

# FiWi Network Planning for Smart Metering Based on Multistage Stochastic Programming

A. Peralta, E. Inga, R. Hincapié, *Member, IEEE*

**Abstract**— This article presents a novel model of mixed integer linear programming (MILP) to conduct network planning (Fiber–Wireless–FiWi) that along a timeline space facilitates growth, expansion and scalability of resources involved in communications network, traditionally used in cellular telephony, and is possible that extends as a multiservice network to provide smart metering, as is the case in Advanced Metering Infrastructure (AMI) in Smart Grid, thus optimizing their infrastructure and minimizing investment costs. This paper proposes a hybrid architecture (fiber optic-wireless networks) with realistic approaches to planning and scalability considerations under scenarios that present uncertainty in the evolution of consumer demand, both for primary users of cell phone and smart metering as a secondary user. We propose a model for network planning based on Multistage Stochastic Programming (MSP) with a growth in demand for stochastic users and FiWi networks scalability through expected maximum benefit for their investment. The approach of this article shows that it is possible to design real FiWi large-scale networks under a cost-effective evolution considering a scheme appropriate growth in the timeline.

**Keywords**— smart grid, advanced metering infrastructure, scalability, network planning, fiwi network, multistage stochastic programming, optimization.

## I. INTRODUCCION

EN la infraestructura de medición avanzada (AMI) etapa fundamental dentro de una red eléctrica inteligente, se requiere de una red de comunicaciones robusta y madura que permita cubrir en primer lugar la demanda de clientes del sistema eléctrico los mismo que deben ser considerados dentro del diseño y planificación de AMI a largo plazo. Esta situación advierte un problema de escalabilidad en la planeación y crecimiento de la red de comunicaciones para cubrir con medición inteligente a usuarios del sistema eléctrico pero que a posterior podría incrementar aún más la demanda debido a sensores provenientes de clientes de otros servicios como: agua, gas, microredes renovables, etc. Por lo tanto, se prevé que la red de comunicaciones sea flexible, minimizando de esta manera el impacto económico por inversión en este tipo de despliegues, pero considerando los beneficios a las empresas encargadas de cada servicio y a los clientes-consumidores del suministro.

Entonces para minimizar el impacto por el crecimiento de medición inteligente se propone en este trabajo reutilizar la

infraestructura de telefonía celular anteriormente analizado en [1], es decir incluyendo un nuevo usuario celular con cero movilidad pero que requiere calidad de servicio, eficiencia y confiabilidad en el traslado de la información en tiempo real. De esta manera minimizamos los costos de inversión provenientes de una infraestructura nueva que podría generarse al desplegar una tecnología diferente para formar una red de sensores de electricidad, agua, gas, etc, dicha infraestructura puede ser asumida como una unidad de negocio adicional de un operador primario celular o a través de una estrategia de negocio diferentes para ser considerada como un operador secundario dedicado a tareas de AMI como un operador móvil de red virtual MVNO [2][3][4].

En este punto lo propuesto hasta el momento incrementaría una demanda considerable a la red, pero adicionalmente debe ser considerado el crecimiento celular y la inclusión de nuevos sensores que emplean esta tecnología, por lo que minimizar el costo de la infraestructura inicial no es el único problema también se debe tener en cuenta la demanda de crecimiento global de la red, la misma que debe satisfacer tanto al operador primario de la red como al cliente de cualquiera de los multi-servicios que podrían derivarse del servicio primario.

De esta manera el trabajo considera una red FiWi (Fibra óptica–Inalámbrica) [5] que permita articular la escalabilidad de la infraestructura de forma global, la misma que se divide en dos etapas. La primera que es la red inalámbrica, considera una red heterogénea con tecnología celular y/o IEEE 802.15.4g [6][7] para llevar la información proveniente de los medidores inteligentes hasta puntos de agregación de datos universales denominados UDAPs (Universal Data Aggregation Point) y que facilita el intercambio bidireccional de información proveniente de medidores inteligentes con las estaciones base celular y esta a su vez con las empresas de distribución eléctrica [8][9], para la planeación de red inalámbrica se ha planteado un problema con incertidumbre según el crecimiento de la demanda a través de programación estocástica multi-etapa (MSP) y presentada en [10].

La segunda etapa y aporte de este trabajo es adicionar el backhaul [11] de fibra óptica para la interconexión de UDAPs o estaciones base que se incrementará para satisfacer la demanda según se presenten los requerimientos, es aquí donde el modelo matemático de optimización considera el despliegue de la red, bajo una planificación y escalabilidad a lo largo del tiempo y espacio. Así, el operador primario puede maximizar su ganancia con la inversión necesaria sin descartar la calidad de servicio de sus múltiples usuarios primarios o secundarios [12][13][14][15].

La Fig. 1 advierte el esquema requerido para cubrir la demanda de diferentes servicios a través de la infraestructura

A. Peralta, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador, aperaltas@ups.edu.ec

E. Inga, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, einga@ups.edu.ec

R. Hincapié, Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, roberto.hincapie@upb.edu.co

de medición avanzada a largo plazo, considerando al operador primario celular como la base de la infraestructura. El problema propuesto, no es trivial, debido a la toma de decisiones para lograr la escalabilidad con el mínimo riesgo de inversión; por lo tanto, si realizamos un corte en un instante de tiempo están involucrados recursos inalámbricos y de fibra óptica para permitir el intercambio de información de los datos medidos y de control, garantizando la calidad y seguridad para cada uno de los diferentes usuarios.

Ahora que sucede cuando la demanda reflejada como una tasa de crecimiento en la población de clientes beneficiarios de los servicios ofertados por la red inteligente, pasa de un instante de tiempo  $t_k$  hacia  $t_{k+1}$ , donde pueden presentarse diferentes circunstancias que dan gran incertidumbre en la toma de decisiones, es importante por ende disponer de una herramienta que pueda medir el riesgo o beneficio que devuelve establecer ciertas políticas al momento de expandir la infraestructura de comunicaciones [10][16][17].

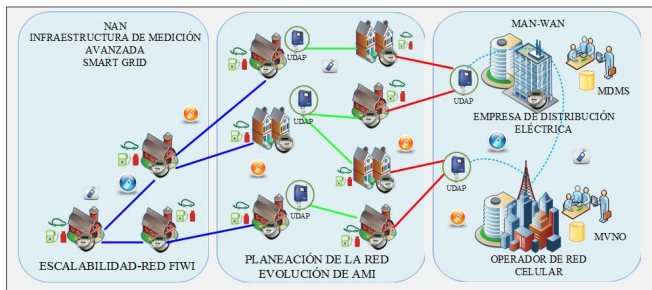


Figura 1. Planeación de Red FiWi para la Infraestructura de Medición Avanzada – Smart Grid.

En adelante este artículo se organiza de la siguiente manera. En la Sección II se explican las características principales de la red FiWi para AMI. La Sección III presenta la formulación del problema. La Sección IV muestra el análisis de los resultados. Finalmente, se pueden encontrar las conclusiones en la Sección V.

## II. REDES FIWI Y LA INFRAESTRUCTURA DE MEDICIÓN AVANZADA EN SMART GRID

Dentro del concepto de la infraestructura de medición avanzada, se debe determinar las subetapas que conforman la topología de red para la planificación de infraestructura; así, tenemos una red de área vecindaria conocida como NAN (neighborhood area network) [18][19] delimitada desde el medidor con un enlace uplink [20] del cliente hasta el concentrador UDAP de cada sector, conglomerado o cluster de clientes, para conformar NAN donde se puede usar tecnología celular como GPRS/LTE[21] o de corto alcance IEEE 802.15.4g por multisaltos[22] hasta completar la primera etapa. Posteriormente los diferentes UDAPs de barrios conforman una red de área metropolitana MAN (metropolitan area network), que a su vez dará paso a la red de área amplia WAN (wide area network) [23][24], pero entre NAN y MAN/WAN se puede plantear dos soluciones para zonas de límites; así, se puede seguir manteniendo una solución inalámbrica celular o IEEE 802.15.4g [25] de acuerdo a su cobertura, capacidad de cada UDAP respecto de

la ubicación de la estación base celular más cercana, pero cuando la demanda de información crece sustancialmente se propone un retorno de fibra óptica [26] [27] además de la interconexión de estaciones base celular normalmente dispuesta para telefonía.

De este escenario de topología podemos analizar que múltiples servicios podrían ser incluidos dentro del concepto de una red eléctrica inteligente por lo que actores como microredes renovables, centro de carga de vehículos eléctricos, vanets, gas, agua, tornarían un problema de expansión notablemente costosa y si a esta restricción se condiciona el crecimiento de la demanda de usuarios de telefonía se presentan retos y barreras para los operadores primarios que deben satisfacer los indicadores de calidad y estándares de servicio que no debe afectar la calidad de ninguno de los servicios que empleen la red primaria [28].

En la etapa inalámbrica existe alternativa que han permitido minimizar el impacto bajo en concepto de radio cognitiva [29][30][31], detectando lo huecos blancos del espectro primario y entregándoles a los usuarios secundario de manera oportunista [32]. A esto se suma que el transporte por multisalto con tecnologías de corto alcance como IEEE 802.15.4g permite el arribo de información con menor inversión que por uso total de la red celular.

Entonces si se agrupa toda la demanda de los diversos clientes en el operador primario se presenta un problema con alto riesgo de inversión, ya que se debe desplegar una red óptima sin sobredimensionar la red y manteniendo la rentabilidad del negocio, pero que permita llegar a una escalabilidad planificada a lo largo del tiempo con el mínimo riesgo de inversión en infraestructura, permitiendo de esta manera satisfacer a los clientes y la rentabilidad del negocio.

## III. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección se presenta como formular y llevar adelante el problema de planeación escalable de redes FiWi en forma estocástica; se inicia con los datos de entrada  $A$ ) que es dado por el árbol de proyección estocástico multietapa (Multistage Stochastic Projection Tree, MSPT), luego en  $B$ ) se hace una descripción detallada del problema de optimización.

### A) Datos de entrada al modelo MILP

La información previa que ingresa al modelo de optimización es suministrada por el MSPT, el cual es generado por tres etapas previas descritas a continuación.

La primera etapa depende de los datos estadísticos disponibles, se elige el método estocástico adecuado, por ejemplo para realizar programación en base a la demanda, se puede utilizar un movimiento browniano, donde desde el primer año hacia adelante se despliegan alternativas con incertidumbre; por otro lado, si la incertidumbre generada es a partir de un tiempo  $t_k$  en adelante se puede optar por Monte Carlo, y finalmente otra alternativa para proyectar población es mediante procesos de nacimiento y muerte. De esta manera con el modelo adecuado elegido se genera una gran cantidad de escenarios para todos los años que se requiera, esto se presenta gráficamente en la columna 1 de la Fig. 2.

La segunda etapa, hace una reducción de los escenarios generados, mediante la utilización de métricas en el espacio de las funciones de probabilidad, en este apartado se puede hacer uso de la herramienta SCENRED-2, que se encuentra en el software matemático (General Algebraic Modeling System, GAMS), mayor información de los algoritmos de reducción se puede encontrar en forma detallada en [33].

En la tercera etapa, se obtiene la información necesaria en cada nodo  $n$  del árbol de programación estocástica multietapa que será considerada en el modelo de optimización, esto se lo puede apreciar en la columna derecha de la Fig.2. En cada trayecto del MSPT, se pasa de un estado  $s$  a un  $s'$ , esto está dado por la probabilidad condicionada  $\mathbb{P}_r(s' | s, a)$ , de ciertas acciones  $a$  reflejadas en la topología desplegada en cada nodo  $D\{d(n_1), d(n_2), \dots, d(n_k)\}$  de MSPT para la arquitectura FiWi, y que devuelven la acumulación de beneficios esperados mismos que a la vez presentan una medida de riesgo e incertidumbre, estas son condiciones que establece el mundo real cuando hay que tomar decisiones de planificación y escalabilidad...

$$\dots E\{\mathcal{R}\} = \sum_{i,j,k,l,m} \mathcal{R}(i, j, k, l, m) * \mathbb{P}_r(i, j, k, l, m).$$

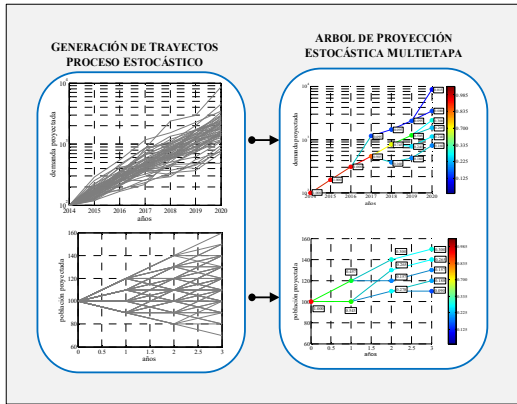


Figura 2. Generación del árbol de proyección estocástica multietapa MSPT.

**B) Descripción del Problema de Optimización MILP**

Dada una área de planeación  $\mathbb{A}$  conformada por usuarios primarios de red celular y usuarios secundarios provenientes de AMI que están conglomerados a través de UDAPs, situaciones que a continuación estarán representados por la variable binaria  $Xs_j^n$  cuyo valor es uno si un  $j$ -ésimo UDAP es servido y cubierto dentro de un estado  $s$  en un nodo  $n$  de MSPT, o cero por lo contrario; la información de los  $Xs_j^n$  se escala en dirección a las radio bases GPRS/LTE que forman un conjunto de celdas candidatas  $\mathbb{C}$  para la cobertura, siempre y cuando se cumplan restricciones en los umbrales de energía que sostengan la conectividad en los enlaces inalámbricos, cuando una  $i$ -ésima radio base se activa en un estado  $s$  dentro de un nodo  $n$  de MSTP, la variable  $Y_i^n$  toma el valor de uno o cero por lo contrario, vale aclarar que cualquier celda candidata activa en un nodo padre  $p(n)$  de MSPT se mantiene así cuando evoluciona de un tiempo  $t_k$  hacia un tiempo  $t_{k+1}$ , lo que sí es posible realizar, son actualizaciones tecnológicas en las radio bases, así en lugar de mantener equipos que soporten 4G-LTE se puede hacer un reemplazo por equipos que soporten 5G pero sin perder el sitio físico-espacial que

estuvo ya activo.

Todas las radio bases activas incorporan un Gateway que permite migrar la información a gran velocidad por Unidades de Red Ópticas (Optical Network Unit, ONU) a través de enlaces de fibra óptica que son seleccionados de un grafo  $G(\mathbb{V}, \mathbb{E})$ , configurados por una grilla de calles, avenidas e intersecciones que se encuentran dentro de  $\mathbb{A}$ , en consecuencia si un enlace se activa para el estado  $s$  en el nodo  $n$  de MSPT, la variable  $Z_{p,q}^n$  toma el valor de uno, o cero por lo contrario, todos los enlaces seleccionados forman una Red Óptica Pasiva (Pasive Optical Network, PON) en topología de árbol, cuyos flujos de información bidireccional van desde las ONUs hasta la Oficina Central donde se disponen de Terminales de Línea Óptica (Optical Line Terminal, OLT), no es objeto de este trabajo realizar un análisis de los equipos pasivos intermedios, como es el caso de los divisores ópticos y enrutadores ópticos, esto tiene su debida justificación dado que la mayor inversión en la construcción de la red PON está en el tendido del cable de fibra óptica [1]. Al igual que ocurre con las radio bases activas si un enlace  $Z_{p,q}^n$  de fibra óptica es seleccionado en un nodo padre  $p(n)$  de MSTP se mantiene así cuando evoluciona de un tiempo  $t_k$  hacia un tiempo  $t_{k+1}$ , lo que está permitido es realizar bifurcaciones para poder brindar backhaul a las nuevas celdas que se vayan activando a futuro, de esta forma se optimiza la reutilización de los medios de transmisión guiados como es la fibra óptica.

Entonces el modelo MILP busca maximizar el beneficio esperado por la inversión en el despliegue de la topología FiWi  $D^*$ :  $\text{argmax } E\{\mathcal{R}\}$ , en forma más amplia y detallada es lo que obtiene en la formulación del problema representado de forma matemática, de esta manera la función objetivo representada en (a) donde el término a la izquierda del primer corchete representa la probabilidad  $\mathbb{P}(n)$  de cada nodo de MSPT, la primera sumatoria a la derecha del primer corchete, calcula los ingresos percibidos por los servicios prestados a los usuarios activos  $Xs_j^n$  en cada nodo de MSPT, la segunda sumatoria con signo negativo da los costos CAPEX & OPEX de las celdas activas en cada nodo de MSPT, de igual forma la última sumatoria con signo negativo se encarga de tabular los costos de CAPEX & OPEX por cada metro de fibra óptica que contienen los enlaces  $Z_{p,q}^n$  activos de cada nodo en MSPT.

$$\begin{aligned} \text{(a). } & \max: \sum_{n \in \mathbb{N}} \mathbb{P}(n) \left[ \sum_{j \in \mathbb{A}} \mathbb{I}_j^n Xs_j^n - \sum_{i \in \mathbb{C}} (C_i^{\text{capex},n} (Y_i^n - Y_i^{p(n)}) + C_i^{\text{opex},n} Y_i^n) \dots \right. \\ & \left. \dots - \sum_{(p,q) \in \mathbb{E}} (C_{p,q}^{\text{capex},n} \mathbb{I}_{p,q}^n (Z_{p,q}^n - Z_{p,q}^{p(n)}) + C_{p,q}^{\text{opex},n} Z_{p,q}^n) \right] \\ \text{s.t. :} & \\ \text{(b). } & \sum_{i \in \mathbb{C}} Y_i^n \geq Xs_j^n & \forall n \in \mathbb{N}, j \in \mathbb{A} \\ \text{(c). } & Y_i^n \geq Y_i^{p(n)} & \forall n \in \mathbb{N}, i \in \mathbb{C} \\ \text{(d). } & \sum_{i \in \mathbb{C}} (Y_i^n - Y_i^{p(n)}) \leq \mathbb{K}^n & \forall n \in \mathbb{N} \\ \text{(e). } & \sum_{j \in \mathbb{A}} W_j^n Xs_j^n \geq \alpha^n |\mathbb{A}| C^n & \forall n \in \mathbb{N} \\ \text{(f). } & Z_{p,q}^n \geq Z_{p,q}^{p(n)} & \forall n \in \mathbb{N}, (p,q) \in \mathbb{E} \\ \text{(g). } & \sum_{q|(p,q) \in \mathbb{E}^{OUT}} Z_{p,q}^n - \sum_{q|(q,p) \in \mathbb{E}^{IN}} Z_{q,p}^n = \mathbb{R}_{p,i} Y_i^n & \mathbb{R}_{p,i} = \begin{cases} 1, \text{ si } i == OLT \\ -1, \text{ si } i == m \\ 0, \text{ si } i \neq OLT \wedge i \neq m \end{cases} \\ \text{(h). } & \sum_{m \in \mathbb{F}} Z_{p,q}^n \leq \mathcal{M} Z_{p,q}^n & \forall n \in \mathbb{N}, (p,q) \in \mathbb{E} \\ & Y \in \{0, 1\}^{\mathbb{N} \times \mathbb{C}}, Xs \in \{0, 1\}^{\mathbb{N} \times \mathbb{A}}, Z \in \{0, 1\}^{\mathbb{N} \times \mathbb{E} \times \mathbb{F}}, C \in \{0, 1\}^{\mathbb{N}} \end{aligned}$$

Para hacer cumplir la función objetivo se han armado las siguientes restricciones; la ecuación (b) asegura que cada

usuario tenga servicio y cobertura, las restricciones (c) y (f) evitan que radio bases, y enlaces de fibra óptica sean destruidos de los nodos padre hacia los nodos hijo en MSPT, se debe tomar en cuenta que el nodo padre raíz inicial en MSPT es reflejado mediante las variables  $Y_i^{p(r)} = 0 \wedge Z_{p,q}^{p(r)} = 0$ , en (d) se limita el número de celdas o radio bases construidas que pueden adicionarse a las ya existentes desde el nodo padre, por otro lado la restricción (e) controla y garantiza que la cobertura sea exitosa sobre el área de planeación  $A$  mediante los parámetros  $\alpha^n$ , coeficientes  $W_j^n$  y las variables  $C^n$ , las restricciones (b)–(e) controlan la parte de escalabilidad y cobertura inalámbrica (**W**ireless) del problema MILP, el siguiente bloque se encarga de asegurar un despliegue escalable del backhaul de fibra óptica (**F**iber), en (g) se busca asegurar un enrutamiento de todos los flujos provenientes de las  $m$  celdas activas–ONU’s hacia la OLT mediante trayectos de fibra que tengan una mínima distancia, finalmente (h) hace cumplir que los enlaces activos correspondan a cada uno de los  $m$  flujos, en la Tabla I se presenta un resumen de todas las variables, constantes, coeficientes y parámetros empleados en la representación del modelo MILP.

A saber si el modelo MILP propuesto se lo simplifica y relaja en algunas restricciones, queda el equivalente de un **Maximum Coverage Problem (MCP)**, en consecuencia se puede indicar que la complejidad presente en el problema de optimización propuesto es del orden **NP-Hard**.

TABLA I. VARIABLES Y COEFICIENTES EN EL MODELO DE OPTIMIZACIÓN.

Nombre	Dominio	Interpretación
<b>Conjuntos</b>		
$A$	$\subseteq \mathbb{R}^2$	Área de Planeación, normalmente dividida en pixeles
$C$	$\in \mathbb{Z}$	Conjunto de Celdas Candidatas para cobertura
<b>Escenario de Arbol</b>		
$N$		Conjunto de nodos en el escenario de MSPT
$p(n)$	$\in \mathbb{N}$	Nodo padre de $n$ en el escenario de MSPT
$P(n)$	$\in (0, 1]$	Probabilidad en el nodo $n$
<b>Parámetros y Coeficientes</b>		
$M$	$\in \mathbb{R}_{>0}$	Es un número suficientemente grande $>  m $ (flujos)
$K^n$	$\in \mathbb{Z}$	Límite de construcción por periodo de tiempo en nodo $n$
$\alpha^n$	$\in [0, 1]$	Parámetro para el requerimiento de cobertura
$W_j^n$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Coefficiente que da el peso sobre un pixel $j$ en el nodo $n$
$W_j^n$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Ingresos generados por pixel $j$ en el nodo $n$
$C_i^{capex,n}$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Costo Capital de la para celda $i$ en el nodo $n$
$C_i^{opex,n}$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Gasto de Operación para celda $i$ en el nodo $n$
$D_{p,q}$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Conjunto de distancias de los enlaces $p \rightarrow q$ en el nodo $n$
$C_{p,q}^{capex,n}$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Costo Capital del enlace $p \rightarrow q$ en el nodo $n$
$C_{p,q}^{opex,n}$	$\in \mathbb{R}_{\geq 0}$	Gasto de Operación del enlace $p \rightarrow q$ en el nodo $n$
<b>Variables de Decisión</b>		
$Y_i^n$	$\in \{0, 1\}$	Celda $i$ está activa en el nodo $n$
$X_{sj}^n$	$\in \{0, 1\}$	UDAP $j$ es servido por una celda activa en el nodo $n$
$Z_{p,q}^n$	$\in \{0, 1\}$	Enlace $p \rightarrow q$ está activo en el nodo $n$
$C^n$	$\in \{0, 1\}$	Cumplimiento de cobertura en nodo $n$

IV. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta sección para ejemplificar la gran utilidad de esta herramienta de planificación y decisión estocástica, se ha elegido proyectar una población de usuarios que representan conglomerados de UDAPs en una zona urbana georeferenciada, donde se encuentran agrupados usuarios primarios de la red celular en conjunto con usuarios

secundarios de AMI, para ello se irá desplegando la red FiWi en forma escalable sobre una línea de tiempo de tres años  $\{t_0, t_1, t_2\}$ , el MSPT para el año  $t_2$  presenta cuatro escenarios cada uno de ellos tiene cierto grado de incertidumbre sobre el cálculo del beneficio esperado, esto se lo puede apreciar mejor en la Fig. 3.

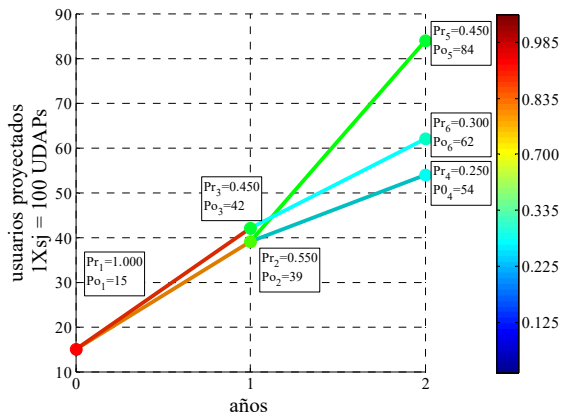


Figura 3. MSPT como insumo de entrada al MILP.

El área de planeación ha sido analizada sobre un entorno urbano, en la Fig. 4 se presenta todos los posibles sitios candidatos para la ubicación de las celdas o radios bases; el grafo para el despliegue de fibra óptica lo conforman calles, avenidas y sus intersecciones, en adición se colocan los potenciales usuarios que podrían tenerse en el año  $\{t_2\}$ .

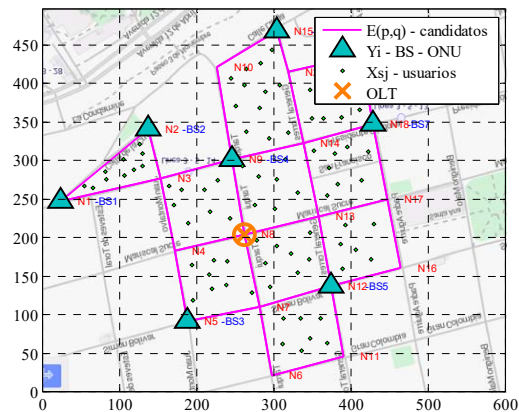


Figura 4. Zona Urbana Colonial - Cuenca–Ecuador, ubicación de sitios candidatos y potenciales usuarios esperados al año  $\{t_2\}$ .

En la Tabla II se coloca un resumen de los resultados obtenidos de las simulaciones efectuadas al MILP.

TABLA II. RESULTADOS OBTENIDOS DEL MILP.

Nº Iterac.	$E\{\mathbb{R}\}$ \$/año	Gap	Incremento Estocástico vs. Determinístico
2676	\$ 1'711.500	1,300 %	10,45 %
125042	\$ 1'712.700	1,200 %	11,65 %
342542	\$ 1'714.600	1,100 %	12,70 %
446347	\$ 1'715.000	1,090 %	14,05 %
<b>627834</b>	<b>\$ 1'715.300</b>	<b>1,085 %</b>	<b>14,36 %</b>
Exactitud Numérica Final $\ *\  = 4,44089e-16$			

Como se puede verificar en la Tabla II, el máximo beneficio esperado que se encuentra en la fila cinco resaltado con negrita logra un incremento de un **14,36 %** respecto de

haber resuelto el problema en forma determinística. Finalmente, para un mejor entendimiento de cómo evoluciona la escalabilidad en el despliegue de la red FiWi se presenta en la Fig. 5 el resultado de un trayecto espacio-temporal del MSPT.

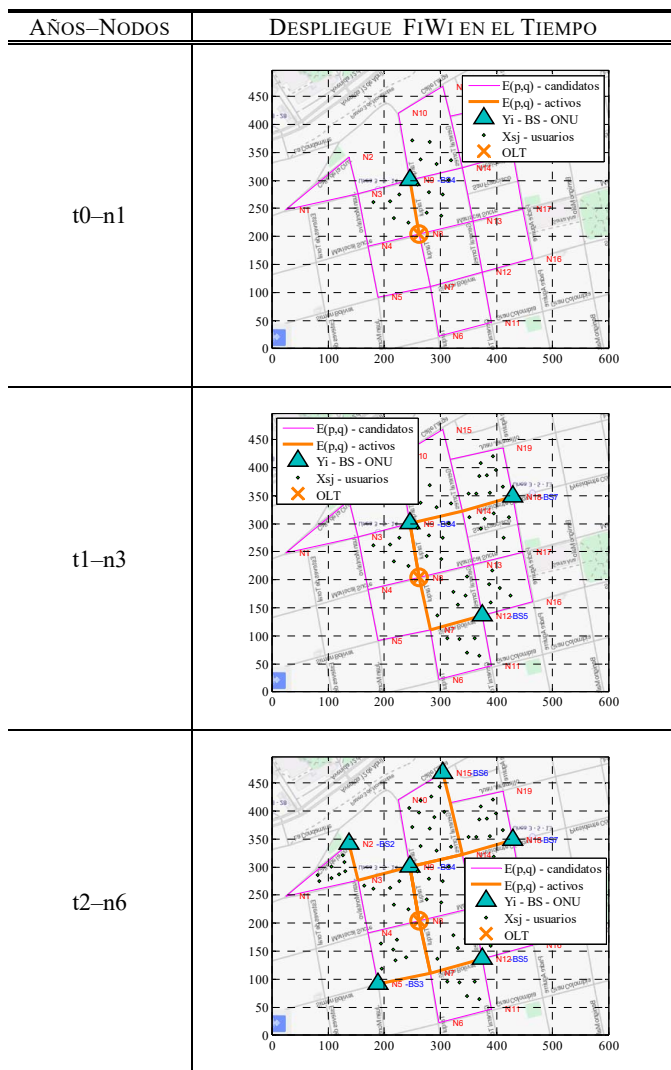


Figura 5. Resultado del despliegue y escalabilidad de la red FiWi, sobre un trayecto del MSPT.

La Fig. 6 advierte que con ingresos mensuales inferiores a tres dólares mensuales percibidos por cada usuario de la red FiWi el operador de la red pierde por ofertar servicio y conectividad a cada conglomerado de los UDAPs, ya con cifras superiores a los tres dólares la relación de retorno por el despliegue de la red FiWi se vuelve factible, de hecho las simulaciones obtenidas en la Tabla II fueron efectuadas con un ingreso mensual por usuario de 18 dólares, lo cual retorna un beneficio anual por cada UDAP de \$17.150 en la Fig. 6 son los círculos de color magenta que están en línea de trazos.

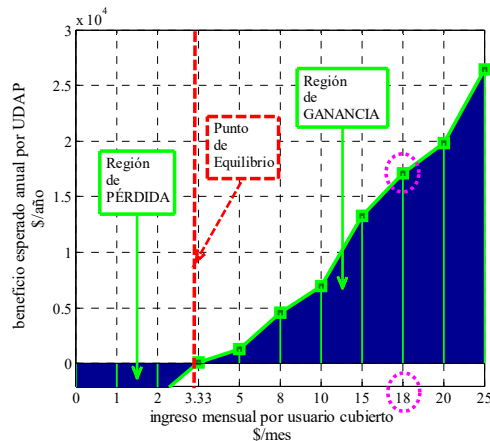


Figura 6. Punto de Equilibrio – Región de Ganancia – Región de Pérdida.

### V. CONCLUSIONES Y FUTUROS TRABAJOS

El principal aporte de este trabajo, presenta un nuevo modelo MILP matemático de optimización, mediante el uso de la programación estocástica multietapa, y que está destinado a resolver un problema que alcanza un grado de complejidad NP-Hard, sin embargo esto resulta idóneo como una herramienta para toma de decisiones al momento de planificar una red de comunicaciones con un alto grado de incertidumbre en el crecimiento de su demanda según diferentes servicios que se podrían anclar sobre la red celular. Este trabajo está enfocado a lograr una planificación escalable de la red de fibra óptica empleada como backhaul y la red inalámbrica formando una red híbrida FiWi para AMI sobre una línea de tiempo-espacio.

Al ser un problema estocástico da la posibilidad y alternativa de medir el riesgo o beneficio jugando con acciones y políticas tomadas en cada escenario, ello hace que la solución llegue desde varios puntos de vista y no desde uno solo, como es el caso de un modelo determinista esto lo hemos demostrado en los resultados obtenidos donde se alcanzó hasta un 14.36 % de incremento resolviendo en forma estocástica.

El árbol de decisión permite encontrar los puntos de quiebre para tomar acciones y políticas que marcan nuevas actualizaciones de la red en cada nodo del MSPT, un escenario real de la red celular, considerando la cobertura y capacidad de las estaciones base para asumir la demanda presentada en un instante de tiempo  $t_k$ , situación que permite modelar el incremento de la capacidad de la estación base mediante actualizaciones de la tecnología que se decida desplegar pero sin perder los emplazamientos físicos que ya han sido construidos, caso similar ocurre con los ductos, zanjas o canalizaciones construidas para el tendido de fibra óptica. La evolución a largo plazo sea de población o demanda se ha modelado como un proceso netamente estocástico continuo, generando una gran cantidad de escenarios, pero reducido a un MSPT.

Para futuros trabajos se piensa generar heurísticas que permitan, por un lado desplegar una gran cantidad de nodos y así simular áreas de planificación muy grandes; adicionalmente, se buscaría reducir los tiempos de procesamiento y con ello llegar a posibles soluciones con una brecha muy corta de aproximación a la región cóncava-conexa donde se establece la solución óptima.

## REFERENCIAS

- [1] A. Peralta-Sevilla, E. Inga, R. Cumbal, and R. Hincapié, "Optimum Deployment of FiWi Networks using Wireless Sensors based on Universal Data Aggregation Points," *Commun. Comput. (COLCOM), 2015 IEEE Colomb. Conf.*, 2015.
- [2] J. Bae, E. Beigman, R. Berry, M. L. Honig, and R. Vohra, "Incentives and resource sharing in spectrum commons," *New Front. Dyn. Spectr. Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symp.*, pp. 261–270, 2008.
- [3] L. Mastroeni and M. Naldi, "Spectrum reservation options for Mobile Virtual Network Operators," in *Next Generation Internet (NGI), 2010 6th EURO-NF Conference on - IEEE*, 2010, pp. 1–8.
- [4] 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.
- [5] Y. Liu, L. Guo, B. Gong, R. Ma, X. Gong, L. Zhang, and J. Yang, "Green survivability in Fiber-Wireless (FiWi) broadband access network," *Opt. Fiber Technol.*, vol. 18, no. 2, pp. 68–80, 2012.
- [6] S. Céspedes, A. a. Cárdenas, and T. Iwao, "Comparison of data forwarding mechanisms for AMI networks," *Innov. Smart Grid Technol. (ISGT), 2012 IEEE PES*, 2012.
- [7] D. F. R. Hincapié and S. Céspedes, "Evaluation of mesh-under and route-over routing strategies in AMI systems," in *Communications Conference (COLCOM), 2012 IEEE Colombian*, 2012, pp. 1–6.
- [8] E. Inga, R. Hincapié, C. Suárez, and G. Arévalo, "Shortest Path for Optimal Routing on Advanced Metering Infrastructure using Cellular Networks," *Commun. Comput. (COLCOM), 2015 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [9] E. Inga, G. Arevalo, and R. Hincapié, "Optimal Deployment of Cellular Networks for Advanced Measurement Infrastructure in Smart Grid," *Commun. Comput. (COLCOM), 2014 IEEE Colomb. Conf.*, pp. 1–6, 2014.
- [10] A. Eisenblätter and J. Schweiger, "Multistage stochastic programming in strategic telecommunication network planning," *Comput. Manag. Sci.*, vol. 9, no. 3, pp. 303–321, 2012.
- [11] A. G. Peralta-Sevilla, F. Amaya-Fernandez, and R. Hincapié, "Multiservice hybrid WDM/TDM-PON dimensioning using a heuristic method," in *2014 IEEE Colombian Conference on Communications and Computing (COLCOM)*, 2014, pp. 1–5.
- [12] S. Zhao, Q. Zhu, and H. Zhu, "Demand responsive pricing competition of two MVNOs in dynamic spectrum access," in *Communication Technology (ICCT), 2010 12th IEEE International Conference on*, 2010, pp. 958–961.
- [13] L. Duan, J. Huang, and B. Shou, "Cognitive Mobile Virtual Network Operator: Investment and Pricing with Supply Uncertainty," in *IEEE INFOCOM 2010*, 2010, pp. 1–9.
- [14] X. Sheng, J. Tang, C. Gao, W. Zhang, and C. Wang, "Leveraging load migration and base station consolidation for green communications in virtualized Cognitive Radio Networks," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, 2013, pp. 1267–1275.
- [15] S. Li and J. Huang, "Dynamic Profit Maximization of Cognitive Mobile Virtual Network Operator," *IEEE Trans. Mob. Comput.*, vol. 13, no. 3, pp. 526–540, 2013.
- [16] V. Kozmik and D. P. Morton, "Evaluating policies in risk-averse multi-stage stochastic programming," *Math. Program.*, 2014.
- [17] R. A. Liu, Chang; Berry, "Investing and Price Competition for Multiple Bands of Unlicensed Spectrum," *Comput. Commun. Work. (INFOCOM WKSHPs), 2015 IEEE Conf.*, pp. 522–527, 2015.
- [18] R. Yu, Y. Zhang, and Y. Chen, "Hybrid spectrum access in cognitive Neighborhood Area Networks in the smart grid," in *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2012, pp. 1478–1483.
- [19] R. Yu, Y. Zhang, S. Gjessing, C. Yuen, S. Xie, and M. Guizani, "Cognitive radio based hierarchical communications infrastructure for smart grid," *IEEE Netw.*, vol. 25, no. 5, pp. 6–14, Oct. 2011.
- [20] R. Jianwei Huang; Subramanian, V.G.; Agrawal, R.; Berry, "Joint Scheduling and Resource Allocation in Uplink OFDM Systems," *Sel. Areas Commun. IEEE J.*, vol. 27, no. 2, pp. 226–234, 2009.
- [21] U. Challita, L. Al-kanj, and Z. Dawy, "On LTE Cellular Network Planning under Demand Uncertainty," *Wirel. Commun. Netw. Conf. (WCNC), 2014 IEEE*, vol. 3, pp. 2103–2108, 2014.
- [22] C. Milling, S. Subramanian, S. Shakkottai, and R. Berry, "Routing Over Multi-Hop Wireless Networks with Non-Ergodic Mobility," *Ieee Infocom 2009*, pp. 2079–2087, 2009.
- [23] N. Ghazisaidi and M. Maier, "Fiber-wireless (FiWi) access networks: Challenges and opportunities," *IEEE Netw.*, vol. 25, no. 1, pp. 36–42, Jan. 2011.
- [24] B. Lin, J. Tapolcai, and P.-H. Ho, "Dimensioning and Site Planning of Integrated PON and Wireless Cooperative Networks for Fixed Mobile Convergence," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 9, pp. 4528–4538, Nov. 2011.
- [25] F. Aalamifar, G. N. Shirazi, M. Noori, and L. Lampe, "Cost-efficient data aggregation point placement for advanced metering infrastructure," in *Smart Grid Communications (SmartGridComm), 2014 IEEE International Conference on*, 2014, pp. 344–349.
- [26] M. Maier, M. Levesque, and L. Ivanescu, "NG-PONs 1 2 and beyond: the dawn of the uber-FiWi network," *IEEE Netw.*, vol. 26, no. 2, pp. 15–21, Mar. 2012.
- [27] B. Karimi and V. Nambodiri, "On the Capacity of a Wireless Backhaul for the Distribution Level of the Smart Grid," *IEEE Syst. J.*, vol. 8, no. 2, pp. 521–532, Jun. 2014.
- [28] T. Nguyen, H. Zhou, R. a. Berry, M. L. Honig, and R. Vohra, "The impact of additional unlicensed spectrum on wireless services competition," *New Front. Dyn. Spectr. Access Networks (DySPAN), 2011 IEEE Symp.*, pp. 146–155, 2011.
- [29] M. Vu, N. Devroye, M. Sharif, and V. Tarokh, "Scaling Laws of Cognitive Networks," *Cogn. Radio Oriented Wirel. Networks Commun. 2007. CrownCom 2007. 2nd Int. Conf.*, 2007.
- [30] V. Mai Vu; Devroye, N.; Tarokh, "On the Primary Exclusive Region of Cognitive Networks," *Wirel. Commun. IEEE Trans.*, vol. 8, no. 7, pp. 3380–3385, 2009.
- [31] R. Hincapié, J. Tang, G. Xue, and R. Bustamante, "QoS Routing in Wireless Mesh Networks with Cognitive Radios," in *Global Telecommunications Conference, 2008. IEEE GLOBECOM 2008. IEEE*, 2008, pp. 1–5.
- [32] R. Hincapié, L. Zhang, J. Tang, G. Xue, R. S. Wolff, and R. Bustamante, "Efficient Recovery Algorithms for Wireless Mesh Networks with Cognitive Radios," in *Communications, 2009. ICC '09. IEEE International Conference on*, 2009, pp. 1–5.
- [33] N. Grove-Kuska, H. Heitsch, and W. Romisch, "Scenario reduction and scenario tree construction for power management problems," in *Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna*, 2003, vol. 3, pp. 1–7.



**Arturo Peralta**, he graduated from the Universidad Politécnica Salesiana in 2002; receive the M.Sc. degree in telecommunication management from the Universidad Politécnica Salesiana in 2011. He is professor at the Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador. He is member of the Telecommunications Research Group (GITEL). He is currently working toward his Ph.D degree in Engineering with the Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia.



**Esteban Inga**, (Y'1976, M'08). He graduated from the Universidad Politécnica Salesiana; receive the M.Ed. degree in education and social development from the Universidad Tecnológica Equinoccial in 2008. He is currently working toward his Ph.D degree in Engineering with the Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, Medellín, and is the Coordinator of the GIREI Research Group. His research interest is cellular networks, advanced metering infrastructure, smart grid. He is a Professor of Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador and Director of Electrical Engineering.



**Roberto Hincapié**, He received the B.S. degree in electronic engineering, the M.S. degree in engineering, and the Ph.D. degree in engineering from the Universidad Pontificia Bolivariana, Medellín, Colombia, 1996, 2005, and 2009, respectively. He is currently an Assistant Professor of telecommunications engineering with the Universidad Pontificia Bolivariana, Colombia, Medellín and is the Director of the GIDATI Research Group. His work is based on mathematical modeling and simulation techniques. His research interests include resource allocation in wireless mesh networks, network planning, and tele-traffic engineering, with applications to quality of service and rural coverage.