones útiles para permitir la interoperabilidad y respuesta automatizada, utilizando las bases de datos dedicadas o compartidas[3].

**DR o respuesta a la demanda** se refiere a los cambios en el consumo de electricidad por parte de los clientes finales de sus patrones de consumo normales en respuesta a cambios en el precio de la electricidad en el tiempo, o para el pago de incentivos diseñados para inducir a un menor uso de electricidad en momentos de altos precios del mercado mayorista o cuando la confiabilidad del sistema se pone en peligro[23]. Este componente de SG involucra el aprovisionamiento de conectividad de las telecomunicaciones (en general inalámbricas o BPL) entre el dispositivo DR (en general el HEMS), el termostato inteligente o un controlador de carga y el centro de control de energía; además propicia el desarrollo de aplicaciones que permitan la interoperabilidad y la respuesta automática utilizando bases de datos separadas o compartidas[3].

**DG o generación distribuida** incluye cualquier variedad de tecnologías y dispositivos de producción de electricidad a pequeña escala, mucho más en número, pero con mucha menos capacidad por unidad que las plantas de energía tradicionales. El ejemplo más popular de la DG de hoy en día es el sistema solar fotovoltaico (PV) de azotea, que consta de paneles solares fotovoltaicos, inversores y medidores para producir energía que sirva al abonado o grupo de abonados [3].

**EV o sistema para vehículo eléctrico** corresponde a los vehículos eléctricos o híbridos eléctricos, estaciones de carga eléctrica y las redes de apoyo respectivas. Las estaciones de carga tienden a ser desplegadas en residencias y negocios, así como en los lugares públicos, incluyendo puntos de recarga disponibles al público en las aceras, aparcamientos y estacionamientos[3]. Esta tendencia hacia el vehículo eléctrico, deberá ser solventada con sistemas de gestión que permitan realizar una facturación dinámica hacia el cliente.

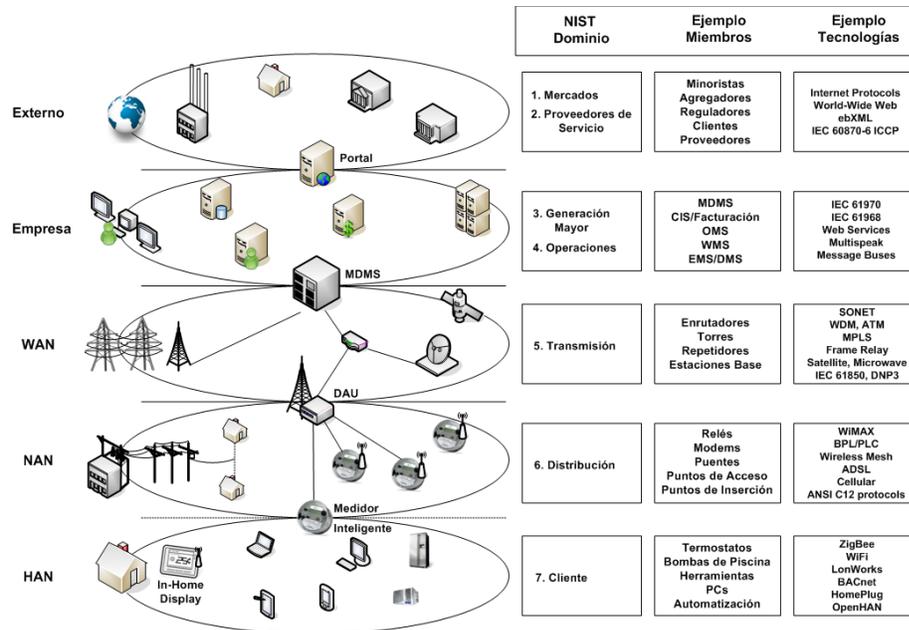
**ES o almacenamiento de energía** está cada vez más disponible a nivel del predio(consumidor final), la comunidad, y a escala de servicios públicos, pero el principal almacenamiento de energía distribuida en el corto plazo es probable que sea de energía a nivel de la comunidad, que es de rango medio en tamaño y capacidad y que sirve a múltiples residencias o negocios de ubicaciones geográficas muy cercanas[3].

### **1.1.3 Infraestructuras y redes de comunicación en Smart Grid**

SG es considerada una red de sistemas y subsistemas interconectados inteligentemente para proporcionar efectividad de costo y confiabilidad del suministro de energía; por otro lado, las redes inteligentes podrán ser logradas si existe una superposición de las infraestructuras de comunicación con las infraestructuras del sistema eléctrico[1]. En este caso existe la necesidad de contar con un sistema de comunicaciones que preste eficiencia, confiabilidad, interoperabilidad y seguridad; dado que los diferentes segmentos de la red necesitan una transferencia de información constante, sobre todo si analizamos los datos provenientes de medición inteligente, donde el despliegue de dispositivos genera una gran cantidad de datos. En base al NIST, se proporciona en la Figura I.4 una vista jerárquica de de la infraestructura de comunicación en SG.

Se considera que dentro de una red de comunicaciones de SG, la partición en varios segmentos tales como HAN (*red de área de hogar*), BAN (*red de área de edificio*), IAN (*red de área industrial*), NAN (*red de área vecina*), FAN (*red de área de campo*) y WAN (*red de área amplia*) proporcionan una dedicada división de conceptos para investigación y desarrollo de aplicaciones[24][25]. Los tres segmentos principales más representativos, que son HAN, NAN y WAN; tal y como lo considerado en la Figura I.4, corresponden a segmentos diferenciales que están interconectados mediante compuertas de enlace, de esa forma HAN se interconecta con NAN a través de los medidores inteligentes y NAN se interconecta con WAN a través de unidades de agregación de datos (DAUs) o concentradores. Los medidores inteligentes llevan la información a través de su

red a los concentradores de datos, los cuales se encargarán de hacer el enlace necesario a través de otra red con el centro de gestión o MDMS (*sistema de gestión de datos de medición*).



**Figura I.4** Infraestructura de Comunicación Jerárquica de Smart Grid

**Fuente:** [1] E. Hossain, Z. Han, and H. V. Poor, *Smart Grid Communications and Networking*. Cambridge University Press, 2012, p. 511.

NAN, que corresponde a la red que se analiza para las aplicaciones de AMI, está definido por los parámetros de las arquitecturas de red que se detallarán más adelante, sin embargo es necesario conocer a que se refiere cada segmento de red que hemos mencionado, por lo que definimos HAN, NAN y WAN más adelante.

**HAN** o red de área de hogar, corresponde a una red que engloba a los dispositivos dentro de un hogar, su función es proporcionar al cliente un óptimo uso de la electricidad proporcionándole un monitoreo y control continuo de sus dispositivos[19]. Cada unidad de hogar o cliente tendrá un medidor inteligente que actuará como el enlace entre HAN y NAN, como ya se lo había mencionado anteriormente. También es necesario mencionar que el control y monitoreo solo se lo puede hacer a través de dispositivos inteligentes con sensores y actuadores que faciliten la comunicación dentro de la red. Esta etapa comprende a un dominio del cliente, en donde se considera el control, monitoreo y gestión de dispositivos para

determinar el comportamiento de la demanda de cada consumidor, es decir el uso de electrodomésticos y demás aparatos eléctricos de uso cotidiano en un hogar. Como podemos apreciar dentro de la Figura 1.4 existen varias tecnologías aplicables para HAN, un ejemplo es ZigBee que es un protocolo inalámbrico de baja potencia de estándar abierto y con mucho, el más popular estándar de red IEEE 802.15.4[1]. Por lo general, HAN necesita cubrir áreas de hasta 100 y soportar de 1 a 10 [24].

**NAN** o red de área vecina es la red que engloba a los SMs (Medidores Inteligentes, *Smart Meters*), su función es la de llevar a través de la infraestructura los datos medidos de cada cliente hacia los concentradores de datos, los cuales llevarán la información hacia la red WAN[1]-[19]. Los SMs son los elementos que se pueden considerar como el corazón de AMI, que para cada cliente proporcionan el monitoreo a tiempo real o cercano al tiempo real del consumo de electricidad. Esta información también sirve a la empresa de distribución para desarrollar la gestión correspondiente a las proyecciones de demanda o DR y sus diferentes actuaries administrativos de la red eléctrica como facturación, cortes y reconexiones. El número de SMs que un concentrador aglomera, varía desde unos pocos cientos a unos pocos miles dependiendo de la topología de la red y el protocolo de comunicaciones utilizado. Esta etapa corresponde a un dominio de la distribución, la cual administra y controla los diferentes puntos de acceso, puentes, módems y demás elementos necesarios para concentrar y trasladar datos desde los medidores hacia las unidades de agregación de datos, o en su defecto a los centros de operación de las empresas proveedoras del servicio de electricidad. NAN, normalmente necesita cubrir áreas de 2,6 a 26 y soportar de 10 a 100 [24]. Más adelante podremos analizar las diferentes tecnologías, protocolos y estándares que existen para esta red.

**WAN** o red de área extendida es la red que conglopera los datos provenientes de las NAN a través de los concentradores, donde su destino final corresponde a los MDMS o en si a la base de datos de las empresas de servicio de electricidad[1]. Esta red también permite las comunicaciones a larga distancia entre los diferentes puntos de agregación de datos (DAPs) de las plantas de

generación de energía, estaciones de DER, subestaciones, redes de transmisión y de distribución, centros de control, etc. WAN es responsable de proporcionar la red de dos vías necesaria para las comunicaciones de las subestaciones, para la DA, y para el monitoreo de calidad de potencia; mientras que también apoya la agregación y retorno para AMI y las aplicaciones de respuesta de la demanda y la gestión de la demanda. Esta etapa corresponde a un dominio de transmisión, el cual incluye elementos como enrutadores, torres, repetidores, estaciones base y demás componentes necesarios para el traslado de información hacia una base de datos, que mediante un sistema integrado permite la gestión de la información de los datos medidos provenientes de la distribución. WAN puede cubrir un área muy grande, es decir, miles de millas cuadradas y podría agregar miles de dispositivos compatibles que requieran de 10 a 100 de transmisión de datos[24].

El sistema completo de comunicaciones en SG corresponde a varios puntos importantes en la estructura jerárquica, por ejemplo hablamos de un nivel de dominio llamado empresarial, el cual corresponde a la entidad de alto nivel responsable del procesamiento y análisis de los datos recolectados de los diferentes niveles jerárquicos y por lo que consta de diferentes sistemas como los SCADA y sistemas de medición de área amplia (WAMS) para el monitoreo y control en su totalidad de la red eléctrica. Los WAMS constan de: un centro de control, unidades de medición fasorial (PMUs) y recolectores de datos fasoriales (PDCs). Los elementos de los WAMS permiten que este sistema sea considerado como una versión sincronizada de un SCADA convencional. También dentro de este dominio empresarial o de este alto nivel jerárquico, se considera: MDMS, OMS, EMS, DMS, WMS (sistema de gestión de trabajo), CIS (sistema de información del consumidor) y la facturación (*Billing*)[1]. Más adelante se explica cada uno de estos elementos.

También dentro de la jerarquía total en las comunicaciones de SG, existe el dominio llamado externo o exterior, el cual considera a todos los minoristas, los reguladores y los proveedores relacionados con el intercambio de los precios y la oferta y la demanda que ayudan al proceso de negocio del sistema eléctrico. La

comunicación desde y hacia los proveedores del mercado y de servicios externos, debe ser confiable para que coincida la producción eléctrica con el consumo. Además, diversos procesos de negocio como la facturación y la gestión de cuentas de clientes ayudan a mejorar los servicios; tales como la gestión del uso de energía y la generación de energía en el hogar. Este nivel externo proporciona servicios y productos nuevos e innovadores para satisfacer las nuevas exigencias y oportunidades que ofrece la red inteligente en evolución[1].

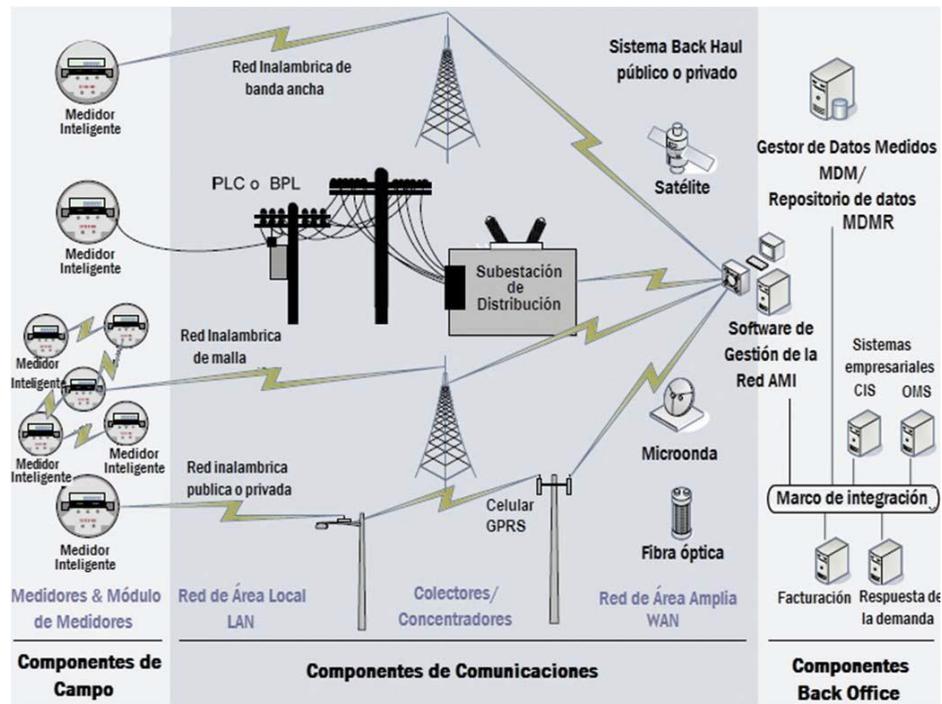
## **1.2 Arquitectura de comunicación en infraestructura de medición avanzada**

Como el primer gran hito y el paso fundamental del mapa de ruta total de una red inteligente, una infraestructura de medición avanzada (AMI)[26] es un sistema que mide, recopila y analiza los datos sobre el uso de la energía y la calidad de la energía de los medidores inteligentes, la cual se comunica con los dispositivos mediante solicitud o fecha prevista[27]. Debido al intercambio de datos tan fundamental en las redes eléctricas inteligentes, la gestión de datos es una de las más importantes tareas que se debe resolver. AMI como tal posee un componente clave en su arquitectura, pues el sistema de gestión de datos medidos o MDMS cumple la función central de la infraestructura de medición avanzada. El MDMS es una base de datos que realiza el almacenamiento y gestión de los datos a largo plazo para la gran cantidad de uso de información y eventos que se realizan debido a la lectura de medidores. Esta base de datos cuenta con herramientas de análisis que permiten la interacción con los sistemas de operación y gestión de la red, estos elementos incluyen un sistema de gestión de interrupciones (OMS), un sistema de información geográfica (GIS), un sistema de información al consumidor (CIS) y un sistema de gestión de la distribución (DMS).

### **1.2.1 Arquitecturas de red para AMI**

Diferentes tipos de tecnología para redes de comunicación hacen que AMI pueda basarse en una arquitectura única o mixta. La red que comprende la conglomeración de medidores inteligentes puede estar bajo una tecnología de comunicaciones móviles, como GPRS o las nuevas redes 4G y sus predecesoras;

también puede basarse en redes de frecuencia no licenciada, como lo es RFID o en su defecto redes malladas. Como preámbulo a las diferentes tecnologías de comunicación para AMI, se muestra a la Figura I.5 como un gráfico resumido de las arquitecturas de NAN más comunes para el traslado de datos de los medidores hacia un centro de operación o MDMS.



**Figura I.5** Diferentes arquitecturas de comunicación para medición inteligente

**Fuente:** [22] J. M. Alvarado Brito, "Servicios de medición avanzada (AMI) para redes inteligentes y su adaptabilidad en el marco de la legislación ecuatoriana," Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, 2011.

La Figura I.5 tiene cuatro diferentes topologías para NAN, la primera en orden descendente se basa en una red inalámbrica de banda ancha, la cual puede ser una tecnología móvil que traslada la información de los SMS hacia una estación concentradora, estación que a su vez intercambia datos a través de satélite, microondas o fibra óptica hacia el MDMS. Una segunda opción utiliza parte de la infraestructura de red de energía eléctrica, tecnologías conocidas como BPL y PLC\* que trasladan la información entre todos los tramos de la red distribución para poder llegar al centro de gestión de datos correspondiente. La tercera opción es una red basada en tecnología inalámbrica, pero con la característica de ser una

topología de red mallada, que mediante un concentrador o acumulador de datos puede trasladar la información hacia el centro de gestión. Una cuarta opción, que no necesariamente es la última, corresponde según el gráfico a una red mixta; donde interviene una red LAN (red de área local) primaria que traslada los datos en forma inalámbrica o cableada hacia un concentrador, el cual a su vez transmite la información mediante una tecnología móvil a una estación base receptora; que se encargará como paso final de enlazar la información con el MDMS. El gráfico también nos explica que como último paso de transmisión, los datos que se intercambien con el MDMS o centro de gestión, puede estar basado en transmisión de datos bajo satélite, microondas o fibra; trabajo de transmisión correspondiente en su mayoría a una operadora o empresa de comunicaciones.

Cuando ya hemos obtenido los datos medidos de NAN, el sistema de gestión o MDMS hace uso de ciertos componentes, los cuales se consideran como base para cualquier tipo de arquitectura en el centro de operación. En primera instancia hablamos de una arquitectura tradicional de comunicaciones en AMI, que posee elementos importantes dentro de su funcionamiento.

**MDMS** implícito que es el sistema que almacena, valida, edita y analiza los datos de las lecturas del medidor para la integración con otras aplicaciones, como la facturación al cliente, previsión de cargas y gestión de incidencias. Desarrolla mecanismos de auditoría energética para identificar áreas propensas de pérdidas y finalmente, reduce las pérdidas mediante la aplicación de medidas eficaces de conservación de energía. También facilita a los consumidores el fácil acceso a su información de uso y alentar a la utilización inteligente de la energía. Los datos que se recopilan de la medición también se utilizan para funciones de control remoto, control de carga, modalidades prepago, y precios en tiempo real. El repositorio de datos de los medidores, es el almacén de datos que mantiene las lecturas del medidor, registro de lecturas, registros de intervalo, eventos de interrupción y restauración, además de registros de eventos. Todos los datos relacionados con el consumo de electricidad se recogen en la base de datos máster[28].

**OMS** es el sistema de gestión de interrupciones, que dentro de AMI proporciona

una dedicada resolución a problemas de cortes, sean estos ocasionados por cortocircuitos, fallas de las centrales de generación o daños en las líneas de transmisión y distribución[29]. Este sistema es el necesario dentro la infraestructura dado que proporciona una eficiente detección y resolución de fallas dentro de la red, tomando en cuenta que la mayoría de fallas que suceden son reportadas por el cliente mismo, el cual actúa dentro de un tiempo poco efectivo para reportar un corte o falla dentro de la red de distribución. Es gracias al debido proceso de adquisición de los datos provenientes de medición inteligente y a la responsable gestión de interrupciones que se puede resolver de manera más rápida un problema por interrupción de la energía, de tal manera que la red va resolviendo la caracterización de una red inteligente.

**CIS/Facturación** corresponde al sistema de información del consumidor, cuya función principal se encuentra vinculada a un repositorio de datos, además de gestionar la facturación para el proveedor del servicio. Dentro de las funciones se encuentra la validación, medición y estimación, que corresponde a las actividades que ayudan a determinar errores en la lectura, transmisión y almacenamiento de datos; también hace registro y auditoría, cálculos de facturación y además se encarga de la carga y recolección de datos[22]. Este sistema es vital para la detección de pérdidas no técnicas conjuntamente con el GIS; además, por manejar los datos de consumo del cliente, al igual que la facturación, facilitan el cálculo de los balances energéticos y el seguimiento y localización de las pérdidas del sistema[30].

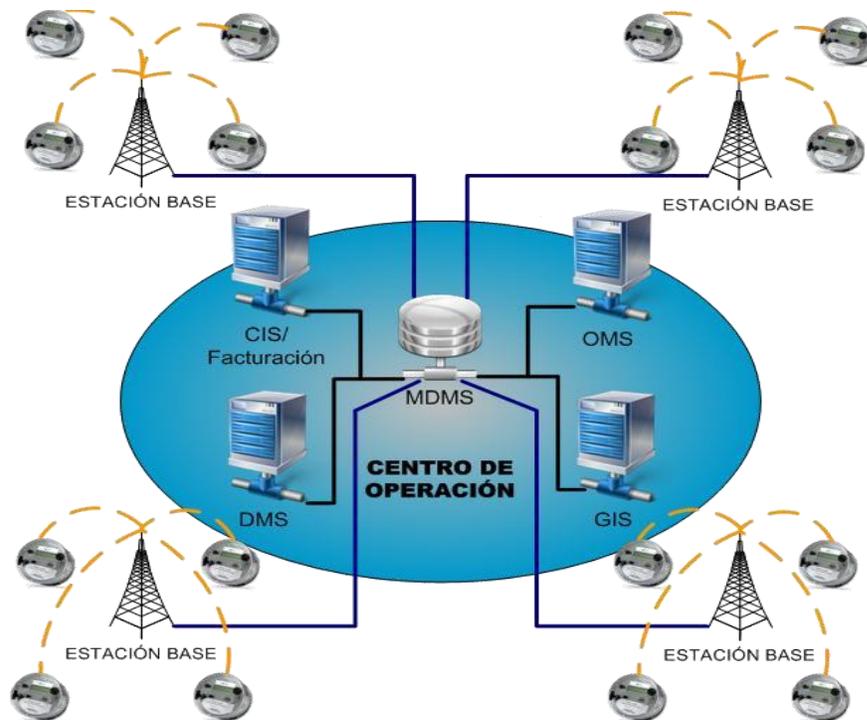
**DMS** corresponde al sistema de gestión de la distribución, el cual se encarga del monitoreo, operación y control de la red, gestión de fallas, gestión de activos, planificación, mantenimiento, construcción, cálculos, análisis y reportes estadísticos[22]; también se encarga de proporcionar gestión de calidad de la energía y la previsión de carga basada en datos del medidor[27]. Algunas de las funciones implementadas en entornos modernos de DMS son la estimación de estado, optimización Volt-Var (VVO), la previsión de carga, gestión de interrupciones y la restauración, la recopilación de datos para las funciones de planificación (análisis de confiabilidad, flujo de carga fuera de la línea, análisis de

cortocircuito, etc), despacho de DG, y reconfiguración. La aplicación de estas funciones implica la disponibilidad de una gran cantidad de elementos de medición y control en el sistema de distribución, situación que es cada vez más común en la modernidad[30].

**GIS** es el sistema de información geográfica que permite a las empresas de servicios relacionar geográficamente cada cliente con su respectivo sistema secundario, el transformador de distribución, alimentador, y subestación de distribución[30]. Es por esta razón que conjuntamente con el CIS, permiten identificar y determinar las pérdidas en el sistema. En otras palabras, GIS ofrece el inventario más completo de los componentes de la red de distribución eléctrica y su ubicación geográfica[7].

### **1.2.2 Arquitectura de comunicación AMI tradicional**

Existen actualmente diferentes arquitecturas para AMI, por lo general cumplen con las generalidades expresadas gráficamente en el Figura I.6, donde se puede apreciar la existencia un solo MDMS centralizado que corresponde en su conjunto a una arquitectura simple. El sistema tradicional corresponde en su conjunto a una cadena de procesos estandarizados, que se alimenta de la información proveniente de los medidores inteligentes y se gestiona a partir de las unidades de gestión de la empresa de distribución o proveedora de energía. Los medidores inteligentes generan un volumen de datos dentro de la red que debe ser trasladado a la distribuidora para su posterior tratamiento. Las estaciones base de la red conglomeran un grupo de medidores, en función de la capacidad de cada estación o grupo de estaciones y envían a través de una red de fibra óptica al centro de operaciones correspondiente, ya dentro del centro de operaciones, se encargarán de los datos medidos, donde entran en juego las funciones de la facturación, la ubicación geográfica, la gestión de interrupciones y el sistema de gestión de la distribución que permiten desarrollar los planes necesarios para que tanto usuarios como clientes, se beneficien de los servicios ofertados por AMI.



**Figura I.6** *Arquitectura tradicional de comunicaciones en AMI*

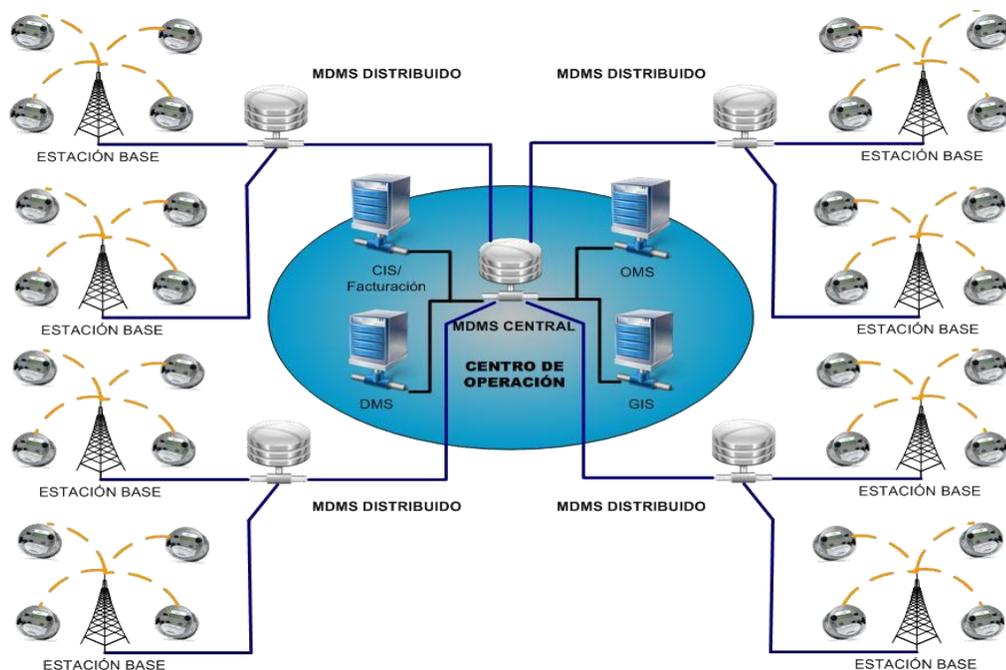
**Fuente:** [27] J. Zhou, R. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol.23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.

Podemos destacar que la arquitectura toma forma con los elementos que han sido mencionados anteriormente (OMS, CIS, GIS, etc), sin embargo esa arquitectura también se compone de elementos previos esenciales en el traslado de la información, que son la red de comunicación desde las estaciones base o antenas receptoras hacia el centro de operaciones y a su vez la red que comunica la estación base o antena receptora con cada medidor inteligente.

Como se había expuesto en el punto anterior 1.2.1, las redes que conglomeran los datos hacia un concentrador y posteriormente a un MDMS pueden ser distintas y es por eso que no se puede definir a una en particular para la arquitectura tradicional. Esta arquitectura corresponde a un sistema con poca escalabilidad, pues en el supuesto caso de incrementarse los datos de medición, generarían un costo más alto de los equipos y la ocupación de la red; además de ser poco eficiente y fiable, ya que tendría que procesar más datos. Sin embargo se lo puede considerar para la gestión de paquetes de datos que no sobrepasen un excesivo

peso de información, por lo cual bien podría adaptarse a una zona rural de una ciudad o distrito. Podemos también deducir que si el incremento de medidores llega al punto de saturar los canales de comunicación, se generará un cuello de botella, donde la información tendrá retardos considerables o peor aún tener pérdidas parciales o totales de datos medidos y por lo tanto la arquitectura se vuelve ineficiente, incluso más ineficiente que los sistemas actuales de medición, cortes y reconexiones.

### 1.2.3 Arquitectura de comunicación AMI con MDMSs distribuidos



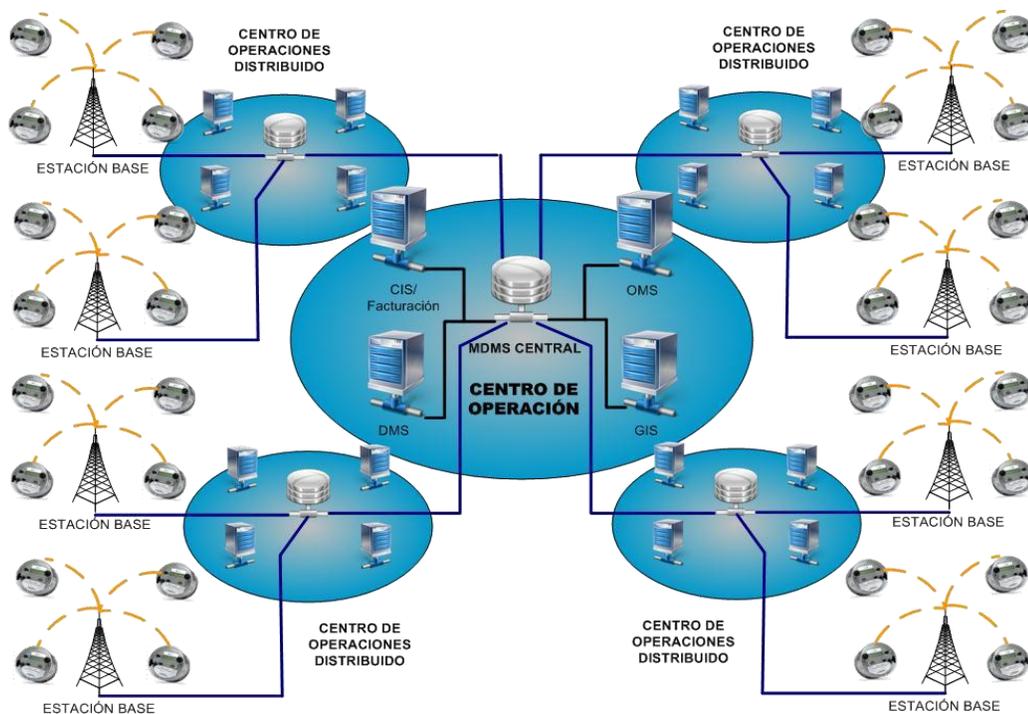
**Figura I.7** Arquitectura de comunicaciones AMI con MDMSs distribuidos

**Fuente:**[27] J. Zhou, R. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.

Al igual que la arquitectura tradicional, la arquitectura con MDMSs distribuidos consta de una base común de elementos (OMS, CIS, GIS, etc), pero como podemos ver en la Figura I.7, el sistema ya se vuelve más idóneo para una cantidad de información considerable, ya que los datos pasan a través de un MDMS distribuido. De la misma forma, el sistema se vuelve más confiable ya que al poseer bases de datos separadas, se puede enviar solo la información

requerida al sistema central y ya no toda la cantidad de datos medidos como en la arquitectura tradicional. Esto también permite que se pueda realizar muestreos más frecuentes, de tal manera que el sistema pueda realizar un monitoreo más cercano al tiempo real. A pesar del aumento del rendimiento mediante esta arquitectura, todavía se puede realizar un aumento en la eficiencia y confiabilidad del traslado de la información entre el usuario y la empresa proveedora del servicio. En este caso los MDMSs distribuidos pueden considerarse como un colector más de los datos, es decir que cumplen una función de bases de datos recolectoras, esto sin quitar el mérito de la escalabilidad que es superior a la arquitectura tradicional.

### 1.2.4 Arquitectura de comunicación AMI totalmente distribuida



**Figura I.8** *Arquitectura de comunicaciones AMI totalmente distribuida*

**Fuente:**[27] J. Zhou, R. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst., vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.

De la arquitectura tradicional, pasando por una arquitectura descentralizada, llegamos a una arquitectura totalmente descentralizada, que se caracteriza por

poseer centros de gestión distribuidos y ya no solo MDMSs distribuidos. Esta modificación analizada representa una gestión previa antes de ser centralizada, pero con la diferencia de que al ser descentralizada proporciona beneficios de congestión reducida y por lo tanto ya es un sistema totalmente escalable que puede realizar una gestión más cerna al tiempo real de todo el segmento de la distribución de la energía eléctrica. La Figura I.8 muestra gráficamente el esquema descentralizado de una arquitectura de comunicaciones para AMI.

También en este tipo de sistemas descentralizados, podemos considerar la reducción de distancias entre los elementos que intervienen en la gestión de datos medidos, es decir la optimización de distancias entre los medidores inteligentes y los concentradores o estaciones bases de conglomeración de los datos.

Recientes estudios han determinado que las arquitecturas de comunicación para AMI dependen esencialmente del número de elementos de medición y las distancias entre estos elementos[27].

### **1.3 Servicios ofertados con infraestructura de medición avanzada**

Al igual que cualquier nueva investigación, AMI nace de una problemática que se enfoca en la calidad del servicio y en la optimización o minimización de los costos por pérdidas en el sistema. Para este caso, AMI se analiza como un conjunto de elementos comunicados bidireccionalmente, que en otras palabras se trata de una caracterización de una red NAN. Pero es gracias a las infraestructuras de medición y sus beneficios que se justifican las implementaciones de medición inteligente. Es necesario conocer que gracias a las funciones que desempeña AMI, se pueden determinar los beneficios que conllevan las implementaciones de medición inteligente. Tanto los beneficios, funciones y características de AMI pueden ser vistos como los servicios que oferta la infraestructura, ya que estos representan la importancia y sobre todo la necesidad de implementación de estos sistemas avanzados. A continuación se muestra la Tabla I.2 que muestra los beneficios de AMI, determinándose así los beneficios a corto y largo plazo que representan las infraestructuras de medición avanzada.

	Beneficios a proveedores de energía y operadores de red	Beneficio Global	Beneficios al consumidor
A Corto Plazo	Menores costos de medición y lecturas más frecuentes y precisas.	Mejor servicio al cliente	Ahorro de energía como consecuencia de la mejora de la información.
	Limita las pérdidas comerciales debido a la detección más fácil de fraude y robo	Esquemas de precios variables	Facturación más frecuente y exacta
		Facilita la integración de generación distribuida (DG) y cargas flexibles.	
A Largo plazo	Reducción de la demanda máxima a través de programas de integración de la demanda (DSI) y así reducir el costo de la compra de electricidad al por mayor en hora pico.	Suministro de energía más confiable y menos reclamos de clientes.	Simplificación de los pagos para producción de DG.
	Mejor planificación de la generación, la red y el mantenimiento.	El uso de infraestructuras de tecnología de información y comunicación (ICT) para control remoto de DG, recompensación de consumidores y disminución de costos para las empresas de servicios públicos.	Pagos adicionales para los beneficios del sistema más amplio.
	Apoya al funcionamiento del sistema en tiempo real a los niveles de distribución.	Facilita la adopción de vehículos eléctricos y bombas de calor, y reduce al mínimo el aumento de la demanda pico.	Facilita la adopción de la automatización de área local por una vida más cómoda mientras se reduce al mínimo el costo energético.
	Capacidad para vender otros servicios (por ejemplo, banda ancha y comunicaciones de video).		

**Tabla I.2 Beneficios gracias a medición inteligente[19].**

### 1.3.1 Características del servicio eléctrico actual y AMI

AMI representa una cantidad considerable de características, correspondientes en su mayoría a las facultades estipuladas por los institutos de estandarización y también por las aplicaciones y usos que la misma empresa de distribución asigne en función de las capacidades tecnológicas y de gestión que posee actualmente el mundo moderno. Las empresas proveedoras de servicios actuales, sean de gas, agua o electricidad se enfocan en implementaciones, nuevos despliegues o desarrollo de infraestructuras de medición avanzada, centradas en implementar

respuesta de la demanda residencial y para servir como el principal mecanismo para la aplicación de precios dinámicos[21]. En el caso del servicio eléctrico, las empresas que se encuentran bajo una estricta ley regulatoria, asumen una postura responsable con los consumidores finales ya que en la mayoría de países una ley ampara los derechos del consumidor (ley orgánica de defensa de consumidor, en el caso ecuatoriano); una gran parte de países como el Ecuador asumen responsabilidades en el servicio de la electricidad mediante los consejos regulatorios (CONELEC<sup>3</sup>) que se enfocan en generación, transmisión, distribución y todo lo que corresponda al sector eléctrico del país, pero sobre todo en el amparo de una constitución que protege el bienestar de los ciudadanos del país. Cabe recalcar que es gracias a que el desarrollo del servicio de electricidad, al ser considerado como un bien de servicio público, es también incluido dentro de los sectores estratégicos y por ende capaz de responder a los nuevos proyectos de desarrollo del sector.

Los niveles de electrificación dentro del territorio y el aumento de la demanda de energía por el sector industrial, indican un crecimiento económico y de desarrollo social dentro del Ecuador, obviamente con leyes que amparen el desarrollo sostenible y sustentable. Gracias a las políticas de desarrollo es que actualmente un proyecto justificado en el sector eléctrico puede ser ejecutado con las mayores de las garantías. AMI es considerado un aspecto fundamental gracias a los mapas de ruta en las redes eléctricas inteligentes, que se desarrollan por parte de países que no cuentan con una clara determinación en el mejoramiento de sus sistemas eléctricos nacionales. Sin embargo, será necesario que se avance en cuestiones normativas internas para poder desarrollar la implementación de sistemas avanzados de medición ya que regulaciones, leyes o resoluciones que amparen el correcto funcionamiento de AMI, podrá facultar a las empresas de distribución y en especial a los consumidores llevar un correcto y completo mecanismo de venta y consumo del recurso energético.

En cuanto al servicio prestado por AMI, es suficiente con mencionar los claros reemplazos de los sistemas obsoletos de medición, cuya gestión es propensa a

---

<sup>3</sup> Consejo Nacional de Electricidad <http://www.conelec.gob.ec/>

bajos índices de eficiencia, es por eso que la principal característica de AMI es la organización y gestión automática más eficiente, para brindar el servicio de energía eléctrica o de cualquier otro bien de servicio público a sus consumidores. Entonces estamos hablando de un mejoramiento y optimización de los sistemas actuales de medición gracias a medición inteligente, que de igual forma proporcionan una detallada y dedicada gestión de fallas o interrupciones del servicio, ocasionadas por fallas operativas de la red o fallas por causas de la naturaleza que gracias a la capacidad tecnológica podrá detectarse y ubicarse más fácilmente dentro de toda la red de distribución. Se pueden determinar también como característica de AMI, la incorporación activa del cliente gracias a las redes de área de hogar y su comunicación bidireccional con el proveedor del servicio. También representa un avance el montar tecnologías que permitan un acceso a la información del consumidor en tiempo real, es decir acceder fácilmente a los registros de actividad, en cuanto al servicio de electricidad o de algún otro bien público se refiere. En sí, AMI cuenta con características del tipo tecnológico, como sistemas de comunicación con banda ancha, interoperabilidad entre equipos, además de una gestión dedicada o enfocada en la calidad del servicio y la mejoría de prestaciones para poder desarrollar una completa red inteligente en el sistema de distribución.

### **1.3.2 Servicios ofertados por AMI con enfoque en el cliente**

Como servicio público, la electricidad se considera un factor importante dentro de las actividades humanas; es por eso que al incluir nuevos métodos más eficientes, efectivos y óptimos dentro de la estructura de la etapa de distribución, pueden determinar un gran beneficio en la sociedad, es por eso que AMI se enfoca en la mejora del sistema por el bien de los consumidores y evidentemente en una mejor gestión de los recursos energéticos, por el bien de los mismos ciudadanos y el beneficio para las empresas encargadas de llevar el servicio de energía eléctrica a cada uno de los hogares de un país, así como a los diferentes negocios que potencian el comercio dentro de una sociedad y que por ende repercute en un flujo de efectivo dentro de todo el esquema económico de dicho

país, por lo cual también representa un avance de las condiciones de vida.

AMI enfocado en el cliente es solo un título de desagregación, que pretende explicar los nuevos y mejorados servicios que esto conlleva. Entonces podemos hablar de que los servicios de medición inteligente y lo que AMI en su estructura desarrolle, puedan determinarse como beneficios en función de las necesidades actuales del ser humano.

En primera instancia, AMI ofrece al cliente un mayor acceso a la información de su consumo, este es un servicio que representa una capacidad para el usuario en racionalizar el uso de la electricidad. Basta con revisar a tiempo real, cuanto estoy consumiendo para poder determinar personalmente si mi demanda de energía es justificada en cuanto a la actividad que estoy desarrollando en ese momento, por eso lo importante de saber si lo que yo consumo en una hora es proporcional a lo que debería consumir por realizar una actividad; es decir, si utilizo un computador personal, ¿es necesario tener encendido la radio o el televisor?, obviamente a veces se tiene en cuenta eso, pero si no lo tengo en cuenta, que tal si tengo un sistema de acceso a mi consumo que me informe cuanto es el consumo actual por tener encendido diferentes dispositivos a la vez y cuanto ahorraría si los apago, en el supuesto caso de que sea necesario tenerlos apagados. Entonces esto representa un servicio que ayuda al cliente a mejorar su economía.

En casos de interrupciones, sabemos que se pueden detectar y localizar fallas, pues en el sistema convencional es común que el consumidor realice una llamada al servicio al cliente para reportar el fallo, pero con medición inteligente el cliente tendrá el asistimiento automático y eficiente de su problema; ya que el sistema de gestión de AMI permite que se determine la reparación o restauración del servicio sin necesidad de que el cliente realice la llamada. Esto es un servicio que beneficia al cliente en el caso de que las interrupciones ocurran, por lo general los cortes de energía suelen darse por descargas eléctricas atmosféricas y en ese caso AMI cumple el deber de resolver la problemática de la manera más óptima a través de su sistema de detección de fallas.

De igual forma AMI no solo sirve para la asistencia en las interrupciones, sino también para poder informar al cliente si en su red existen problemas de calidad

de energía. Entonces el consumidor final puede estar al tanto de la calidad de la energía que el distribuidor le proporciona, por lo tanto podrá tener un reporte a tiempo real de la situación que atraviesa su red eléctrica dentro del hogar.

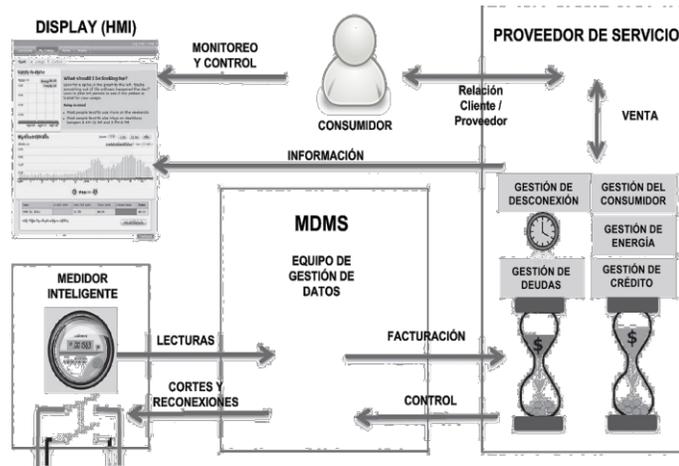
Gracias a que se puede tener acceso a un sistema avanzado de interacción con el cliente, los consumidores podrán realizar planificación del uso de sus equipos; teniendo en cuenta que si no todo el tiempo está pendiente de ello, podría realizar una programación del tiempo de funcionamiento de cada uno de los equipos del hogar, oficina o fábrica. Este beneficio corresponde a un servicio fácil de interacción entre humano y máquina.

Uno de los servicios más convencionales que prestan las empresas proveedoras de servicio de electricidad es la reconexión, que se ocasiona por un corte previo del servicio. Estadísticamente existe un índice considerable de gente que olvida realizar el pago de las planillas; además, es natural que exista una probabilidad de que al menos una vez en el año, un cliente se olvide de realizar el pago de una planilla. El servicio que existe actualmente es poco eficiente y por lo general representa repercusiones económicas para ciertos clientes, entonces uno de los servicios mejorados que ofrece AMI es el corte y reconexión remotos de medidores; esto se obtiene gracias a un avanzado medidor que permite realizar esta acción, acompañado del eficiente sistema de gestión que hace notable una mejoría de los tiempos de interrupción del suministro.

Un servicio muy importante que proporciona AMI, es la modalidad de usuario; esto se refiere a que un usuario por lo general tiene una modalidad pospago de la energía consumida, pero es posible una modalidad prepago; ya que los sistemas de gestión y las capacidades tecnológicas pueden permitir que un usuario realice su consumo en base a un pago previo del servicio, es decir que consuma lo que previamente pagó, al igual que una recarga de minutos o datos en un celular. Esto ayuda a que el cliente no tenga que pagar planillas mensuales, obviamente se vuelve un servicio adecuado para aquellas personas que por ejemplo pasan días, semanas, meses e incluso años fuera de casa; entonces aquellas personas que necesitan energía por poco tiempo, se convierten en clientes de energía prepagada y por ende se evitan realizar pagos mensuales de la planilla. Todo esto

acompañado de una asistencia virtual que le permita conocer cuánto necesita pagar de energía para poder utilizar uno, dos o varios aparatos según lo que planea hacer; esto irá de la mano del desarrollo de aplicaciones para dispositivos inteligentes o software para PCs. La Figura I.9 representa gráficamente el sistema que interpreta el sistema de flujo de un servicio prepago de energía eléctrica.

AMI además permitirá gracias a sus servicios, ayudar en el futuro al ingreso de la generación distribuida, la facturación dinámica de energía y muchos otros beneficios más como el acondicionamiento de las protecciones adaptativas. En fin, todos estos servicios por el bien de la sociedad que cada vez crece y que por ende aportan un aumento considerable de la demanda de energía eléctrica.



**Figura I.9** Flujo de datos de un sistema prepago de energía eléctrica.

**Fuente:**[31] S. Borlase, Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions. CRC Press, 2012, p. 611.

### 1.3.3 Beneficios de AMI para el proveedor de servicios

Como hemos analizado anteriormente, los nuevos y mejorados servicios que oferta AMI son enfocados en el bienestar de los consumidores, pero es gracias a eso que también permiten a la empresa proveedora del servicio realizar su gestión y por ende ser más eficiente y confiable. Los servicios y por tanto beneficios que obtiene el cliente gracias a AMI, van de la mano con los beneficios hacia la empresa de distribución; es por tal motivo que los beneficios que representan la inversión en infraestructuras de medición avanzada enfocadas en el cliente, son directamente proporcionales con los beneficios que obtiene la empresa de

distribución. Es necesario mencionar que AMI como tal, también aporta en la reducción de pérdidas no técnicas de energía en el sistema, lo cual corresponde en una minimización de los costos que asume el estado por energía no facturada; que en realidad se traduce como el robo o hurto de energía mediante acciones ilegales y fraudulentas que lamentablemente son difíciles de determinar con los sistemas de medición actuales.

Una de las facultades de AMI, es permitir el acceso a una información más exacta del consumo de electricidad; con lo cual, las empresas pueden mejorar la predicción de la demanda y también generar tarifaciones en tiempo real. Este beneficio representa una ayuda eficaz en la gestión de carga y análisis, además de mejorar la gestión de la oferta, planificación y sobre todo la eficiente mejoría en la administración de las empresas de distribución o proveedoras de servicio.

Una particularidad de AMI, también es la comunicación en dos vías, es decir la comunicación bidireccional entre la empresa de servicios y el consumidor; lo cual permite a la empresa detectar condiciones anómalas en la red de un usuario, como niveles de tensión desproporcionales o algún defecto que afecte la calidad de la energía. De igual forma le permite a la empresa detectar manipulaciones o actitudes sospechosas en la demanda del usuario. Esta característica también permite que se pueda crear programas de gestión de la demanda, lo cual es un soporte en la gestión de las empresas de distribución. Gracias a esto también es posible la gestión de interrupciones, ya que permite a la empresa conocer de manera inmediata si el cliente tuvo un desperfecto en su red, que como se había mencionado antes son generadas en la mayoría por condiciones atmosféricas del lugar (tormentas eléctricas) o también por accidentes de tránsito o temblores y terremotos que pueden ocasionar algún desperfecto en las líneas de distribución. Pero también la gestión de interrupciones es importante para la empresa, ya que de eso depende sus índices de calidad en el servicio, lo cual se traduce como el eficiente restablecimiento del sistema o la mejora en el despacho de personal de restauraciones, que propician un mejor entendimiento entre el distribuidor y los consumidores finales.

Algo muy importante que aporta AMI a las empresas proveedoras de servicio, es

la medición remota, que en un principio fue conocida como AMR o medición automática, lo cual permitía y permite aún optimizar los tiempos de lectura de cada uno de los medidores de los abonados. La rentable inversión en medidores inteligentes actualmente hace posible reemplazar al sistema convencional de medición, lo cual representaba movilización de personal hacia cada uno de los predios de los consumidores para realizar la lectura del medidor. AMI cuenta con esta facultad de telemedición, que ahora se convierte en uno de los cambios más rentables en los sistemas de distribución. También, al igual que la medición remota, gracias al avance de la tecnología, empresas dedicadas en la fabricación de medidores inteligentes proporcionaron una modalidad de cortes y reconexiones automáticas y telecomandadas, por lo que el sistema que así mismo era realizado por un personal contratado por la empresa proveedora del servicio, hoy en día se convierte en un sistema de alto índice de eficiencia en restauraciones del servicio a los consumidores; ayudando así a la empresa en la modernización de la gestión que realiza por el bienestar de sus abonados.

#### **1.4 Normativa internacional para medición inteligente**

De acuerdo a la propuesta de distintas tecnologías, una red actual de telecomunicaciones posee la capacidad de utilizar cualquier protocolo que intervenga en la transmisión y recepción de datos entre dispositivos; además, la determinación de los mejores protocolos de comunicación se realiza en función de conformar normativas para un estándar de medidas tecnológicas a implementar dentro de un grupo de elementos de una red. Esto implica que mediante una estandarización, se puede obtener la interoperabilidad entre dispositivos que intervienen en la medición inteligente de energía eléctrica.

##### **1.4.1 estándares y protocolos de comunicación en medición inteligente**

En la etapa de distribución de un sistema eléctrico, los sistemas de medición residenciales poseen un considerable número de elementos. Tanto en el caso de un sistema de medición avanzada como en un sistema convencional, se necesitaría procesar una gran cantidad de datos correspondientes al número de

elementos del sistema[2]. Hasta cierto punto es posible imaginar el comportamiento de la red cuya finalidad es cumplir con el traslado eficiente de la cantidad de información que se maneje, pues dentro de las condiciones que rigen a un proceso de telecomunicación, se destaca la importancia de los estándares y protocolos que reglamentan los procesos de las comunicaciones entre los centros de gestión de los datos y los elementos dentro de la red.

Un protocolo de comunicaciones se refiere a un conjunto de reglas que define cómo realizar una tarea asociada a un proceso de envío y recepción de datos. Una colección o conjunto de este tipo de protocolos que trabajan juntos para apoyar la comunicación de datos entre origen y destino se llama una pila de protocolos[19], los cuales están dispuestos o distribuidos en capas. Esta disposición de protocolos, también se pueden ver como la descomposición de la compleja tarea de intercambio de información en pequeñas subtarefas que son en su mayoría independientes; por lo tanto, un protocolo puede ser cambiado o modificado sin afectar a los otros en la tarea de comunicación, o a su conjunto (pila de protocolos) como tal. En sistemas de medición avanzada se requiere el uso de estas medidas de comunicación[32], dado que la base fundamental de estos sistemas es el traslado de datos dentro del proceso de consumo de energía. Los protocolos dentro de las comunicaciones inalámbricas también exigen a la tecnología a seguir un proceso de calidad, lo cual asegura que cualquier funcionamiento productivo se desarrolle en forma correcta.

Al igual que los necesarios protocolos en telecomunicaciones, los estándares contemplan la redacción de normas o reglas correspondientes al acoplamiento de elementos que se desarrollan para el traslado de la información. También garantiza una seguridad de funcionamiento, así como la calidad de dispositivos que se encuentren inmersos en el acondicionamiento y traslado de datos. Dentro de los factores importantes que hacen posible el direccionamiento de los estándares y tecnologías en las redes eléctricas inteligentes, está el poder encontrar una vía para descomponer coherentemente sus estándares y tecnologías fundamentales que permitan una investigación específica; de igual manera, se hace necesario encontrar las barreras que limitan el desarrollo de

soluciones para la implementación de SG.

*Smart Metering* es un concepto que en la práctica debe llevar un sistema estandarizado de acciones, tal y como cualquier proceso de servicio basado en protocolos. Es necesario mencionar que ejemplos reales pueden darse en base a una mezcla de tecnologías de comunicación y tipos de protocolos. En países de Europa, existen combinaciones de PLC\* y comunicaciones GPRS, donde PLC\* realiza el enlace entre el medidor y el concentrador de datos (tecnología de última milla) y GPRS realiza el enlace entre el concentrador o estación base y la puerta de entrada al sistema de gestión de datos[19]. Una de las principales interrogantes en aplicaciones AMI, se genera respecto a los requerimientos del sistema, que mediante estándares pretende ser idóneo para su finalidad, ya que es necesario establecer normativas que manejen interoperabilidad, confiabilidad y eficiencia[32].

Como es necesario, las empresas de servicio público serán en este tiempo las encargadas de la dura tarea de acoplar tecnología de medición inteligente en transmisión, distribución y sistemas de servicio al cliente[32] y dentro de del proceso juegan una llave importante para la esencial operatividad de la red. Por ser *Smart Metering* una de las partes fundamentales en SG, varias organizaciones de estandarización han tomado la responsabilidad de expeditar y desarrollar estándares y protocolos que intervienen en medición, de tal manera que AMI se convierta en la base fundamental de futuras aplicaciones de SG[31]. El desarrollo de estándares puede ser pensado a través de una empresa, especificaciones de propiedad o un acuerdo entre partes; luego es pensado como una serie de requisitos tecnológicos o de mercado, seguido de una estandarización nacional y finalmente para ser considerado como un estándar internacional.

En cuanto a las organizaciones o institutos encargados de la estandarización, Estados Unidos de América posee al NIST, que es el encargado hasta la fecha de la coordinación de los desarrollos en cuanto a los protocolos y modelos estándar para SG y *Smart Metering*. [31]-[32]. Las organizaciones relevantes del desarrollo de estándares como: ANSI (*American National Standards Institute*), IEC (*International Electrotechnical Commission*), IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), ISO (*International Organization for Standardization*), ITU

(*International Telecommunication Union*), etc; tienen varios elementos normativos en cuanto a las comunicaciones, de los cuales dependen las normativas para SG y AMI. Cabe recalcar que estas organizaciones tienen la facultad de realizar acuerdos entre sí, de tal manera que dan paso a una armonización para el desarrollo de estándares.

#### **1.4.2 estándares en medición de energía eléctrica**

El gran número de fabricantes de medidores, propició una gran cantidad de protocolos de comunicación entre los dispositivos de las diferentes marcas, por eso se desarrolló varios estándares para la interoperabilidad. El caso de IEC y ANSI, que proporcionan normativas para el tratamiento de los datos de medición, presentan algunas normas que se acoplan a las infraestructuras de medición avanzadas, sin embargo todavía es necesario que se trabaje por alcanzar una mejor normativa adaptable a cualquier desarrollo que se presente para AMI y SG en un país en concreto. A continuación se presenta algunas normas generadas por ANSI referente a la medición de energía eléctrica.

**ANSI C12.18** está escrito específicamente para las comunicaciones de medidores a través de un puerto óptico ANSI Tipo 2. Especifica parámetros como: la velocidad de tráfico binario, detección de errores, y *time out* (tiempo fuera). También especifica la consulta *log-on/log-off* de registro (lea o escriba), y comandos de estructuras[33]. Es un protocolo punto a punto (P2P) completo de comunicaciones que abarca las siete capas del modelo OSI. Además, detalla los criterios necesarios para la comunicación entre un dispositivo ANSI C12.18 y un cliente ANSI C12.18 a través de un puerto óptico. El cliente ANSI C12.18 puede ser un lector portátil, un ordenador portátil, un sistema de la estación principal, u otro dispositivo de comunicaciones electrónicas. Se utiliza sobre todo para la lectura del medidor manual mediante el puerto óptico de infrarrojos[31].

**ANSI C12.19** es el estándar principal americano que se usa para el intercambio de datos entre los medidores y las empresas proveedoras de servicio, sus inicios se remontan a los años 90s. Es la base de estructuras de datos comunes que proporciona un vocabulario común en la industria de medidores[22]. Este

proporciona un modelo de datos del medidor a través de la especificación de un conjunto de estructuras de datos comunes determinadas como tablas para leer, escribir y configurar un dispositivo de medición. Las tablas a las que se refiere el protocolo, corresponde a especificaciones de configuración del consumo, mando de la pantalla del medidor, seguridad, etc. Sin embargo, ANSI C12.19 sólo proporciona un modelo de los medidores y como tal no es un protocolo de comunicaciones completo[31]-[33].

**ANSI C12.21** detalla los criterios requeridos para las comunicaciones entre un dispositivo C12.21 y un cliente C12.21 a través de un módem conectado a la red telefónica conmutada. También es un protocolo P2P de comunicaciones, pero en comparación con la norma ANSI C12.18, permite la lectura a distancia de un medidor que también incluye autenticación[31].

**ANSI C12.22** es la denominación de la última norma desarrollada para permitir el transporte de datos de las tablas ANSI C12.19 a través de conexiones en red. C12.22 es para uso a través de redes de comunicación ya existentes así como C12.21 se destina para el uso con módems ya existentes. Comprende especificaciones de protocolos de comunicación para la interfaz de los datos con las redes que soporta el medidor[22]. Ejemplos de tales redes de comunicaciones cubiertos por C12.22 incluyen TCP/IP (Protocolo de Control de Transmisión/Protocolo de Internet) sobre Ethernet, SMS (Servicio de mensajes cortos) en GSM (Sistema Global de comunicaciones Móviles), o UDP/IP (Protocolo de Datagramas de Usuario/Protocolo de Internet) sobre PPP (Protocolo Punto a Punto) a través de enlaces de comunicaciones en serie. ANSI C12.22 es adecuado para la lectura automatizada de medidores, de tal manera que todos los medidores puedan tener una capa de uso común[31]-[33].

#### **1.4.2 Normas adaptables a medición inteligente y AMI (Protocolos, Estándares e Iniciativas)**

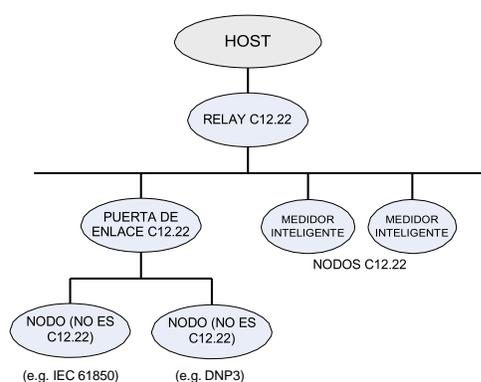
El principal elemento dentro de medición inteligente es el medidor, que puede ser usado de distintas formas y por ende conduce a la determinación de los requisitos necesarios para el sistema de comunicación de medición inteligente[19].

Se había determinado que AMR es el sistema encargado de la lectura automática de medidores, lo cual le hace responsable de trasladar los datos medidos hacia el sistema de gestión correspondiente; por lo general el proceso de AMR se limita a una probable frecuencia mensual de medición, lo cual implica que no requiere un uso constante de la red de comunicación (transmisión de datos ocasionales). AMI en cambio es un sistema que necesita un constante uso de la infraestructura, debido a que la información se recopila en frecuencias de cada 30 o 15 minutos; por tanto representa una gran cantidad de información que debe ser trasladada no solo en una dirección, sino en doble vía (bidireccional) ya que con AMI existe el traslado mutuo de información entre el cliente y el proveedor del servicio. Como también se había mencionado, AMI representa un gran avance en la filosofía de SG y por tanto el uso de medidores inteligentes aportan en gran medida a las operaciones de las redes eléctrica inteligentes; pero a la vez también representa una importante exigencia a la red comunicaciones, ya que existirá una gran cantidad de información a ser gestionada.

**ANSI C12.18 y C12.19** son una base normativa actual de AMI, estas dos fueron formuladas para estandarizar la configuración, recopilación de datos, y la capa de enlace de comunicación con el medidor. ANSI, NEMA (Asociación Nacional de Fabricantes Eléctricos) e IEEE han adoptado este estándar para los productos de medición electrónicos. Esta norma define un conjunto de estructuras de datos flexibles para uso en productos de medición[31]. En particular, este estándar define una estructura de tabla para los datos de aplicaciones de utilidad que se pasa entre un medidor de electricidad y un dispositivo de mano típico llevado por un lector de medidores o un módulo de comunicación de medidores que forma parte de un sistema de lectura automática de medidores. La norma organiza los datos del dispositivo de medición y los criterios de funcionamiento en tablas estándar que contienen los datos comunes provenientes de todos los fabricantes y tablas de fabricante que contienen datos específicos del fabricante[31].

Como se puede ver en la Figura I.10, una estructura básica basada en la norma ANSI C12.22, puede determinar el transporte de los datos medidos. Además de ANSI C12.22, IEC 62056 forma parte del grupo para conformar conjuntos de

normas que describen los sistemas de comunicación abiertos para los medidores inteligentes. IEC 62056 define las capas de transporte y aplicación para la medición inteligente bajo un conjunto de especificaciones COSEM (Especificación Complementaria de Medición de Energía). ANSI C12.22 especifica el envío y recepción de datos del medidor hacia y desde sistemas externos. Esta arquitectura se puede utilizar en cualquier red de comunicación y por ese motivo se convierte en la opción primordial para el tratamiento de los datos de medición. A este estándar se le puede denominar también como estándar de intercambio de información[19].



**Figura I.10** *Arquitectura básica de medición inteligente ANSI C12.22*

**Fuente:**[19] J. Ekanayake, N. Jenkins, and K. Liyanage, Smart grid: technology and applications. John Wiley & Sons, 2012, p. 315.

**IEC 62056 (DLMS / COSEM)** es un conjunto de normas que especifica los modelos de objetos para representar la funcionalidad de un medidor, un sistema de identificación para todos los datos de medición, un método de mensajería para comunicarse con el modelo y un método de transporte para trasladar la información entre el equipo de medición y el sistema de recolección de datos. Es un estándar que está creciendo en adopción en los mercados IEC[31].

Dentro de las iniciativas para una normalización de la medición inteligente y AMI, se considera el trabajo realizado por el NIST, el cual se encarga del desarrollo continuo de estándares fundamentales para una red inteligente de energía eléctrica. Se debe mencionar que ANSI C12.19 e IEC 61968 son la parte del marco inicial de los estándares lanzados hasta el momento para una interoperabilidad de una red inteligente[31]. Añadido a esto se suman diferentes desarrollos normativos en HAN, a la cual se le propone un marco normativo

fundamentado en perfiles de energía inteligente, el cual ha sido ya desarrollado en Texas, Estados Unidos de América. De igual forma, todas las organizaciones encargadas de la estandarización, trabajan arduamente en la elaboración de nuevas metodologías del traslado y acondicionamiento de los datos que provengan de la medición inteligente; por esta razón, exponemos las soluciones que han presentado estas organizaciones que a criterio son las más adecuadas al momento y que por tal motivo fundamentan las aplicaciones de AMI dentro de cualquier país en el mundo.

## **CAPÍTULO II**

### **II. REDES DE COMUNICACIÓN INALÁMBRICAS PARA MEDICIÓN INTELIGENTE**

En este capítulo se proporciona la base teórica de las tecnologías aplicables a una medición inteligente, tomando en cuenta los principales estándares que existen para las redes de comunicación inalámbrica. Se desarrolla la sustentación necesaria de tecnologías disponibles en una zona residencial urbana, referido a las aplicaciones de AMI. Las arquitecturas y sistemas actuales de las redes de telecomunicación que existen en el Ecuador serán también proporcionadas, de tal manera que se analice las tecnologías aplicables a la implementación de medición inteligente. También se presenta los diferentes procedimientos o modelos matemáticos empíricos concernientes al estudio, análisis y determinación de la funcionalidad de una red de telecomunicaciones; además, se dará a conocer un apartado referente al envío de información en modalidad up/down/link de los medidores inteligentes. .

#### **2.1 Redes y tecnología de comunicaciones inalámbricas para zonas urbanas**

Las comunicaciones inalámbricas han tenido una historia que ha permitido el desarrollo de muchas aplicaciones; estas no son nuevas, como todo el mundo piensa, en realidad recordemos que las tribus humanas en los principios de la civilización utilizaban tambores para producir sonido a determinada distancia y así poder dar aviso de diferentes sucesos, de igual manera recordemos los mensajes de humo que practicaban tribus norteamericanas, sin embargo estos sistemas comunicacionales inalámbricos presentaban sus inconvenientes, pero de igual manera funcionaban y no representaban redes o medios físicos para el traslado de la información. A través del tiempo se fueron mejorando los sistemas y medios de comunicación, pasamos por código Morse y otros diferentes hasta que se pudo desarrollar la transmisión por radio, donde la voz humana se debe convertir en una señal eléctrica a través de un dispositivo, a esto se le denominó como la comunicación analógica; por este motivo, el estudio de las ondas de sonido se convirtió en una clave para la radiocomunicación. Gracias a esos conocimientos

de los principios radioeléctricos se puede comprender los diferentes sistemas de comunicación inalámbricos y de esta forma se dio paso a los primeros sistemas de telecomunicación, que con el tiempo transmitiría todo tipo de información y según su capacidad a través de determinadas distancias[34].

El libre y fácil acceso a la información se ha dado desde el aparecimiento de nueva tecnología, de hecho es gracias a las comunicaciones inalámbricas, los sistemas avanzados de almacenamiento o las infraestructuras informáticas que actualmente se puede tener a disposición la información de los acontecimientos del mundo y sobre todo la comunicación dentro de todas las actividades cotidianas del ser humano.

Las empresas que hace unos 25 años atrás desarrollaban tecnología o productos tecnológicos, hoy en día se han convertido en empresas consolidadas; dado que sus investigaciones y desarrollos brindaron a la gente nuevas formas de conectarse con la información, generando un consumo masivo de tecnología inalámbrica en muchos mercados[35]-[31], como el caso de los sistemas inteligentes de medición que pueden usar infraestructuras de comunicación celular u otros medios de comunicación inalámbrica; por tal motivo, también se fue dejando de lado las comunicaciones por cable. Sin embargo es válido resaltar que ciertas redes como las de Fibra Óptica, siguen siendo una solución irremplazable y por lo tanto necesaria para realizar topologías de red confiables.

Con el aumento de la tecnología y las nuevas tendencias en el sector eléctrico, se asume hoy en día un aumento considerable en la demanda de energía, sobre todo de aquellos países que han incrementado su consumo energético debido a la industria y el crecimiento poblacional[2]; lo que incide también en una mayor cantidad de información que deberá manejar la red de comunicaciones en el caso de implementaciones de AMI, lo cual lleva a la determinación de mejores sistemas de gestión, operación y mantenimiento.

Las comunicaciones son una de las principales funciones que tiene un conglomerado de acciones ya sean comerciales, industriales o residenciales, que sirve para poder enlazar procesos; de tal forma que haya una eficiencia y eficacia en el traslado de datos provenientes de dichas acciones[19]. En lo que

corresponde a la funcionalidad de un proceso, existen varias formas de intervención para poder desarrollar la comunicación necesaria, eso dependerá de la finalidad o alcance del conjunto de acciones que determinan como tal un producto o servicio. Esto también permitirá considerar a la tecnología de comunicación como un factor determinante dentro del proceso de implementación de AMI.

Dentro de las comunicaciones, las primeras generaciones de tecnología celular eran exclusivas para la gente de determinada clase social o determinado cargo de gobierno, así también como para empresarios de multinacionales o personas de altos cargos en grandes empresas privadas; sin embargo se puede notar como ese uso antes exclusivo ahora es tan común para todo el mundo. Esto también representa dentro la sociedad como una brecha de equidad socioeconómica que se ha tornado más pequeña, propiciando un aumento de confianza en la gente y por ende un desarrollo de pensamiento más amplio en los ideales de vida.

Una de las finalidades del desarrollo de nueva tecnología, es el servicio en eventos de las telecomunicaciones, es así que el uso de redes móviles celulares se pueden encargar de atender el servicio de telefonía, internet e incluso hoy en día el acceso a televisión digital y otros. Los servicios móviles dentro de las redes celulares son los que se encargan del traslado de la información entre dispositivos de usuario[19], permitiendo en medida de lo posible que los datos lleguen a su destino de la forma más eficiente y segura. Los entornos de red móvil o celular están determinados por los alcances de las antenas receptoras o estaciones base, lo que representa la cobertura de la señal para brindar los servicios ofertados por una operadora de red o MNO (*operador de red móvil*). Cabe recalcar que el uso de las comunicaciones celulares actualmente brinda cobertura en gran parte de las zonas pobladas de un barrio, parroquia o ciudad; lo que implica que muchos servicios de comunicación se pueden dar a través de este medio, que de hecho se convierte en la mejor forma de comunicación dentro de una zona urbana.

Gracias a los avances tecnológicos en las comunicaciones móviles, el posible acondicionamiento de las infraestructuras de red ha permitido la inclusión de sistemas de gestión que propician un adecuado servicio de comunicaciones; es

por esto que las empresas encargadas de la elaboración de dispositivos inteligentes de medición, adoptan medidas tecnológicas de transmisión y recepción de datos de una red NAN o WAN basados en las comunicaciones de banda ancha como GPRS, LTE, WiMAX, etc[36].

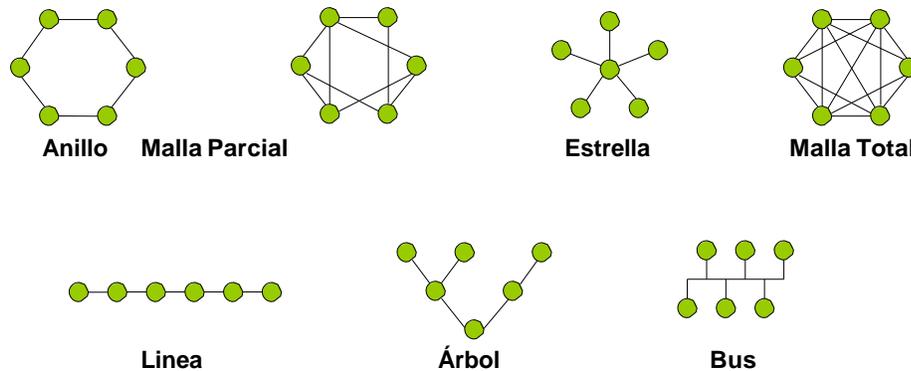
Por lo general se conoce que las comunicaciones móviles están referidas en su mayoría al servicio de la telefonía, sin embargo se sabe que en los últimos años ha sido la base fundamental para el acceso a internet de gran parte de la población mundial, incluyendo países con gran población rural. También cabe mencionar que dada la evolución en tecnología, la red de telecomunicaciones sería capaz del acoplamiento de procesos útiles como la medición inteligente de energía eléctrica; es por esto que dentro del análisis de una red inalámbrica se debe considerar la disponibilidad y funcionalidad de la tecnología en determinada zona poblacional. El uso de accesos inalámbricos no es el mismo en una zona de alta demanda comercial de una ciudad que en una zona netamente residencial; de igual manera, es necesario elegir la vía de comunicaciones necesaria para una zona urbana como para una rural, debido a que la cantidad de datos o la distancia entre dispositivos dentro de la red, determina la factibilidad técnica y económica de un proyecto destinado a la implementación de nuevos servicios en una red de comunicaciones.

El principal factor dentro de las implementaciones de un sistema AMI es la cantidad de datos, pues como habíamos mencionado anteriormente, en un sitio poblacional urbano se pueden encontrar zonas de alta demanda residencial y por este motivo la cantidad de elementos de medición sería considerable. Dado el parámetro importante de la cantidad de información, es necesario también conocer las virtudes de las diferentes redes de comunicación inalámbricas existentes que se puedan adaptar a las características de una zona urbana.

### **2.1.1 Topologías de red en las comunicaciones**

Sumado al análisis de las tecnologías posiblemente aplicables a AMI, se tiene la determinación de la red de comunicación según su topología. Dentro de las comunicaciones y sobre todo de los conceptos de redes, podemos encontrar

diferentes tipos que se diferencian por presentar características de forma, a lo cual se le denomina topología de la red. Podemos representar las topologías de red básicas para poder comprender su funcionalidad en los diferentes procesos que son requeridas. La Figura II.1 representa gráficamente las topologías de red básicas que se pueden encontrar.



**Figura II.1** Topologías de red básicas

**Fuente:** [37] S. Buettrich and A. Escudero Pascual, "Basic Wireless Infrastructure and Topologies," *Wireless Networking*, 2006. [Online]. Available: [http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless\\_en/04\\_Infrastructure\\_Topology/04\\_en\\_mmtk\\_wireless\\_basic-infrastructure-topology\\_slides.pdf](http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_en/04_Infrastructure_Topology/04_en_mmtk_wireless_basic-infrastructure-topology_slides.pdf).

La primera topología es la denominada en anillo, que como indica el gráfico está conformada por elementos cuyo principio de enlace inicia en un nodo y termina en el mismo nodo. La topología de malla parcial es denominada por considerar enlaces entre los nodos, pero no entre todos. La topología en estrella se caracteriza por poseer un nodo central al que se enlazan otros nodos, pero los nodos no centrales solo se pueden enlazar a un central, no entre sí. La topología en malla total corresponde a un conjunto de diferentes nodos conectados entre sí, es decir que cualquier nodo dentro de esta red puede conectarse directamente con otro de la misma red. La topología en línea es aquella cuya comunicación o conexión inicia en un nodo y termina en otro nodo diferente, es decir que un nodo cualquiera no puede comunicarse directamente con otro si ese otro no es el inmediatamente anterior o el inmediatamente posterior; por lo tanto, para que un nodo se comunique con otro ubicado lejanamente, debe existir otro nodo que actúe como el enlace previo. La topología en árbol tiene la característica de comunicar nodos para formar ramificaciones, ramificaciones que según su origen

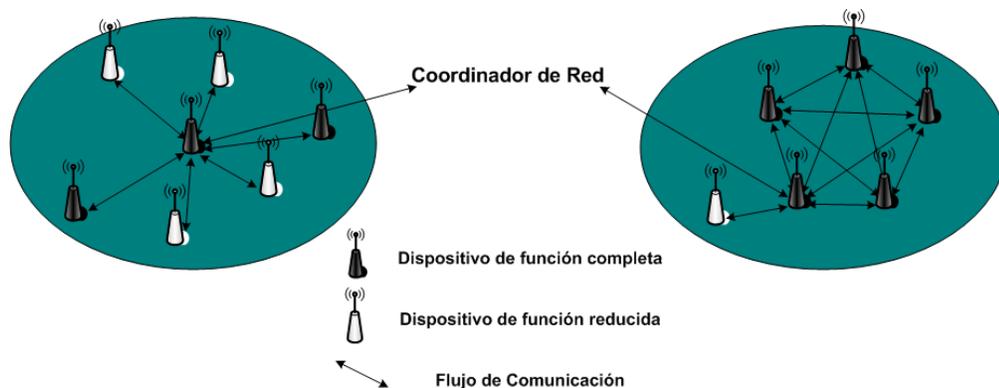
podrán determinarse como primarias, secundarias, terciarias, etc. La topología en bus corresponde a la conformación de diferentes nodos conectados a un bus o enlace central, esta topología es aplicable a las redes por cable, no a las inalámbricas.

Las tecnologías inalámbricas son la mejor opción, siempre y cuando estas posean las capacidades necesarias para el traslado de datos específico. La característica principal en determinar una tecnología inalámbrica o también por cable, es la capacidad de formar topologías de red. En el caso de una red inalámbrica existen las topologías básicas de red mencionadas anteriormente, a excepción de la topología en bus que es única para las redes por cable (imposible aplicar su concepto a una red inalámbrica); también las topologías en anillo son poco comunes y casi no se aplican a las redes inalámbricas.

La mayoría de las topologías de redes inalámbricas se pueden conformar en 2 topologías lógicas, la topología tipo estrella y la topología P2P (punto a punto). La primera se caracteriza por establecer una comunicación de todos los dispositivos con un solo coordinador que controla la comunicación dentro de la red. En la topología P2P se caracteriza la comunicación entre todos los dispositivos y un coordinador, pero la diferencia es que todos los dispositivos pueden comunicarse entre sí, dependiendo del alcance de cada dispositivo[32]. La distinción se puede apreciar de forma gráfica, en la Figura II.2 se muestra la forma en cómo se constituyen básicamente las topologías de red en estrella y P2P. Cabe mencionar que también existen diferentes tipos de redes que se pueden aplicar según su utilidad, pero en aplicaciones de AMI se ha tornado común encontrarse con la topologías estrella y P2P, otras que se pueden encontrar son variantes o topologías base que conforman redes complejas.

Como se puede ver en la Figura II.2, la topología en estrella posee un solo coordinador de la red o centroide de los diferentes dispositivos de función reducida a su alrededor, que lo convierte en un dispositivo de funciones completas, pero también nos podemos encontrar con dispositivos de la misma característica completa, pero estos serían centroides de otro grupo de dispositivos; de lo cual, el conjunto de centroides con sus dispositivos de función reducida conformarían una

red confiable que intercambia datos entre coordinadores de red. De la misma manera, las topologías P2P son compuestas por un solo coordinador de red, pero la diferencia es que cada dispositivo tiene funciones completas de comunicación bidireccional. La diferencia entre los dispositivos de funciones completas y los de funciones reducidas, es que los primeros se denominan así por poseer la capacidad de comunicación directa entre todos los dispositivos de la red, dependiendo obviamente del alcance; los de funciones reducidas tienen la misma capacidad de comunicación bidireccional, pero no pueden realizar enlaces directos de comunicación con dispositivos de sus mismas características.



**Figura II.2** Topologías de redes inalámbricas

**Fuente:** [32] L. T. Berger and K. Iniewski, Smart Grid Applications, Communications, and Security. Wiley, 2012, p. 488.

La topología P2P se le puede definir como la topología de red inalámbrica con menor costo económico a diferencia de las redes con topología en estrella, sin embargo se hablaría de redes HAN, IAN o BAN, ya que los dispositivos inalámbricos definirían el costo total de la implementación de una red nueva; de igual forma, una red NAN dependería de los dispositivos a implementarse, pero en el caso de que fuese a realizar una nueva red, ya que si se utiliza una red ya existente, como la red celular, no dependería de inversiones en infraestructura o equipos para la transmisión de datos. El resultado de la fusión híbrida de las dos topologías de red conformarían una red compleja, pero para el caso de desagregar toda la red de medición inteligente sabemos que se obtienen las redes HAN o de hogar, las redes NAN o vecinas y las redes WAN o amplias, lo cual ayuda a determinar la red inalámbrica necesaria para cada caso. En el caso de las

redes HAN, es común que sean de topologías P2P que también se pueden denominar como malladas totales, debido a la comunicación entre todos los dispositivos de funciones completas. En el caso de las redes NAN, podemos encontrarnos con topologías P2P, pero no es común porque en gran parte de los casos solo se llegan a conformar mallas parciales lo que también representa una dedicada asignación de funciones de cada dispositivo actuante dentro de la red ya que al ser una malla completa o parcial los dispositivos tendrán la capacidad de actuar como enlace de comunicación entre otros dispositivos y por ende tener funciones más complejas.

### **2.1.2 Tecnologías NAN en infraestructuras de medición avanzada**

Las redes de telecomunicación han representado el avance en la prestación de servicios al cliente, de tal manera que muchas de las necesidades humanas se han vuelto dependientes de estos servicios ofertados por las empresas de telecomunicaciones. Según las propuestas de vanguardia en redes inteligentes, los sistemas de comunicación deben cumplir con cualidades de acoplamiento y debido a esto se ha tornado difícil determinar la mejor opción de comunicaciones, estas opciones tecnológicas deberán ser analizadas por las empresas proveedoras del servicio eléctrico, sobre todo por el cumplimiento de los requerimientos de calidad, eficiencia, seguridad y costo efectivo[32]. Existen dos grupos de tecnología para transmisión de datos, el grupo conformado por tecnologías inalámbricas y el grupo de tecnologías por cable. Las tecnologías inalámbricas obtienen ventajas sobre las otras, debido a que tienen un costo más bajo, además de la facilidad de llegar a lugares muy alejados o dificultosos; sin embargo, no la hace propensa a limitantes de propagación de la señal radioeléctrica, por lo que las comunicaciones por cable pueden resultar en una buena opción, dependiendo del caso en que se encuentre. De cualquier forma, los sistemas de comunicaciones pueden acoplarse para formar un sistema híbrido, por lo cual se llega a obtener buenos resultados del proceso de intercambio de información en una red. Descomponiendo toda la red de comunicaciones, obtenemos una parte principal a analizar, que es la red de área vecina o NAN,

denominada de esta forma por la filosofía de SG; sin embargo, las redes NAN son también denominadas MAN (red de área metropolitana), donde se distingue por ser una red que traslada datos a través de grandes distancias[38]. Dentro de los conceptos de SG, a las redes NAN se las puede conocer como FAN (red de área de campo) e incluso se la puede comparar con una red WAN. Lo más importante de esta clasificación o particularidad, es que proporciona una idea clara de los deberes de la red para la transmisión de datos entre un dispositivo de medición y la oficina central y centro de gestión de medición (MDMS).

Tecnología	Espectro	Tasa de transmisión de datos	Rango de cobertura	Aplicaciones	Limitaciones
<b>GSM</b>	900 – 1800 MHz	Hasta 14.4 Kbps	1 – 10 Km	AMI, Respuesta a la demanda, HAN	Baja tasa de transmisión de datos
<b>GPRS</b>	900 – 1800 MHz	Hasta 170 Kbps	1 – 10 Km	AMI, Respuesta a la demanda, HAN	Baja tasa de transmisión de datos
<b>3G</b>	1.92 – 1.98 GHz 2.11 – 2.17 GHz Licenciada	384 Kbps – 2 Mbps	1 – 10 Km	AMI, Respuesta a la demanda, HAN	Costosa tarifa de espectro
<b>WiMAX</b>	2.5 GHz, 3.5 GHz, 5.8 GHz	Hasta 75 Mbps	10 – 50 Km (LOS) 1 – 5 Km (NLOS)	AMI, Respuesta a la demanda, HAN	No es común
<b>PLC</b>	1 – 30 MHz	2 – 3 Mbps	1 – 3 Km	AMI, Detección de fraude	Entorno de canal ruidoso
<b>ZigBee</b>	2.4 GHz, 868 – 915 MHz	250 Kbps	30 – 50 m	AMI, HAN	Baja tasa de transmisión de datos, rango de cobertura corto

**Tabla II.1** *Tecnologías AMI adaptables*[6].

Las comunicaciones dentro de las redes inteligentes, pueden determinarse según la naturaleza de la red donde se encuentren, ya que para una red NAN, las tecnologías más adaptables son aquellas que permiten la transmisión de datos en largas distancias, a diferencia de una red HAN donde se utilizan tecnologías de corto alcance como ZigBee. La Tabla II.1 detalla en resumen las diferentes tecnologías y sus usos dentro de SG, donde podemos distinguir las opciones que existen para AMI.

Existen diferentes familias tecnológicas aplicables a AMI, sin embargo es necesario diferenciar cada una de ellas mediante las ventajas y desventajas que representan. La mejor opción tecnológica se verá determinada por un modelamiento en base a las características de un caso de estudio.

Familia	Estándares	Ventajas	Desventajas
WPAN	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEEE 802.15.4</li> <li>• Non-SDO: ZigBee, WirelessHART, ISA 100.11a (todas basadas en IEEE 802.15.4)</li> </ul>	Consumo de energía muy bajo.	
		Equipos más económicos.	Bajo ancho de banda.
		Conveniente para dispositivos con poca memoria.	No escala a redes de gran tamaño.
		Nuevas normas permiten una total interoperabilidad con las redes basadas en IPv6	

**Tabla II.2** *Ventajas y Desventajas de WPAN*[13].

ZigBee es una tecnología basada en el estándar IEEE 802.15.4[6], su espectro es de banda no licenciada, es decir que se puede utilizar sin necesidad de alquilar el espectro radioeléctrico, ver Tabla II.2. Pertenece a la las familias tecnológicas de WPAN (red inalámbrica de área personal) y es muy útil en redes P2P para corto alcance (IEEE 802.15.4 tiene rangos de cobertura de 10 a 75 y tasas de transmisión de datos de 256 ) [13].

WiFi comprende a una familia de estándares IEEE 802.11e/n/s/p, cuyo aumento de la tasa de transmisión de datos es considerable (IEEE 802.11e/s hasta 54 e IEEE 802.11n hasta 600 ), de igual forma tiene un incremento en su rango de cobertura (IEEE 802.11e/n/s hasta 300 al aire libre e IEEE 802.11p hasta 1 ). Esta familia de estándares también es de banda no licenciada, por lo que se puede utilizar el espectro radioeléctrico sin pagar alquiler, ver Tabla II.3 para considerar las ventajas y desventajas de la tecnología. Esta tecnología presenta más condiciones de trabajar en servicios de AMI, sin embargo también es poco común por ciertos limitantes descritos en la tabla siguiente.

La familia de estándares muy reconocido en despliegues de redes para SG, es WiMAX, cuya base es el estándar IEEE 802.16. Esta tecnología representa un incremento de las tasas de transmisión de datos (IEEE 802.16 128 de bajada y 28 para subida y en IEEE 802.16m 100 para usuarios móviles y 1 para usuarios fijos). Esta es una red para grandes distancias, por lo que puede adaptarse a extensiones grandes de territorio (IEEE 802.16 de 0 a 10 e IEEE 802.16m óptima para distancias de 0 a 5 , aceptable para distancias de 5 a 30 y bajo rendimiento para distancias de 30 a 100 ), sin embargo es de espectro licenciado y debido a esto es necesario un alquiler del espectro radioeléctrico. WiMAX es una tecnología considerada como red celular, su rango de cobertura delata una especial adaptación a metrópolis o ciudades, sin embargo posee algunos inconvenientes para ser adaptado a un sistema de medición inteligente, ver Tabla II.4 para mayores referencias.

Familia	Estándares	Ventajas	Desventajas
WiFi	<ul style="list-style-type: none"> <li>•IEEE 802.11e (mejoras de calidad de servicios)</li> <li>•IEEE 802.11n (ultra alto rendimiento de la red)</li> <li>•IEEE 802.11s (redes malladas)</li> <li>•IEEE 802.11p (WAVE – acceso inalámbrico en entornos vehiculares)</li> </ul>	<p>Bajo costo en despliegues de red (espectro sin licencia).</p> <p>Equipos de bajo costo</p> <p>Alta flexibilidad, adecuado para diferentes casos de uso</p>	<p>Alta interferencia ya que opera en un espectro sin licencia muy concurrida.</p> <p>El consumo de energía puede ser demasiado alto para muchos dispositivos de red inteligente</p> <p>Soporte simple de QoS (calidad de servicio) (básicamente priorización de tráfico)</p>

**Tabla II.3** *Ventajas y Desventajas de WiFi*[13].

Una de las opciones en gran crecimiento, es el uso de las redes celulares, debido a que comprenden una cobertura considerable dentro de un territorio y sobre todo que la infraestructura no es necesaria de implementar ya que las operadoras móviles ya tiene redes dentro de un territorio, esto considerado las generaciones celulares como 2G, 3G y 4G. En el caso de las redes 3G se consideran altos valores de la tasa de transmisión de datos (para HSPA 14,4 de bajada y 5,75 de subida, para HSPA+ 84 de bajada y 22 de subida); aunque sus valores de velocidad de transmisión de datos son

relativamente buenos, no representan una competencia para WiMAX y a pesar de eso siguen siendo una opción favorable, de hecho su rango de cobertura también es amplio (0 a 5 ) y eso también es conveniente para topologías en estrella. En redes 4G tenemos una gran ventaja de cobertura y sobre todo de la tasa de transmisión de datos (en LTE 326 de bajada y 86 de subida y para LTE-Advanced 1 de bajada y 500 de subida), en rangos de cobertura se tiene que es óptima de 0 a 5 , aceptable cuando es de 5 a 30 y de bajo rendimiento para distancias entre 30 y 100 , ver la Tabla II.5 para mayores referencias.

Familia	Estándares	Ventajas	Desventajas
WiMAX	<ul style="list-style-type: none"> <li>• IEEE 802.16 (fija y acceso inalámbrico de banda ancha móvil)</li> <li>• IEEE 802.16j (relé multisaltos)</li> <li>• IEEE 802.16 m (interfaz de aire avanzado)</li> </ul>	<p>Adecuado para miles de usuarios simultáneos.</p> <p>Distancias más largas que WiFi.</p> <p>Un control orientado a la conexión del ancho de banda del canal.</p> <p>Más sofisticados mecanismos de QoS que 802.11e.</p>	<p>Compleja gestión de la red.</p> <p>Costos elevados de los equipos.</p> <p>Uso del espectro con licencia</p>

**Tabla II.4 Ventajas y Desventajas de WiMAX[13].**

Familia	Estándares	Ventajas	Desventajas
3G/4G	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3G: UMTS (HSPA, HSPA +)</li> <li>• 4G: LTE, LTE-Advanced</li> </ul>	<p>Capaz de soportar decenas de millones de dispositivos.</p> <p>Bajo consumo de energía de los equipos terminales.</p> <p>Los operadores celulares están lanzando soluciones de servicio específico de redes inteligentes.</p> <p>Alta flexibilidad, adecuado para los diferentes casos de uso.</p> <p>El uso de espectro con licencia reduce la interferencia.</p> <p>Estándares abiertos de la industria</p>	<p>Los operadores celulares pueden cobrar a las empresas de servicio altos precios al utilizar sus redes.</p> <p>El uso del espectro con licencia aumenta el costo.</p> <p>Difícil asegurar retardos en la red.</p>

**Tabla II.5 Ventajas y desventajas de 3G/4G[13].**

Cabe mencionar en este apartado, que la disputa entre las mejores soluciones inalámbricas para ser implementadas en las redes inteligentes y sobre todo en AMI, se encuentran determinadas por las topologías de red malladas y las topologías de red celular. Esta competencia sana conlleva a representar casos de estudio particulares, lo cual permite determinar que tan factible es que la medición inteligente se adapte a una topología específica.

**Red mallada** consiste en un conglomerado de nodos donde nuevos nodos pueden unirse al grupo y realizar funciones de enrutadores independientes, este tipo de redes puede tener característica de autosanación que representa el encontrar una ruta distinta a través de otros nodos, si en un supuesto caso un nodo o grupo de nodos se desconectan de la red[39]. Este sistema tiene gran acogida dentro de Norte América, ahí las empresas se han encargado de desplegar equipos de medición inteligente que forman redes de comunicación, estos equipos se encargan de actuar como repetidores de señal hasta que los datos alcancen el punto de acceso u oficina central de gestión de la información (empresa proveedora de servicios)[6]. Mediante la Tabla II.6 podemos diferenciar las ventajas y desventajas de las redes malladas.

	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>REDES MALLADAS</b>	Solución rentable con la auto-organización dinámica, auto-sanación, auto-configuración, prestaciones de escalabilidad.	Capacidad de la red, desvanecimiento y la interferencia se pueden contar como los principales desafíos.
	Mejora del rendimiento de la red, el equilibrio de la carga en la red, extendiendo el rango de cobertura.	La densidad de medición dentro de zonas urbanas no proporciona una cobertura completa de la red de comunicación.
	Con buena cobertura se puede proveer a zonas urbanas y rurales, además de una capacidad de enrutamiento multisalto.	Proporcionar equilibrio entre confiabilidad y enrutamiento flexible, suficientes dispositivos inteligentes, teniendo en cuenta el costo de cada elemento de la red, son factores muy críticos para redes malladas.
	Los dispositivos inteligentes pueden actuar como repetidores, por lo cual puede ayudar al crecimiento de la red en cuanto a cobertura y a capacidad.	Una tercera empresa tiene la obligación de gestionar la red y ya que la información de medición pasa a través de cada punto de acceso, se debe aplicar algunas técnicas de cifrado de datos con fines de seguridad.
	Se puede utilizar en las infraestructuras de medición avanzadas y en sistemas de gestión en el hogar.	Mientras que los paquetes de datos se desplazan alrededor de muchos nodos, puede haber problemas de lazo, lo cual causa gastos adicionales en el canal de comunicaciones; así también, resultaría en una reducción del ancho de banda disponible.

**Tabla II.6** *Ventajas y desventajas de redes malladas*[6].

### **2.1.3 Redes Celulares**

Las redes celulares comprenden un conjunto de diferentes generaciones de tecnología que han estado presentes en las últimas décadas, debido a esto los fabricantes o los mismos investigadores en el campo de la medición de energía, han visto como una buena opción a sistemas que se basan en tecnología móvil; es decir, que han tomado muy en cuenta la utilización de redes celulares para la comunicación de datos entre los medidores de energía y los centros de gestión u oficinas centrales[6]. La infraestructura de comunicaciones existente en los territorios de un país evita a las empresas proveedoras de servicios gastar en costos de operación, mantenimiento y también tiempo adicional que conlleva la construcción de una infraestructura nueva de comunicaciones. Generaciones de tecnología celular 2G, 3G, 4G o WiMAX están a disposición de las empresas proveedoras de energía eléctrica mediante las operadoras celulares[40]. Cuando se utiliza un intervalo de transferencia de datos de típicamente 15 minutos entre el medidor y la empresa de servicios, se generará una gran cantidad de información por lo que una conexión de alta velocidad de datos sería necesaria para transferir esos datos a la empresa de distribución. Empresas norteamericanas han realizado sus sistemas de medición inteligente mediante una infraestructura GSM (Sistema global para comunicaciones móviles), instalando en sus dispositivos inteligentes un módulo de comunicación celular para que se comuniquen con la empresa proveedora de servicios. Ya que se utiliza la infraestructura de GSM, la empresa operadora se encarga del manejo de las comunicaciones de medición inteligente, entonces se vuelve innecesaria la inversión de una nueva red de comunicaciones, inversión que tendría que ser cubierta por la empresa proveedora del servicio eléctrico. Empresas operadoras de red como Telenor, Telecom Italia, China Mobile, Vodafone también han acordado poner su red GSM en servicio para el flujo de datos de las comunicaciones de medición inteligente. Fabricantes de medidores eléctricos como Itron, proporcionan a sus equipos módulos de comunicación GPRS que se conectan con el servidor para un sistema de gestión perteneciente a la empresa de servicio eléctrico. CDMA (Acceso múltiple por división de código), WCDMA (Acceso múltiple por división de código de banda

ancha) y UMTS (Sistema universal de telecomunicaciones móviles) también han sido tecnologías utilizadas ampliamente en aplicaciones de SG y AMI, gracias a que las operadoras han encontrado óptimo el uso de sus redes para tal motivo[6]. Así como los sistemas mallados, las redes celulares también presentan ventajas y desventajas en función de las características técnicas, es por eso que mediante la Tabla II.6 las analizamos.

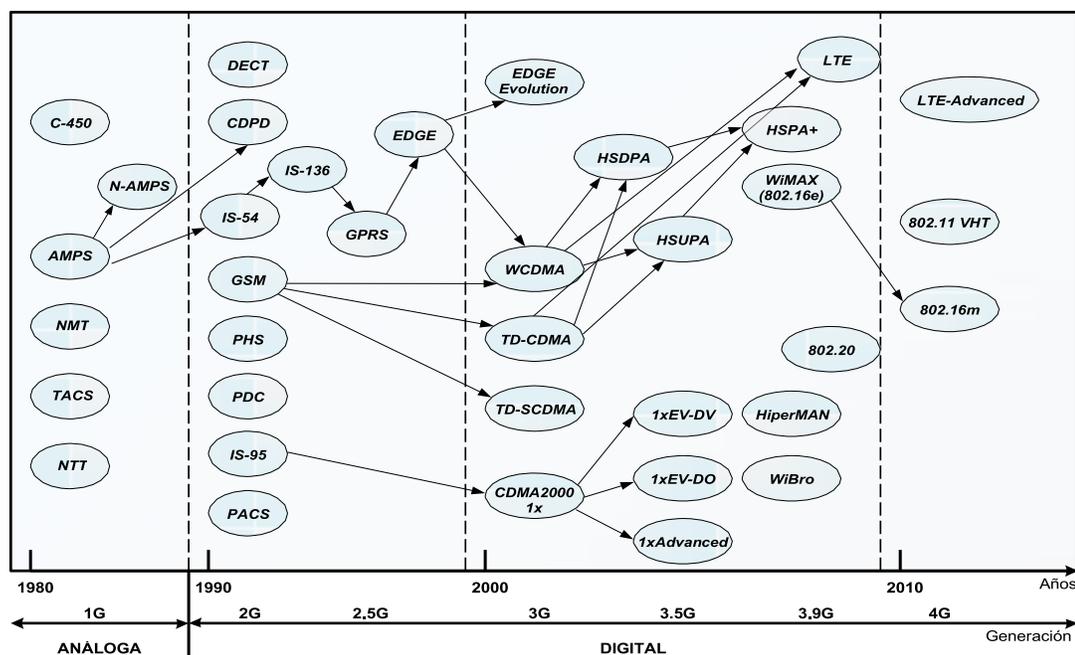
	<b>Ventajas</b>	<b>Desventajas</b>
<b>REDES CELULARES</b>	Las redes celulares ya están bien asentadas en un territorio, por lo tanto las empresas proveedoras del servicio eléctrico no tienen que incurrir en un costo adicional para la construcción de la infraestructura de comunicaciones.	
	La amplia propagación y los rentables beneficios hacen que la comunicación celular sea una de las tecnologías de comunicación líderes en el mercado.	
	Debido a la recopilación de datos en intervalos más pequeños, se generará una gran cantidad de datos y las redes celulares proporcionarán suficiente ancho de banda para tales aplicaciones.	Algunas aplicaciones de misión crítica de la red eléctrica necesitan una disponibilidad continua de las comunicaciones, y ya que los servicios de redes celulares son compartidos por mercado de clientes, puede dar lugar a la congestión de red o disminución de rendimiento de la red en situaciones de emergencia.
	Las redes celulares están listas para asegurar las transmisiones de datos con fuertes controles de seguridad.	En situaciones anormales, como una tormenta, los proveedores de redes celulares no pueden proporcionar el servicio de garantía..
	Para el despliegue de los millones de medidores inteligentes, la red celular proporciona actualmente una gran cobertura que incluye a usuarios urbanos y también rurales. Tecnologías como GSM o GPRS pueden representar las capacidades necesarias para AMI.	En comparación a las redes públicas, las redes privadas pueden manejar mejor las situaciones, debido a la utilización de una variedad de tecnologías y las bandas del espectro.
	Los servicios de seguridad de anonimato, autenticación, protección de señalización y protección de datos de usuario son los puntos fuertes de seguridad de la tecnología GSM	
	Características como menor costo, mejor cobertura, menores costos de mantenimiento e instalación rápida son las razones por las cuales las redes celulares pueden ser el mejor candidato en las aplicaciones de comunicación en SG.	

**Tabla II.7** *Ventajas y desventajas de redes celulares*[6].

La Tabla II.7 especifica las ventajas y desventajas de las redes celulares en forma genérica, sin embargo cabe recalcar que la realidad de las redes se diferencia en función de las condiciones económicas, sociales y tecnológicas de

un país como caso de estudio. Como habíamos mencionado en la sección 2.1.2 de este subcapítulo, las generaciones celulares corresponden a diferentes características, es por eso que dentro de esa clasificación de redes celulares se encuentran todas las tecnologías celulares actualmente disponibles. Las Referencias [6] y [13] nos hablan de una gran utilización de los sistemas celulares para realizar medición inteligente debido a que su penetración comercial y sobre todo tecnológica, corresponden a una estimación de costos y calidad de información dentro de la red de comunicaciones que permite que un sistema AMI funcione perfectamente. El caso de la Referencia [13] habla de que en parte de la Unión Europea, así como en parte de Asia se desarrollan sistemas de medición inteligente en base a las comunicaciones GSM y GPRS.

Sin entrar a detalle de cada tecnología celular, en la Figura II.3 especificamos una clasificación de las tecnologías según su generación.



**Figura II.3** Evolución de las comunicaciones móviles

**Fuente:** [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.

Los sistemas celulares móviles 1G eran los sistemas de comunicación de voz analógicos. Fueron desplegados principalmente antes de 1990. Ellos se caracterizan por FDMA (división de frecuencia de acceso múltiple) junto con FDD (división de frecuencia dúplex), FM analógico (frecuencia modulada) para la

modulación de voz, y FSK (modulación por desplazamiento de frecuencia) para la señalización de control, y proporcionan servicios de voz analógicas. Los sistemas 1G fueron desplegados principalmente en las bandas de frecuencias de 450 a 1 . El radio de la celda es de entre 2 y 40 [41].

Los sistemas 2G se introdujeron a principios de 1990. Proporcionan servicios de voz digital de calidad de telefonía fija sobre la base de las comunicaciones de datos por conmutación de circuitos. Estos sistemas se caracterizan por la aplicación digital. Nuevas técnicas de acceso, tales como TDMA (acceso múltiple por división de tiempo) y CDMA (acceso múltiple por división de código), también se introdujeron. Los estándares celulares 2G más dominantes son GSM (Sistema Global para Comunicaciones Móviles) e IS-95 (Interim Standard 95) CDMA. A partir del segundo trimestre de 2007, GSM tenía 2300 millones de suscriptores en todo el mundo, mientras que CDMA tenía 450 millones. Otras normas regionales celulares 2G son IS-54 / IS-136 TDMA y PDC (celular digital personal) TDMA en Japón. Las bandas de frecuencias de operación son típicamente entre 900 y 1,9 [41]. GSM e IS-136 emigró a 3G en dos fases. En la primera fase, GPRS (General Packet Radio Service) aumentaron la velocidad de datos de alrededor de 115 , aunque la tasa máxima teórica es 172,2 si se utilizan los ocho intervalos de tiempo en una trama GSM. GPRS hizo una transición a partir de datos de conmutación de circuitos que se utilizan en GSM a datos conmutados por paquetes. La velocidad de datos para los datos de conmutación de circuitos en GSM es de 9,6 . GPRS también se desplegó sobre IS-136. En la segunda fase, el estándar EDGE (Datos Mejorados para la Evolución de GSM) mejora aún más la velocidad de datos a 384 . EDGE es una convergencia de las redes GSM e IS-136[41].

Actualmente, los sistemas celulares 3G ya han sido desplegados en todo el mundo. Los estándares 3G fueron desarrollados por la ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) con el nombre de las IMT-2000 (Telecomunicaciones internacionales móviles 2000) o UMTS (sistema universal de telecomunicaciones móviles) en el ITU-R Rec. M.1457. El sistema celular 3G se caracteriza por las comunicaciones de banda ancha. Como requisitos generales, se exige una

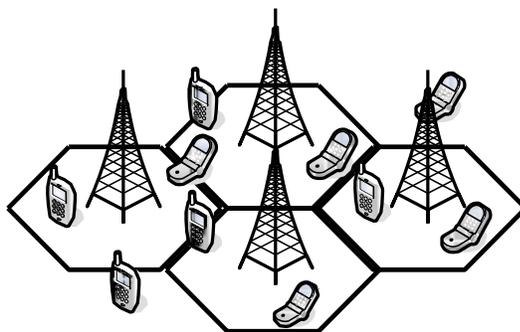
velocidad de datos de 2 en los móviles fijos, 384 para un usuario a la velocidad de los peatones, y 144 en un vehículo en movimiento. La red 3G utiliza la conmutación de paquetes, y típicamente se despliega en la banda de frecuencia de 2 [41]. Dos principales estándares 3G son WCDMA y CDMA2000, que son administrados por dos cuerpos en la ITU, 3GPP (Proyecto de asociación de tercera generación) y 3GPP2 (Segundo Proyecto de asociación de tercera generación), respectivamente. En octubre de 2007, la ITU-R incluyó WiMAX (802.16e) en la suite de IMT-2000 de los estándares inalámbricos y actualizó la ITU-R Rec. M.1457. WiMAX ahora es un fuerte contendiente para WCDMA y CDMA2000[41].

El diseño de LTE se llevó a cabo al mismo tiempo como una iniciativa de la Unión Internacional de Telecomunicaciones. A finales de 1990, la ITU ha contribuido a impulsar el desarrollo de las tecnologías 3G mediante la publicación de una serie de requisitos para un sistema de comunicaciones móviles 3G, con el nombre de las IMT-2000. Los sistemas 3G se señaló anteriormente son los más importantes en la actualidad aceptado por la ITU como el cumplimiento de los requisitos para las IMT-2000. La ITU puso en marcha un proceso similar en 2008, con la publicación de una serie de requisitos para un sistema de comunicación de cuarta generación (4G)[42] con el nombre de IMT-Advanced. De acuerdo con estos requisitos, la velocidad de datos máxima de un sistema compatible debería ser al menos 600 en el enlace descendente y 270 en el enlace ascendente, en un ancho de banda de 40 [43].

Las comunicaciones celulares proporcionan a las infraestructuras de medición avanzadas una opción que debe analizarse como un caso de estudio, ya que las diferentes tecnologías disponibles de generación móvil son diferentes para cada país. GPRS representa a una de las más conocidas tecnologías celulares aún utilizadas a nivel mundial, a pesar de los avances actuales como las redes 4G, esta tecnología corresponde a la generación 2.5G que proporciona dentro de un sitio poblacional urbano una alternativa de comunicación de bajo costo; de hecho, planes para transmisión y recepción de datos, así como servicio de mensajería se manejan en este sistema debido a que su conmutación por paquetes permite a la

operadora facturar por el peso del paquete de datos y no por el tiempo de conexión como lo hace GSM. Una ventaja de GPRS es que no necesita gran inversión en infraestructura nueva, debido a que reutiliza la red que está desplegada para GSM. Es considerable la opción de GPRS dentro de las infraestructuras de medición avanzada y redes eléctricas inteligentes, ya que una parte de la filosofía nos habla de la optimización de los recursos; es decir, la minimización de los costos por implementaciones, operación y mantenimiento, así como la maximización de los recursos disponibles. Si bien es cierto, las infraestructuras de medición requieren un determinado factor tecnológico para que sus sistema funcione de manera correcta, también es necesario acotar que su función depende de la entidad que gestione los datos, que en este caso es concerniente al distribuidor o comercializador de energía. Los planes que tenga la empresa de distribución determinarán la factibilidad técnica y también económica del uso de infraestructuras de comunicación celulares. Una explicación clara de esto, es que por estudio en los sistemas de medición avanzada se determinó un conjunto de ofertas que puede brindar AMI, pero es necesario mencionar que esas ofertas son base y no definen las ofertas reales que la empresa respectiva quiera obtener para el beneficio de sus abonados y por ende a sí misma. Ofertas tales como medición remota, cortes/reconexiones remotos y también el modo de facturación prepago de energía consumido; de igual forma, repositorio de datos completo para la gestión donde se pueda realizar planes de respuesta a la demanda o proyecciones de carga a nivel de distribución.

Las redes GPRS se acentúan en las redes de GSM, de este modo se puede analizar esta estructura para determinar el funcionamiento adaptable a infraestructuras de medición avanzadas. Una red celular actualmente mantiene áreas de cobertura bien definidas, gracias a que las MNOs (operadoras de red móvil) han planificado su expansión según parámetros técnicos, estos parámetros bien están definidos por la reutilización del espectro, capacidad y cobertura que proporcionan sus redes actuales, además de una dedicada asignación de frecuencias. La Figura II.4 muestra la forma o estructura celular básica.



**Figura II.4** Estructura celular básica

**Fuente:** [44]-[45] H. Gruber, *The Economics of Mobile Telecommunications*. Cambridge University Press, 2005, p. 343 - A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.

La estructura celular corresponde a una división de células definidas por los parámetros de cobertura que brinda una antena de comunicaciones de una estación base. Las células representan el alcance de dicha antena celular, pero en realidad no es que sean en forma hexagonal, una antena de comunicaciones proporciona una zona de cobertura en forma esférica irregular. También existen tipos de antenas direccionadas cuya señal radioeléctrica es proporcionada en una dirección en específico según el diseño elaborado por la empresa operadora celular, pero actualmente la mayoría de antenas celulares son omnidireccionales.

Desde el punto de vista técnico, los servicios de telefonía celular 2G como GSM emplean una transmisión de conmutación por circuitos, lo cual resulta poco eficiente. En las redes de conmutación por circuitos se asigna un canal de tráfico completo a un único usuario durante toda la duración de una llamada, si el tráfico se presenta a ráfagas (por ejemplo, tráfico de internet), el uso del recurso de radio resulta ineficiente. Para el tráfico a ráfagas, los servicios portadores de la conmutación por paquetes producen mejores resultados en los canales de tráfico. El canal solo se asigna cuando es necesario y se liberará inmediatamente después de la transmisión de los paquetes. En base a este principio, múltiples usuarios pueden compartir un canal físico mediante una técnica de multiplexación estadística. Con el surgimiento de GPRS se puede solucionar el resultado ineficiente en la transmisión de datos de GSM, ya que su principio de radiopaquetes proporciona el eficiente traslado de datos entre el usuario y el

servicio de internet o de la red de paquetes de datos. Los usuarios GPRS se benefician de tiempos de acceso más cortos y de tasas de datos más altas[34].

## **2.2 Modelos para análisis de redes inalámbricas de comunicación**

El canal de radio inalámbrico posee un problema para la comunicación confiable de alta velocidad, ya que es sensible a los ruidos, interferencias y otros impedimentos de canal, estos impedimentos cambian con el tiempo de manera impredecible como resultado del desplazamiento del usuario y el medio ambiente dinámico[46]. Se vuelve fundamental el análisis de la transmisión de datos de una red enfocándose en la variación de la potencia de la señal debido a la pérdida de trayectoria y ensombrecimiento. La pérdida de trayectoria es causada por la disipación de la potencia radiada por el transmisor, así como por los efectos del canal de propagación. Modelos de pérdidas de trayecto generalmente asumen que la pérdida de trayectoria es la misma a una distancia de transmisión-recepción dada (suponiendo que el modelo de pérdida de trayecto no incluye los efectos de sombra)[45]. El ensombrecimiento es causado por obstáculos entre el transmisor y el receptor que atenúan la potencia de señal a través de la absorción, reflexión, dispersión y difracción. Cuando la atenuación es fuerte, la señal es bloqueada. La variación de la potencia recibida debido a la pérdida de trayectoria se produce a través de distancias largas (100 -1000 ), mientras que la variación debida al ensombrecimiento se produce a distancias que son proporcionales a la longitud del objeto de obstrucción (10 -100 en ambientes al aire libre y menos en ambientes interiores) . Las variaciones en la potencia recibida debido a la pérdida de trayectoria y ensombrecimiento se producen a distancias relativamente grandes, estas variaciones a veces se conocen como efectos de la propagación a gran escala. De igual forma otras variaciones se producen en distancias muy cortas, conforme la longitud de onda de la señal, por lo que a veces se conocen como los efectos de propagación de pequeña escala[45].

### **2.2.1 Propagación de señal en comunicaciones inalámbricas**

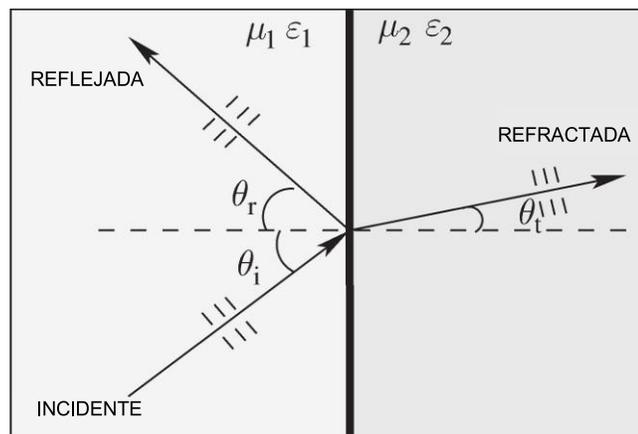
Como habíamos visto en la ilustración de la Figura II.4, un sistema celular se caracteriza por presentar una extensa cobertura en forma de panal gracias a las

celdas o células que la conforman, de este modo es entendible la comunicación dentro de una zona poblacional. Gracias al crecimiento arquitectónico y también a los ambientes naturales propios de una zona, las señales de radio que se transmiten pueden verse interferidas. Cada célula da cierto nivel de cobertura y se define por su tamaño, su población y en especial su patrón de tráfico, esto viene dado por el diseño y la planificación de la operadora de red. Una difícil tarea de las empresas que brindan servicio móvil es la predicción del comportamiento del canal de propagación, ya que esto varía conforme las características del terreno y la movilidad de los dispositivos móviles; esto se toma en cuenta debido a que existe un desvanecimiento de la señal al aumentar la velocidad del dispositivo lo que a su vez se vuelve crítico. De igual forma un dispositivo celular va a presentar comportamientos aleatorios, es decir que no siempre va tener los mismos movimientos dentro de una zona de cobertura, por eso se prestan para un análisis estadístico y gracias a eso se pueden predecir patrones del comportamiento de la red dentro de determinado sitio habitable. Al producirse la transmisión y recepción de las señales radioeléctricas, los fenómenos de difracción, dispersión y reflexión se convierten en los principales casos de estudio para el comportamiento de una red de comunicaciones. Cualquiera que sea la red de comunicación va a tener los problemas de toda señal inalámbrica y por ese motivo es necesario un pequeño análisis, pero sobre todo se vuelve fundamental el conocimiento de estos fenómenos para la determinación de un modelo de patrón de pérdidas por propagación; y gracias a estos análisis, se hará posible determinar bajo simulación la introducción de medidores inteligentes con tarjetas de comunicación celular, dentro de la red de comunicaciones de una operadora.

El principio básico de la propagación de una onda electromagnética está basado en las ecuaciones de Maxwell; sin embargo, debido a la compleja situación de los canales inalámbricos que producen copias reflejadas, difractadas o dispersas de la señal transmitida, el análisis basado en las ecuaciones de Maxwell es extremadamente complejo y también poco práctico ya que tiene que estar basado en una gran cantidad de supuestos. Existen una serie de modelos, empíricos principalmente para estimar la pérdida de propagación[41]. Los modelos también

se analizan bajo parámetros de propagación directa, ya que en ciertos casos la propagación de señales es transmitida en línea recta, es decir sin desviaciones, lo que representa que una antena emisora alcance una receptora en forma directa. También debemos citar que al igual que el análisis de propagación directa, se debe analizar que la reflexión, refracción, dispersión y difracción son los cuatro mecanismos importantes de propagación de radio. La reflexión y la refracción se producen cuando una onda que se propaga incide sobre un objeto que tiene dimensiones muy grandes en comparación con la longitud de onda. Dispersión se produce cuando la onda pasa a través de un medio compuesto de muchos pequeños objetos (en términos de longitud de onda). Difracción se produce cuando la trayectoria de la onda es obstruida por una superficie que tiene bordes afilados[41].

**Reflexión y refracción:** Cuando una onda plana es incidente en un límite plano entre dos medios con diferentes permeabilidades  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  y permitividades  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ , a un ángulo  $\theta_i$ , como se muestra en la Figura II.5, las ondas reflejadas y refractadas (de transmisión), se pueden determinar por la ley de Snell de la reflexión y la ley de Snell de la refracción[41].



**Figura II.5** Reflexión y Refracción: Onda Plana incidente en una superficie límite  
**Fuente:** [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.

Del gráfico tenemos que:

(II.1)

$$\frac{v}{c} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (II.2)$$

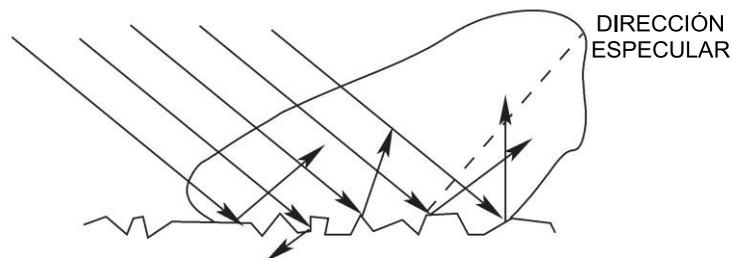
donde para medios ( )

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}} \quad (II.3)$$

es el índice refractivo, es la permeabilidad relativa, es la

permitividad relativa, la velocidad de onda, , la permeabilidad y permitividad en espacio vacío respectivamente, para y [41].

**La dispersión** es un importante mecanismo de propagación de la onda, debido a la superficie de terreno áspero. La teoría de dispersión asume la rugosidad de una superficie es aleatoria. Diferentes alturas de la superficie producen reflexión (dispersión) en diferentes direcciones, lo que lleva a una reducción en la potencia del rayo reflejada especularmente. Cuando la superficie se vuelve más áspera, la onda incidente es reflejada desde muchos puntos de la superficie, lo que lleva a una ampliación de la energía dispersada. Mediante la Figura II.6 podemos observar el resultado de la dispersión[41].

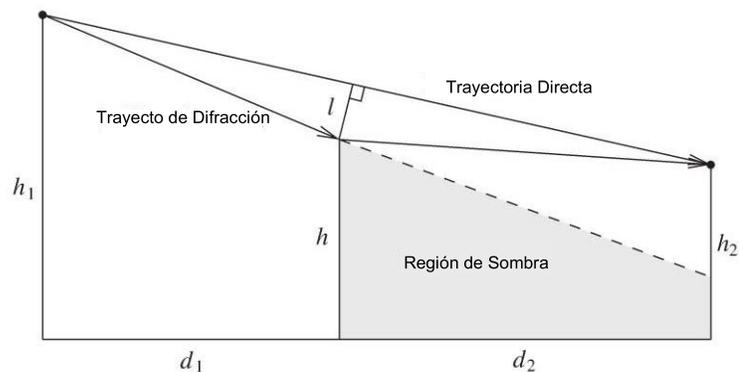


**Figura II.6** *Dispersión en una superficie áspera*

**Fuente:** [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.

**La difracción** es causada por discontinuidades en una superficie sobre la que incide una onda electromagnética. Permite que las ondas de radio se propaguen alrededor de la superficie curva de la Tierra y para llegar detrás de obstrucciones.

Difracción puede entenderse fácilmente utilizando el principio de Huygens. Para el análisis de difracción, si la longitud de onda es muy pequeña, la óptica geométrica es exacta. Para la propagación de microondas, el análisis de difracción se puede utilizar para derivar un coeficiente de difracción que estima la potencia que se puede recibir en la región de sombra detrás de un obstáculo, tal como una montaña, un edificio o una serie de montañas o edificios[41]. Los dos modelos canónicos para el análisis de difracción de una onda plana homogénea son de difracción por un borde de cuchillo o de pantalla y difracción por una cuña. En estos casos, la solución de la óptica geométrica conduce a un campo completamente incorrecto en la región de sombra. La óptica geométrica también se ha ampliado para incluir la difracción, produciendo la teoría geométrica de la difracción[41]. El filo de cuchillo o la difracción media de plano se pueden utilizar para modelar el efecto tal que rodea a una colina. El campo recibido es la suma de la trayectoria directa y las condiciones del trayecto de difracción. La difracción en filo de cuchillo se ilustra en la Figura II.7, donde  $d_1$  y  $d_2$  son las distancias desde el transmisor y el receptor a la parte superior del borde, respectivamente y  $h_1$ ,  $h_2$  y  $h$  son las alturas del transmisor, receptor, y el borde, respectivamente. El espacio libre entre el filo de cuchillo y el camino directo se denota por  $l$ . Si  $l > 0$ , el camino directo está obstruido, y sólo la condición de difracción contribuye al campo recibido[41].



**Figura II.7** Difracción en filo de cuchillo

**Fuente:** [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.

Los mecanismos mencionados anteriormente corresponden a una parte importante en el diseño de los modelos de pérdidas de propagación y sobre todo

para el análisis específico de un caso de estudio. En los análisis de propagación se incluyen estos conceptos llamados mecanismos de propagación, mediante lo cual podremos determinar la transmisión y recepción de una señal inalámbrica dentro de una red.

### **2.2.2 Modelos de análisis de propagación en zonas urbanas**

#### **Pérdidas en espacio libre (*Free-Space Path Loss*):**

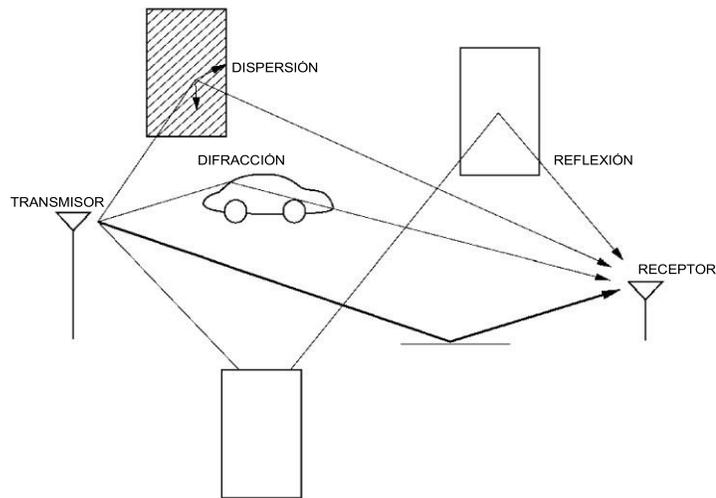
Considere una señal transmitida a través del espacio libre a un receptor situado a una distancia desde el transmisor. Suponga que no hay obstáculos entre el transmisor y el receptor, y que la señal se propaga a lo largo de una línea recta entre los dos. El modelo de canal asociado con esta transmisión se denomina canal en línea de visión (LOS), y la señal recibida correspondiente se denomina señal LOS o rayo[45].

#### **Trazado de rayo (*Ray Tracing*):**

En un entorno urbano o de interior típico, una señal de radio transmitida desde una fuente fija se encontrará con varios objetos en el medio ambiente que producen copias reflejadas, difractadas, o dispersas de la señal transmitida, como se muestra en la Figura II.8. Estas copias adicionales de la señal transmitida, conocidos como componentes de señal de trayectos múltiples, pueden ser atenuados en la potencia, diferidos en el tiempo y desplazados en fase y/o frecuencia con respecto a la trayectoria de la señal LOS en el receptor. Los múltiples trayectos y señal transmitida se suman en el receptor, que a menudo producen distorsión en la señal recibida con respecto a la señal transmitida[45].

En *Ray Tracing* asumimos un número finito de reflectores con ubicación conocida y las propiedades dieléctricas. Los detalles de la propagación por trayectos múltiples pueden ser resueltos usando las ecuaciones de Maxwell con las condiciones de contorno adecuadas. Sin embargo, la complejidad computacional de esta solución hace que sea poco práctico como una herramienta de modelado general. Las técnicas *Ray Tracing* se aproximan a la propagación de ondas electromagnéticas mediante la representación de los frentes de onda como partículas simples. Por lo tanto, los efectos de reflexión, difracción y dispersión en

el frente de onda se aproximan utilizando ecuaciones geométricas simples en lugar de ecuaciones de onda más complejas de Maxwell[45].



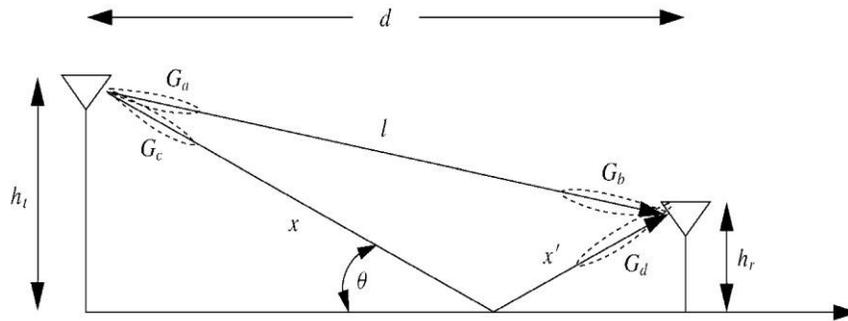
**Figura II.8** Componentes de onda reflejados, difractados y dispersos

**Fuente:** [45] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.

El trazado de rayos o la óptica geométrica y las técnicas de la teoría uniforme de difracción (UTD) se utilizan generalmente para aproximar la solución precisa basada en las ecuaciones de Maxwell. El error de aproximación óptica geométrica es muy pequeño cuando el receptor tiene muchas longitudes de onda de distancia de la dispersión más cercana, o cuando todas las dispersiones son suaves y grandes en comparación con una longitud de onda. La representación de rayo de propagación de radio es especialmente útil en las microondas y bandas de ondas milimétricas. Este método es apropiado para la caracterización de la propagación de ondas de radio en las ciudades, ya que la longitud de onda es mucho más pequeña en comparación con las dimensiones de los edificios[41]-[45].

- Modelo de dos rayos (*Two-Ray Model*):

El modelo de dos rayos se utiliza cuando una única reflexión en el suelo domina el efecto de trayectos múltiples, como se ilustra en la Figura II.9. La señal recibida consta de dos componentes: el componente LOS o rayo, que es sólo la señal transmitida propagándose a través del espacio libre, y un componente o rayo reflejado, que es la señal transmitida reflejada del suelo.

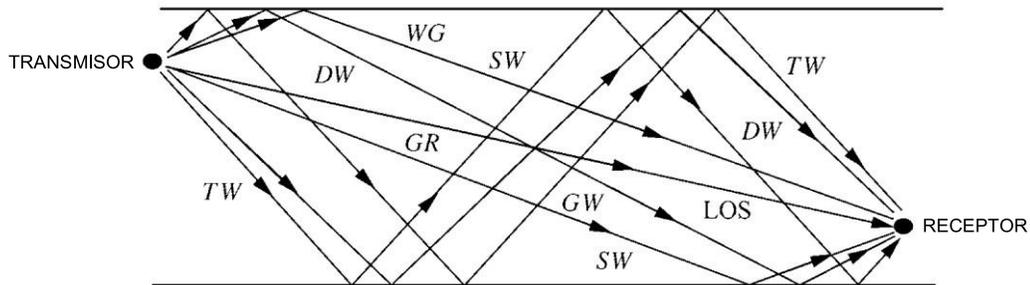


**Figura II.9** Modelo de dos rayos (*Two-Ray Model*)

**Fuente:** [45] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.

- Modelo de diez rayos (cañón dieléctrico) (*Ten-Ray Model (Dielectric Canyon)*):

Este modelo supone calles rectilíneas, con edificios a ambos lados de la calle, así como transmisor y receptor de antena alturas que están cerca de la calle. Las calles de construcción forrada actúan como un cañón dieléctrico a la señal que se propaga. En teoría, un número infinito de rayos puede ser reflejado en las fachadas de los edificios para llegar en el receptor; además, los rayos también pueden ser retroreflejados desde edificios tras el transmisor o receptor. Sin embargo, como parte de la energía de la señal se disipa con cada reflexión, los trayectos de señal corresponden a más de tres reflexiones que en general pueden ser ignoradas[45]. Cuando el diseño de la calle es relativamente sencillo, las reflexiones de retorno son generalmente insignificantes también. Los datos experimentales muestran que un modelo de diez rayos de reflexión se aproxima mucho a la propagación de la señal a través del cañón dieléctrico. Los diez rayos incorporan todos los caminos con uno, dos o tres reflexiones: en concreto, está el (LOS) trayectoria de línea de visión y también las trayectorias de la reflejada del suelo (GR), la reflejada de una sola pared (SW), la reflejada de doble pared (DW), la reflejada de triple pared (TW), la reflejada de pared-suelo (WG), y la reflejada de suelo-pared (GW). Hay dos de cada tipo del trayecto reflejado de pared, uno para cada lado de la calle. Una vista del modelo de diez rayos se muestra en la Figura II.10[45].



**Figura II.10** Modelo de diez rayos (*Ten-Ray Model*)

**Fuente:** [45] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.

- Trazado de rayo general (*General Ray Tracing*):

El trazado de rayos general (GRT) se puede utilizar para predecir la intensidad de campo y la dispersión de retardo para cualquier configuración de construcción y colocación de la antena. Para este modelo, la base de datos de construcción (altura, ubicación y propiedades dieléctricas) y los lugares de transmisión y recepción en relación con los edificios se debe especificar exactamente. Dado que esta información es específica de sitio, el modelo GRT no se utiliza para obtener las teorías generales sobre el rendimiento del sistema y el diseño; más bien, explica el mecanismo básico de la propagación urbana y puede utilizarse para obtener información de retardo y fuerza de la señal para una configuración particular del transmisor y receptor en un entorno dado[45].

### **Modelos empíricos de pérdidas de trayectoria (*Empirical Path-Loss Models*):**

La mayoría de los sistemas de comunicaciones móviles operan en entornos de propagación complejas que no se pueden modelar con precisión por *Free-Space Path Loss* o *Ray Tracing*. Una serie de modelos de trayectoria de pérdida se han desarrollado a lo largo de los años para predecir la pérdida de trayectoria en entornos inalámbricos típicos como grandes macroceldas urbanas, microcélulas urbanas y más recientemente, el interior de edificios[45]. Estos modelos se basan principalmente en las mediciones empíricas sobre una distancia dada en un rango de frecuencias para una zona geográfica determinada o edificio. Sin embargo, las aplicaciones de estos modelos no siempre se limitan a entornos en los que se

realizaron las mediciones empíricas, lo que puede comprometer la exactitud de tales modelos basados empíricamente cuando se aplica a entornos más generales; sin embargo, muchos sistemas inalámbricos utilizan estos modelos como base para análisis de rendimiento[45].

- Modelo de Okumura (*Okumura Model*):

Uno de los modelos más comunes para la predicción de la señal en grandes macroceldas urbanas es el modelo Okumura. Este modelo es aplicable a distancias de 1 a 100 y rangos de frecuencia de 150 a 1500 . Okumura utiliza extensas mediciones de atenuación de la señal de estación base al móvil a lo largo de Tokio para desarrollar un conjunto de curvas que dan mediana atenuación relativa al espacio libre de la propagación de la señal en un terreno irregular. Las alturas de la estación base para estas mediciones fueron de 30 a 100 , una gama cuyo extremo superior es más alto que las estaciones base típicas de hoy en día[45].

- Modelo de Hata (*Hata Model*):

El modelo de Hata es una formulación empírica de los datos de trayectoria de pérdida de gráficas proporcionadas por Okumura y es válido durante aproximadamente la misma gama de frecuencias, 150-1500 . Este modelo empírico simplifica el cálculo de pérdida de trayectoria, ya que es una fórmula de forma cerrada y no se basa en las curvas empíricas para los diferentes parámetros[45].

- Modelo de Okumura-Hata (*Okumura-Hata Model*):

El modelo Okumura-Hata es un modelo bueno, pero más complejo de propagación que se basa en extensas mediciones empíricas tomadas en ambientes urbanos, y fue aproximado aún más por Hata. El modelo incluye parámetros tales como la frecuencia, rango de frecuencia, las alturas del transmisor y el receptor y la densidad de construcción. El modelo es el más popular para la predicción de la pérdida en macrocelda. El modelo para las zonas urbanas se ha normalizado en la Recomendación ITU-R Rec. P.529[41]. El modelo fue diseñado para macroceldas, y es aplicable a distancias de 1 a 100

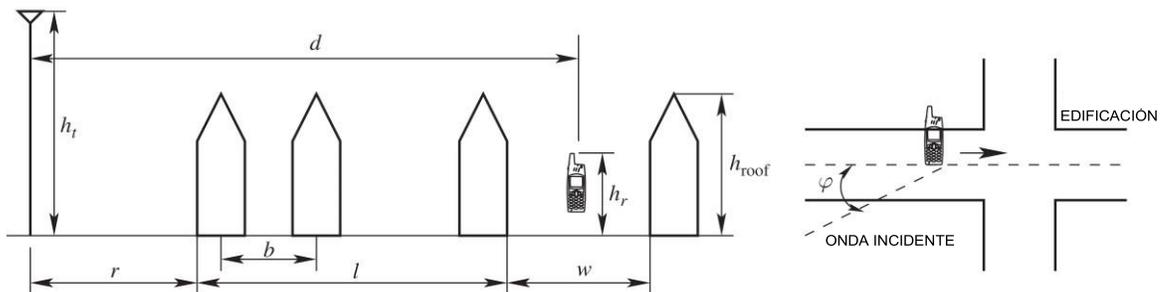
, rango de frecuencia de 150 a 1500 , altura BS (Estación base)

de 30 a 200 m, y MS (estación móvil) a alturas de 1 a 10 m. El modelo es satisfactorio en las zonas urbanas y suburbanas, pero no es tan bueno en las zonas rurales. Este modelo es adecuado para los sistemas celulares 1G, pero no es aplicable para los sistemas celulares actuales que tienen tamaños de celda más pequeños y frecuencias más altas, y para sistemas inalámbricos de interior.

- Modelo COST-231-Hata (*COST-231-Hata Model*):

El modelo COST-231-Hata[47] es una extensión del modelo Okumura-Hata a 2 GHz. También es un modelo empírico, y es adecuado para microcélulas y macrocélulas pequeñas. Este modelo es adecuado cuando  $f$  está dentro de 1,5 GHz - 2 GHz, la altura del transmisor debe estar dentro de 30 a 200 m, la altura del receptor debe estar dentro de 1 a 10 m, y la distancia entre el transmisor y receptor debe estar dentro de 1 a 20 km. Es utilizado por las normas IMT-2000 de la ITU-R para el caso de exteriores[41].

- Modelo COST-231-Walfisch-Ikegami (*COST-231-Walfisch-Ikegami model/COST-WI model*):



**Figura II.11** Escenario típico de propagación en zonas urbanas y definición de los parámetros utilizados en el modelo COST-WI.

**Fuente:** [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.

Este modelo combina el modelo Walfisch-Bertoni y el modelo de Ikegami además de algunos factores de corrección empíricos para mejorar el acuerdo con las mediciones en el medio ambiente urbano. El modelo que se muestra en la Figura II.11 define más parámetros que son la alturas de edificios ( $h_r$ ), anchos de calles ( $w$ ), separación entre edificios ( $l$ ), y la orientación de la carretera con respecto a la trayectoria de radio directa ( $\varphi$ ) [41]. El modelo COST-231-Walfisch-

Ikegami es aplicable para frecuencias en el rango de 800 a 2000 , alturas del transmisor ( ) en el rango de 4 a 50 , alturas del receptor ( ) en el rango de 1 a 3 , y distancias ( ) en el rango de 20 a 5 . El modelo logra la mejor aproximación cuando la altura ( ) de la antena de la BS (estación base) es mucho mayor que la altura del techo de los edificios, es decir que . Este modelo se utiliza en las normas IMT-2000 de la ITU-R en forma de ITU-R Rec. P.1411, pero la frecuencia de aplicación se extiende a 5 [41].

### **2.3 Estado actual de las redes de comunicación inalámbricas en el Ecuador**

El Ecuador posee un espectro radioeléctrico, al igual que otros países dentro de su territorio. Según las leyes especiales de las telecomunicaciones, los rangos de frecuencia correspondientes a un espectro específico son de propiedad exclusiva del estado y como tal se les considera como bien de dominio público que es inalienable e imprescriptible. El Ecuador como país soberano es el encargado de la gestión y control del espectro, lo que significa que tiene el deber de desarrollar la planificación necesaria para la asignación del espectro a los diferentes tipos de aplicaciones como comunicaciones inalámbricas, radiodifusión, seguridad, defensa, emergencias, televisión, transporte e investigación científica[48]. De acuerdo a la normativa vigente, aquellas entidades o usuarios que tengan atribuido una parte del espectro radioeléctrico deberán cumplir con obligaciones y derechos que permitan desarrollar en el Ecuador una sana utilización del recurso. Una de las obligaciones de las entidades usuarias del espectro, es la de operar sus sistema en las frecuencias que la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones le autorice. De igual forma, también se encuentra obligado a disponer su espectro asignado libre de interferencias que perjudiquen a sus abonados o de igual manera que perjudiquen a sus competencias. En cuanto a los abonados de cada entidad, les corresponden derechos tales como que el sistema de radiocomunicaciones asigne códigos de seguridad a cada terminal de abonado, para precautelar el buen estado de la comunicación que se realice. La ley también le permite al usuario tener el derecho a recibir el servicio sin interrupciones, así el

sistema de la entidad de servicios se encuentre en mantenimiento; sin embargo, a la empresa del servicio también se le concede un pequeño salvoconducto en caso de que sucediese un problema de causa mayor, caso fortuito o en el supuesto caso que la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones disponga una autorización previa para la salida de funcionamiento [48].

En síntesis, el espectro radioeléctrico que se dispone en el Ecuador, se ata a leyes, reglamentos y normas que deben cumplirse por el bien de cada uno de los ecuatorianos. Tenemos en el Ecuador la Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada cuyo objetivo es normar en el territorio nacional la instalación, operación, utilización y desarrollo de toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, imágenes, sonidos e información de cualquier naturaleza por hilos, radioelectricidad, medios ópticos u otros sistemas electromagnéticos. También se posee el Reglamento General a la Ley Especial de Telecomunicaciones Reformada, que tiene como finalidad establecer las normas y procedimientos generales aplicables a las funciones de planificación, regulación, gestión y control de la prestación de servicios de telecomunicaciones y la operación, instalación y explotación de toda transmisión, emisión o recepción de signos, señales, imágenes, datos y sonidos por cualquier medio; y el uso del espectro radioeléctrico. En el Ecuador también se ha expedido el Reglamento de Radiocomunicaciones que tiene por objeto, fomentar el uso y explotación del espectro radioeléctrico y de los servicios de radiocomunicación, de una manera eficaz, eficiente y regulada dentro del territorio nacional, a fin de obtener el máximo provecho de este recurso. Por citar solo algunos de los restantes reglamentos y normas, cuya finalidad es la de mantener el buen estado de las comunicaciones, tenemos: el Reglamento y Norma Técnica para los Sistemas Troncalizados, la Norma para la Implementación y Operación de Sistemas de Modulación Digital de Banda Ancha, el Reglamento de los Sistemas Comunales de Explotación, la Norma Técnica para el uso de Bandas Libres para aplicaciones Industriales, Científicas y Medicas y también a todo estos importantes reglamentos, normas y leyes se suma el Plan Nacional de Frecuencias, cuya finalidad se basa en el establecimiento de las normas para la atribución de

bandas, sub-bandas y canales radioeléctricos para la utilización en los diferentes servicios de radiocomunicaciones[48].

### **2.3.1 Comunicaciones Celulares**

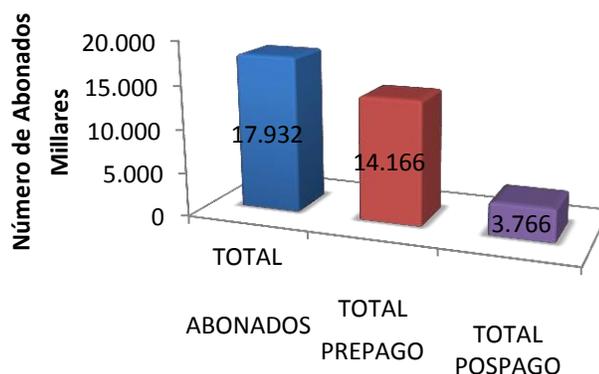
Dentro del territorio ecuatoriano, las comunicaciones celulares o más bien conocidas como el Servicio Móvil Avanzado (SMA) actualmente, se convierten en uno de los pilares fundamentales en el crecimiento del país. El SMA (telefonía móvil) es un servicio final de telecomunicaciones del servicio móvil terrestre, que permite toda transmisión, emisión y recepción de signos, señales, escritos, imágenes, sonidos, voz, datos o información de cualquier naturaleza[48]. Este servicio permite actualmente a los abonados, clientes o usuarios de cualquier tipo, el desarrollar comunicaciones de voz, transmisión y recepción de SMS (Servicio de mensajes cortos) y sobre todo acceder a redes de datos mediante un navegador o de igual forma acceder a servicios especiales mediante aplicaciones creadas exclusivamente para dispositivos inteligentes.

Desde 1993 se han prestado los servicios de telefonía móvil en el Ecuador. En un inicio se ocupaba solo la banda de 850 MHz, pero actualmente se han extendido a más frecuencias (850 MHz, 1900 MHz, 700 MHz, AWS (1700/2100

MHz) y 2,5 GHz) que mediante las infraestructuras de las operadoras móviles incluyen no solo la prestación de telefonía móvil celular, sino servicios como transmisión de datos e internet móvil[49]. El SMA es el servicio de telecomunicaciones que mayor expansión ha experimentado en el Ecuador; mediante estadística, desde el año 2000 hasta el año 2011, el servicio de telefonía móvil celular experimentó un crecimiento del 3805% y también según datos de [49], entre 2011 y 2014 el crecimiento fue tal que existen más cantidad de Líneas Activas que habitantes en el territorio ecuatoriano. Esto lo podemos visualizar mediante la ilustración de la Figura II.12, donde el número de abonados totales es aproximadamente 18 millones, lo cual también se constata según los datos de la Secretaría Nacional de Telecomunicaciones (SENATEL). De igual forma el gráfico de la Figura II.12 nos muestra que la mayor parte del total de líneas activas se concentran en los usuarios de tipo prepago.

La tecnología CDMA, con sus versiones CDMA 2000 1xRtt de 2G y 1x EVDO de

3G, que son utilizadas por dos de las tres operadoras existentes en el país, son cada vez menos usadas, con lo que se espera que en los próximos años desaparezca si no se les da un uso aplicado a otra función o servicio; en contraposición, la tecnología GSM, con toda su cadena de evolución GSM/GPRS/EDGE, es la que disponen las tres operadoras del Servicio Móvil Avanzado y sigue en fase de crecimiento; mientras que la tecnología UMTS se encuentra en una fase de estabilidad de crecimiento desde diciembre del 2008. Desde febrero del 2014, la tecnología LTE hizo su ingreso en el Ecuador, así los servicios de las operadoras ofrecen mayores aplicaciones para que los abonados se sientan conformes con el servicio[49]. El SMA es el principal servicio de telecomunicaciones que utilizan los ecuatorianos, con las tecnologías GSM, UMTS y LTE; de tal forma, que es imprescindible intensificar el control para que el estado garantice la prestación del servicio, tal como lo establece el marco legal vigente[49].



**Figura II.12** Distribución del mercado de telefonía móvil, por tipo de abonado octubre-2014.

**Fuente:** [50] SUPERTEL, "Estadísticas del SMA a Octubre de 2014," 2014. [Online]. Available: [http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil/!ut/p/z1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8\\_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/](http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil/!ut/p/z1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/). [Accessed: 30-Dec-2014].

### **Operadoras:**

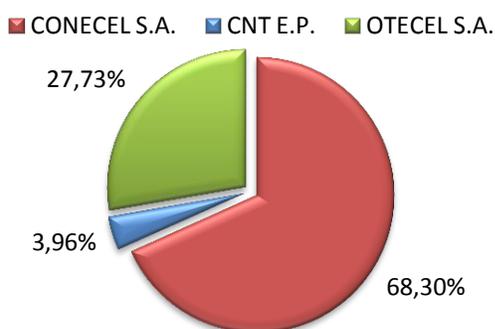
Las operadoras móviles en el Ecuador son 3 actualmente, ellas corresponden a: CONECEL S.A. (Claro), OTECEL S.A. (Movistar) y CNT EP (CNT). Las tres operadoras son las únicas con el espectro radioeléctrico concesionado para brindar el servicio de comunicaciones móviles. En el caso de Claro, se firmó un contrato de concesión para la prestación de servicio móvil avanzado y de servicio

telefónico de larga distancia internacional; estos servicios podrán prestarse a través de Terminales de Telecomunicaciones de Uso Público y concesión de las Bandas de Frecuencias Esenciales[49]. En el caso de Movistar, de igual manera firmó un contrato de concesión para servicios móviles avanzados y de servicio telefónico de larga distancia internacional. Por otro lado CNT, empresa de estatal posee la concesión para operar servicios móviles avanzados.

La operadora móvil CONECEL fue la primera empresa en brindar servicio de telefonía móvil, cuyo crecimiento tecnológico evolución conforme se desarrollaron nuevos descubrimientos de las redes celulares, es así que inició con tecnología analógica AMPS, para pasar a tecnología 2G (D-AMPS) y luego a GSM y GPRS en el 2003. Desde finales del 2008, Claro brinda servicios móviles avanzados en redes 3G (UMTS) y redes 3.5G (HSDPA)[51]. En el caso de OTECEL, se logró iniciar con tecnología 1G, casi enseguida que CONECEL para luego atravesar un cambio de tecnología a CDMA y casi enseguida para actualizarla a CDMA1x para poder brindar servicios de transmisión de datos e internet. De igual forma que Claro, Movistar adoptó las tecnologías de GSM, GPRS y EDGE (Tecnologías 3GPP), para finalmente adoptar las tecnologías UMTS y HSDPA para brindar servicio móvil avanzado. El caso de CNT EP se caracteriza por atravesar una serie de cambios comerciales ya que en 2010 absorbe a la empresa Alegro PCS, nombre comercial que pertenecía a TELECSA, que de igual forma se creó por empresas de telefonía fija para desarrollar competencia a las operadoras móviles que hasta el año 2003 eran solo 2; cabe recalcar también, que CNT EP fue creada a partir de las dos mismas empresas de telefonía fija que crearon TELECSA. De esta manera, se puede decir que TELECSA a partir de su creación, aporta con el servicio de telefonía móvil a través de PCS (Sistema de Comunicación Personal), para migrar en el 2005 a CDMA1x y finalmente debido problemas de economía se vio forzada a la renta de la red de telecomunicaciones de OTECEL para poder brindar servicio de telefonía móvil en GSM[51].

A pesar de los esfuerzos en crecimiento de infraestructura de redes de telecomunicación, CNT aún no podría superar el grado de preferencia o penetración en el mercado de Claro. Los niveles de cobertura incluso están a favor

de CONECEL, aunque con las nuevas propuestas de competencia que está generando CNT, se esperaría un mayor crecimiento en la preferencia de los usuarios para la operadora estatal. Estadísticamente, Claro lidera todo el mercado con un 68,3% del total de terminales de usuario, la Figura II.13 muestra los porcentajes correspondientes a la penetración en el mercado según terminales de usuario.



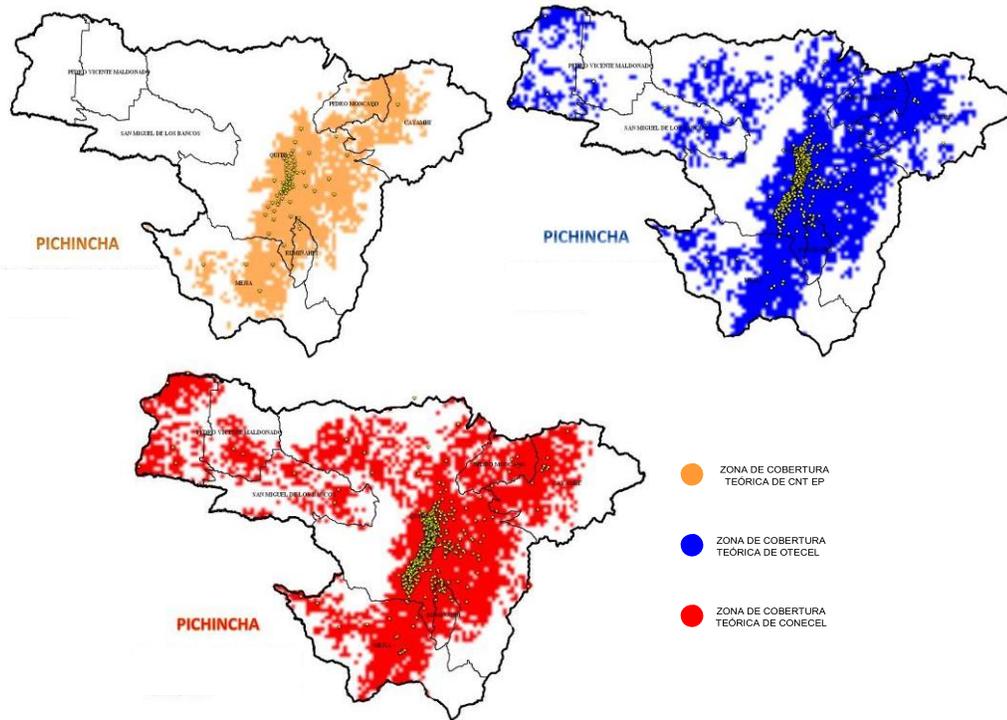
**Figura II.13** Distribución del mercado de telefonía móvil, por operadora (considerando solo terminales de usuario) octubre-2014.

**Fuente:** [50] SUPERTEL, "Estadísticas del SMA a Octubre de 2014," 2014. [Online]. Available: [http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil/ut/p/z1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8\\_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/](http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil/ut/p/z1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/). [Accessed: 30-Dec-2014].

### **Cobertura:**

Se refiere a las áreas geográficamente autorizadas para la explotación del sistema. El área de cobertura es la zona en la cual cada operadora dispone de infraestructura celular que permite al usuario el acceso al Servicio Móvil Avanzado[49]. Gracias a los datos estadísticos del SENATEL, las zonas de cobertura correspondiente a cada una de las operadoras de servicio móvil avanzado se han podido elaborar mapas provinciales que contienen la información acerca de la cobertura teórica en función de parámetros de las estaciones base como altura, ganancia y potencia de los equipos. En la Figura II.14 hacemos una comparación de la zona de cobertura teórica dentro de la provincia de Pichincha, la ilustración muestra que CNT es la operadora con menor cobertura, mientras que CONECEL y OTECEL dentro de la provincia mencionada compiten casi a la par.

El resultado de zonas de cobertura de otras provincias puede ser visto en [52], donde la biblioteca del SENATEL nos proporciona estadística completa del sector telecomunicaciones en el Ecuador.



**Figura II.14** Comparación de la zona de cobertura teórica de CNT, Movistar y Claro dentro de la provincia de Pichincha.

**Fuente:** [52] SENATEL, “Secretaría Nacional de Telecomunicaciones | Ecuador » Biblioteca,” 2014. [Online]. Available: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/biblioteca/>. [Accessed: 30-Dec-2014]<sup>4</sup>.

Los niveles de cobertura se explican debido a que Claro por ejemplo fue la primera operadora en el país y por ende tuvo mayor penetración en los territorios de cada provincia del Ecuador, un poco más atrás se encuentra Movistar y al último CNT. A pesar de que CNT tiene poca cobertura actualmente, se espera que llegue a zonas rurales mediante la banda de 700 y en zonas urbanas también tendrá un mayor acceso mediante la banda de 1,7. Según [51], para este año 2014 CNT debería haber implementado un total de 491 BS de HSPA+, que mediante

<sup>4</sup> Para las zonas de cobertura de CNT EP: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=716&force=1>

Para las zonas de cobertura de OTECEL: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=715&force=1>

Para las zonas de cobertura de CONECEL: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/wp-content/plugins/download-monitor/download.php?id=713&force=1>

una actualización de software podría escalar a redes LTE. De igual manera, Movistar y Claro tendrán la posibilidad de escalar sus redes a LTE debido a que ambas ya poseen redes en tecnología 3G y HSPA+, por lo que también dependerían de una actualización de software.

### **2.3.2 Aplicaciones de MVNO en las redes celulares ecuatorianas**

Los MVNOs[53] (operadores móviles virtuales/OMVs) son definidos como un tipo de operador móvil capaz de ofrecer al público servicios móviles avanzados, su principal característica es que no cuenta con el acceso directo al espectro radioeléctrico, por tanto no dispone de una red de acceso[54]. Estos operadores móviles son llamados virtuales debido a que carecen de una concesión del espectro radioeléctrico, es por eso que arrienda parte de la red de una operadora móvil concesionada y por ende ocupa parte del espectro que se le asigna a una operadora de red. En el caso práctico, sería como si una nueva empresa MVNO arrendara la infraestructura de Claro, Movistar o incluso CNT EP para brindar servicios de telefonía u otras aplicaciones. Dentro de una perspectiva, los operadores móviles virtuales representarían un efecto positivo e incluso necesario dentro del mercado de la telefonía móvil en el Ecuador. Según [55], *“el elevado porcentaje de usuarios de tipo prepago, la estandarización de tecnología móvil en cuanto a la red y a los equipos terminales, la obligación de compartir infraestructura de estaciones base, la importancia del mercado de las telecomunicaciones móviles que mueve alrededor de 2600 millones de dólares por año, la demanda siempre creciente de usuarios de los servicios, los principios constitucionales actuales y las reformas legales en camino, configuran un escenario propicio para el ingreso de operadores móviles virtuales en el Ecuador”*<sup>5</sup>. Dentro de las perspectivas por el ingreso de MVNOs en el Ecuador, se ha desarrollado un criterio notable, que tiene que ver con la situación actual de las operadoras móviles del país. El criterio desarrollado corresponde a un análisis del espectro concesionado a cada una de las operadoras, en el caso de CNT EP posee un gran espectro en comparación con CONECEL Y OTECEL, lo que le

---

<sup>5</sup> F. Brito Mancero, “INGRESO DE LOS OPERADORES MÓVILES VIRTUALES EN EL ECUADOR,” *SUPERTEL Cuad. 2 Telecomunicaciones*, 2013, Página 15, Párrafo 4.

hace ser el mejor candidato para albergar operadores móviles virtuales; sin embargo, CNT EP posee todavía una infraestructura reducida, de hecho esta empresa estatal todavía depende de parte de la red de OTECEL para brindar cobertura y de esta realidad se ha llegado a suponer que CNT actúa como un operador virtual arrendando la red Movistar, sin embargo con los nuevos planes de expansión de su infraestructura, con el tiempo CNT podrá ser el apto arrendador de red para disponerlo a operadores móviles virtuales. Según [56], a Claro se le ha dado actualmente un total de espectro de 35 MHz, de igual manera para Movistar y solo CNT tiene en la banda de 1900 MHz un total de 40 MHz. Esto podría dar una perspectiva clara de que el mejor candidato en albergar MVNOs sea CNT, sin quitar la posibilidad de que tanto Claro como Movistar se presten en un futuro a arrendar también su red para albergar a estos operadores virtuales. Según [54] basado en [57], hay unas consecuencias que traen beneficios al aplicar un correcto modelo de negocio para el operador móvil virtual. Mencionan que existe una estimulación a los segmentos no explotados debido a un crecimiento del mercado; lo cual se explicaría como la adición de nuevos servicios en el mercado que permitan a los usuarios desarrollar nuevas interacciones. También se menciona que gracias a la los MVNOs, se han evitado oligopolios, resultado de una competencia abierta dentro del mercado; esto se explica diciendo que gracias a la competencia, se pueden tener más opciones en cuanto a elegir un servicio; lo a su vez, se explica gracias a la oferta de nuevos planes tarifarios y también a las nuevas propuestas de servicio móvil avanzado. Debido a la competencia de los operadores se mejoran los servicios para poder acaparar la mayor cantidad de usuarios. Finalmente, el ingreso de operadores móviles virtuales podría estimular la inversión de la empresa privada, brindando así una nueva forma de crecimiento económico a nivel nacional, debido a que estas empresas también generarían fuentes de empleo directas e indirectas, a las que la gente podrá acceder según su competencia y dentro de lo requerido por la empresa. [54] considera que para una posible implementación de OMVs puede darse siempre y cuando no se interpongan barreras políticas, ya que de lo contrario el fracaso de la empresa que quiera disponer su espectro para OMVs será inevitable; también concluye que los

tres pilares fundamentales de un posible ingreso de operadores virtuales son los aspectos técnicos, económicos y legales que tendrán que ser analizados de forma bien detallada.

- **AMI y MVNO:**

Consideramos que si AMI puede montarse en una infraestructura de comunicación celular, se vuelve muy útil la implementación de un MVNO que se encargue de direccionar y clasificar los datos que se obtengan de medición inteligente; esto no quiere decir que las operadoras concesionadas no puedan hacerlo, pero creemos que un operador móvil virtual dedicado en especial a brindar un servicio de comunicaciones para medición inteligente puede ser mejor que depender de una empresa operadora móvil y de esta manera separar los usuarios celulares regulares de los usuarios de medidores inteligentes, ya que se considera que un medidor inteligente es como un celular pero de cero movilidad; esto también permitirá a la operadora planificar el ingreso adecuado de medidores sin intensificar bruscamente el tráfico de la red celular. Sin embargo, en el supuesto caso de que los operadores móviles virtuales estén disponibles en un futuro muy lejano o en el supuesto caso de que el MVNO no sea rentable en el Ecuador, el servicio de medición inteligente se podrá dar gracias a un plan de negocios directamente con la operadora concesionada (CNT, Movistar, Claro). Dentro de los estudios de MVNO y AMI, se puede citar a varios países de Europa y Estados Unidos, donde operadores virtuales han decidido explotar ese nicho de negocio y brindar el servicio de medición inteligente.

Los operadores móviles virtuales se vuelven fundamentales en el caso de que una operadora móvil concesionada lo albergue, ya que los datos deberán ser bien clasificados y sobre todo bien equiparados dentro de la compartición de los canales radioeléctricos entre el servicio celular y el servicio de medidores inteligentes; actualmente también se han desarrollado estudios que hacen que el MVNO adquiera un nivel avanzado de funcionamiento, lo que se denomina como C-MVNOs[58], que se traducen como operadores móviles virtuales cognitivos que desempeñan funciones complejas dentro de una red para poder determinar aspectos esenciales en la transmisión y recepción de datos[10].

## **2.4 Caracterización de la información up/down/link de medidores inteligentes**

Los medidores inteligentes son los elementos más importantes dentro del sistema AMI, ya que determinan el tráfico de datos que enviarán o recibirán entre las empresas de distribución y los abonados de energía eléctrica, mediante la red de comunicaciones de la operadora de red o del operador móvil virtual. Se ha logrado determinar que cada medidor inteligente aporta un nivel considerable de datos, debido a las aplicaciones que prestan al distribuidor de energía y al cliente; esto quiere decir que aquellos datos que se envíen o reciban dependerán de la funcionalidad que las empresas de distribución le den al medidor inteligente. También es necesario considerar que debido a la gran cantidad de medidores inteligentes y la cantidad de datos que genera cada uno, el sistema de comunicaciones que se vaya a utilizar debe estar dotado de características de gran capacidad y que también tome en cuenta las particularidades que engloba realizar medición inteligente[59].

Habíamos mostrado anteriormente diferentes estándares de comunicaciones para hacer posible el traslado de la información de medición inteligente, también habíamos mostrado que las comunicaciones celulares son bastante útiles para la finalidad; es por esto que, el operador móvil debe tener claro que los medidores inteligentes se comportarán de manera similar a un celular, pero no de igual forma, debido a que deben considerar la cero movilidad y las intensidades de tráfico que son perfectamente definidas y por tanto se diferenciarán de los teléfonos celulares cuyo funcionamiento se basa en un tráfico de datos y una movilidad aleatorios. Es por esta razón que el operador encargado del traslado de datos de los medidores inteligentes podrá tener siempre constante la cantidad de información y movilidad que representa la medición inteligente. La cero movilidad permitirá a la empresa de comunicaciones definir el lugar o estancia geográfica de cada dispositivo, por tanto asignar cada medidor a una estación base más cercana, dependiendo de la capacidad de los canales de frecuencia que tenga cada estación base y sobre todo la identificación del tráfico generado en la zona, para que permitan desarrollar planes de compartimiento de canal tanto para los usuarios de telefonía como para los de medición inteligente.

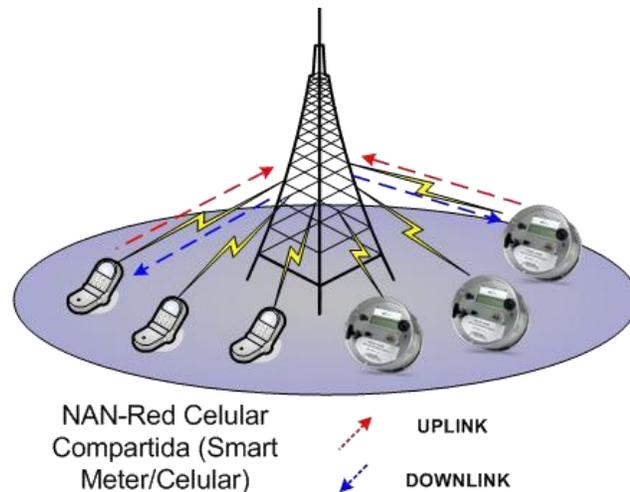
### **2.4.1 Enlaces Ascendente/Descendente (Uplink/Downlink)**

Las redes inalámbricas de banda ancha proporcionan amplias áreas de cobertura omnipresentes, alta disponibilidad y una fuerte seguridad y por tanto, son un fuerte candidato para el manejo de las comunicaciones de medidores inteligentes. Los operadores inalámbricos naturalmente ven una oportunidad de negocio atractivo en AMI, ya que se destacan por obtener ingresos adicionales a partir de las redes celulares existentes. Las agencias gubernamentales han alentado tal uso compartido de red para reducir la huella energética de AMI[59].

Como en todos los sistemas de telecomunicaciones bidireccionales existen dos tipos de enlace en el traslado de datos de medición inteligente. En comunicaciones celulares, la dirección de la estación base hacia los dispositivos móviles se denomina enlace descendente (downlink), mientras que la dirección inversa se llama enlace ascendente (uplink). El enlace ascendente se considera la dirección limitante para la cobertura y el enlace descendente se considera la dirección limitante para la capacidad[60]. En el caso de medidores inteligentes, el problema se suscita en uplink, debido a que la información más determinante a ser trasladada y ocupada corresponde al envío de datos medidos del medidor inteligente hacia la empresa de distribución de energía eléctrica.

En la red celular se presupone un tráfico que normalmente se modela como un conjunto de sesiones individuales, en los que la duración de la sesión o escala de tiempo muestra una distribución fuertemente atado y suele ser órdenes de magnitud mayor que la escala de tiempo de paquetes; es decir, que la duración de las sesiones varía ampliamente y una sesión típica requiere un gran número de paquetes para comunicar digitalmente. Esto permite que cada sesión sea tratada como una conexión independiente, sujeto a los mecanismos de control de admisión, con los procedimientos de señalización asociados para la configuración de los recursos de radio y de red. La señalización asociada con la configuración de conexión representa una sobrecarga mínima en comparación con el total de datos transferidos por la duración de las sesiones[59]. En contraste, se espera que la mayoría del tráfico AMI consista en sólo unos paquetes de carga útil entre el medidor y el MDMS. Además, se espera que en las operaciones normales, la

mayoría del tráfico sea regular en lugar de ser ad-hoc; es decir, que los medidores informarán periódicamente los datos en uplink y los datos downlink del sistema de gestión pueden seguir si así es requerido. Después de eso, habrá un largo período de inactividad hasta la próxima vez que se reporte datos de medición[59]. La Figura II.15 explica claramente la forma como se estructuraría la red NAN compartida entre los medidores inteligentes y los usuarios de telefonía celular para enviar o recibir datos, sea en 2G, 3G o cualquier otra tecnología celular.



**Figura II.15** Caracterización del Enlace de datos Uplink y Downlink en una red compartida  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

Cabe mencionar que dentro de las redes celulares, una regla de diseño es que la cobertura suele ser más importante que la velocidad de datos. La velocidad de datos es importante siempre que sea suficiente para transferir datos con regularidad, pero es más importante que los datos sean transmitidos en su totalidad por cada uno de los medidores. La mayoría de las comunicaciones de los medidores se pueden medir en ( ) en lugar de ( ) o ( ). Un medidor inteligente normalmente envía alrededor de 20 a 40 de información tal vez una vez cada 30 minutos. Esto equivale a un promedio de 240 por 30 minutos o 8 [61]. Por otro lado, según [24], el consumo de energía leído por cada Smart Meter es en forma periódica y el tráfico asociado es predecible y tiene requisitos de latencia largos. Por ejemplo, el intervalo de 15 min entre cada lectura del medidor, se transfieren a la empresa de distribución cada 4 horas durante el día o cada 8 horas por la noche. Los principales factores que

determinan el ancho de banda para las lecturas de los medidores (uplink) son el tamaño de las lecturas y la frecuencia de las lecturas. Cada medidor puede necesitar 10 de transmisión de datos y la latencia está en el intervalo de 2 a 10 segundos. Por otro lado, los datos que la empresa enviará a cada abonado, dependerán del uso de DR (respuesta a la demanda), que por lo general tendrá periodos de latencia largos (de unos 500 milisegundos a varios minutos), lo que será un factor determinante en la determinación de la red para AMI. En el caso de cortes y reconexiones, en cambio, puede requerir unos pocos cientos de milisegundos de latencia[24], lo que no implica una gran relevancia para el operador de la red de comunicaciones.

#### 2.4.2 perspectiva de los medidores inteligentes

Un medidor inteligente también representa un sistema electrónico interno capaz de desempeñar las funciones necesarias para el traslado de datos de la energía medida. Un medidor inteligente en su composición completa puede ser ejemplificado como el de la Figura II.16, que es solo un modelo de medidor desarrollado por la marca Elster.

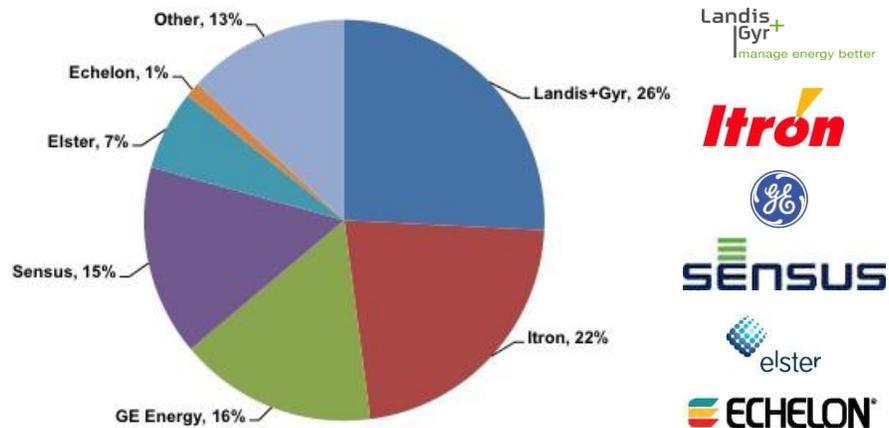


**Figura II.16** *Elster REX2*

**Fuente:** [62] iFixit, "Elster REX2 Smart Meter Teardown," 2011. [Online]. Available: <https://es.ifixit.com/Teardown/Elster+REX2+Smart+Meter+Teardown/5710>. [Accessed: 03-Jan-2015].

Existen medidores de distintas marcas como las detalladas en la Figura II.17 que dentro del mercado mundial han sido reconocidas ampliamente, pero en Estados Unidos han logrado adquirir un porcentaje de preferencia que según [63], Landis+Gyr acapara aproximadamente el 26% del mercado; sin embargo, existe un porcentaje considerable del 13% que corresponde a otras marcas no tan reconocidas. Las diferentes marcas también son las que imponen los costos de un

medidor inteligente, estos costos pueden variar dependiendo de las funciones y características técnicas. Un plan de negocios a manos de entidades gubernamentales permitiría desarrollar acciones de importación o en el mejor de los casos, planes de manufactura interna para ensamblar medidores y así disminuir costos y sobre todo generar fuentes de empleo en el sector industria gracias a la elaboración de medidores inteligentes.

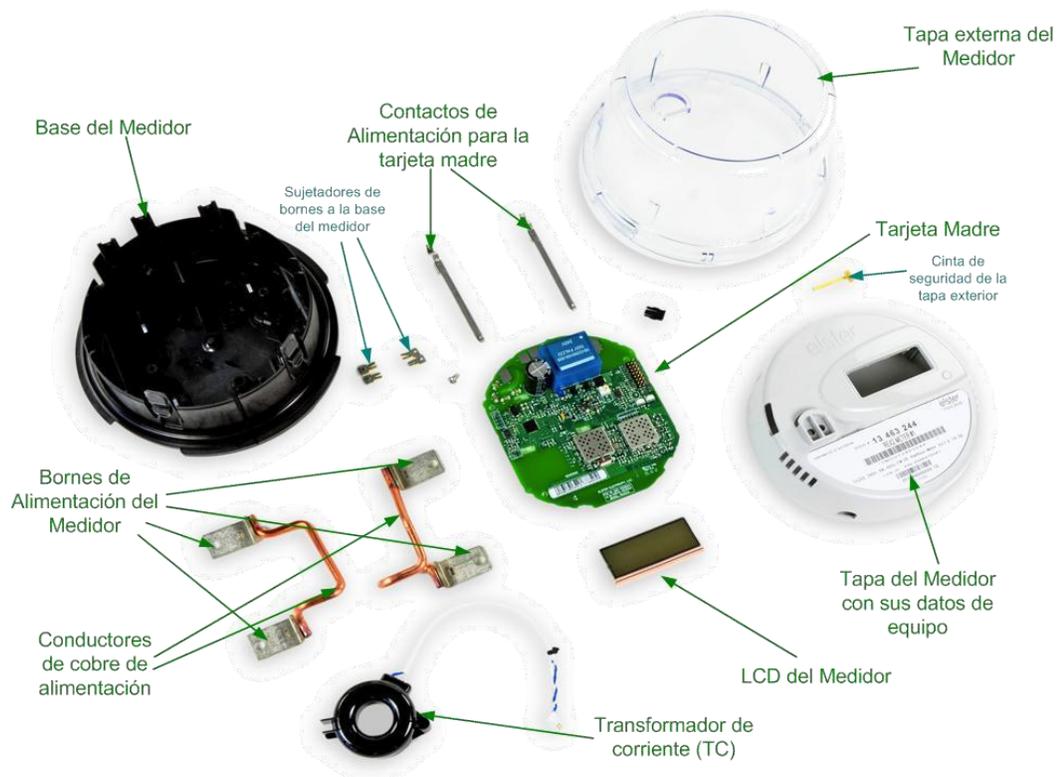


**Figura II.17** Gráfica de porcentajes de marcas predominantes en el mercado de medidores inteligentes.

**Fuente:** [63] S. Marcacci, "Global Smart Meter Market Drops 15 Percent in 1Q 2012," 2012. [Online]. Available: <http://www.marcaccicomms.com/news/global-smart-meter-market-drops-15-percent-in-1q-2012/>. [Accessed: 03-Jan-2015].

Gracias a la gran cantidad de marcas y de modelos de los medidores inteligentes, es imposible determinar un modelo genérico de la estructura interna de un medidor, sin embargo hay ciertas características que los identifican como medidores inteligentes. La Figura II.18 nos muestra al medidor REX2 de Elster desarmado en todas sus partes. Como se muestra en el gráfico, existen elementos característicos que lo identifican, uno de esos elementos es el transformador de corriente (TC) que mide la energía consumida y la envía a la tarjeta madre. Su tarjeta madre se encarga de las acciones internas del medidor, incluyendo las comunicaciones y las acciones de monitoreo y control, cabe mencionar que otros dispositivos inteligentes poseen tarjetas adicionales a la tarjeta madre y en gran parte de los casos son las tarjetas de comunicación que en ciertos casos son modulares, es decir que vienen con la opción de ser reemplazadas según el diseño de la red AMI. Otros tipos de medidores incluyen diferentes partes como

los dispositivos de control remoto de conexión On/Off, para poder realizar las acciones de corte y reconexión remota.



**Figura II.18** Partes internas de un medidor inteligente elster REX2

**Fuente:** [62] iFixit, "Elster REX2 Smart Meter Teardown," 2011. [Online]. Available: <https://es.ifixit.com/Teardown/Elster+REX2+Smart+Meter+Teardown/5710>. [Accessed: 03-Jan-2015].

## CAPÍTULO III

### III. MODELAMIENTO, SIMULACIÓN Y EMULACIÓN DE UNA RED INALÁMBRICA PARA MEDICIÓN INTELIGENTE DE ENERGÍA ELÉCTRICA

En este capítulo se desarrolla la parte de modelamiento de la red a través de algoritmos matemáticos y simulaciones de software que indiquen una manera de implementar medidores inteligentes a través de una red celular. Se ha desarrollado un algoritmo de optimización en base de k-means, que se encarga de realizar una conglomeración de un número finito de usuarios dentro de un rango de cobertura simulado en base a las características técnicas de una estación base celular. Este apartado también se encarga de la determinación del espacio geográfico donde se pueda desplegar los sistemas de medición inteligente; de igual forma, será necesario realizar un breve análisis de las pérdidas de energía en distribución para poder entender el aspecto de gestión de las empresas de distribución y por medio de esto solventar la caracterización de la zona donde se pueda desplegar AMI.

#### 3.1 Índice de pérdidas no técnicas en zonas urbanas y plan de reducción a través de AMI

Las pérdidas eléctricas se atribuyen a fenómenos físicos característicos de los materiales conductores al ser sometidos al paso de la corriente eléctrica. Para efectos comerciales y técnicos, se puede decir que las pérdidas eléctricas son el resultado de la diferencia entre la electricidad disponible del sistema y la electricidad facturada[64].

*“La determinación de las pérdidas, en los sistemas que están en servicio, suele realizarse mediante balances efectuados en los diferentes componentes del sistema eléctrico; como la diferencia entre la disponibilidad aguas arriba de un componente o sistema y, la entrega aguas abajo”<sup>6</sup>.*

Las pérdidas eléctricas representan un problema importante en los sistemas eléctricos. Gran parte de estos problemas de pérdidas se generan en la etapa de

---

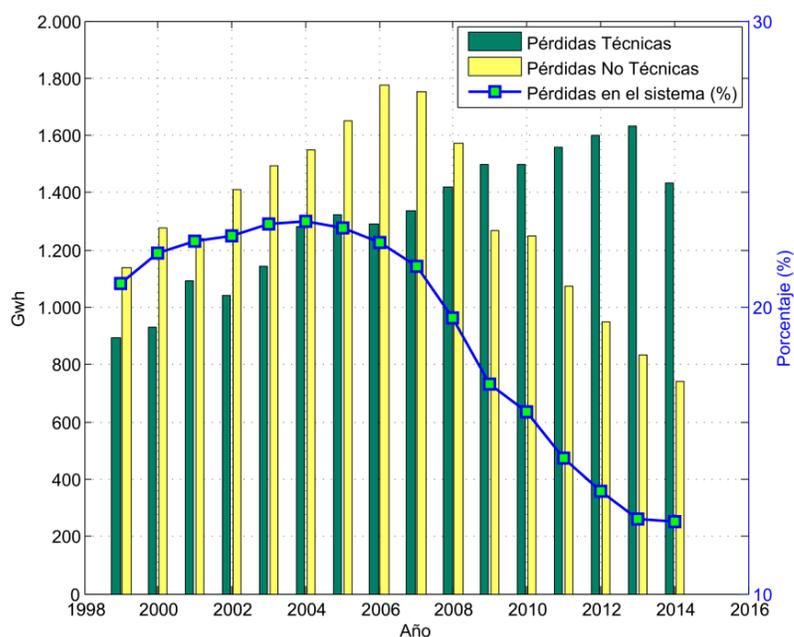
<sup>6</sup> V. Orejuela Luna, “BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA APLICACIÓN DEL PLAN DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN EL ECUADOR,” *ECUACIER XXIX Semin. Nac. del Sect. Eléctrico Machala*, May 2014, Página 2, Párrafo 6.

distribución, por lo tanto impactan en el rendimiento de estos sistemas. Se suele clasificar a las pérdidas en pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas por efectos de análisis; estos análisis son la base fundamental en la determinación de los problemas operativos que causan bajo índice de eficiencia en los sistemas eléctricos; de igual forma, estas pérdidas que se producen en la fase de distribución[30], dan lugar a que los índices de eficiencia se reflejen en el servicio. Esta situación está lejos de ser mitigada con el uso de medidores de energía tradicionales, que no permiten una medición de energía en tiempo real que pueda minimizar los errores de lectura o de igual forma que permitan la administración remota del medidor. Todo esto representa un grado de deficiencia en los sistemas de distribución, que debería ser controlado mediante el mejoramiento de los planes de reducción de pérdidas de energía.

### **3.1.1 Análisis de pérdidas de energía en distribución**

Los sistemas de distribución son en un alto porcentaje radiales, lo que significa que el flujo de potencia nazca de un solo nodo principal, el cual corresponde a la subestación que alimenta a la red[65]. Las subestaciones transforman la alta tensión (AT) entregada por el sistema a niveles de media tensión (MT); los voltajes en MT se transportan a través de una red que alimentará en forma trifásica, bifásica o monofásica a transformadores de distribución que se encargarán de finalmente acondicionar a baja tensión (BT) para ser suministrada a los abonados o clientes regulados. Entonces se puede decir que las redes de distribución poseen una red primaria que está en MT y una red secundaria que están BT y que según el tipo de consumidor (residencial, comercial o industrial) se conectará a la red en forma adecuada[65]. Dentro de las redes de distribución, las pérdidas técnicas son normales, pero las pérdidas no técnicas corresponden a una composición de diferentes factores, que en su mayoría son ocasionados por el hurto, el robo y el fraude de la electricidad recibida de la empresa de distribución. El balance total de las pérdidas a nivel nacional, representan un problema que denota deficiencia en las empresas de distribución, lo cual a su vez ocasiona serios impactos en las tarifas eléctricas y también la economía de las

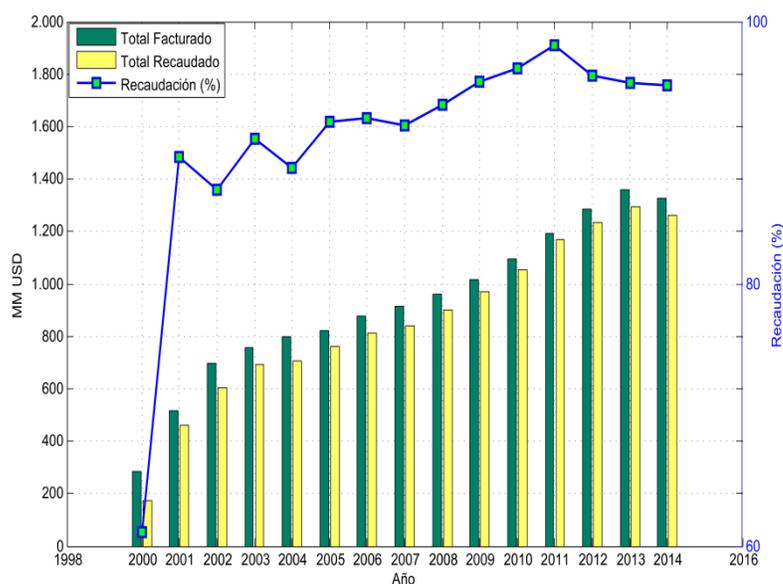
empresas[65]. Gracias a los datos proporcionados por el Consejo Nacional de Electricidad (CONELEC), en el Ecuador se han determinado niveles de pérdidas que ocasionan al país un perjudicial monto de dinero que debe cubrirse. La Figura III.1 indica la estadística desde el año 1999 al 2014 de las pérdidas ocasionadas en el sistema de distribución. Esta gráfica nos permite determinar que desde el 2008 se ha presentado una disminución de las pérdidas, siendo el 2007 el pico más alto de esta estadística, también podemos ver que los niveles de pérdidas no técnicas representan una gran disminución, contrario a las pérdidas técnicas que han aumentado, pero lo importante de esta estadística es mostrar como el Plan de Reducción de Pérdidas en el Ecuador (PLANREP) ha dado frutos. Sin embargo, es necesario notar que las pérdidas no técnicas siguen siendo un problema, dado que estas pérdidas no van a reducirse en su totalidad o gran parte de ella, si no se implementan nuevos mecanismos de reducción de pérdidas no técnicas. En el año 2014, los últimos datos analizados por el CONELEC muestran que las pérdidas totales en el sistema son aproximadamente 12,5%; esto también demuestra una importante variación porcentual respecto a las pérdidas de años anteriores[66].



**Figura III.1** Pérdidas de energía eléctrica de distribución en el Ecuador

**Fuente:** [66] CONELEC, "Pérdidas anuales de energía eléctrica en los sistemas de distribución," 2014. [Online]. Available: [http://www.conelec.gob.ec/enlaces\\_externos.php?l=1&cd\\_menu=4248](http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4248). [Accessed: 04-Jan-2015].

Según el balance nacional de energía del Ecuador elaborado por el CONELEC y actualizado hasta el mes de Septiembre de 2014, los valores correspondientes a las pérdidas en distribución, atribuyen 1704,3 a las pérdidas técnicas y 858,93 a las pérdidas no técnicas; esto a su vez determina que las pérdidas técnicas representan el 8,26% y las pérdidas no técnicas un 4,16% de las pérdidas del sistema y que en su totalidad generan pérdidas energéticas en el orden de los 2563,24 y por ende generan pérdidas económicas[67]. De igual forma, la estadística recolectada por el CONELEC, también muestra los valores en facturación y recaudación de la energía entregada a los clientes. La Figura III.2 muestra los valores anuales facturados, mostrando que en el 2014 se han facturado alrededor de US\$1326,58 MM (millones de dólares), pero se ha recaudado US\$1262,25 MM, lo que quiere decir que existe una diferencia de 4,85% del total de dinero sin recaudar; evidentemente, esto demuestra que los valores no recaudados directamente a clientes finales, corresponde a una pérdida económica de \$US64,33 MM que en parte son ocasionados por las pérdidas no técnicas. El gráfico también evidencia un aumento en los montos facturados, pero de igual forma montos no recaudados a lo largo de 15 años[68].



**Figura III.2** Valores facturados y recaudados a clientes finales en el Ecuador  
**Fuente:** [68] CONELEC, "Valores anuales facturados y recaudados a clientes finales," 2014.  
 [Online]. Available: [http://www.conelec.gob.ec/enlaces\\_externos.php?l=1&cd\\_menu=4229](http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4229).  
 [Accessed: 04-Jan-2015].

### 3.1.2 Identificación de pérdidas no técnicas en el sistema

Habíamos mencionado que las pérdidas eléctricas se clasifican en pérdidas técnicas y no técnicas, sin embargo no se ha determinado el concepto y el cálculo de las pérdidas no técnicas, que se caracterizan por presentar características importantes para el análisis de implementar un sistema de reducción de las pérdidas en el sistema de distribución. Se sabe que no toda la energía producida puede ser vendida y facturada, debido a esto las empresas de distribución registran pérdidas en la energía que se genera y se tiene disponible. Los valores de pérdidas no técnicas no se pueden contabilizar debido a que los sistemas de medición actuales en el Ecuador no lo permiten. Estas pérdidas no técnicas, por lo tanto, no pueden ser consideradas como una pérdida real de energía, sino más bien como una pérdida en factores económicos comerciales, por esa razón es que estas pérdidas son consideradas como pérdidas comerciales[65]-[69]. Otros criterios de las pérdidas comerciales, le atribuyen causas como *“la falta de registro de abonados en la base de datos de los sistemas de comercialización de las distribuidoras, ausencia y/o facturación a consumidores que se proveen de energía en forma ilegal o cuyos sistemas de registro sufren algún daño o manipulación”*<sup>7</sup>. Las pérdidas técnicas, en base a diferentes criterios, pueden ser clasificados según su origen o causa que las producen. De esta manera, [70] los clasifica en 4 grupos:

a) Por Hurto o Robo

Estas son causadas por la intervención ilegal de los usuarios en las redes de energía eléctrica en forma directa, lo cual provoca que existan cargas no registradas en la red y por ende pérdidas económicas por energía facturada no recaudada. También se debe mencionar que la diferencia entre hurto y robo está estipulada según el nuevo COIP (Código Orgánico Integral Penal)<sup>8</sup> y por ende determinará las penas en el caso de ser demostradas. La diferencia entre hurto y robo es que en el hurto, el ladrón no utiliza la violencia, por ejemplo cuando el perjudicado no se da cuenta de que le robaron la billetera, pero el robo se caracteriza por presentar violencia o amenaza en contra de la víctima o si se

<sup>7</sup> CONELEC, “PLAN MAESTRO DE ELECTRIFICACIÓN 2012-2021,” Quito, 2012, Página 44, Párrafo 1.

<sup>8</sup> <http://www.asambleanacional.gob.ec/documentos/asamblea2013-2017/sala-prensa/coip-registro-oficial-180.pdf>

aplica la fuerza sobre el objeto que se va a sustraer. En resumen, clasificaríamos este grupo en dos formas, el hurto y el robo de electricidad. El hurto de electricidad sería cuando el usuario realice anclajes ilegales a la red de distribución, sin que el distribuidor se dé cuenta inmediatamente del acto ilícito; mientras que el robo de electricidad, sería determinado como el acto en el cual el abonado realice anclajes ilegales en la red, a sabiendas de que el distribuidor ya se enteró en el momento de la realización del acto ilícito. De cualquier forma, estas acciones de anclaje ilegal a la red de distribución se clasificarían dentro del grupo de hurto o robo de electricidad.

b) Por fraude

Un fraude, según [70], es el acto provocado por el cliente que manipule el equipo de medición logrando un registro erróneo de consumo. [64] también determina que fraude puede atribuirse a conexiones directas del suministro o manipulación de las instalaciones.

c) Por mala administración

Esta clasificación, según [70] también, se deben a la procedencia incorrecta de la facturación para el pago del consumo, lo cual es generado por parte de la gestión comercial y administrativa de la empresa de distribución. Esta clasificación determina los siguientes procedimientos incorrectos:

- *Errores de lectura*
- *Clientes sin identificación comercial*
- *Falta de registro de los consumos propios*
- *Retraso de la Facturación*
- *Errores de los factores de multiplicación de equipos de medición*
- *Equipos de medición obsoletos*
- *Suspensiones erróneas, etc.*
- *Servicios sin medidor, cuando se deja el servicio directo por parte de la empresa sin una medición ya sea por falta de medidores en el laboratorio lo que conlleva a estimar el consumo de energía eléctrica para la facturación, o cuando se realiza un cambio de medidor dejando sin registro de consumo de energía eléctrica hasta colocar un nuevo*

*medidor*<sup>9</sup>.

d) Zonas conflictivas

Esta clasificación es para aquellas pérdidas que se originan por la conexión de cargas considerables en sitios que socialmente salen de control de la empresa de distribución[70]. Es decir, esta clasificación es para aquellas pérdidas que se originan por conexiones técnicamente mal instaladas en lugares donde la empresa de distribución no puede acceder para su control, por problemas sociales que se generan en esa zona.

Según la investigación de [65], basado en manuales de la OLADE (Organización Latinoamericana De Energía), las pérdidas no técnicas se pueden clasificar según la causa provocada y según las actividades administrativas de la empresa. Esto nos da a entender que según las causas que las producen, incluye al consumo de usuarios no suscritos o por contrabando, error en la contabilización de la energía, error en consumo estimado (en el caso de suscriptores sin medidor de energía), por fraude o hurto y errores de consumo propio de las empresas distribuidoras. Aquellas pérdidas clasificadas como las pérdidas según la actividad administrativa de la empresa, se caracterizan por englobar dos aspectos importantes, que son pérdidas ocasionadas por registro o medición deficiente del consumo y las ocasionadas por facturación incorrecta de los usuarios.

El cálculo o balance de las pérdidas en el sistema se puede calcular gracias a los datos de la energía entregada a la empresa de distribución y la energía que es entregada y facturada a los usuarios finales[70]. Según [70], basado en indagaciones sobre las empresas distribuidoras del Ecuador, como la EERSSA (Empresa Eléctrica Regional del Sur S.A.), ha determinado que:

(III.1)

Donde,

corresponde a la energía disponible en el sistema (en      ),  
es la energía comprada en el mercado eléctrico mayorista (en      ),  
es la energía comprada a autogeneradoras (en      ),  
es la energía comprada a otra distribuidora (en      ),

---

<sup>9</sup> P. O. Quishpe Sacancela and D. P. Tapia Rivas, "Análisis técnico económico de las formas mas comunes de contravenciones en el consumo de energía eléctrica," Quito, 2010.

es la energía generada no incorporada al mercado eléctrico mayorista (en ) y  
corresponde a la energía recibida para terceros (en ).

También que:

(III.2)

Donde,

corresponde a la energía entregada y facturada a clientes finales (en ),  
es la energía facturada a clientes regulados (en ),  
es la energía facturada a clientes no regulados (en ) y  
corresponde a la energía entregada a terceros (en ).

Y según [70] también, estos cálculos que deben ser realizados dentro del mismo periodo de análisis, las pérdidas en distribución se calculan así:

(III.3)

Donde,

corresponde a las pérdidas calculadas en distribución (en ), mientras que (III.1) nos indicaba que es el resultado de la energía disponible en el sistema y (III.2) nos mostraba que correspondía a la energía entregada a clientes finales.

Ahora, las pérdidas no técnicas se pueden calcular determinando en primer lugar las pérdidas técnicas del sistema, cuyo valor suele basarse en estimaciones, empleando modelos de simulación de las operaciones de los distintos componentes de la red. Los modelos pueden ser análogos, que son a escala de red o modelos mediante programas digitales, que realizan flujos de carga[64]. De esta manera se puede decir que:

(III.4)

Donde,

corresponde a las pérdidas no técnicas de energía (en ),  
sabemos que son las pérdidas calculadas en distribución (en ) y  
son las pérdidas técnicas de energía estimadas por modelos de cálculo (en ) [71].

Cabe mencionar que estos balances son realizados por cada una de las empresas de distribución, lo cual implica que deben ser elaborados con veracidad y eficacia para poder reportarlos al ente regulador que en el caso ecuatoriano es CONELEC, de esta manera se pueden realizar los balance finales que ayudarán a determinar también planes de mejoramiento de los sistemas de distribución en función de reducir al mínimo posible las pérdidas en distribución.

### **3.1.3 Planes de reducción de pérdidas a través de AMI**

Como ya lo habíamos determinado, las pérdidas no técnicas son causadas principalmente por el robo de electricidad, sabotaje a los medidores, y los errores propios del sistema comercial de la empresa de distribución. Esto incluye: a) el consumo de energía no medida; b) alteraciones del medidor[72]; y c) errores en la lectura facturación de medidores. La finalidad de este análisis es describir una lista de alternativas para la reducción de pérdidas no técnicas. Estas alternativas se ocupan de cuestiones relacionadas con la medición, sistemas secundarios y caídas del servicio y los sistemas de información de las empresas de distribución[30].

Alternativas para reducir las pérdidas en distribución mediante medición más eficiente y extendida incluye:

- Instalación de medidores a todos los clientes e instalaciones, independientemente del tipo del cliente, el tipo de instalación (por ejemplo, servicios auxiliares, subestaciones, etc.), o tipo de tarifa (puede haber clientes con tarifas especiales). Esto permite la medición de toda la energía suministrada por el sistema y calcular con precisión las pérdidas[30].
- Instalación de medidores prepago. Más de 40 países han implementado medidores de prepago en sus mercados. Algunos ejemplos son el Reino Unido, con alrededor de 3,5 millones de consumidores, y Sudáfrica, con más de 6 millones de medidores. Los medidores prepago permiten a los clientes comprar por adelantado el equivalente monetario de la cantidad de energía que se consuma. Los medidores informan a los consumidores

cuando la mayoría del crédito de energía se ha consumido, por lo que el cliente verá si es necesario comprar energía adicional. La experiencia internacional ha demostrado que los medidores prepago son una buena alternativa para reducir las pérdidas no técnicas, debido a las irregularidades de facturación y comerciales que se ocasionan[30].

- Instalación de macro-medición para la medición y el cálculo de las pérdidas técnicas y no técnicas. La estrategia de medición macro (también conocido como medición colectiva, medición maestro o la medición totalizadora) requiere la instalación de medidores globales (por ejemplo, en el lado de baja tensión de los transformadores de distribución). De esta manera la energía total suministrada puede ser comparada a la energía facturada por la empresa, una solución conocida como balance de energía, que permite a la empresa localizar, detectar y controlar las pérdidas no técnicas. La experiencia internacional con la medición macroeconómica ha sido muy satisfactoria. Por ejemplo, investigaciones de [30], en base a [73], se informa de una reducción del 8% de las pérdidas no técnicas (de 25% en diciembre 2003 al 17% en junio 2006) mediante la implementación de un proyecto de medidores totalizadores[30].
- AMI[74][75] crea una red entre los contadores inteligentes y sistemas de la empresa de distribución, lo cual permite la aplicación de lectura remota, desconexión de cuentas vencidas, detección de manipulación (alarma de apertura de la cubierta de medidores, alarmas de corriente inversa y alarmas de desequilibrio de fase), notificaciones de corte de luz, y funciones avanzadas incluyendo DR (respuesta a la demanda), y tasas del tiempo de uso. AMI, que se utiliza en combinación con macro- medición (lo que se denomina topología de instalación pre-planificada de medidores inteligentes) facilita la detección de una carga excesiva y el consumo no medido, lo cual facilita también detección de robo a distancia. Además, los datos proporcionados por AMI se pueden utilizar para perfilar el uso de electricidad; esto se hace mediante el análisis de las lecturas

del medidor inteligentes para identificar patrones anormales de consumo, por ejemplo, cuando el consumo es menor o mayor de lo habitual para un largo tiempo. Numerosas empresas de servicios públicos están utilizando AMI para la detección de pérdidas no técnicas[30].

- Instalación de sellos de medidores (en medidores y transformadores de medida), anillos altamente resistentes de bloqueo de medidores o cualquier otro tipo de dispositivo a prueba de manipulaciones. El objetivo de estos dispositivos es asegurar que nadie altere o abra el medidor sin dejar evidencia. Medidores, anillos de seguridad y sellos deben instalarse al mismo tiempo para evitar dejar desprotegido al medidor. Inspecciones periódicas zonales deben realizarse para identificar, verificar y sellar los medidores[30].

La referencia [30], también sugiere acciones complementarias para AMI. Esto incluye sustitución de cables convencionales por conductores antifraude. El objetivo de esta alternativa es a la restricción o para hacer más difícil el acceso de los consumidores a las líneas secundarias. Por ejemplo, en las zonas conocidas por el robo de electricidad, cables de baja tensión pre-ensamblados o coaxiales se utilizan en lugar de conductores convencionales. Se ocupan cables antifraude, evitando el acceso al conductor de fase por medio de la perforación o el corte del aislamiento. El conductor de fase está protegido por el conductor neutro, que tiene un patrón concéntrico alrededor del aislamiento. Por lo tanto, si se intenta una conexión no autorizada, se produce un cortocircuito que interrumpe el servicio. Este cable se utiliza sobre todo para cargas monofásicas, y su eficacia se ha reportado en la literatura internacional[30].

La conversión de líneas secundarias aéreas a bajo tierra: El fácil acceso a las líneas secundarias aéreas facilita la conexión ilegal de cargas y la proliferación de sistemas no estándar. Una alternativa para superar este problema es convertir líneas aéreas a una distribución subterránea. Las principales ventajas de este enfoque son los beneficios inherentes de los sistemas subterráneos: la estética (mucho menos desorden visual), seguridad (menos posibilidades de contacto con el público), confiabilidad (significativamente menos interrupciones de corta y larga

duración), O&M (Operación y Mantenimiento) (menores costos de mantenimiento) y alcance más largo (menos caída de tensión). Su principal desventaja es económica; el costo de las líneas subterráneas es mayor que el de las líneas aéreas[30].

Los sistemas de distribución utilizan georeferenciación en base software GIS (sistemas de información geográfica) estándar y sistemas de información del consumidor (CIS), los cuales son vitales para la reducción de pérdidas no técnicas. A través de los GIS, la empresa de distribución es capaz de relacionar geográficamente cada cliente con su respectivo sistema secundario, transformador de distribución, alimentación y subestación de distribución. El CIS maneja el consumo de energía del cliente y de facturación. Ambos sistemas facilitan el cálculo de balances de energía exactos, y el seguimiento y la localización de las pérdidas del sistema. Por otra parte, algunas empresas de distribución se están moviendo hacia la aplicación de DMS (sistemas de gestión de la distribución), lo que permite optimizar el funcionamiento del sistema para minimizar las pérdidas técnicas, así como la recopilación de datos que pueden ser utilizados para la estimación y la localización de las pérdidas no técnicas[30].

### **3.2 Caracterización de la zona urbana para implementar medición inteligente**

En este trabajo investigativo, se ha expuesto gran cantidad de elementos determinantes para la caracterización de una zona urbana donde se piense introducir medición inteligente. En la ciudad de Quito, capital de Ecuador, las zonas urbanas están diferenciadas en parroquias. En total existen 32 parroquias urbanas y 33 parroquias rurales, distribuidas entre norte, centro y sur[76]. Estos son ejemplos reales de zonas urbanas, por lo que es necesario analizar sus características. Vamos a tomar como ejemplo, la parroquia de la Kennedy, cuya administración zonal es Eugenio Espejo; de igual forma dentro de la parroquia Kennedy se dividen 17 sectores urbanos, de los cuales podemos citar como ejemplo el sector de La Kennedy con una población total de 4822 personas censadas hasta el año 2010 y una superficie de 31,68 (hectáreas), datos demográficos adicionales se encuentran en[77]. Las características demográficas

en valores totales para la parroquia de la Kennedy son: 673,5 de superficie urbana, una población total de 68484 habitantes y 24760 viviendas, en [78] se pueden encontrar los datos demográficos completos de la administración zonal Eugenio Espejo. En el Anexo 1 podemos observar la división sectorial de la parroquia Kennedy. Cabe mencionar que los datos demográficos que tomaremos para realizar nuestras simulaciones, serán los referentes a una parroquia urbana, como el caso de la Kennedy; sin embargo los datos más importantes para nuestra simulación serán las características técnicas de las redes celulares dentro del lugar y sobre todo tomar en cuenta el número estimado de abonados de electricidad y también de usuarios de telefonía móvil.

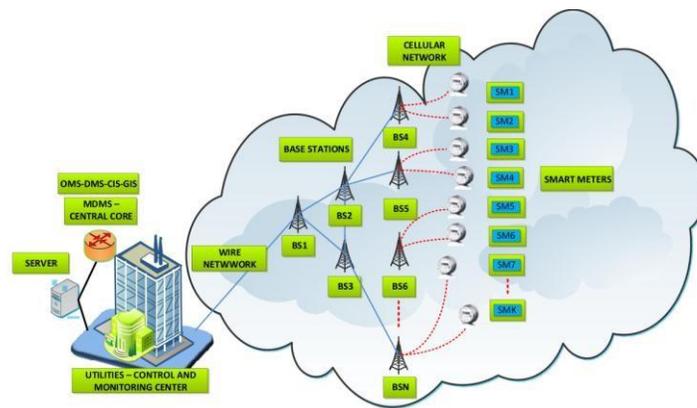
Las zonas urbanas donde se piensen desplegar los sistemas avanzados de medición, constan con redes de telecomunicación celular ya instalada y sobre todo permiten tener zonas extensas de cobertura. Para efectos de simulación y de modelamiento, consideraremos un área no mayor a los 316800 , como el caso del sector La Kennedy del DMQ, donde la densidad poblacional responde a 152

( ), lo que en otros términos corresponde a un total de 1701 viviendas[77], que deben tener servicio eléctrico mediante al menos un medidor del tipo residencial. Para poder determinar el número de abonados con medidores, nos remitimos a [79] (datos estadísticos de la Empresa Eléctrica Quito), que indica un total de 965442 medidores a clientes regulados facturados dentro de un área de concesión total de 14971 . Para experimentación, se puede asumir un plan piloto con 1000 medidores inteligentes, que para el caso del área de concesión de la Empresa Eléctrica Quito representaría aproximadamente el 0,1% del total de abonados regulados facturados.

Otro ejemplo real de implementación recae sobre una zona de concesión correspondiente a la Empresa Eléctrica Ambato, donde el total de clientes se dividen en residenciales, comerciales, industriales y otros. Como nuestro caso de estudio recae sobre clientes residenciales, el total de abonados bajo esta categoría para la Empresa Eléctrica Ambato es de 207923, que para efectos de planes piloto o experimentales de implementación con 1000 medidores tendríamos un aproximado de muestreo del 0,48% del total de abonados residenciales.

Evidentemente el número de abonados para la Empresa Eléctrica Quito constituye una gran diferencia en comparación a la Empresa Eléctrica Ambato, debido al área de concesión asignada; pero podemos considerarlas parecidas en factores urbanísticos para los efectos de simulación, donde la ciudad de Quito y la ciudad de Ambato pueden catalogarse como zonas urbanas de alta densidad arquitectónica, hasta cierto punto. El mapa de áreas de concesión para las empresas eléctricas de distribución, se pueden verificar en el Anexo 2.

Como base de aplicaciones de medición inteligente, hemos adoptado una red celular para las simulaciones. La arquitectura de como implementar medidores inteligentes mediante una red celular, la podemos distinguir según la Figura III.3 que caracteriza una zona de cobertura proporcionada por una estación base y los diferentes elementos dentro de esa red.



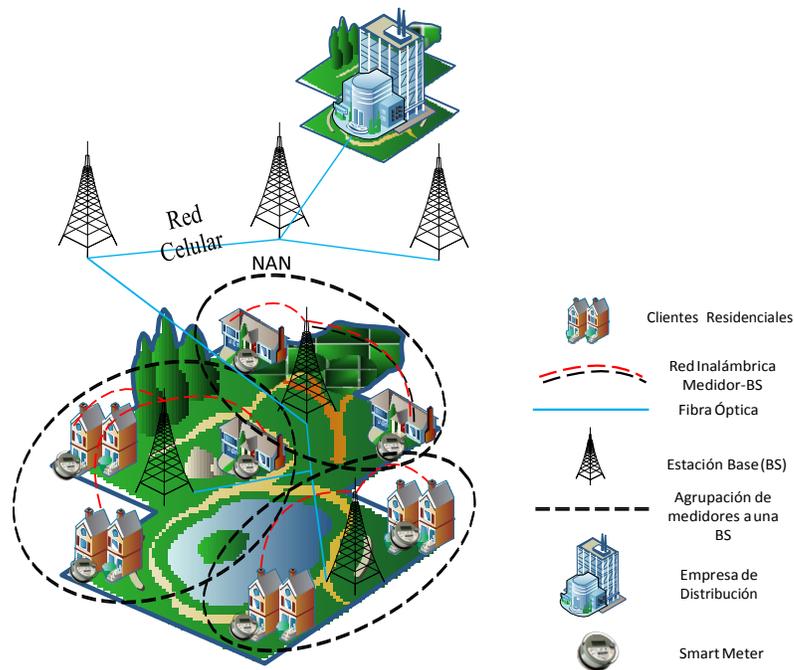
**Figura III.3** *Arquitectura AMI – Red Celular*

**Fuente:** [10] E. Inga, G. Arévalo, and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," 2014, no. 1The 2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, pp. 1–6.

La figura inmediatamente anterior explica que las aplicaciones de AMI basadas en red celular (tecnologías 2G, 3G o 4G), implican una recopilación de datos de los medidores mediante una estación base previa más cercana para que el sistema propio de la operadora móvil traslade los datos hacia la empresa de distribución. Visto de otra forma, el gráfico simulativo puede representarse según la Figura III.4, donde la principal características, es la clusterización de medidores dentro de un área determinada; como nuestro modelo se basa en la medición inteligente residencial en zonas urbanas, es necesario aclarar que la tecnología

celular más utilizada es GSM en Ecuador. En el caso de Claro y Movistar es una diferencia notable respecto a las otras tecnologías, solo CNT tiene más usuarios en HSPA+; pero como ya habíamos analizado, CNT tiene un número muy reducido de usuarios respecto a las otras operadoras.

Es necesario mencionar que debido a los pocos sistemas de monitoreo en distribución, no se puede determinar exactamente qué zona urbana dentro de las ciudades es más propensa a presentar problemas de pérdidas no técnicas. Como sabemos, para hacer posible la determinación de pérdidas por zonas, es necesario implementar planes de macro medición en las redes de distribución.



**Figura III.4** *Arquitectura de medición avanzada montada en una red celular*  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

### 3.3 Modo de tráfico de redes celulares de la infraestructura de medición avanzada

El tráfico de datos de una red celular es muy complejo y por ende las empresas operadoras móviles deben generar muchos análisis del comportamiento. Un celular convencional o dispositivo del servicio móvil avanzado, sea prepago o postpago, tendrá un acceso a la red mediante la cobertura proporcionada por la estación base más cercana. El cliente o usuario generará un tráfico de datos en la

red que se verá determinado por el tiempo de conexión en una llamada o la latencia en datos enviados, pero el tráfico de datos celulares es muy cambiante, no se puede tener patrones exactos de la carga de datos, lo que implica que las proyecciones del uso de la red también son estimados. Esto se debe a la naturaleza cambiante y aleatoria de los usuarios, pero gracias a métodos computacionales avanzados, las operadoras de red estiman ciertos patrones diarios, semanales, mensuales e incluso patrones de tráfico por temporadas; de esta manera pueden prever que tan óptima se comportará la red en el futuro. En medición inteligente, tenemos un rango de latencia; lo que implica que podemos generar datos aleatorios en el rango de 2 a 10 segundos, gracias a que [24], nos ha dado ese rango<sup>10</sup>.

La intensidad de tráfico se mide en  $\lambda$ , para el caso de los medidores inteligentes, podemos generar un muestreo de tal manera que podamos ver cómo varía aleatoriamente la intensidad del tráfico para un número determinado de medidores. De igual forma que los celulares, los medidores inteligentes también tendrán una variación dentro de la red, lo que significa que tendrán un tope máximo de 10 segundos conectados a la red y un tope mínimo de 2 segundos conectados a la red. Se pueden generar miles de muestras con datos aleatorios de la latencia, pero siempre va a predominar un valor mínimo y máximo. Para el crecimiento de la infraestructura de medición, podemos considerar valores fijos de latencia e incluso utilizar la media, que sería 6 segundos. En un análisis consideramos mantener el mismo valor de latencia, pero con una cantidad de medidores variable. Entonces para el cálculo de la intensidad de tráfico con duración de llamadas (en el caso de datos, latencia) en segundos, podemos calcular con la fórmula:

(III.5)

Siendo  $\lambda$  el valor calculado en  $\lambda$  que corresponde a la intensidad de tráfico, la cantidad de llamadas requeridas en la red y la duración de las llamadas en segundos. Bajo tablas, hemos podido generar un número finito de

---

<sup>10</sup>M. S. Obaidat, A. Anpalagan, and I. Woungang, *Handbook of Green Information and Communication Systems*. Academic Press, 2012, p. 815, Página 120, Párrafo 1.

muestras aleatorias de la latencia y un número total de 400 medidores. Como cada medidor realizará una transmisión de datos en un intervalo con una duración de 2 a 10 segundos, entonces podemos simular el tráfico que genera una sola transmisión.

Bajo elaboración de otra tabla de datos, generamos un conjunto de 1000 medidores y mediante un valor estático de latencia, calculamos el tráfico de datos creciente. Si generamos tablas de datos más extensas, podemos determinar la intensidad de tráfico creciente que se verá determinado según se vayan implementando medidores en la red. La Tabla III.1 nos muestra los valores referenciales del tráfico de uplink de un intervalo de transmisión de datos. En el capítulo 4 analizaremos este crecimiento de tráfico según el aumento de infraestructura.

Medidores	Tráfico Latencia 2	Tráfico Latencia 3	Tráfico Latencia 4	Tráfico Latencia 5	Tráfico Latencia 6	Tráfico Latencia 7	Tráfico Latencia 8	Tráfico Latencia 9	Tráfico Latencia 10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,056	0,083	0,111	0,139	0,167	0,194	0,222	0,250	0,278
200	0,111	0,167	0,222	0,278	0,333	0,389	0,444	0,500	0,556
300	0,167	0,250	0,333	0,417	0,500	0,583	0,667	0,750	0,833
400	0,222	0,333	0,444	0,556	0,667	0,778	0,889	1,000	1,111
500	0,278	0,417	0,556	0,694	0,833	0,972	1,111	1,250	1,389
600	0,333	0,500	0,667	0,833	1,000	1,167	1,333	1,500	1,667
700	0,389	0,583	0,778	0,972	1,167	1,361	1,556	1,750	1,944
800	0,444	0,667	0,889	1,111	1,333	1,556	1,778	2,000	2,222
900	0,500	0,750	1,000	1,250	1,500	1,750	2,000	2,250	2,500
1000	0,556	0,833	1,111	1,389	1,667	1,944	2,222	2,500	2,778

**Tabla III.1** Valores de tráfico de un solo intervalo de medición

Algunas recomendaciones de medición nos dicen que en el día también se pueden generar hasta 8 mediciones, lo que implica que el tráfico de un solo envío de un número finito de medidores debe ser multiplicado por 8, entonces tenemos la Tabla III.2, que nos muestra el tráfico total en un día para las diferentes latencias y el número de medidores. Ahora, el tope de tráfico para 400 medidores recae en 8,889 . De igual manera, estos valores serán representados gráficamente en el análisis del capítulo 4 de este trabajo investigativo.

Medidores	Tráfico Latencia 2	Tráfico Latencia 3	Tráfico Latencia 4	Tráfico Latencia 5	Tráfico Latencia 6	Tráfico Latencia 7	Tráfico Latencia 8	Tráfico Latencia 9	Tráfico Latencia 10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	0,444	0,667	0,889	1,111	1,333	1,556	1,778	2,000	2,222
200	0,889	1,333	1,778	2,222	2,667	3,111	3,556	4,000	4,444
300	1,333	2,000	2,667	3,333	4,000	4,667	5,333	6,000	6,667
400	1,778	2,667	3,556	4,444	5,333	6,222	7,111	8,000	8,889
500	2,222	3,333	4,444	5,556	6,667	7,778	8,889	10,000	11,111
600	2,667	4,000	5,333	6,667	8,000	9,333	10,667	12,000	13,333
700	3,111	4,667	6,222	7,778	9,333	10,889	12,444	14,000	15,556
800	3,556	5,333	7,111	8,889	10,667	12,444	14,222	16,000	17,778
900	4,000	6,000	8,000	10,000	12,000	14,000	16,000	18,000	20,000
1000	4,444	6,667	8,889	11,111	13,333	15,556	17,778	20,000	22,222

**Tabla III.2** Valores de tráfico de 8 intervalos de medición (Tráfico en 1 día)

Si nosotros deseamos saber el tráfico generado por los medidores en un año, entonces el cálculo recae en la multiplicación del tráfico generado en un día por los 365 del año, para este caso hemos generado la Tabla III.3, que nos muestra valores de tráfico total correspondientes al número finito de medidores y al valor de latencia especificado. Ahora la intensidad máxima de tráfico para 400 medidores es de 3244,44 como máximo, por lo tanto esta es la cantidad que debería soportar la red celular para el traslado de datos medidos en uplink en un año.

Medidores	Tráfico Latencia 2	Tráfico Latencia 3	Tráfico Latencia 4	Tráfico Latencia 5	Tráfico Latencia 6	Tráfico Latencia 7	Tráfico Latencia 8	Tráfico Latencia 9	Tráfico Latencia 10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	162,222	243,333	324,444	405,556	486,667	567,778	648,889	730,000	811,111
200	324,444	486,667	648,889	811,111	973,333	1135,556	1297,778	1460,000	1622,222
300	486,667	730,000	973,333	1216,667	1460,000	1703,333	1946,667	2190,000	2433,333
400	648,889	973,333	1297,778	1622,222	1946,667	2271,111	2595,556	2920,000	3244,444
500	811,111	1216,667	1622,222	2027,778	2433,333	2838,889	3244,444	3650,000	4055,556
600	973,333	1460,000	1946,667	2433,333	2920,000	3406,667	3893,333	4380,000	4866,667
700	1135,556	1703,333	2271,111	2838,889	3406,667	3974,444	4542,222	5110,000	5677,778
800	1297,778	1946,667	2595,556	3244,444	3893,333	4542,222	5191,111	5840,000	6488,889
900	1460,000	2190,000	2920,000	3650,000	4380,000	5110,000	5840,000	6570,000	7300,000
1000	1622,222	2433,333	3244,444	4055,556	4866,667	5677,778	6488,889	7300,000	8111,111

**Tabla III.3** Valores de tráfico en 1 año

Aparte de la intensidad de tráfico de los medidores, también se debe conocer el

crecimiento de la cantidad de información a ser enviada por los medidores, es por eso que elaboramos una tabla para determinar el volumen de datos de hasta 1000 medidores. Considerando que un medidor inteligente puede variar su volumen en función del fabricante, se ha considerado un rango de 20 a 200 por cada medidor para determinar la cantidad de datos en un día y en un año. La Tabla III.4 nos muestra el volumen por un envío de datos en .

Medidores	Volumen 20 bytes/M	Volumen 40 bytes/M	Volumen 60 bytes/M	Volumen 80 bytes/M	Volumen 100 bytes/M	Volumen 120 bytes/M	Volumen 140 bytes/M	Volumen 160 bytes/M	Volumen 180 bytes/M	Volumen 200 bytes/M
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
200	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
300	6	12	18	24	30	36	42	48	54	60
400	8	16	24	32	40	48	56	64	72	80
500	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
600	12	24	36	48	60	72	84	96	108	120
700	14	28	42	56	70	84	98	112	126	140
800	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160
900	18	36	54	72	90	108	126	144	162	180
1000	20	40	60	80	100	120	140	160	180	200

**Tabla III.4** Volumen de Información de 1 envío en uplink

La Tabla III.5 muestra el volumen diario en de los datos de medición de hasta 1000 medidores para 10 valores referenciales del peso de información enviado por un medidor en una sola transmisión.

Medidores	Volumen 20 bytes/M	Volumen 40 bytes/M	Volumen 60 bytes/M	Volumen 80 bytes/M	Volumen 100 bytes/M	Volumen 120 bytes/M	Volumen 140 bytes/M	Volumen 160 bytes/M	Volumen 180 bytes/M	Volumen 200 bytes/M
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	16	32	48	64	80	96	112	128	144	160
200	32	64	96	128	160	192	224	256	288	320
300	48	96	144	192	240	288	336	384	432	480
400	64	128	192	256	320	384	448	512	576	640
500	80	160	240	320	400	480	560	640	720	800
600	96	192	288	384	480	576	672	768	864	960
700	112	224	336	448	560	672	784	896	1008	1120
800	128	256	384	512	640	768	896	1024	1152	1280
900	144	288	432	576	720	864	1008	1152	1296	1440
1000	160	320	480	640	800	960	1120	1280	1440	1600

**Tabla III.5** Volumen de Información diaria en uplink

La Tabla III.6 nos permite distinguir el volumen anual de datos en que generarán un grupo de medidores, la tabla nos indica que para 400 medidores, el volumen de datos no excederá 233,6 . Esto se toma en cuenta para poder determinar la cantidad de información que se necesitará enviar por medio de la red celular en un año y por lo tanto saber a qué plan de datos de servicio móvil avanzado podemos acceder.

Medidores	Volumen 20 bytes/M	Volumen 40 bytes/M	Volumen 60 bytes/M	Volumen 80 bytes/M	Volumen 100 bytes/M	Volumen 120 bytes/M	Volumen 140 bytes/M	Volumen 160 bytes/M	Volumen 180 bytes/M	Volumen 200 bytes/M
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
100	5,84	11,68	17,52	23,36	29,2	35,04	40,88	46,72	52,56	58,4
200	11,68	23,36	35,04	46,72	58,4	70,08	81,76	93,44	105,12	116,8
300	17,52	35,04	52,56	70,08	87,6	105,12	122,64	140,16	157,68	175,2
400	23,36	46,72	70,08	93,44	116,8	140,16	163,52	186,88	210,24	233,6
500	29,2	58,4	87,6	116,8	146	175,2	204,4	233,6	262,8	292
600	35,04	70,08	105,12	140,16	175,2	210,24	245,28	280,32	315,36	350,4
700	40,88	81,76	122,64	163,52	204,4	245,28	286,16	327,04	367,92	408,8
800	46,72	93,44	140,16	186,88	233,6	280,32	327,04	373,76	420,48	467,2
900	52,56	105,12	157,68	210,24	262,8	315,36	367,92	420,48	473,04	525,6
1000	58,4	116,8	175,2	233,6	292	350,4	408,8	467,2	525,6	584

**Tabla III.6** *Volumen de Información anual en uplink*

### **3.4 Simulación y emulación de redes celulares para infraestructura de medición avanzada**

Las comunicaciones celulares constituyen la base fundamental de nuestro estudio, ya que determinan los parámetros necesarios para desarrollar un modelo matemático centrado en optimizar la distancia entre un dispositivo de medición inteligente y una estación base de la red celular. El modelado óptimo se complementa con simulaciones que representarán algunos escenarios de las redes celulares. Para efectos de simulación solo realizaremos una pequeña muestra de la red celular; es decir, que las redes celulares con implementación de medidores inteligentes se harán bajo parámetros reducidos y no en función de toda la infraestructura existente para los servicios móviles avanzados con tecnologías 2G y 3G.

Emular una red inalámbrica es muy complejo debido a que no podemos determinar con exactitud el movimiento o cantidad de datos que se generan

diariamente en la red por parte de los usuarios de telefonía móvil.

### 3.4.1 Optimización matemática

La optimización corresponde a la minimización o maximización de las situaciones prácticas de la ingeniería, así como de diferentes aspectos de la vida en general. En el caso práctico de las ingenierías, una optimización representa minimización de costos y maximización del rendimiento en algún proceso específico; de hecho, siempre se buscan soluciones óptimas para un problema que se suscite. Los métodos de optimización se basarán en la aplicación de algoritmos diseñados para encontrar la solución más óptima; sin embargo, no siempre todo algoritmo diseñado será óptimo o el más óptimo, de esta manera se considera las soluciones heurísticas. Las soluciones heurísticas se basan en la modalidad prueba y error para producir soluciones aceptables a un problema complejo, como el caso de las redes inalámbricas, donde problemas como el tráfico de datos tiene variables muy complejas para el análisis. La complejidad de los problemas hacen imposible encontrar cada solución posible o combinación, de esta manera se encuentran soluciones factibles o aceptables[80].

Un problema de optimización matemática o simplemente problema de optimización se expresa:

$$f(x) \quad (III.6)$$

$$g_j(x) \leq b_j, \quad (III.7)$$

Donde  $x$  es la variable del problema, la función  $f(x)$  es la función objetivo, las funciones  $g_j(x)$  son las funciones de restricción y las constantes  $b_j$  son los límites de las restricciones. Un vector

$x^*$  es llamado óptimo o solución del problema, si tiene el valor objetivo más pequeño entre todos los vectores que satisfacen las restricciones: para cualquier

con  $x \in S$ , tenemos  $f(x^*) \leq f(x)$  [81]. Consideramos a las familias o clases de problemas de optimización, caracterizándolas por formas particulares del objetivo y las funciones de restricción. El problema de optimización dado por (III.4) y (III.5) es considerado como un programa lineal, si las funciones

de restricción  $f_i(x)$  son lineales, es decir que satisfacen (III.8)  
para todas  $x \in X$  y todas  $\lambda_i \geq 0$ . Si el problema es no lineal, se lo llama programa no lineal. Por otro lado, un problema de optimización convexa es aquel cuyo objetivo y funciones de restricción son convexas, es decir que satisfacen la desigualdad

$$f_i(x) \leq \lambda_i \quad \text{para todas } x \in X \text{ y para todas } \lambda_i \geq 0 \quad \text{con } x \in X \quad (III.9)$$

Comparando (III.6) y (III.7), vemos que la convexidad es más general que la linealidad: la desigualdad sustituye a la igualdad más restrictiva y la desigualdad debe contener sólo para ciertos valores de  $\lambda_i$ . Ya que cualquier programa lineal, por tanto, es un problema de optimización convexa, podemos considerar la optimización convexa para ser una generalización de la programación lineal[81].

Para el modelamiento de la red celular con medidores inteligentes, ocuparemos un algoritmo de optimización basado en k-means[82], el cual nos permite realizar agrupaciones de datos desplegados en un plano, de esta manera el algoritmo de k-means nos permitirá desarrollar el modelamiento de la red inalámbrica para determinar las distancias más cortas que un medidor inteligente tendrá con respecto a una estación base.

**K-means:** El algoritmo de k-means[83] agrupa vectores de datos en un predeterminado número de agrupaciones, en base a las medidas de similitud conocidas como Distancias Euclidianas. Estas Distancias Euclidianas del cálculo entre todos los vectores de datos son pequeñas, en comparación con las distancias a otros vectores de datos en diferentes clústeres. Los vectores de la misma agrupación se asocian con un vector céntrico, el cual representa el punto medio de ese clúster y es también la media de los vectores de datos que pertenecen al centroide[84]-[85]. K-means se puede realizar en base al algoritmo de Forgy/Lloyd, el cual es ampliamente usado para clasificación de datos; sin embargo, no es el algoritmo absolutamente correcto, lo que significa que el algoritmo k-means Forgy/Lloyd es solo una opción para realizar el proceso de optimización de distancias.

- Algoritmo de Forgy/Lloyd

Para un conjunto de casos  $[C]$ , donde  $E$  es el espacio de datos de  $n$  dimensiones, el algoritmo intenta encontrar un conjunto de  $k$  centros de

clúster  $[C_k]$  que es la solución a un problema de minimización:

$$\sum_{i \in C_k} \sum_{j \in C_k} (d_{ij})^2 \quad (III.10)$$

$$\sum_{i \in C_k} \int f(x) g(x) dx \quad (III.11)$$

(III.8) es para distribuciones discretas, mientras que (III.9) para funciones continuas. En el caso de la función continua,  $f(x)$  es la función de densidad de probabilidad, si esta función de densidad de probabilidad no se conoce, se debe estimar a partir de los datos disponibles. Según [86], el pseudocódigo o algoritmo base se puede presentar de la siguiente forma:

---

#### Algoritmo de k-means Forgy/Lloyd

---

- 1: **Paso 1:** Elegir el número de clústeres
  - 2: **Paso 2:** Elegir la medida de similaridad a utilizar
  - 3: **Paso 3:** Elegir el método para escoger centroides
  - 4: **Paso 4:** Asignar centroides iniciales
  - 5: **Paso 5:** While medidas(centroides, casos) > umbral
    - a. For casos
      - Asignar caso de conglomerado más cercano según métrica
    - b. Recalcular centroides
- 

### 3.4.2 Problema de optimización de distancias para una red NAN

Mediante el análisis de conglomerados, podemos basarnos en la técnica de k-means para poder resolver un problema de optimización, donde se desea minimizar las distancias entre el medidor de energía eléctrica y las estaciones bases concentradoras de los datos de medición. El algoritmo que se pretende emplear también se considera como un problema de optimización convexa. Por lo tanto, el tipo de la función objetivo y las restricciones deben cumplir con las

características de convexidad. Este algoritmo también se basa en el trabajo investigativo y aplicativo de [10].

Dentro del proceso matemático que se realizará tenemos la intención de utilizar un algoritmo de agrupamiento basado en un conjunto de vectores en un plano real; para el que se considera k-means [86] y ciertos algoritmos basados en este método que permiten la optimización de las distancias para la transferencia eficaz de información de AMI. El método de análisis que se utilizó para la agrupación de datos se basa en la distancia euclidiana (medida de similitud); además de usar el análisis no jerárquico de conglomerados. Es necesario precisar que el método de agrupación, utilizando las distancias euclidianas, corresponde a la determinación de la similitud de las distancias entre cada uno de los contadores inteligentes agrupados con una estación base.

De esta forma se tiene:

$$\sum \sum \| \mathbf{x}_i - \mathbf{c}_k \|^2 \quad (III.12)$$

$$\{ \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n \} \quad (III.13)$$

$$\{ \mathbf{c}_1, \mathbf{c}_2, \dots, \mathbf{c}_k \} \quad (III.14)$$

Donde,

$\| \mathbf{x}_i - \mathbf{c}_k \|^2$  es la distancia a optimizar entre el medidor inteligente y la estación base, es llamada también función objetivo o función de costo. Un universo  $U$  al cual pertenecen un número de usuarios, que para este caso son Medidores Inteligentes (SMs), advierte la cantidad de elementos a ser clasificados. Cada elemento del conjunto tendrá una posición referencial dentro de un plano y por lo

tanto ayudará en la determinación de un número de centroides conocidos para este caso como estaciones base (BS), donde  $\{c_k\}$ . Cada SM generará un  $(x_i, y_i)$  que es punto en el clúster  $k$ , donde  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ . La investigación presente considerará que a cada BS se le asigne un número máximo de usuarios y un número de usuarios mínimos, siendo  $(M_k, m_k)$ . De esta manera, la cantidad de SMs agrupados dentro del radio de cobertura  $R_k$ , cuyo rango es de  $(R_{k_{min}}, R_{k_{max}})$ ,

$(M_k, m_k)$ , tendrán que ser determinados en base a los límites establecidos y las distancias euclidianas como medidas de optimización. El número de BS tendrá que ser mayor igual que el número de usuarios en

relación al máximo número de usuarios por cada clúster  $k$ . La notación  $\|x_i - c_k\|$  representa la distancia entre  $x_i$  y  $c_k$  [87].

El algoritmo que se presenta en este trabajo toma como base primordial la técnica de clusterización k-means; haciendo de referencia al algoritmo de iteración de Forgy/Lloyd, para la asignación más adecuada del centroide en base a las limitaciones establecidas. Se consideró este algoritmo ya que este problema de optimización es un caso de distribución de datos discretos. Dentro de la formulación del algoritmo se considera:

$$(x_i, y_i) \in \{c_k\} \quad (III.15)$$

$$(x_i, y_i) \in \{c_k\} \quad (III.16)$$

De lo cual, en el plano cartesiano,  $(x_i, y_i)$  corresponde a una posición  $e$  de los centroides correspondientes al método matemático de optimización presentado anteriormente, en base a las posiciones  $e$  de cada  $(x_i, y_i)$  (usuario). Previamente a la asignación de los  $c_k$ , existirán centroides iniciales determinados por las distancias euclidianas provenientes de entre los usuarios. De esta forma los centroides iniciales serán:

Por simulación, se declaran las variables:  $(x_i, y_i)$  (III.17)

$$\{x_i, y_i\} \quad \{c_k\} \quad \{M_k, m_k\} \quad (III.18)$$

De (III.18),  $K$  es el número de usuarios (medidores inteligentes),  $M_k$  el número máximo de usuarios por BS y  $m_k$  el número mínimo de usuarios por BS.

$$(\quad) \quad (III.19)$$

De (III.19),  $\mathbf{p}$  corresponde al vector de posiciones de todos los usuarios, donde se tiene coordenadas  $x$  e  $y$  para cada usuario. El vector  $\mathbf{p}$  se formará según el número de usuarios y cada  $x$  e  $y$  de cada usuario deben pertenecer al conjunto de los números racionales positivos ( $\mathbb{R}^+$ ).

De (III.20),  $\mathbf{p}_b$  corresponde al vector de posiciones de todas las estaciones base, donde se tiene coordenadas  $x$  e  $y$  para cada estación. El vector  $\mathbf{p}_b$  se formará según el número de clústeres y cada  $x$  e  $y$  de cada clúster deben pertenecer al conjunto de los números racionales positivos ( $\mathbb{R}^+$ ).

De (III.21),  $\mathbf{p}_c$  corresponde al vector de posiciones de los centroides iniciales, donde se tiene coordenadas  $x$  e  $y$  para cada centro de masa. El vector  $\mathbf{p}_c$  se formará según el número de centroides iniciales y cada  $x$  e  $y$  de cada centroide deben pertenecer al conjunto de los números racionales positivos ( $\mathbb{R}^+$ ).

De (III.22),  $\mathbf{d}$  corresponde al vector de distancias de entre los usuarios, donde  $u_i$  representa a la ubicación de un usuario y  $u_j$  representa a la ubicación de otro usuario. El vector  $\mathbf{d}$  se formará según el total de distancias entre usuarios.

De (III.23),  $\mathbf{d}_b$  corresponde al vector de distancias de entre cada usuario y una estación base, donde  $p_b$  representa a la posición de una estación base y  $p_u$  representa a la posición de un usuario. El vector  $\mathbf{d}_b$  se formará según el total de distancias entre los usuarios y cada estación base.

El Anexo 3 y Anexo 4 muestran los códigos de programación para resolver el problema de optimización de distancias. El Anexo 3 es el script (código de programación) principal que se encarga de desarrollar el proceso de la optimización, mientras que el Anexo 4 es una función que se encarga de generar algunos datos necesarios para el script. El algoritmo para la optima distancia, también basado en el algoritmo de [10], se muestra de la siguiente manera:

---

### Algoritmo de Optimización de Distancias

---

```
1: Paso 1: Determinación del número de clústeres
2:
3: Redondear el número de estaciones base a un valor inmediato superior de los
4: Paso 2: Determinación de medidas de similaridad, matriz distancias entre los
5: = ( ) 6:
Paso 3: Escoger centroides iniciales
7:
8: Paso 4: k-means ( )
9:
10: If max{| ( ) |} >
then
GOTO Paso 4
else
GOTO Paso 5
11: end if
12: Paso 5: Para todo
13: :
```

---

Cabe recalcar que, este primer algoritmo se basa en la generación de posiciones aleatorias dentro de un área determinada, lo cual quiere decir que no posiciona medidores en forma georeferenciada o posición deseada; sin embargo aclaramos que el algoritmo solo se encarga de realizar una optimización de distancias para poder enlazar medidores a una estación base. Mediante la aplicación de otro algoritmo similar, que también permite realizar optimización de distancias gracias a las distancias euclidianas y también realizar la clusterización que dependerá de la posición y radio de cobertura de las estaciones base, hemos creado una cantidad finita de medidores dentro de un plano. Para poder posicionar dentro del área la ubicación de los medidores inteligentes, será necesario generar una base de datos con la información de latitud y longitud de cada uno de los usuarios. El Anexo 5 muestra el código de programación de la optimización de distancias en base a datos importados de un archivo de datos almacenados; el pseudocódigo del algoritmo se muestra a continuación:

---

### Algoritmo de Optimización de Distancias con Datos Importados

---

```
1: Paso 1: Ingreso de datos de la posición de cada medidor
2:
3: Paso 2: Ingreso de la posición de las estaciones base
4:      (      )
5: Paso 3: Ingresar el radio de cobertura de cada estación base
6:
7: Paso 4: Distancias euclidianas
8: For      hasta número de estaciones base
9:      For      hasta número de medidores
10:      (      (      ))
11:      end
12: end
13: Paso 5: Asignación del radio de cobertura a cada estación base
14: Paso 6: Clusterización de los medidores a cada estación base
```

---

#### Descripción del funcionamiento de los algoritmos

- Algoritmo de Optimización de Distancias

Este algoritmo requiere de la determinación del área donde se insertarán las posiciones de cada medidor y estación base, un número finito de medidores inteligentes, un tamaño medio de cuadras y un número máximo y mínimo de usuarios por estación base. Mediante una función de generación y almacenamiento de datos para generar datos aleatorios, se crearan posiciones en

e para poder utilizarlas en la generación de datos de posiciones de cada medidor y también generar una matriz de distancias para determinar los centroides iniciales que son las posiciones iniciales de las estaciones base. Con la determinación inicial de los centroides, podemos realizar el análisis de las medidas de similaridad (distancias euclidianas) para determinar la distancia entre cada medidor inteligente y cada estación base. La optimización se realiza mediante la comparación de cada distancia con cada estación base para saber la distancia mínima. Debido a la cobertura por cada estación base generada por el programa, existirán varias zonas de traslape, lo que significa que existirán espacios en los cuales habrá medidores que puedan asignarse a una estación base o a otra, por lo que se considerará la capacidad de las estaciones base, en ese caso ya habíamos determinado un número mínimo y máximo de usuarios; sin embargo el programa

también se encarga de realizar iteraciones con la finalidad de encontrar la distancia más óptima para la asignación de cada medidor a un centroide.

- **Algoritmo de Optimización de Distancias con Datos Importados**

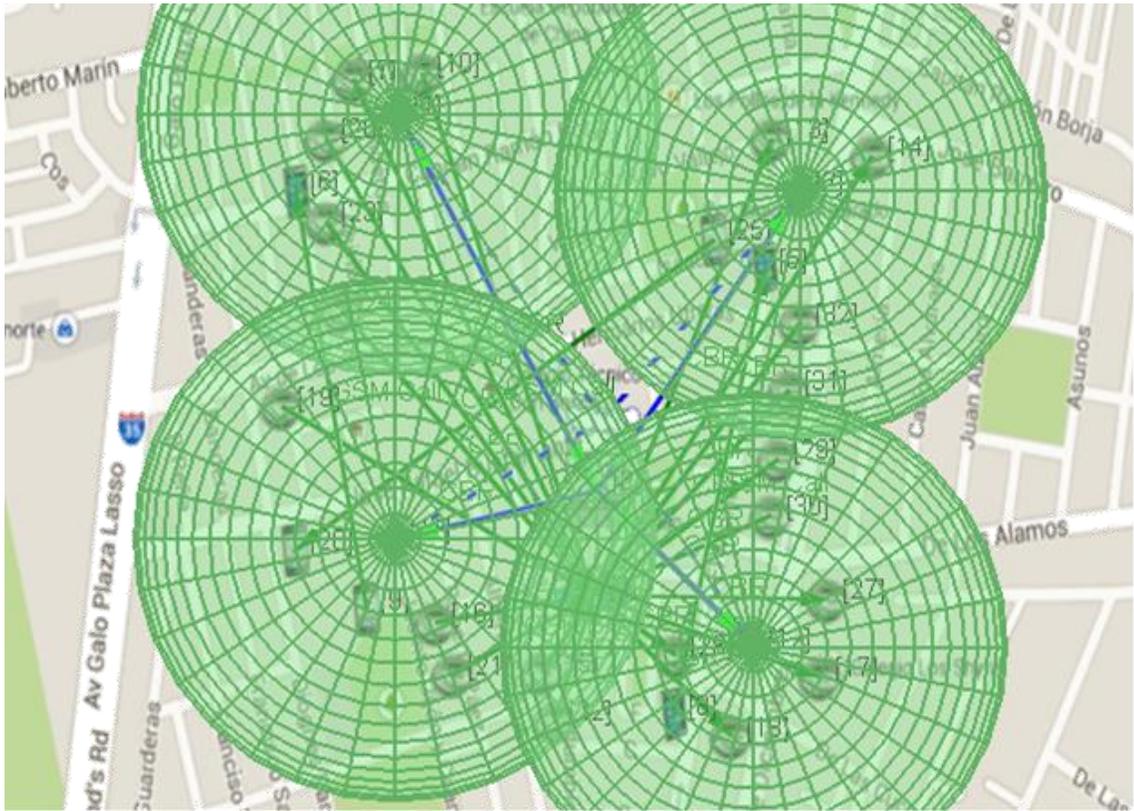
Este algoritmo también optimiza distancias, pero la característica principal es que podemos importar datos de cada medidor, por lo tanto no requerimos de la generación aleatoria de datos, demostrando que en la práctica o vida real debemos disponer de la posición georeferenciada de cada medidor. Para un análisis más profundo se requiere de una base de datos completa de los medidores desplegados, a la cual no se tiene acceso por pertenecer a la estricta gestión de las empresas de distribución. Sin embargo hemos generado una base de datos de posición para efectos de simulación. Con la importación de los datos de posición, generamos un área de despliegue de los dispositivos, área que alberga todas las posiciones de cada elemento. Gracias a la estimación de las posiciones de las estaciones base, ingresamos las coordenadas de cada una; con este ingreso podemos resolver el problema de optimización. El programa calcula las distancias de cada medidor con respecto a cada estación base, lo que permite generar una matriz de distancias mínimas que se encargarán de ser el principal fundamento para la asignación de cada medidor a una estación base. Las estaciones poseerán un radio de cobertura que deberá ser ingresado en base a una estimación de las características de una estación base real.

### **Simulaciones Dinámicas**

Mediante software de simulación de redes inalámbricas, se puede desarrollar escenarios pequeños para la implementación de medición inteligente. La Figura III.5 es la representación de un pequeño perímetro donde se simula el uplink de un pequeño número de medidores, el downlink de datos de cortes y reconexiones para un número de usuarios y se le suma 3 llamadas GSM que durante la simulación permanecerán generando tráfico dentro de la red, de esta manera podemos emular un comportamiento típico reducido a un pequeño espacio geográfico. Los dispositivos considerados para el escenario son: medidores inteligentes funcionando como dispositivos estáticos, 6 teléfonos móviles ocupando la red para transmitir y recibir llamadas GSM, 4 estaciones base



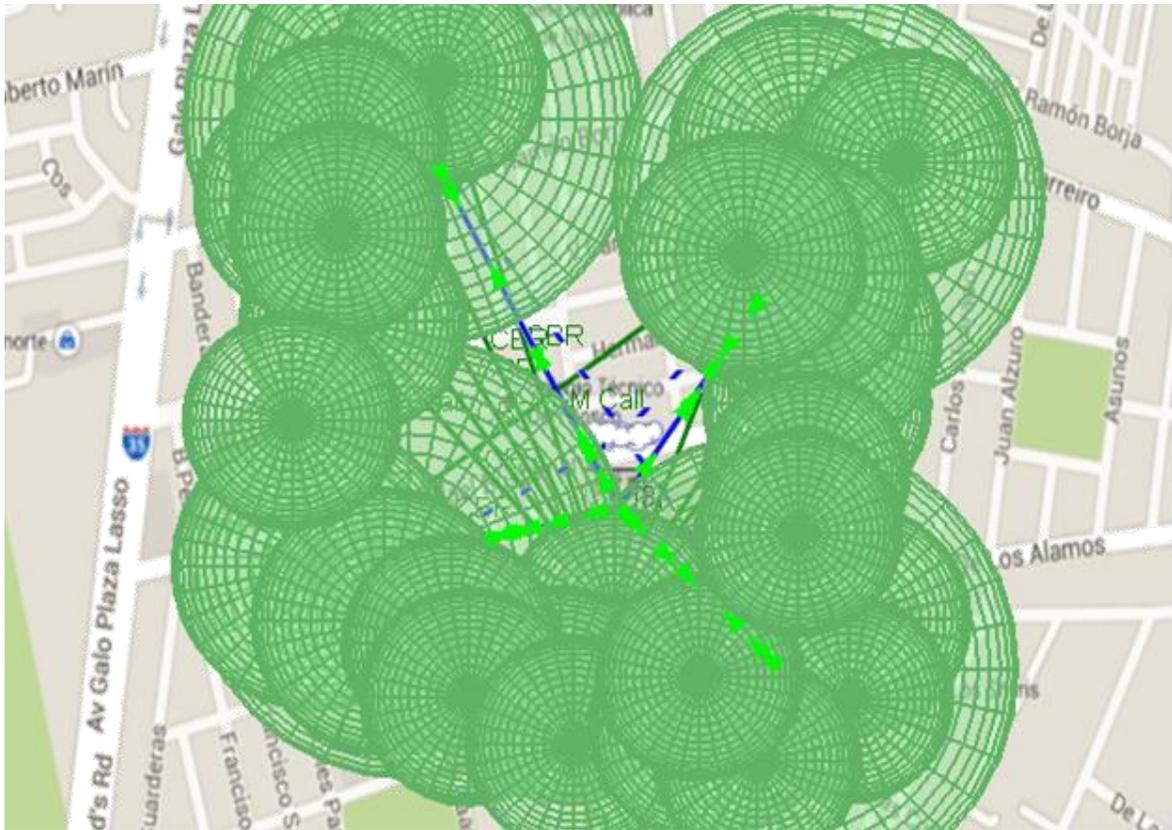
La Figura III.6 nos muestra la primera vista de simulación, donde se distingue los lóbulos de cobertura generados por las estaciones base, cabe recalcar que el programa de simulación nos permite la modificación de los parámetros de cada dispositivo, es por esto que pudimos emular el comportamiento de cada estación base, cada medidor, cada celular, también cada enlace de comunicación inalámbrica y absolutamente todo el escenario, es por esto que podemos incluir el mapa referenciado, podemos incluir el modelo de propagación de la señal inalámbrica (*Two Ray Model*) y también el número de canales de la red.



**Figura III.6** Inicio de simulación  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

Para la simulación, el programa nos permite visualizar todo el tiempo que se demora realizar el proceso de transmisión y recepción de datos y llamadas dentro de la red. La Figura III.7 nos permite apreciar en forma gráfica como se desarrolló la simulación del escenario, podemos apreciar los lóbulos generados por los dispositivos, lo que significa que tanto el envío como la recepción de los datos y llamadas se realizaron según lo simuló el programa. También podemos ver en la

figura, que los enlaces de cada estación base con la estación de conmutación están en constante flujo de información. En el capítulo 4 de esta tesis expondremos los resultados estadísticos que nos dio el programa.



**Figura III.7** *Proceso de simulación*  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

## **CAPÍTULO IV**

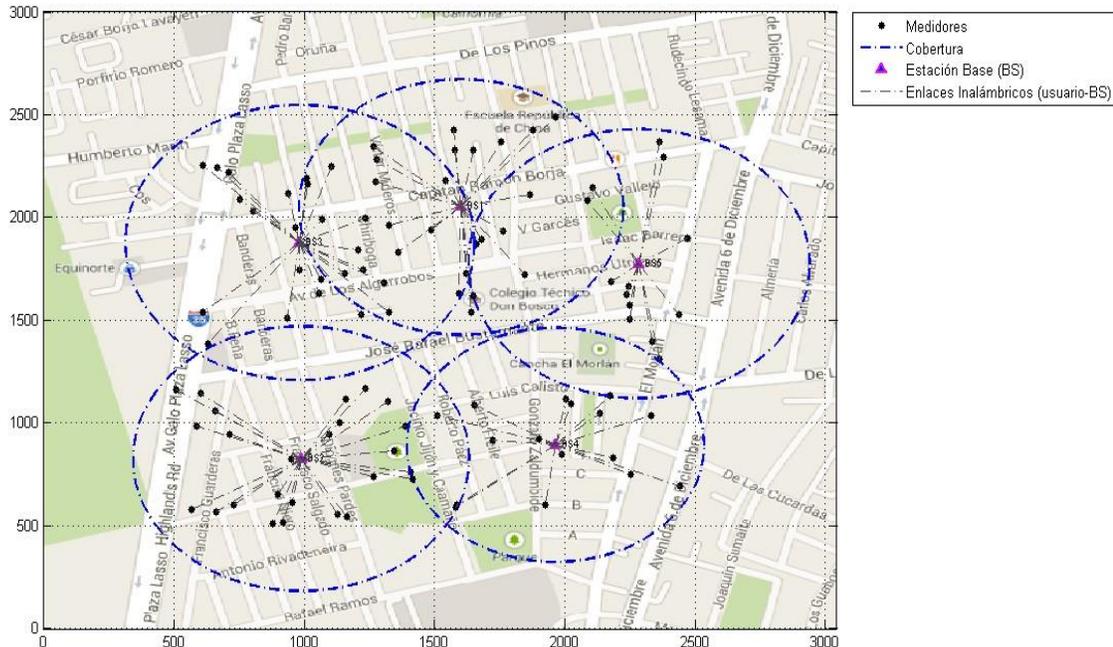
### **IV. RENDIMIENTO DE UNA RED CELULAR PARA UNA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA**

La finalidad de esta tesis era determinar la funcionalidad de una red celular para que pueda brindar servicios de medición inteligente. Mediante los algoritmos de optimización matemática, hemos podido modelar el comportamiento de conglomeración de la infraestructura celular para medición inteligente. La capacidad de una infraestructura celular para albergar más usuarios se verá afectada de manera drástica con respecto al tráfico de datos que se generará por parte de los usuarios de telefonía y los usuarios de AMI, es por eso que una planificación de escalabilidad de la infraestructura será necesaria para poder compartir los canales de radiofrecuencia entre los dos tipos de usuarios. Trabajos complementarios a este se están desarrollando para colaborar en la inserción del tráfico de AMI a las redes celulares.

#### **4.1 Análisis de cobertura de la red celular en zonas urbanas**

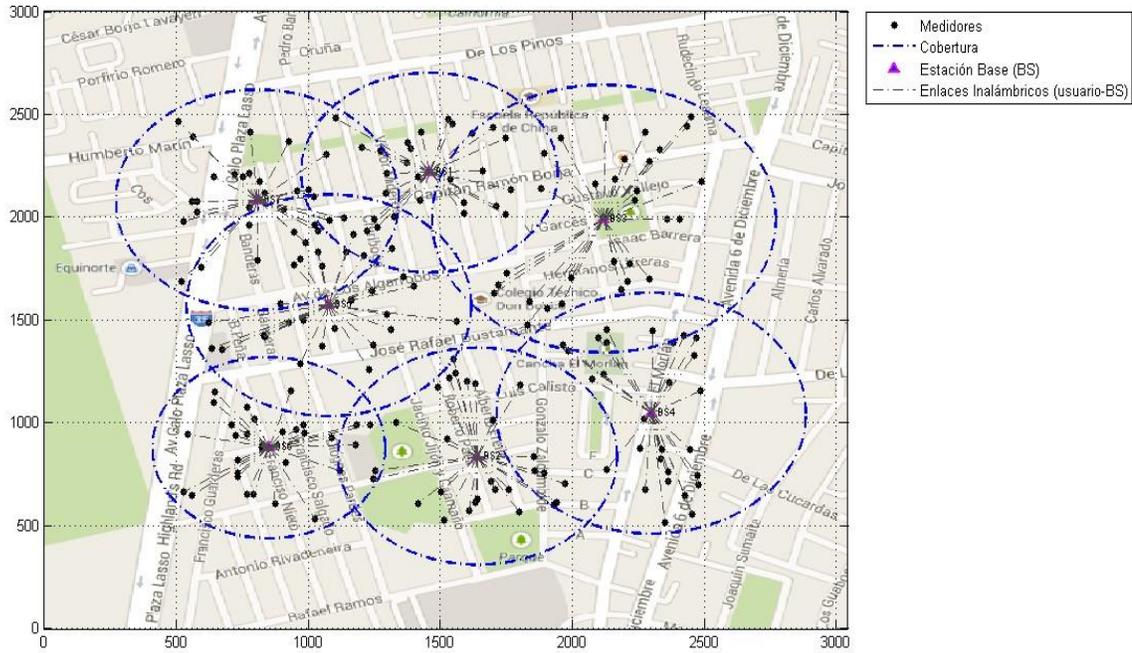
El trabajo de esta tesis ha presentado 2 algoritmos para resolver un problema de minimización de distancias. En base al primer algoritmo se ha podido obtener resultados gráficos como el mostrado en la Figura IV.1, donde se ha ingresado parámetros de funcionamiento de una red celular. En primera instancia, hemos puesto a funcionar al programa creado con 100 medidores dentro un área que involucra a parte de 3 barrios de la parroquia Kennedy del DMQ, donde se aprecia el despliegue aleatorio de los 100 medidores, los cuales están conglomerados a las respectivas estaciones base más cercanas. Esta primera simulación nos ha arrojado un resultado de hasta 5 estaciones base, correspondientes a la cantidad de medidores; a la vez, cada estación base ha sido diseñada para soportar un máximo de 25 medidores, cuya asignación de medidores también dependerá del rango de cobertura asignado por el programa en función de las distancias y la determinación del centroide en el plano. En conclusión, el programa ha realizado la asignación de cada medidor a una estación base, en función de la distancia mínima. Este modelamiento también podía ser considerado para la

implementación de concentradores de datos, concentradores que albergarán una cantidad finita de medidores para luego transmitir un solo paquete de información a la estación base de la operadora de red celular.



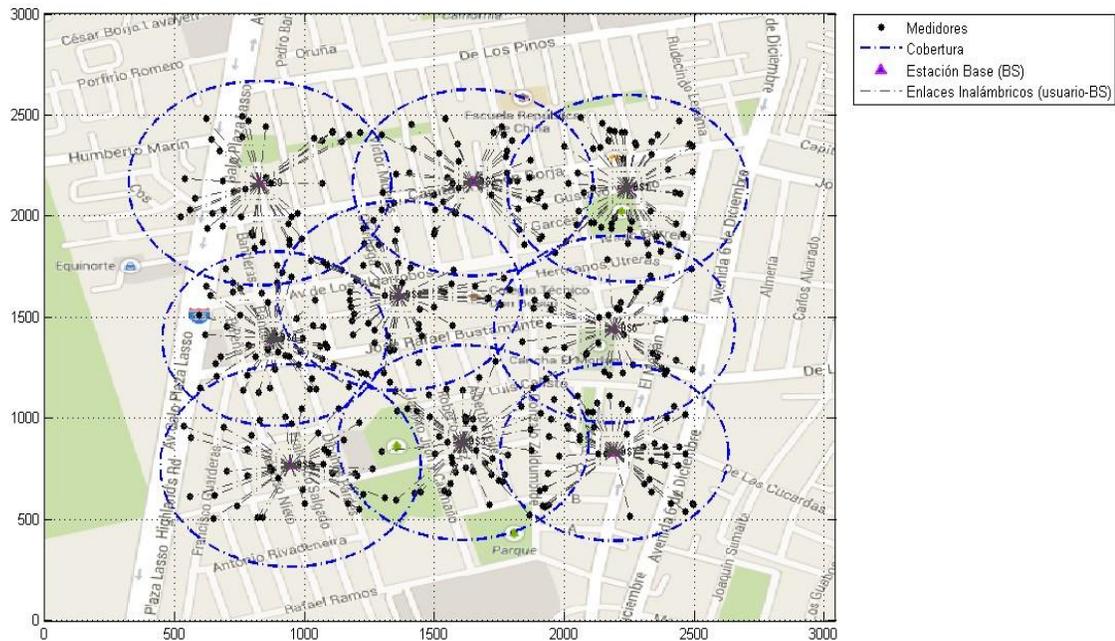
**Figura IV.1** Cobertura de 5 estaciones base a un total de 100 medidores  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

Otra simulación con 200 medidores desplegados aleatoriamente, nos ha dado otra perspectiva de la conglomeración de medidores, en este caso se ha asumido una capacidad para albergar hasta 30 medidores como máximo por cada estación base. Como podemos ver en la Figura IV.2, el programa nos dice que según la cantidad de medidores y la capacidad máxima de las estaciones base, se tienen 7 centroides asignados en función de la posición más idónea que conglomerar el grupo de medidores en una determinada zona. El programa se ha demorado aproximadamente 5 segundos para encontrar el posicionamiento idóneo de cada estación base y de igual forma, realizar la asignación de cada medidor a la estación base más cercana. El tiempo de la simulación dependerá de la capacidad del computador que lo simule, por lo general se demorará menos tiempo de simulación si el computador posee un procesador diseñado para soportar gran cantidad de tareas y velocidad en resolverlas.



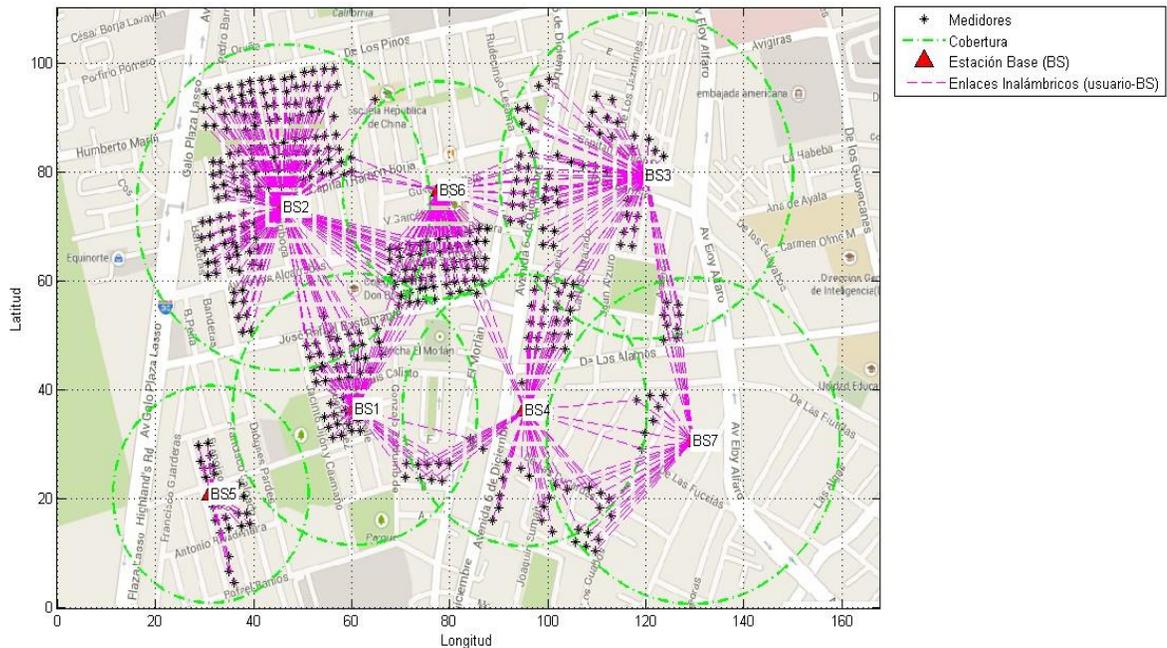
**Figura IV.2 Cobertura de 7 estaciones base a un total de 200 medidores**  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.3 muestra otro resultado que representa un despliegue aleatorio de 400 medidores, donde el programa ha considerado posicionar 9 estaciones base, dentro de un mismo perímetro que las anteriores simulaciones.



**Figura IV.3 Cobertura de 9 estaciones base a un total de 400 medidores**  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.3 no solo muestra un despliegue más completo de medidores dentro de la zona, sino también una gran cantidad de medidores asignados a cada estación base, esto debido a que la capacidad de las estaciones base se ha modificado a un número total de 50 medidores como máximo para cada estación base. El programa obviamente se ha demorado más que las anteriores veces, duplicando el tiempo de determinación. También hemos puesto a prueba la capacidad de la máquina en resolver el mismo problema de los 400 medidores, pero con una capacidad por estación base reducidas, lo cual nos ha presentado un tiempo de hasta 6 horas que en resultados finales no ha podido cumplir con el objetivo de conglomerar a todos los medidores.



**Figura IV.4** Cobertura de 7 estaciones base a un total de 400 medidores  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

Como habíamos mencionado en este trabajo, el primer algoritmo nos da valores aleatorios en cada ejecución del programa, por lo que nos hemos visto obligados a determinar un despliegue más real de los medidores dentro de un plano, lo cual se puede observar en la Figura IV.4, donde podemos observar que los medidores están asignados dentro del plano en función de una base de datos provenientes de un archivo de Excel, el cual puede ser modificado para ingresar posiciones

georeferenciadas de cada medidor, lo cual se vuelve práctico para el caso de una simulación mucho más real, estos datos de cada medidor deberán ser proporcionados por la empresa de distribución, ya que ellos poseen dentro de su departamento administrativo la base de datos correspondiente a cada uno de los medidores dentro de la zona de cobertura de la red eléctrica.

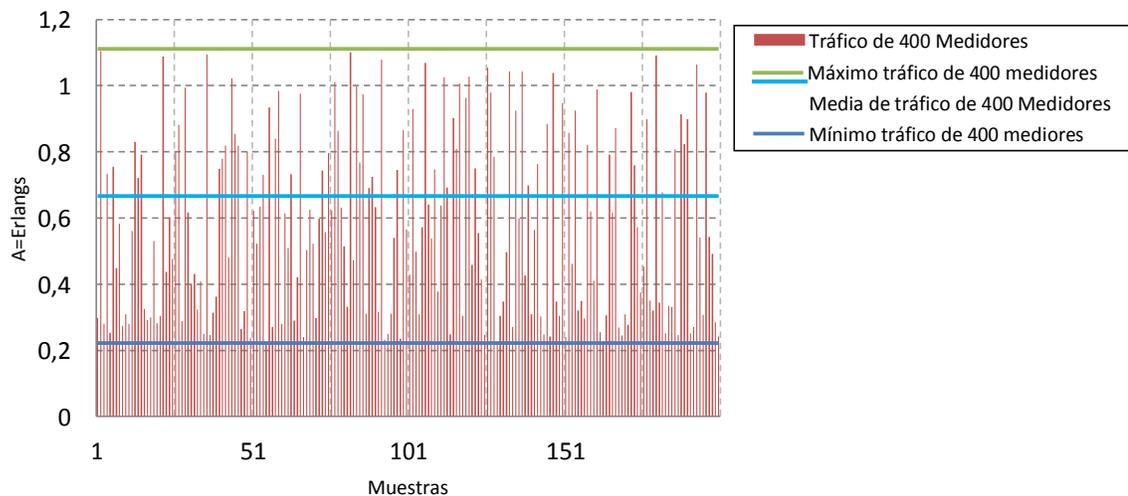
Estos modelamientos y simulaciones nos han permitido mostrar un comportamiento estimado de la red, pero para mejores resultados es necesario un trabajo intenso entre las empresas distribución y las empresas operadoras de red móvil. El análisis de la cobertura, por ejemplo, es un trabajo de las operadoras móviles que actualmente poseen un alto grado de alcance dentro de los perímetros urbanos. Las páginas de internet respectivas de cada operadora contienen mapas de cobertura que nos muestran el alcance teórico de cada red dentro del territorio ecuatoriano. Por ejemplo, en la parroquia de la Kennedy existe una cobertura completa de servicio móvil avanzado en tecnologías 2G e incluso 3G. En el perímetro urbano existe una gran cantidad de usuarios celulares, es por eso que las operadoras del servicio móvil avanzado se encargan de proporcionar un servicio de alta calidad, tomando en cuenta la capacidad de sus redes y la necesidad de los usuarios.

#### **4.2 Análisis de crecimiento óptimo de una red celular en la infraestructura de medición avanzada**

Se sabe que la cantidad de datos que generaría un grupo de medidores inteligentes, aportarían un importante tráfico dentro de la red, por lo que es importante diseñar un plan de inserción de AMI dentro de cualquier territorio del país. A pesar de los esfuerzos en realizar modelamientos y simulaciones de las redes celulares, se vuelve difícil determinar un comportamiento exacto de toda la red compartida entre usuarios móviles y medidores inteligentes, es por eso que todo dependerá de un trabajo arduo de los entes gubernamentales, las empresas de distribución y las operadoras de servicio móvil avanzado. Como también habíamos mencionado en este trabajo investigativo, implementar operadores móviles virtuales para la gestión de los datos medidos debe volverse una realidad inmediata; si en un supuesto caso, las operadoras de red celular actuales no se

pueden encargarse del trabajo de gestión de datos de AMI.

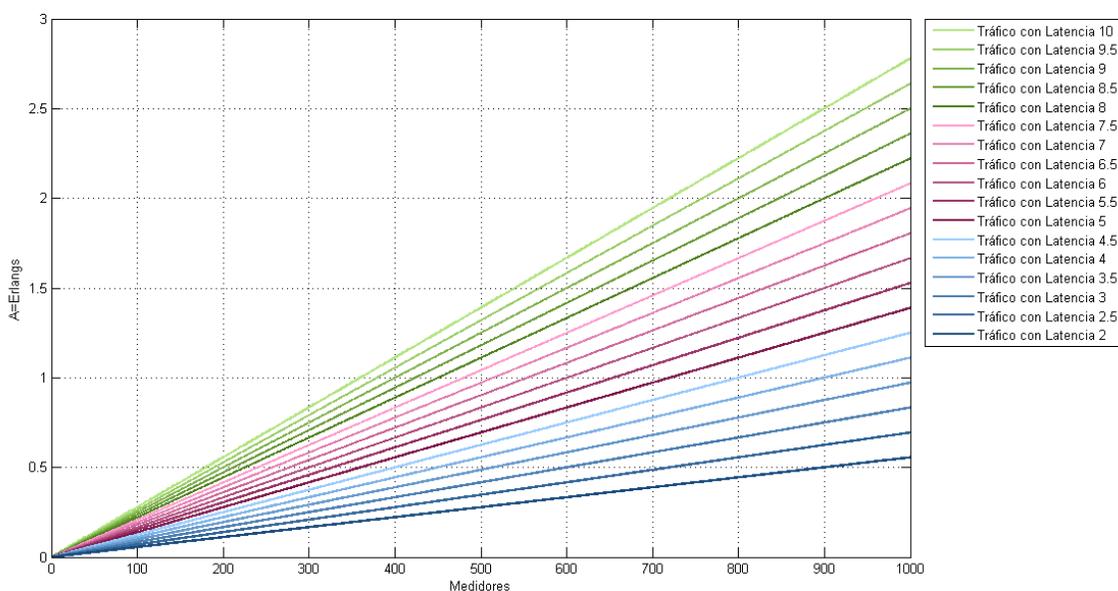
Como habíamos determinado en el subcapítulo 3.3 de esta tesis, podemos estimar un tráfico de datos a partir del rango de latencia y el número de medidores. El gráfico de la Figura IV.5 muestra la variación de 200 muestras del tráfico de 400 medidores; como es notable y entendible, la variación es debido a la función de aleatoriedad del programa, es decir que la aleatoriedad de la latencia no está hecha bajo ningún patrón o modelo, simplemente es realizado por el programa. Esto es posible hacerlo, debido a que un medidor inteligente nunca tendrá una latencia fija dentro de la red, posiblemente varíe en función de la tecnología del mismo o en función del servicio ofertado por la red misma. Este gráfico solo nos ilustra el comportamiento aleatorio del tráfico, pero de igual manera nos da los límites del tráfico para 400 medidores. El tope máximo de intensidad de tráfico es de 1,111 Erlangs, mientras que el tope mínimo es de 0,222 Erlangs y la media es de 0,667 Erlangs. Cabe mencionar que solo hemos estimado el tráfico para una sola transmisión en datos del medidor hacia la estación base, es decir el tráfico en uplink de un solo envío de datos a la red, recordemos que para la gestión de DR por parte de las empresas de distribución requieren intervalos de 15 minutos para la medición. Para poder elaborar un estimado más preciso del tráfico de medidores, es necesario desarrollar proyectos experimentales.



**Figura IV.5** Estimación de la intensidad de tráfico de 400 medidores inteligentes

**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

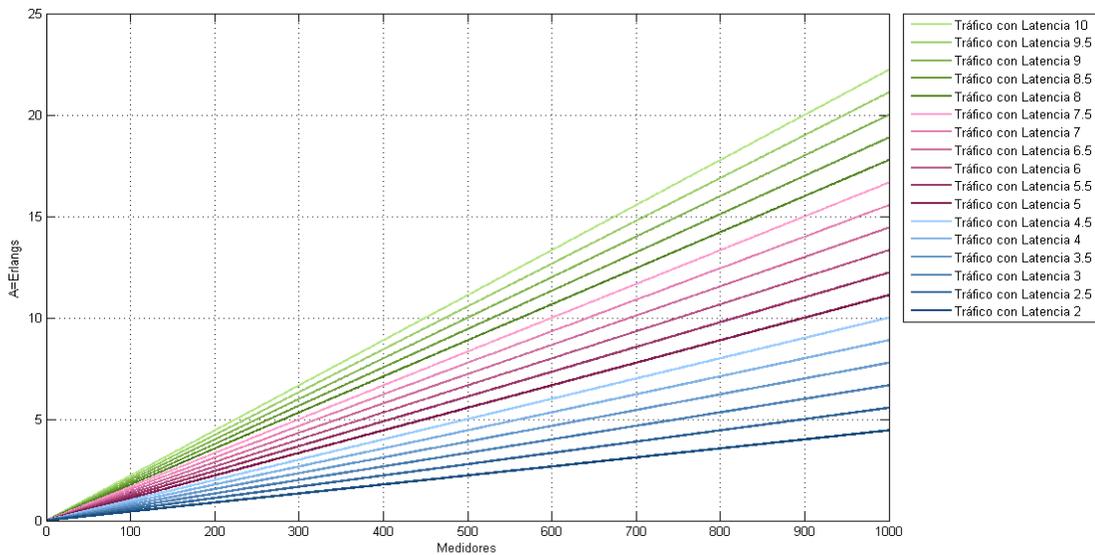
Debido a la variabilidad de la latencia de un medidor dentro de la red, es difícil determinar un comportamiento exacto, pero podemos estimar un crecimiento del tráfico en función de una latencia fija y un número de medidores específico. LA Figura IV.6 nos muestra las líneas de tendencia que se forman a partir de un valor de latencia, de igual manera que el anterior gráfico, es entendible que no se tenga un valor preciso del tráfico generado por los medidores, pero en el caso de que se desee analizar el tráfico con un valor medio, entonces nos sirve de gran manera determinar que con una latencia máxima de 10 segundos por cada medidor de un total de 1000 medidores por ejemplo, se tendrá una intensidad de tráfico de 2,778 y de igual forma, para 1000 medidores, con la latencia mínima de 2 segundos, se tendrá una intensidad de tráfico 0,556 .



**Figura IV.6** Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (1 intervalo)  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

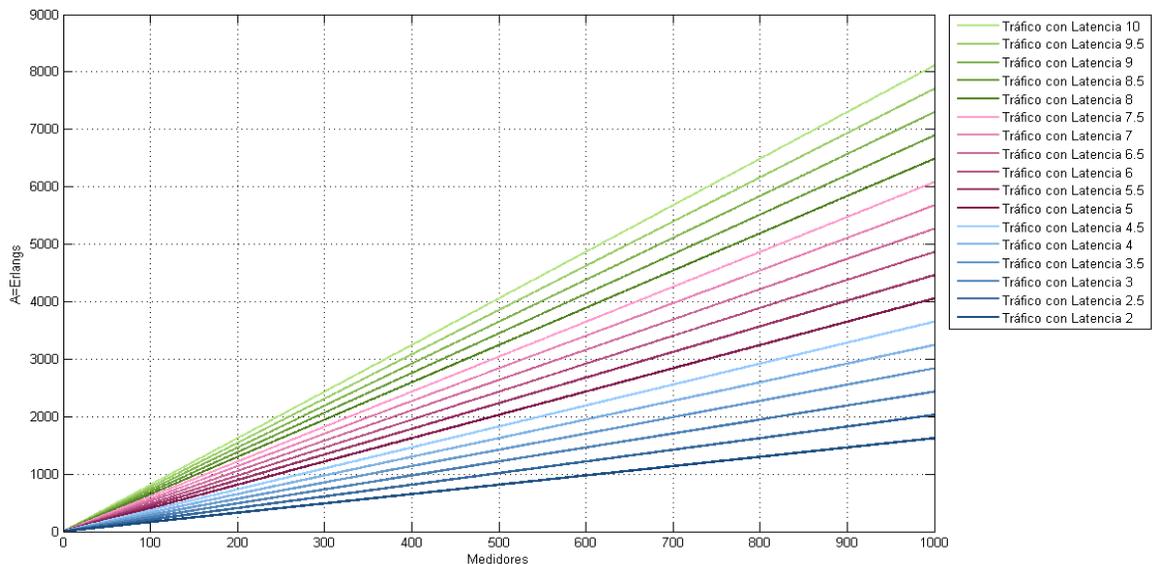
Como habíamos mencionado en el subcapítulo 3.3, hay recomendaciones que sugieren un periodo de medición de 8 veces (8 intervalos) diarias para efectuar actividades administrativas del consumo de electricidad, por este motivo hemos generado una gráfica de hasta 1000 medidores. La Figura IV.7 da la perspectiva del tráfico para un número finito de medidores con rango de latencia 2 a 10

segundos, podemos observar que para 1000 medidores, el valor máximo de tráfico diario con la mínima latencia (2 ) es 4,44 , mientras que el tráfico máximo diario con la máxima latencia (10 ) es 22,22 .



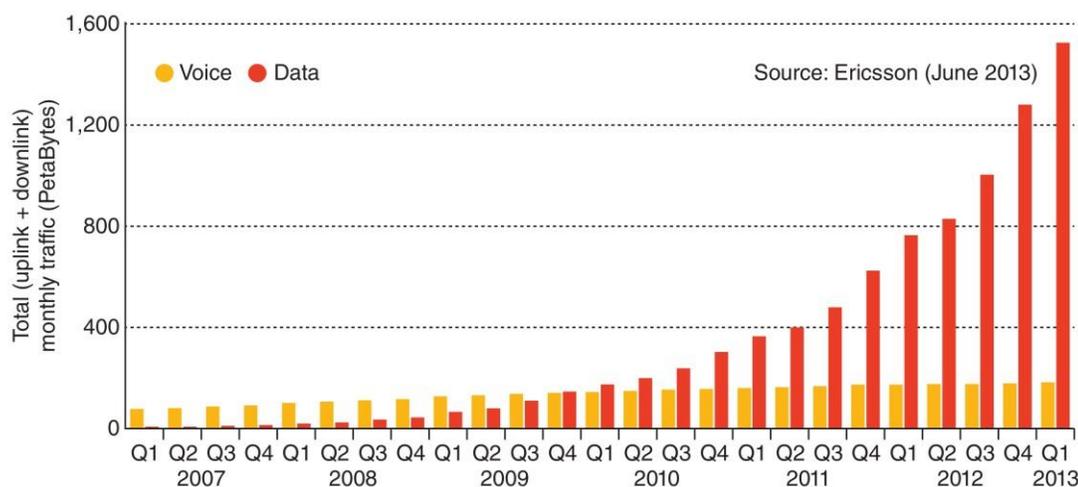
**Figura IV.7** Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (Diario)  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

De la misma forma hemos generado una estimación de tráfico para 1000 medidores en el periodo de un año, de esta manera obtuvimos la gráfica mostrada en la Figura IV.8. El máximo tráfico anual de 1000 medidores es de 8111,11 para una latencia máxima de 10 .



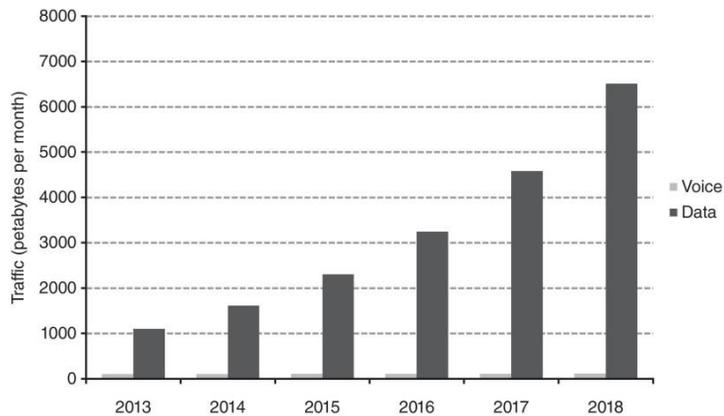
**Figura IV.8** Estimación de la intensidad de tráfico de medidores inteligentes (Anual)  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

Para la adecuada inserción de AMI en el Ecuador y montado sobre redes celulares, debe analizarse el tráfico que inyectan actualmente los usuarios del servicio móvil avanzado y sobre todo elaborar una proyección de los datos en base a las estadísticas ecuatorianas. Según [43], el tráfico de voz y datos han presentado una diferencia durante los últimos años, la Figura IV.9 muestra que el tráfico de datos ha mostrado una tendencia creciente no tan prominente y a partir del 2010 mantiene un tráfico mensual igual para los siguientes años hasta el 2013. En la otra perspectiva se encuentra el tráfico de datos uplink y downlink de los usuarios de telefonía móvil, donde existe un factor de crecimiento por sobre el valor de 500. Se asevera también, que el ingreso de teléfonos inteligentes, dispositivos con conexión a internet y sobre todo el aumento de servicios móviles avanzados comenzaron a congestionar las redes, por lo que las operadoras empezaron planes de expansión y aumento de la capacidad de sus redes[43].



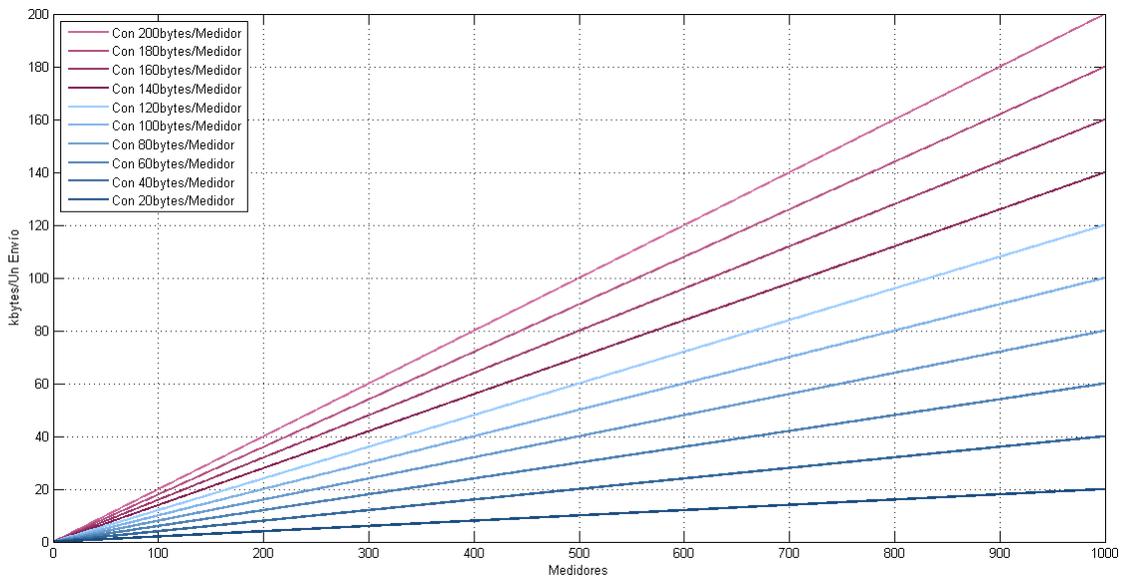
**Figura IV.9** Mediciones de tráfico de voz y datos de las redes celulares a nivel mundial  
**Fuente:** [43] C. Cox, An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. John Wiley & Sons, 2012, p. 354.

Si agregamos una línea de tendencia, podemos determinar la función de tráfico creciente a nivel mundial. [43] nos muestra la proyección de tráfico de datos y voz al 2018, donde la Figura IV.10 nos permite observar una creciente función de tráfico de datos en el orden de 6500 por mes para el año 2018.



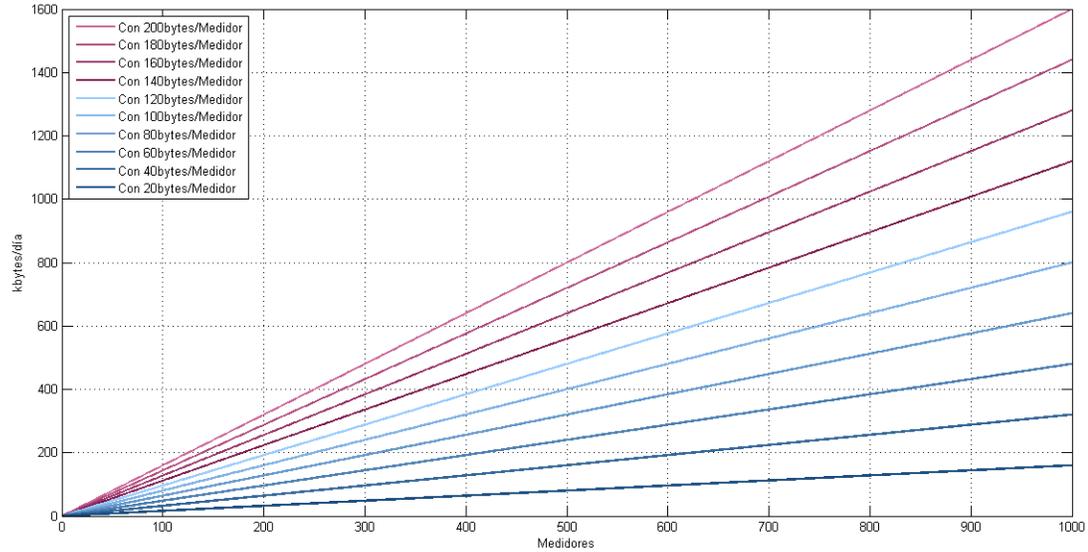
**Figura IV.10** Proyección de tráfico de voz y datos en las redes celulares a nivel mundial  
**Fuente:** [43] C. Cox, An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications. John Wiley & Sons, 2012, p. 354.

Como lo hemos mencionado, el aumento de dispositivos en las redes celulares debe ser considerado, debido a que si las operadoras de red o los MVNO empiezan a brindar servicios de datos para medición inteligente, la red celular se congestionará en un punto determinado, es por eso que los planes de inserción de medidores con tecnología celular debería considerar un aumento paulatino para que tanto los usuarios de telefonía móvil, como los usuarios de medición inteligente tengan las mismas condiciones de calidad, seguridad y eficiencia en el traslado de sus datos.



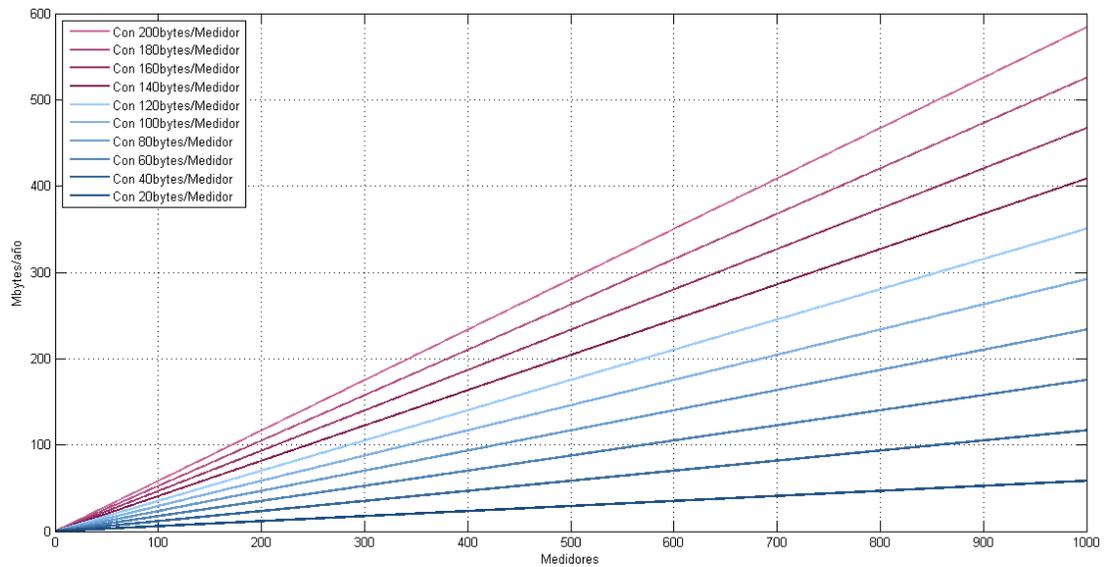
**Figura IV.11** Estimación del volumen de datos por un envío en uplink  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

Para un posible despliegue de medidores inteligentes, presentamos la Figura IV.11 que presenta el volumen de datos para un envío de datos según el número de medidores, la Figura IV.12 que muestra el volumen de datos diarios según el número de medidores.



**Figura IV.12** Estimación del volumen de datos diarios en uplink  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

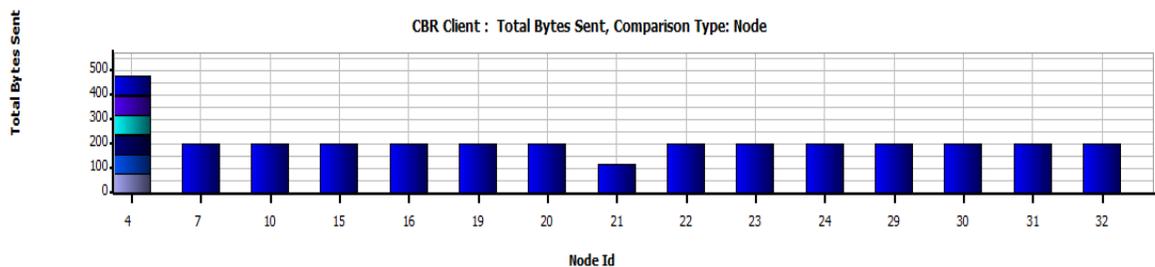
La Figura IV.13 que muestra el volumen de datos anuales según el número de medidores. Los datos diarios están basados en 8 lecturas, es decir en 8 intervalos al día, lo que significa una cantidad acumulada considerable.



**Figura IV.13** Estimación del volumen de datos anuales en uplink  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

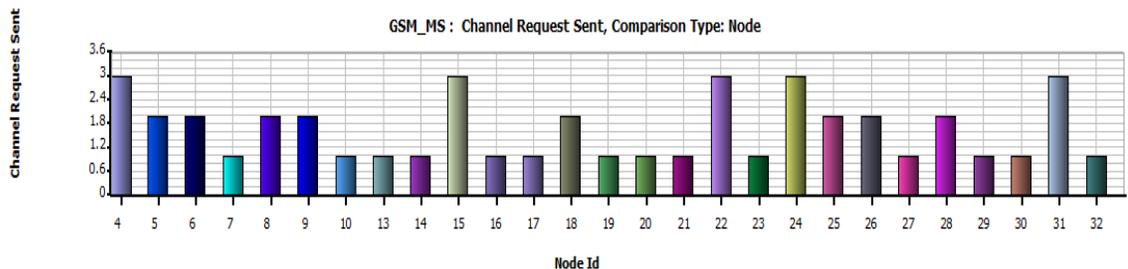
## Resultados analíticos de las simulaciones dinámicas

Gracias a las características del simulador de redes inalámbricas, con el que se pudo simular los escenarios, obtuvimos gráficas estadísticas que nos muestran los resultados de la simulación. La Figura IV.14 nos muestra la cantidad de bytes que se enviaron por cada nodo durante la simulación, de esta forma podemos ver que el nodo 4 es el que envió una cantidad de datos que simulaban los cortes y reconexiones, mientras que los demás nodos enviaron en su mayoría la cantidad de datos correspondiente a 200 que corrobora el volumen de datos que debería enviar un medidor en una sola transmisión. Cabe recalcar que todas estas gráficas no tienen ninguna modificación, ya que fueron generadas por el mismo simulador



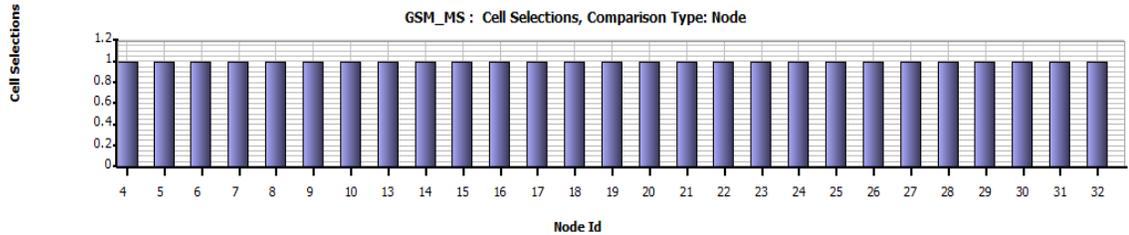
**Figura IV.14** Cantidad de datos enviados por cada nodo  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.15 nos muestra los canales que requirió cada nodo, de esta manera podemos notar que ciertos nodos tuvieron varios canales asignados, debido a que el simulador tiene la capacidad de asignación de canales dentro de la red, esto lo hace de manera automática y por este motivo busca de solventar la petición de cada dispositivo para realizar su acción dentro de la red.



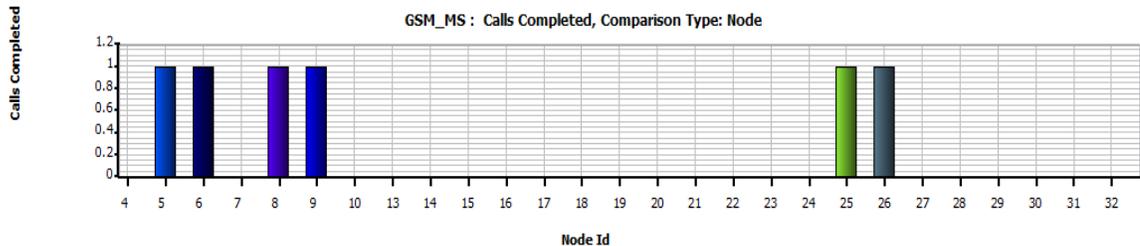
**Figura IV.15** Solicitudes de canal enviadas por cada nodo  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.16 nos muestra que cada nodo fue asignado a una célula (una estación base), esto significa que como cada medidor es estático, no tiene movimiento y por tanto se asigna a una estación base. De igual forma cada celular se pudo asignar a una sola estación base, a pesar de que tuvo movimiento y por ende no requirió un traslape a otra estación.



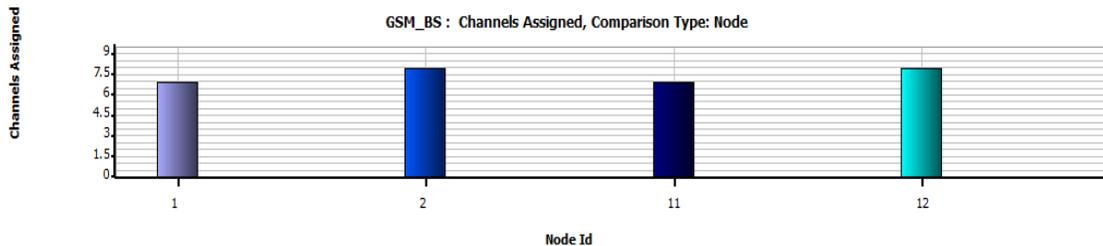
**Figura IV.16** Selecciones de celda por cada nodo  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.17 muestra las llamadas celulares GSM que se realizaron y se completaron, esta estadística nos permitió comprobar que las llamadas programadas se realizaron sin ningún problema, a pesar del tráfico de datos generados por los medidores.



**Figura IV.17** Llamadas GSM completadas  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

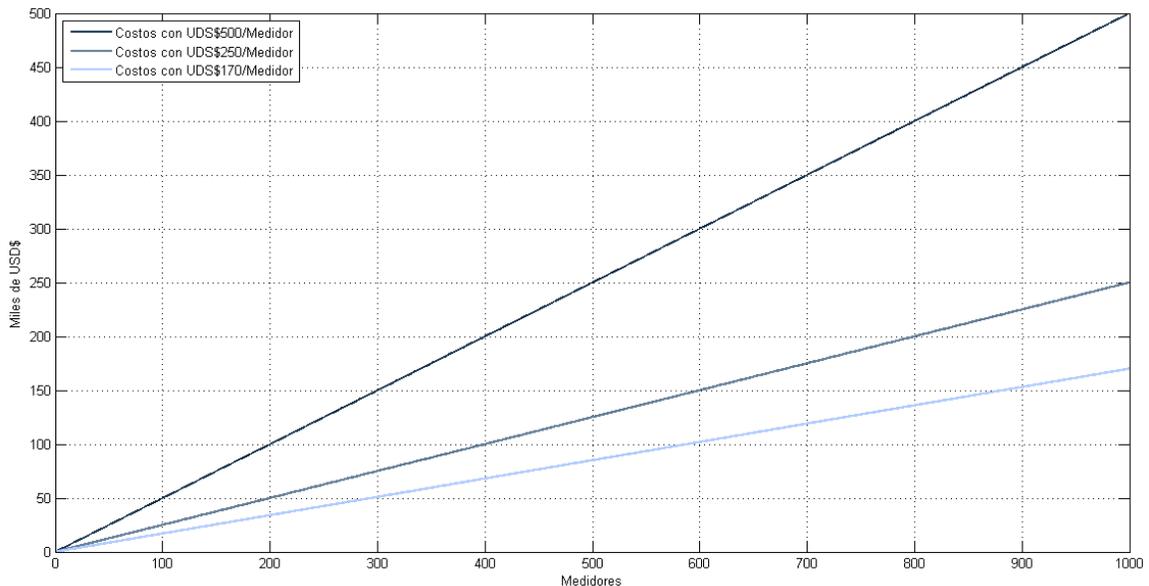
La Figura IV.18 es el resultado de los canales asignados que realizó cada estación base en base a las solicitudes de cada nodo.



**Figura IV.18** Canales Asignados por cada estación base  
Fuente: Carlos Suárez Pozo

### 4.3 Análisis económico para implementar infraestructura de medición inteligente

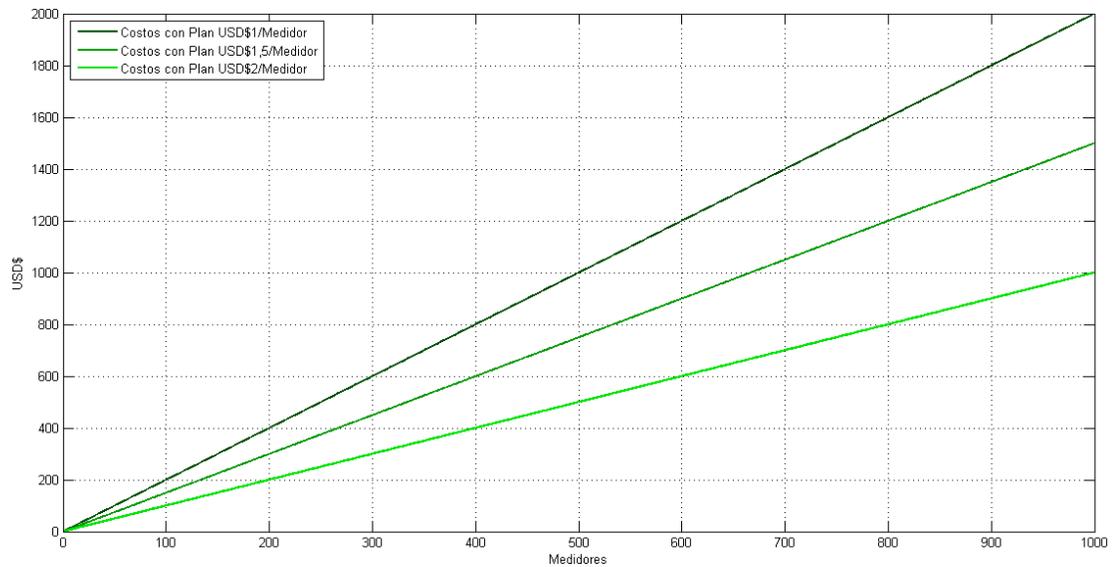
Para el análisis económico hemos considerado parámetros genéricos, en función de una media de costos proporcionados por la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte S.A. y también de [33] en base a datos de la Empresa Eléctrica de Azogues C.A. Para el cálculo hemos considerado los ahorros de una empresa eléctrica en lectura de medidores, ahorro en cortes y reconexiones, ahorro en costos por energía no recaudada (pérdidas comerciales), ahorro por energía no consumida y también para el beneficio se ha considerado el costo que provoca que el usuario presente un reclamo a la respectiva empresa de distribución. Para un proyecto de experimentación, hemos considerado 400 medidores y para un proyecto más amplio se podrá considerar 1000 medidores o más. Los costos de los medidores son variables según el fabricante, así que para efectos de estimación consideramos 3 precios de medidores y para el traslado de información consideramos 3 planes de datos. La Figura IV.19 Muestra los montos totales de inversión por compra de un número específico de medidores.



**Figura IV.19** Estimación del costo de un número total de medidores con 3 diferentes precios  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.20 muestra valores referenciales de 3 planes de datos anuales para un total de medidores, se ha considerado estos precios debido a que el volumen

de información generada por un medidor es mínimo, por lo que aplicaríamos el plan de datos más económico que ofrece una operadora de servicios móviles avanzados.



**Figura IV.20** Estimación del costo con 3 planes de datos para un número total de medidores  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

### Cálculo de ingresos

- Costo anual de lectura de medidores

Es un valor anual que asume la empresa de distribución por desplegar personal para toma de lecturas. Se estima que por cada medidor, la distribuidora invierte aproximadamente USD\$1,7469.

(IV.1)

- Costo anual de cortes y reconexiones

Es un valor anual que asume la empresa distribuidora por desplegar y gestionar personal para cortes de energía y reconexiones de energía. Para este cálculo se ha considerado una media de 16% de morosidad, considerado así por los datos proporcionados por [33] y los datos de la Empresa Eléctrica de Ambato. También se ha considerado en base a la información que el costo por un corte o reconexión mensual se invierte aproximadamente USD\$7,69.

(IV.2)

- Costo anual por energía fuera de servicio

Es un costo que debe asumir la empresa debido a la energía que no se consume por falta de pago de un cliente, entonces para el cálculo consideramos el 16% de morosidad, el costo de energía promedio al que compra una empresa de distribución de la región central y norte del Ecuador (USD\$0,05), el costo del para un cliente residencial (USD\$0,09), el consumo de energía diario en base a una media de consumo mensual (200kwh) y el número de horas promedio de sin servicio( ).

( ) (IV.3)

( )

- Costo anual por concepto de pérdidas comerciales

Es un costo que tiene que asumir la empresa de distribución por la energía que pierde por conceptos de pérdidas comerciales, es decir cubrir los que se consumieron y no se pagaron. Según [33], ayudado de datos proporcionados por la Empresa Eléctrica de Azogues, estima un porcentaje de 8,79% de medidores manipulados y por cada medidor manipulado dice que se pierde alrededor aproximadamente 150 . Para el cálculo también se ocupa el costo del (USD\$0,09).

(IV.5)

### **Inversión para el proyecto**

El costo de inversión inicial que vamos a asumir, contempla solo un monto que cubre la infraestructura de la red NAN, es decir solo estimaremos el costo total de 400 medidores y el costo por un plan de datos correspondiente al número de medidores. Elaboramos el análisis económico para 400 medidores con el costo de

medidor más bajo y un plan de datos medio de USD\$1,50. El plan de datos considerado está en base al costo de planes más bajo para nuestro caso, debido a que el volumen de datos por cada medidor en el año no comprende un factor contundente; de hecho, un medidor inteligente al año consume solo 584 como máximo si se asume un volumen de 200 por medidor.

Para 400 medidores, con un costo de USD\$170 por cada medidor el plan de datos medio (USD\$1,5), se ha determinado:

según la Figura IV.14 y según la Figura IV.15 se ha calculado:

El flujo de efectivo para el proyecto quedaría determinado por la Tabla IV.1, donde hemos considerado un periodo de plazo de 20 años, suponiendo que la vida útil de los medidores inteligentes duren ese tiempo, aunque por experiencia se consideran tiempos de vida mucho más largos para los componentes. Para los cálculos de viabilidad del proyecto hemos considerado el VAN, TIR y la relación beneficio/costo, debido a que estos son los indicadores principales para la viabilidad de un proyecto. Según los estudios financieros, se determina que para que un proyecto sea económicamente factible, se tiene una regla de decisión. Las reglas de decisión dicen que el VAN debe ser mayor que cero, el TIR mayor que la tasa de interés y la relación beneficio/costo mayor o igual a 1. Este tipo de proyecto se caracteriza por presentar un beneficio a la empresa de distribución, más no todavía para los usuarios, para considerar el beneficio a los usuarios, se debe realizar los estudios necesarios para implementar HAN, IAN o BAN, con el fin de realizar las interfaces de interacción con el usuario. Debido a lo antes expuesto, consideramos que los costos de inversión en medición inteligente deben ser cubiertos por las distribuidoras y más no por los clientes. Esto es entendible, ya que en el Ecuador no existe un mercado de competencia para la etapa de distribución, por lo tanto los monopolios naturales que se han formado se vuelven las únicas opciones para los clientes dentro de una zona de concesión correspondiente.

Años de operación	Ingresos					Egresos			Flujo Neto de Efectivo	
	Ahorro en tomas de lectura	Ahorro en cortes y reconexiones	Por energía fuera de servicio	Ahorro por medidores alterados	Total de Ingresos	Inversión en medidores inteligentes	Plan de datos de red celular	Total de Egresos		
0	2015							68000,00	68000,00	-68000,00
1	2016	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
2	2017	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
3	2018	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
4	2019	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
5	2020	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
6	2021	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
7	2022	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
8	2023	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
9	2024	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
10	2025	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
11	2026	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
12	2027	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
13	2028	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
14	2029	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
15	2030	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
16	2031	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
17	2032	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
18	2033	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
19	2034	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07
20	2035	698,79	5905,92	125,45	5695,92	12426,07		600,00	600,00	11826,07

**Tabla IV.1** Flujo de Efectivo anual.

La Tabla IV.2 nos muestra los valores considerables para la viabilidad del proyecto con una tasa de interés del 12%. Esta tasa es considerada en base a las tasas proporcionadas por el Banco Central para la inversión en proyectos.

Costo medio ponderado del capital			12%			
Año de Operación	Total de Ingresos	Total de Egresos	Flujo Neto de Efectivo	Flujo descontado	Flujo Acumulado	
0	\$ -	\$ 68.000,00	\$ (68.000,0)	\$ (68.000,00)	\$ (68.000,00)	
1	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 10.558,99	\$ (57.441,01)	
2	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 9.427,67	\$ (48.013,33)	
3	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 8.417,57	\$ (39.595,77)	
4	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 7.515,68	\$ (32.080,08)	
5	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 6.710,43	\$ (25.369,65)	
6	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 5.991,46	\$ (19.378,20)	
7	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 5.349,51	\$ (14.028,68)	
8	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 4.776,35	\$ (9.252,33)	
9	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 4.264,60	\$ (4.987,73)	
10	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.807,68	\$ (1.180,05)	
11	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.399,71	\$ 2.219,66	
12	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.035,46	\$ 5.255,12	
13	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.710,23	\$ 7.965,35	
14	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.419,85	\$ 10.385,20	
15	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.160,58	\$ 12.545,78	
16	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.929,09	\$ 14.474,87	
17	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.722,40	\$ 16.197,27	
18	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.537,86	\$ 17.735,13	
19	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.373,09	\$ 19.108,22	
20	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.225,97	\$ 20.334,19	

**Tabla IV.2** Cálculos para tasa de interés del 12%

La Tabla IV.3 nos muestra los valores considerables para la viabilidad del proyecto con una tasa de interés reducida. De igual manera que la Tabla IV.2, se consideran los mismos flujos netos de efectivo, pero con la diferencia de que ahora se calcula los flujos descontados y acumulados con la tasa del 10%.

Costo medio ponderado del capital			10%		
Año de Operación	Total de Ingresos	Total de Egresos	Flujo Neto de Efectivo	Flujo descontado	Flujo Acumulado
0	\$ -	\$ 68.000,00	\$ (68.000,0)	\$ (68.000,00)	\$ (68.000,00)
1	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 10.750,98	\$ (57.249,02)
2	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 9.773,61	\$ (47.475,41)
3	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 8.885,10	\$ (38.590,31)
4	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 8.077,37	\$ (30.512,94)
5	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 7.343,06	\$ (23.169,88)
6	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 6.675,51	\$ (16.494,37)
7	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 6.068,65	\$ (10.425,72)
8	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 5.516,95	\$ (4.908,77)
9	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 5.015,41	\$ 106,64
10	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 4.559,46	\$ 4.666,10
11	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 4.144,97	\$ 8.811,07
12	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.768,15	\$ 12.579,22
13	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.425,59	\$ 16.004,81
14	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 3.114,17	\$ 19.118,98
15	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.831,07	\$ 21.950,05
16	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.573,70	\$ 24.523,75
17	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.339,73	\$ 26.863,48
18	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 2.127,02	\$ 28.990,50
19	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.933,66	\$ 30.924,16
20	\$ 12.426,07	\$ 600,00	\$ 11.826,1	\$ 1.757,87	\$ 32.682,03

**Tabla IV.3** Cálculos para tasa de interés del 10%

La Tabla IV.4 es la tabla de resultado de los indicadores del proyecto, así se pudo determinar que el proyecto es viable económicamente. Por supuesto hay que tener en cuenta que es un análisis estimado.

12%	10%
VAN	VAN
\$ 18.155,52 Aceptable	\$ 29.710,93 Aceptable
TIR	TIR
16,58% Aceptable	16,58% Aceptable
Relación B/C	Relación B/C
1,28 Aceptable	1,46 Aceptable
Payback (Años)	Payback (Años)
10,31 Aceptable	8,89 Aceptable

**Tabla IV.4** Indicadores de la factibilidad económica

#### 4.4 Plan de negocios para medición inteligente de energía eléctrica

Para el plan de negocios, hemos considerado el modelo de consecución de metas en el corto, mediano y largo plazo del SIGDE (Sistema integrado para la gestión de la distribución eléctrica), donde propone un esquema para los planes de expansión de la distribución. También se ha considerado la estructura de la unidad de negocios CELEC EP-TRANSELECTRIC y las estructuras organizacionales de una empresa de distribución. La Figura IV.21 muestra la estructura de la cadena de procesos que conlleva implementar un proyecto de inversión en medición inteligente. Todo dependerá del esfuerzo de cada ente funcional, como lo son la empresa de distribución y la operadora de servicios móviles avanzados; obviamente también con el apoyo de las Universidades como entes de investigación y experimentación. El gobierno ecuatoriano, mediante sus secretarías y ministerios correspondientes deberán apoyar el ejercicio de proyectos que permitan mejorar las infraestructuras de los sistemas de distribución, todo por el bien de los consumidores y la confiabilidad, eficiencia y seguridad que debe prestar el sistema eléctrico.

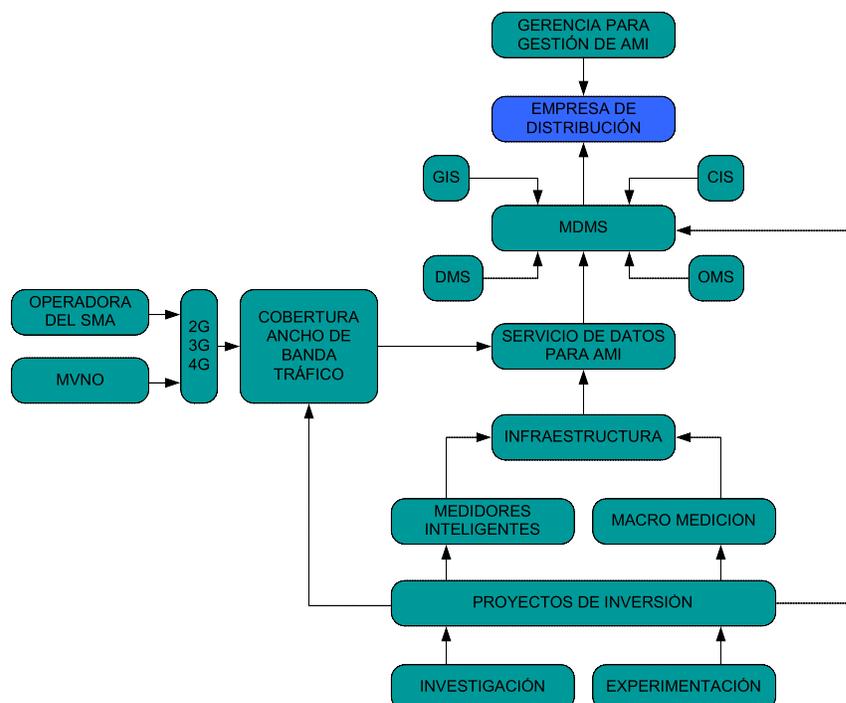
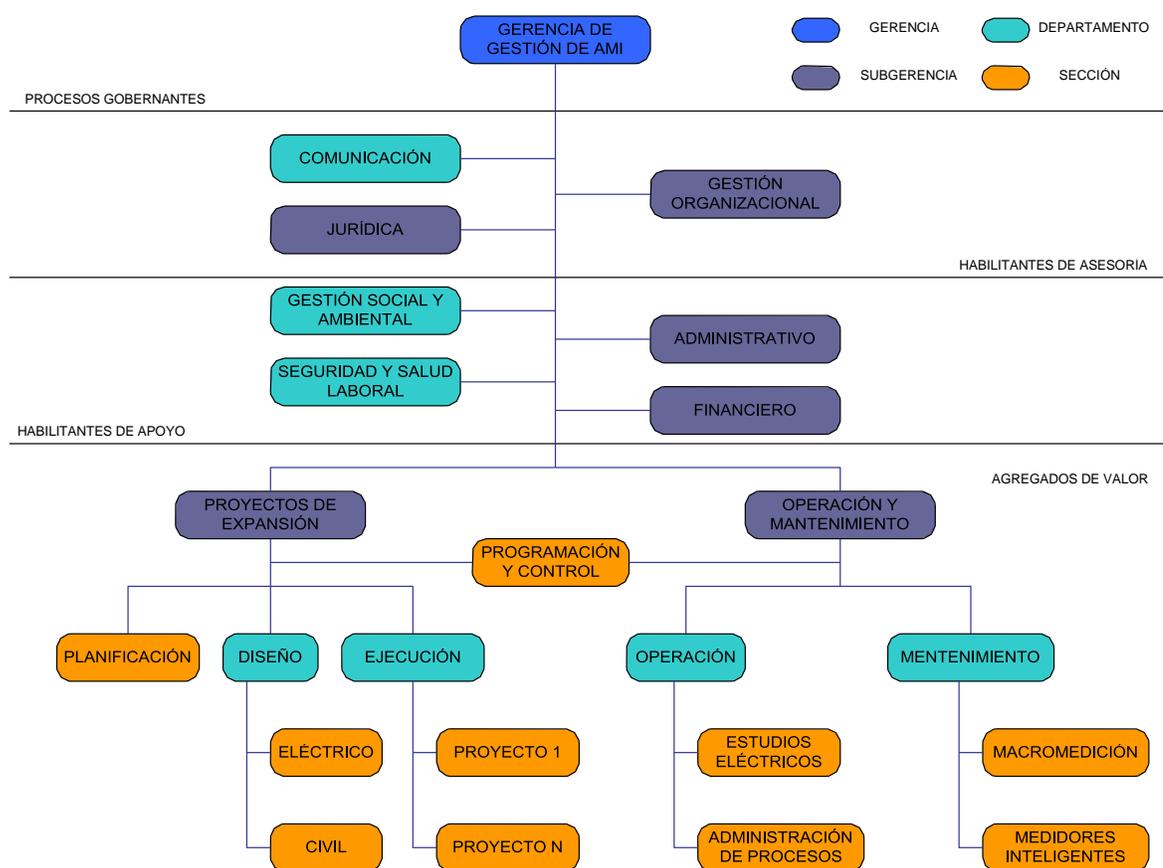


Figura IV.21 Estructura de la cadena de procesos para AMI

Fuente: Carlos Suárez Pozo

La Figura IV.22, en cambio, muestra la estructura organizacional funcional de la gestión de datos de medición inteligente. La gerencia de gestión de datos de AMI apoyada con seis subgerencias para la parte administrativa, financiera, jurídica, organizacional, de operación y mantenimiento y la parte encargada de los proyectos. En la estructura también se distinguen 7 departamentos en función de la gestión ambiental, seguridad y salud, comunicación, diseño y ejecución de proyectos así como de operación y mantenimiento. En base a cada parte de los agregados de valor de la estructura se suman las secciones que desempeñan el trabajo de mantener, operar y expandir la infraestructura de medición avanzada.



**Figura IV.22** Estructura organizacional funcional  
**Fuente:** Carlos Suárez Pozo

## CONCLUSIONES

El presente proyecto, permite determinar el comportamiento de una red celular en función de características reales dentro de un perímetro urbano. Para este fin, se utilizó los conceptos de optimización matemática, que nos permitieron formular el problema con sus restricciones y así minimizar costos. El algoritmo planteado permite encontrar las distancias mínimas entre cada medidor inteligente hasta la estación base más cercana; así, a través de un problema lineal resolver las necesidades de cobertura de una estación base de acuerdo al número de dispositivos que se aglutinan cercanos a la estación base.

El algoritmo esencial en este modelamiento y simulación fue k-means, este algoritmo nos permitió generar la solución a la minimización de las distancias. Además se ha podido determinar un posicionamiento-localización óptimo de una estación base dentro de un plano denominados sitios factibles; por ende, nuestros algoritmos minimizan las distancias con respecto a la posición más efectiva de estaciones base y su ubicación geográficamente.

Las simulaciones realizadas en el programa de Matlab, fueron realizadas en función de parámetros estimados de las capacidades de las infraestructuras de comunicación celular. Con esto pudimos recrear áreas de cobertura dentro de un perímetro de funcionamiento y por ende determinar el comportamiento de la red para poder albergar medición inteligente.

Mediante la simulación de un escenario desarrollado bajo software especializado Qualnet 5.2, pudimos determinar parámetros funcionales reales de una red celular. El escenario simulado tuvo a favor características que nos permite desplegar infraestructura de red, utilizar modelos de propagación, agregar potencias de transmisión de las estaciones base y de los dispositivos móviles, especificar el terreno para la simulación, realizar enlaces inalámbricos a conveniencia y generar un número finito de canales. Con las facilidades del programa, también pudimos simular el comportamiento que realiza un usuario de servicio móvil avanzado, gracias a esto y demás parámetros de funcionamiento de la red, este programa también nos generó resultados de simulación que nos indican volumen de datos enviados, asignaciones de canal y asignaciones de estaciones base.

Una red celular no solo nos proporciona una efectiva cobertura, sino también un dedicado traslado de la información, lo que la convierte en la mejor opción para implementar servicios de medición inteligente, de igual forma nos permite ocupar una red de telecomunicaciones sin preocuparnos del mantenimiento y operación de los equipos e infraestructura. Por esto estamos a favor del ingreso de operadores móviles virtuales o a la expansión de los servicios móviles avanzados ofrecidos por una operadora de red celular para brindar comunicaciones a AMI.

Los medidores inteligentes poseen características muy distintas, ya que dependen de los fabricantes, pero en promedio hemos podido encontrar que un medidor inteligente consume un rango promedio de banda ancha, esto genera una media de volumen de datos y una media de latencia, lo que permite pronosticar o estimar los rangos de ocupación de una red.

Se pudo determinar la cantidad finita de tráfico provocado por la inserción de una cantidad de medidores inteligentes, de igual manera se pudo estimar el volumen de datos que generaría un número de medidores inteligentes. Mediante esto pudimos generar gráficos referenciales para la determinación de factores importantes para la compartición de los canales de red celular con los usuarios de telefonía móvil.

La etapa de distribución de un sistema eléctrico puede verse mejorado en gran porcentaje, a tal punto de cumplir índices óptimos en la calidad del servicio eléctrico, esto puede ser posible gracias a AMI. Mientras mejor se diseñe un escenario de medición inteligente, mejores van a ser los resultados económicos y de gestión de una empresa distribuidora.

## RECOMENDACIONES

El proyecto desarrollado se centra en conglomeración de datos, para futuras investigaciones se recomienda asociarlo a un algoritmo que desarrolle asignación de canales de telefonía móvil o a un algoritmo de proporcionalidad para la compartición de canales de la red celular.

El análisis económico que pudimos realizar, estima ahorros correspondientes a costos que con AMI se mitigarían, inversión mínima por compra de medidores inteligentes y un costo mínimo en los planes de datos de las operadoras celulares. Es por esto que para futuros proyectos, se recomienda analizar la mayor cantidad de datos financieros y de gestión de una empresa de distribución; de esta manera, se puede determinar precisamente las condiciones económicas de implementación de AMI. Con las operadoras del servicio móvil avanzado, es necesario realizar negociaciones que permitan minimizar el costo de un plan de datos, ya que los medidores inteligentes no transmiten una gran cantidad de información por envío.

Es necesario revisar más a fondo la inversión en medidores inteligentes, ya que el costo por medidor actualmente puede ascender a valores poco rentables para una empresa de distribución en el Ecuador. El costo de un medidor inteligente bien equipado puede oscilar entre USD\$350,00 y USD\$850,00, lo que implica un valor medio de USD\$450,00 por medidor; que en resultados económicos representaría una inversión de USD\$1800.000.000,00 para un total de 4 millones de abonados. Debido a esto es necesario disminuir los costos por inversión, por lo que se deberían proponer planes de producción nacional; con esto; se disminuiría costos de implementación y se generaría más mano de obra a contratarse, lo que implicaría también puestos de trabajo para la población.

El desarrollo de planes de inserción de medición inteligente mediante operadores móviles virtuales u operadoras de servicio móvil avanzado, reduciría el impacto económico por la inversión con el debido análisis de tráfico en las redes celulares.

Para implantar AMI, se debe considerar iniciar el plan de implementación en sectores residenciales donde exista una evidencia de gran porcentaje de pérdidas

no técnicas, ya que la distribuidora debería considerar estas zonas conflictivas como la problemática de pérdidas comerciales. Es natural también, considerar la demografía y ubicación geográfica del lugar a implementar medición inteligente, ya que las zonas pobladas podrá ser urbano o rural; según esto, también se puede encontrar la mejor opción tecnológica para el traslado de datos de medición.

## REFERENCIAS

- [1] E. Hossain, Z. Han, and H. V. Poor, *Smart Grid Communications and Networking*. Cambridge University Press, 2012, p. 511.
- [2] Y. Xiao, *Communication and Networking in Smart Grids*. CRC Press, 2012, p. 330.
- [3] A. Carvallo and J. Cooper, *The Advanced Smart Grid: Edge Power Driving Sustainability*. Artech House, 2011, p. 269.
- [4] G. Rajalingham, "Attainable throughput, delay and scalability for geographic routing on Smart Grid neighbor area networks," *2013 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.*, pp. 1121–1126, Apr. 2013.
- [5] E. Inga, "Redes de Comunicación en Smart Grid," *INGENIUS*. N°7, (enero/junio), pp. 36–55, 2012.
- [6] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergüt, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "Smart grid technologies: communication technologies and standards," ... *IEEE Trans.*, vol. 7, no. 4, pp. 529–539, 2011.
- [7] A. Sinha, S. Neogi, R. N. Lahiri, S. Chowdhury, S. P. Chowdhury, and N. Chakraborty, "Smart grid initiative for power distribution utility in India," *2011 IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet.*, pp. 1–8, Jul. 2011.
- [8] E. Yaacoub and A. Abu-Dayya, "Automatic meter reading in the smart grid using contention based random access over the free cellular spectrum," *ELSEVIER Comput. Networks*, vol. 59, pp. 171–183, Feb. 2014.
- [9] P. Mukhopadhyay and H. K. Chawla, "Approach to make Smart Grid a reality," *2014 Int. Conf. Adv. Energy Convers. Technol.*, pp. 77–82, Jan. 2014.
- [10] E. Inga, G. Arévalo, and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," 2014, no. 1 The 2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing, pp. 1–6.
- [11] H. Sui, H. Wang, M. Lu, and W. Lee, "An AMI System for the Deregulated Electricity Markets," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 45, no. 6, pp. 2104–2108, 2009.
- [12] K. Nagothu and B. Kelley, "Persistent Net-AMI for microgrid infrastructure using cognitive radio on cloud data centers," *Syst. Journal, IEEE*, vol. 6, no. 1, pp. 4–15, 2012.

- [13] E. Ancillotti, R. Bruno, and M. Conti, "The role of communication systems in smart grids: Architectures, technical solutions and research challenges," *ELSEVIER Comput. Commun.*, vol. 36, no. 17–18, pp. 1665–1697, Nov. 2013.
- [14] J. G. Kassakian, R. Schmalensee, G. Desgroseilliers, T. D. Heidel, K. Afridi, A. M. Farid, J. M. Grochow, W. W. Hogan, H. D. Jacoby, J. L. Kirtley, H. G. Michaels, I. Perez-Arriaga, D. J. Perreault, N. L. Rose, and G. L. Wilson, *The Future of the Electric Grid An Interdisciplinary MIT Study*. Massachusetts Institute of Technology, 2011, p. 268.
- [15] J. Momoh, *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. John Wiley & Sons, 2012, p. 234.
- [16] Litos Strategic Communication, "THE SMART GRID : AN INTRODUCTION," U.S. Department of Energy, Office of Electricity Delivery and Energy Reliability, Washington, DC 20585, 2008.
- [17] W. Callender, W. Baker, B. Laningham, E. Rogers, M. Williamson, and D. Hayes, "The Role of Load Research in Automated Meter Infrastructure / Meter Data Management Initiatives," no. September. AEIC's Load Research Committee Performance Leadership Sub-Committee, p. 15, 2008.
- [18] S. Collier, "Ten Steps to a Smarter Grid," *IEEE Ind. Appl. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 62–68, Mar. 2010.
- [19] J. Ekanayake, N. Jenkins, and K. Liyanage, *Smart grid: technology and applications*. John Wiley & Sons, 2012, p. 315.
- [20] M. A. Rahman, E. Al-Shaer, and P. Bera, "A Noninvasive Threat Analyzer for Advanced Metering Infrastructure in Smart Grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 273–287, Mar. 2013.
- [21] NIST, "NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards , Release 1.0," *NIST Spec. Publ. 1108*, p. 145, 2010.
- [22] J. M. Alvarado Brito, "Servicios de medición avanzada (AMI) para redes inteligentes y su adaptabilidad en el marco de la legislación ecuatoriana," Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, 2011.
- [23] P. Siano, "Demand response and smart grids—A survey," *ELSEVIER Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 30, pp. 461–478, Feb. 2014.
- [24] M. S. Obaidat, A. Anpalagan, and I. Woungang, *Handbook of Green Information and Communication Systems*. Academic Press, 2012, p. 815.

- [25] M. Kuzlu, M. Pipattanasomporn, and S. Rahman, "Communication network requirements for major smart grid applications in HAN, NAN and WAN," *ELSEVIER Comput. Networks*, vol. 67, no. April, pp. 74–88, Jul. 2014.
- [26] X. Jin, L. Lu, W. Tong, and Z. Li, "Study on Communications Scheduling Strategy Oriented to Wide Area Advanced Metering Infrastructure," *2012 Second Int. Conf. Instrumentation, Meas. Comput. Commun. Control*, pp. 407–410, Dec. 2012.
- [27] J. Zhou, R. Hu, and Y. Qian, "Scalable distributed communication architectures to support advanced metering infrastructure in smart grid," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 23, no. 9, pp. 1632–1642, 2012.
- [28] M. Gupta, S. Gupta, and T. Thakur, "Design and impact of wireless AMI for distribution utilities," *2013 Annu. IEEE India Conf.*, pp. 1–6, Dec. 2013.
- [29] V. C. Gungor, D. Sahin, T. Kocak, S. Ergut, C. Buccella, C. Cecati, and G. P. Hancke, "A survey on smart grid potential applications and communication requirements," *IEEE Trans. Ind. INFORMATICS, VOL. 9, NO. 1, Febr. 2013*, vol. 9, no. 1, pp. 28–42, 2013.
- [30] J. R. Agüero and S. Member, "Improving the Efficiency of Power Distribution Systems through Technical and Non-Technical Losses Reduction," *Transm. Distrib. Conf. Expo. (T&D), 2012 IEEE PES*, pp. 1–8, 2012.
- [31] S. Borlase, *Smart Grids: Infrastructure, Technology, and Solutions*. CRC Press, 2012, p. 611.
- [32] L. T. Berger and K. Iniewski, *Smart Grid Applications, Communications, and Security*. Wiley, 2012, p. 488.
- [33] D. R. Idrovo Coronel and S. M. Reinoso Torres, "Análisis de factibilidad para la implementación de un sistema AMI (Advanced Metering Infraestructure) mediante contadores inteligentes por parte de la Empresa Eléctrica Azogues C.A.," Universidad Politécnica Salesiana, Facultad de Ingeniería Electrónica, 2012.
- [34] R. J. Bates, *Comunicaciones inalámbricas de banda ancha*. McGraw-Hill Profesional, 2003, p. 345.
- [35] A. F. Molisch, *Wireless Communications*. Wiley, 2010, p. 884.
- [36] I. Joe, J. Y. Jeong, and F.-Q. Zhang, "Design and Implementation of AMI System Using Binary CDMA for Smart Grid," *2013 Third Int. Conf. Intell. Syst. Des. Eng. Appl.*, pp. 544–549, Jan. 2013.

- [37] S. Buettrich and A. Escudero Pascual, "Basic Wireless Infrastructure and Topologies," *Wireless Networking*, 2006. [Online]. Available: [http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless\\_en/04\\_Infrastructure\\_Topology/04\\_en\\_mmtk\\_wireless\\_basic-infrastructure-topology\\_slides.pdf](http://www.itrainonline.org/itrainonline/mmtk/wireless_en/04_Infrastructure_Topology/04_en_mmtk_wireless_basic-infrastructure-topology_slides.pdf).
- [38] B. Vaidya, D. Makrakis, and H. Mouftah, "Secure multipath routing for AMI network in Smart Grid," *2012 IEEE 31st Int. Perform. Comput. Commun. Conf.*, pp. 408–415, Dec. 2012.
- [39] P. Kulkarni, S. Gormus, Z. Fan, and F. Ramos, "AMI Mesh Networks—A Practical Solution and Its Performance Evaluation," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 3, pp. 1469–1481, Sep. 2012.
- [40] S. Chen, K. Xu, Z. Li, F. Yin, and H. Wang, "A privacy-aware communication scheme in Advanced Metering Infrastructure (AMI) systems," *2013 IEEE Wirel. Commun. Netw. Conf.*, pp. 1860–1863, Apr. 2013.
- [41] K.-L. Du and M. N. S. Swamy, *Wireless Communication Systems: From RF Subsystems to 4G Enabling Technologies*. Cambridge University Press, 2010, p. 1020.
- [42] I. Esteban, M. Inga, and O. Mgt, "La telefonía móvil de cuarta generación 4G y Long Term Evolution," pp. 3–12.
- [43] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. John Wiley & Sons, 2012, p. 354.
- [44] H. Gruber, *The Economics of Mobile Telecommunications*. Cambridge University Press, 2005, p. 343.
- [45] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005, p. 676.
- [46] P. Sharma and R. Singh, "Comparative analysis of propagation path loss models with field measured data," *Int. J. Eng. Sci. Technol.*, 2010.
- [47] Y. Yang, D. Shen, Y. Xie, and X. Li, "Matlab Simulink of COST231-WI Model," *Int. J. Wirel. Microw. Technol.*, vol. 2, no. 3, p. 1, 2012.
- [48] SUPERTEL, "Control del espectro radio eléctrico," 2014. [Online]. Available: <http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/espectro/>. [Accessed: 30-Dec-2014].
- [49] SUPERTEL, "Telefonía móvil," 2014. [Online]. Available: <http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/>. [Accessed: 30-Dec-2014].

- [50] SUPERTEL, “Estadísticas del SMA a Octubre de 2014,” 2014. [Online]. Available: [http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil!/ut/p/z1/04\\_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8\\_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/](http://controlenlinea.supertel.gob.ec/wps/portal/informacion/informaciontecnica/telefoniamovil/estadisticasmovil!/ut/p/z1/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfIjo8zijY08DAw8_A28DUJcHQ0cg50d3QPDTAwNgoz0C7ldFQH9kQkn/). [Accessed: 30-Dec-2014].
- [51] A. P. Guevara Toledo and V. G. Vásquez Alarcón, “Estado actual de las redes LTE en Latinoamérica,” Universidad de Cuenca, Facultad de Ingeniería, Escuela de Electrónica y Telecomunicaciones, 2013.
- [52] SENATEL, “Secretaría Nacional de Telecomunicaciones | Ecuador » Biblioteca,” 2014. [Online]. Available: <http://www.regulaciontelecomunicaciones.gob.ec/biblioteca/>. [Accessed: 30-Dec-2014].
- [53] L. Mastroeni and M. Naldi, “Spectrum reservation options for Mobile Virtual Network Operators,” *6th EURO-NGI Conf. Next Gener. Internet*, pp. 1–8, Jun. 2010.
- [54] J. Inga Ortega and E. Ordóñez Morales, “Análisis Técnico, Económico y Regulatorio para el Ingreso de un Operador Móvil Virtual en el Ecuador,” Universidad Politécnica Salesiana, Unidad de Posgrados, Maestría en Gestión de Telecomunicaciones, 2013.
- [55] F. Brito Mancero, “INGRESO DE LOS OPERADORES MÓVILES VIRTUALES EN EL ECUADOR,” *SUPERTEL Cuad. 2 Telecomunicaciones*, 2013.
- [56] E. G. Valarezo Añasco, D. A. Zhunio Maldonado, and F. Villao Quezada, “Estructuración del entorno regulatorio adecuado del Ecuador para facilitar la implementación de la banda ancha móvil,” Feb. 2014.
- [57] C. Camarán and D. De Miguel, “Mobile Virtual Network Operator (MVNO) basics: What is behind this mobile business trend,” *Valoris Manag. Consult. View Point*, no. October, 2008.
- [58] S. Li, J. Huang, and S. Member, “Dynamic Profit Maximization of Cognitive Mobile Virtual Network Operator,” vol. 13, no. 3, pp. 526–540, 2014.
- [59] R. Mao and V. Julka, “Advanced Metering Infrastructure Using Wireless Broadband Networks,” 2012. [Online]. Available: <http://smartgrid.ieee.org/may-2012/577-advanced-metering-infrastructure-using-wireless-broadband-networks>. [Accessed: 31-Dec-2014].

- [60] M. Grötschel, J. Schweiger, F. Mathematik, T. Universit, and B. Berlin, "Application of Multistage Stochastic Programming in Strategic Telecommunication Network Planning," Technischen Universität Berlin, 2010.
- [61] W. Webb, *Understanding Weightless: Technology, Equipment, and Network Deployment for M2M Communications in White Space*. Cambridge University Press, 2012, p. 221.
- [62] iFixit, "Elster REX2 Smart Meter Teardown," 2011. [Online]. Available: <https://es.ifixit.com/Teardown/Elster+REX2+Smart+Meter+Teardown/5710>. [Accessed: 03-Jan-2015].
- [63] S. Marcacci, "Global Smart Meter Market Drops 15 Percent in 1Q 2012," 2012. [Online]. Available: <http://www.marcaccicomms.com/news/global-smart-meter-market-drops-15-percent-in-1q-2012/>. [Accessed: 03-Jan-2015].
- [64] V. Orejuela Luna, "BENEFICIOS ECONÓMICOS DE LA APLICACIÓN DEL PLAN DE REDUCCIÓN DE PÉRDIDAS EN EL ECUADOR," *ECUACIER XXIX Semin. Nac. del Sect. Eléctrico Machala*, May 2014.
- [65] V. G. Taco Chalá, "Análisis en los primarios de distribución de las subestaciones: no. 02, no. 10, no. 12, no. 32 y no. 53 pertenecientes a la Empresa Eléctrica Quito S.A. para reducir pérdidas," Quito, 2012.
- [66] CONELEC, "Pérdidas anuales de energía eléctrica en los sistemas de distribución," 2014. [Online]. Available: [http://www.conelec.gob.ec/enlaces\\_externos.php?l=1&cd\\_menu=4248](http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4248). [Accessed: 04-Jan-2015].
- [67] CONELEC, "Balance Nacional de Energía Eléctrica, Información Estadística Septiembre 2014," 2014. [Online]. Available: <http://www.conelec.gob.ec/contenido.php?cd=10261&l=1>. [Accessed: 04-Jan-2015].
- [68] CONELEC, "Valores anuales facturados y recaudados a clientes finales," 2014. [Online]. Available: [http://www.conelec.gob.ec/enlaces\\_externos.php?l=1&cd\\_menu=4229](http://www.conelec.gob.ec/enlaces_externos.php?l=1&cd_menu=4229). [Accessed: 04-Jan-2015].
- [69] a. R. Abaide, L. N. Canha, a. Barin, and G. Cassel, "Assessment of the smart grids applied in reducing the cost of distribution system losses," *2010 7th Int. Conf. Eur. Energy Mark.*, pp. 1–6, Jun. 2010.

- [70] P. O. Quishpe Sacancela and D. P. Tapia Rivas, "Análisis técnico económico de las formas mas comunes de contravenciones en el consumo de energía eléctrica," Quito, 2010.
- [71] A. Chauhan and S. Rajvanshi, "Non-Technical Losses in power system: A review," 2013, pp. 558–561.
- [72] D. Suriyamongkol, "NON-TECHNICAL LOSSES IN ELECTRICAL POWER SYSTEMS," Ohio University, Fritz J. and Dolores H. Russ College of Engineering and Technology, 2002.
- [73] R. Acosta and J. Ospino, "Control of Non Technical Losses Through Totalizing Meters," *IEEE PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Lat. Am. Venez.*, 2006.
- [74] Y. Lo, S. Huang, and C. Lu, "Non-technical loss detection using smart distribution network measurement data," *IEEE PES Innov. Smart Grid Technol.*, pp. 1–5, May 2012.
- [75] S.-C. Huang, Y.-L. Lo, and C.-N. Lu, "Non-Technical Loss Detection Using State Estimation and Analysis of Variance," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 28, no. 3, pp. 2959–2966, Aug. 2013.
- [76] STHV, "Parroquias del DMQ," *Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda*, 2014. [Online]. Available: [http://sthv.quito.gob.ec/index.php?option=com\\_content&view=article&id=36&Itemid=1](http://sthv.quito.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=1). [Accessed: 15-Nov-2014].
- [77] STHV, "POBLACION E INDICADORES DEL 2010 EN LA ADMINISTRACION ZONAL EUGENIO ESPEJO SEGÚN BARRIO-SECTOR," *Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda*, 2014. [Online]. Available: [http://sthv.quito.gob.ec/images/indicadores/Barrios/demografia\\_barrio10.htm](http://sthv.quito.gob.ec/images/indicadores/Barrios/demografia_barrio10.htm). [Accessed: 15-Nov-2014].
- [78] STHV, "POBLACION E INDICADORES DE LA ADMINISTRACION ZONAL EUGENIO ESPEJO SEGÚN PARROQUIAS," *Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda*, 2014. [Online]. Available: <http://sthv.quito.gob.ec/images/indicadores/parroquia/Demografia.htm>. [Accessed: 15-Nov-2014].
- [79] Empresa Eléctrica Quito EEQ, "La EEQ en cifras," 2014. [Online]. Available: <http://www.eeq.com.ec:8080/nosotros/la-eeq-en-cifras>. [Accessed: 15-Oct-2014].

- [80] X.-S. Yang, *Engineering Optimization: An Introduction with Metaheuristic Applications*. John Wiley & Sons, 2010, p. 377.
- [81] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge: Cambridge University Press, 2004.
- [82] F. Scarlatache, G. Grigora, G. Chicco, and G. Câr, "Using k-Means Clustering Method in Determination of the Optimal Placement of Distributed Generation Sources in Electrical Distribution Systems," *IEEE Optim. Electr. Electron. Equip. (OPTIM), 2012 13th Int. Conf.*, pp. 953–958, 2012.
- [83] G. Grigoras, "Load estimation for distribution systems using clustering techniques," *IEEE 13th Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip.*, pp. 301–306, 2012.
- [84] M. Davodi, H. Modares, E. Reihani, M. Davodi, and A. Sarikhani, "Coherency Approach by Hybrid PSO , K-Means Clustering Method in Power System," *2nd IEEE Int. Conf. Power Energy (PECon 08)*, no. PECon 08, pp. 1203–1207, 2008.
- [85] H.-A. Cao, C. Beckel, and T. Staake, "Are domestic load profiles stable over time? An attempt to identify target households for demand side management campaigns," *IECON 2013 - 39th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc.*, pp. 4733–4738, Nov. 2013.
- [86] L. Morissette and S. Chartier, "The k -means clustering technique : General considerations and implementation in Mathematica," *Tutor. Quant. Methods Psychol.*, vol. 9, no. 1, pp. 15–24, 2013.
- [87] V. Faber, "Clustering and the Continuous k -Means Algorithm," *Los Alamos Sci.*, no. 22, pp. 138–144, 1994.
- [88] STHV, "Parroquia Kennedy," *Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda*, 2014. [Online]. Available: <http://sthv.quito.gob.ec/images/indicadores/Barrrios/kennedy.jpg>. [Accessed: 15-Nov-2014].
- [89] CONELEC, "MAPA DE ÁREAS DE CONCESIÓN DE LAS DISTRIBUIDORAS," 2013. [Online]. Available: [http://www.conelec.gob.ec/images/documentos/doc\\_10640\\_MAPA\\_AREAS\\_CONCESION\\_BIEN.pdf](http://www.conelec.gob.ec/images/documentos/doc_10640_MAPA_AREAS_CONCESION_BIEN.pdf). [Accessed: 22-Oct-2014].
- [90] E. Bou-Harb, C. Fachkha, M. Pourzandi, M. Debbabi, and C. Assi, "Communication security for smart grid distribution networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 51, no. 1, pp. 42–49, Jan. 2013.