

Milano Digital City: Planning the Municipal Wireless Network of Milano

Stefano Bregni, *Senior Member, IEEE*, Maurizio Décina, *Fellow, IEEE*, Paolo Giacomazzi and Alessandro Poli

Abstract— Planning municipal wireless access networks is a challenging task, since many optimization choices must be taken in large metropolitan areas while, in turn, the number of free variables is very large, on the order of several millions. The aim is to optimize the position of wireless access points, as well as their connection to the backbone network. This paper is focused on the "Milano Digital City" project, i.e. the municipal wireless access network of Milano. We formalized the problem of choosing appropriate access points' locations and connecting the wireless access network to the backbone network. We designed an optimization algorithm, based on a fast heuristic approach, and applied it to a real-world scenario: the 51-km² city area of Milano (Italy). The proposed heuristic algorithm was extended to support mobility. Results show that the additional cost for supporting user mobility is limited to few percent.

Keywords— Access networks, wireless networks, municipal networks, network planning.

I. INTRODUCCIÓN

LA PLANIFICACIÓN de las Redes de Acceso Inalámbrico Municipales (Municipal Wireless Access Networks, MWAN) se ha convertido en un tema relevante últimamente. A nivel mundial alrededor de 500 proyectos han sido iniciados [1], y el interés de las municipalidades en esta área está incrementando rápidamente, debido a los significativos e importantes servicios para los ciudadanos que permiten estas infraestructuras.

Una red municipal de acceso inalámbrico es una solución viable para proveer a la comunidad con una red de banda ancha pagando un costo de implementación relativamente bajo, comparado con las redes cableadas [2]. Aunque, el éxito de MWANs varía enormemente de una ciudad a la otra. En las ciudades, donde se ha implementado una adecuada planificación de un modelo de riesgo compartido entre el sector privado y el sector público, típicamente se obtiene un mayor éxito.

Muchos trabajos teóricos de las redes inalámbricas municipales se enfocan en aspectos económicos o sociales. En [3], el rol de las municipalidades como proveedoras de acceso inalámbrico de banda ancha es estudiado, y se presentan modelos de negocios actuales. El artículo [4] provee un marco de referencia de alto nivel, para guiar las comunidades que buscan implementar una MWAN, el cual consiste en tres pasos: identificación de metas, planificación e implementación. El artículo [5] analiza la motivación que impulsa la implementación de MWAN en las tres más grandes áreas metropolitanas de U.S.A., considerando estándares y la evolución de la tecnología. Una variedad de tecnologías y opciones para redes de

acceso inalámbrico son estudiadas en [6], adicional a los ejemplos implementados actualmente. Finalmente, el artículo [7] intenta estudiar la posibilidad de una MWAN en un contexto específico, explorando aspectos políticos y opciones tecnológicas; también es presentada una estimación de costos a grandes rasgos.

Sin embargo el tema de planificación de MWAN no es tratado en profundidad en la literatura actual, principalmente debido a la dificultad del problema mismo. Esta tarea compleja requiere la ubicación de los puntos de acceso y la conexión de las redes de acceso inalámbrico a la red backbone.

Este artículo formaliza el problema y presenta un algoritmo de optimización que minimiza el costo total de la infraestructura a ser implementada. Es estudiado un escenario real: 51 km² de área del centro de la ciudad de Milán. El artículo también sugiere una actualización de la metodología propuesta, con el fin de soportar la movilidad de los usuarios, e ilustra los resultados obtenidos mediante la introducción de soporte a la movilidad en un escenario real.

II. MILÁN CIUDAD DIGITAL: PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

El 15% de las compañías Italianas de Tecnologías de Información y Comunicaciones (ICT) se encuentran concentradas en Milán, como también el 40% de la investigación nacional, 37% de las patentes y 54% de las ganancias nacionales de la industria del diseño. Además, el 70 % de calles en el área metropolitana se encuentra cubierto con fibra óptica, así como el 60 % de edificios.

A. Antecedentes

En 2007, cuando Milán fue candidato para la Expo 2015 (finalmente asignado a Milán en marzo de 2008), la autoridad local para la Investigación y la Innovación comenzó el diseño de una red *MuniWireless* (Inalámbrica Municipal) basada en la explotación de la extensa cobertura en fibra óptica de la ciudad y las tecnologías de acceso inalámbrico. Este proyecto, denominado *Milano Città Digitale* (es decir, Milán Ciudad Digital), ha sido desarrollado en colaboración con el grupo de autores de este artículo en el Departamento de Electrónica e Información del Politecnico di Milano.

B. Primer Plano

El primer objetivo del proyecto "Milano Città Digitale" es definir la arquitectura, funcionalidades y componentes de servicios de la infraestructura de la red municipal. La red debe ser robusta, escalable y duradera. Debe ser capaz de soportar las nuevas tecnologías, que van desde el WiFi actual y 3G HSDPA (High Speed Downlink Packet Access) a los sistemas de 4ª generación, tales como WiMAX y LTE (Long Term Evolution).

La infraestructura municipal será la plataforma básica para proveer un amplio conjunto de servicios de valor agregado pa-

Los autores agradecen a la Ingeniera Antonia Castellar, Cartagena, Colombia, por traducir cuidadosamente al español el texto original.

S. Bregni, Senior Member, IEEE, M. Décina, Fellow, IEEE, P. Giacomazzi y A. Poli son en el Politecnico di Milano, Dep. de Electronica y Información, Milano, Italia. E-mail: {bregni, decina, giacomaz, poli}@elet.polimi.it.

ra los ciudadanos, por ejemplo: cámaras de vigilancia, información de movilidad, control ambiental, la telemedicina, el turismo, los servicios para los estudiantes y los ancianos o personas con discapacidad. Estos servicios requieren independencia de la plataforma de red y la posibilidad de garantizar rendimiento diferenciado y niveles de calidad en diferentes zonas de la ciudad.

En conclusión, los servicios prestados por la plataforma "Milano Città Digitale" se encuentran entre los principales objetivos de las actividades de modernización de la ciudad en curso. El Departamento de Sistemas de Información del municipio contribuye a la definición de la plataforma tecnológica para el aprovisionamiento de servicios.

El proyecto "Milano Città Digitale" se diferencia de otros proyectos MuniWireless nacionales por su especial atención a los servicios institucionales para la seguridad, el control de tráfico, medio ambiente y servicios sociales tales como las comunicaciones para los estudiantes y los ciudadanos más desfavorecidos, la asistencia a los ancianos, y así sucesivamente. Los servicios institucionales de la comunidad en la red se convertirán en los rasgos distintivos del municipio.

C. Infraestructura Subterránea y Terrestre

El proyecto técnico se basa en el concepto de explotación a máxima escala de la gran variedad de bienes infraestructurales de la Municipalidad de Milán en el área metropolitana, a saber:

- los postes del sistema de alumbrado público,
- las luces de la calle,
- la red de vigilancia de la zona metropolitana,
- la red de control de la empresa de transporte público (ATM),
- la red de fibra óptica Campus -II que conecta cerca de 800 edificios municipales,
- la red de fibra óptica de la Dirección de Transporte y Movilidad,
- la gran red de fibra óptica de Metroweb,
- la malla eléctrica A2A (la utilidad pública de energía) que pueden ser utilizada para transportar comunicaciones mediante cable eléctrico (PLC, Power Line Communications).

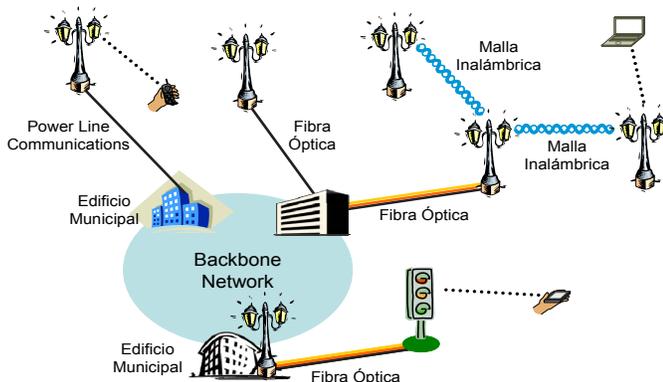


Figura 1. Interconexión de los puntos de acceso inalámbrico a la red backbone. Las conexiones pueden ser compartidas entre puntos de acceso a través de mallas inalámbricas.

Los postes del sistema de alumbrado público y las luces de la calle pueden ser usados para colgar los puntos de acceso

inalámbricos. El Backhauling (p.e. la conexión de las redes de acceso inalámbrico con la red backbone fija) puede ser obtenido con malla de redes inalámbricas, fibra óptica, o PLC (Fig. 1).

D. Planificación de la red y pruebas

En este complejo panorama, desarrollamos MUWI, una herramienta de software para el diseño de una infraestructura de red inalámbrica Municipal (MUNicipal WIREless network infrastructure) óptimo en termino de costos. MUWI optimiza ambos, la cobertura de radio con diferentes requerimientos de ancho de banda y el backhauling cableado, en las áreas metropolitanas de gran tamaño del orden de cientos de kilómetros cuadrados. MUWI minimiza el costo de toda la infraestructura y proporciona el diseño detallado y el presupuesto de la infraestructura. En la siguiente fase del proyecto, MUWI será utilizado para evaluar la relevancia y utilidad de los activos disponibles, así como la sensibilidad de los costos de los parámetros del sistema.

Las próximas actividades del proyecto "Milano Città Digitale" se centrarán específicamente en los servicios para la ciudad y la comunidad, ofreciendo un análisis detallado del portafolio de prioridades y necesidades, y definiendo los requisitos de la plataforma para el aprovisionamiento y manejo de los servicios.

Sistemas de prueba serán desplegados en dos áreas importantes de la ciudad, con el fin de presentar algunas muestras de los servicios. En las aéreas seleccionadas para las pruebas, el Municipio está completando la implementación de un activo importante: la red de fibra óptica y la infraestructura para la video-vigilancia pública.

En la zona de San Siro, en torno al estadio de fútbol, la infraestructura de fiber-wireless será usada para experimentar el control de servicios como la vigilancia de los vehículos de transporte público y la gestión del estacionamiento. En el área central de la Catedral, se pondrán a prueba servicios avanzados para el turismo (guía virtual, video-mapas interactivos, servicios de transporte aplicados al contexto, estacionamiento, restaurantes, etc).

III. EL PROBLEMA DE OPTIMIZACIÓN

El objetivo del algoritmo de optimización es la cobertura exterior de una determinada área metropolitana con una red inalámbrica a un costo mínimo. Todos los puntos de acceso seleccionados deben estar conectados a una red backbone.

A. Requerimientos Físicos

En primer lugar, los requisitos físicos de la red inalámbrica municipal han sido especificados formalmente.

- La conformación del área de referencia es descrita por una matriz del mapa del área metropolitana $\mathbf{M} = \{m_{ij}\}$, identificando, para cada punto latitud-longitud, la altura en metros de la construcción más alta en ese punto, desde una altura de referencia fija rh .
- Para cada punto ij en el mapa del área metropolitana, el mapa requerido de cobertura $\{c_{ij}^{req}\}$ identifica si un punto exterior debe estar cubierto por la red inalámbrica (1) o no (0). Un requerimiento del radio de cobertura cr^{req} (normalmente ~ 1) define el mínimo radio de puntos actualmente cubiertos por la red inalámbrica hasta el número total de puntos

requeridos a ser cubiertos.

Ya que diferentes áreas en el mapa metropolitano tienen diferentes peculiaridades ambientales, diferentes densidades de población y diferentes comportamientos de usuarios, la red inalámbrica resultante deben diseñarse de acuerdo a ello. Los distintos requerimientos son tenidos en cuenta al definir, como datos de entrada adicionales:

- el *mapa del radio de cobertura* $\mathbf{R} = \{r_{ij}\}$, definiendo, para cada punto, la distancia máxima desde cualquier punto de acceso a los puntos que debe cubrir.
- el *mapa del tamaño de grupo* $\mathbf{S} = \{s_{ij}\}$, que determina, para cada punto, el tamaño máximo de un grupo de puntos de acceso que deben compartir una conexión a la red backbone; el tamaño de este conjunto en gran medida afecta el ancho de banda disponible de la red inalámbrica;
- el *radio de backhaul* br , define la distancia máxima entre un par de puntos de acceso que pueden comunicarse recíprocamente, por lo que posiblemente forman una malla inalámbrica de *grupos*; los puntos de acceso en el mismo conjunto comparten una única conexión a la red backbone.

B. Recursos Tecnológicos

Los recursos de infraestructura se definen de la siguiente manera:

- Un conjunto disponible de *tecnologías de conexión a la red backbone* son dadas como entrada. Para cada tecnología de conexión ct_k , el *costo* c , es dado como una función de la longitud del enlace. Este costo también incluye un costo fijo para la activación de la conexión.
- Un conjunto de todos los *puntos de interconexión backbone* b_j disponibles es considerado. Un punto de interconexión puede ser conectado directamente a la red principal o a otro punto de interconexión. Para cada punto de interconexión, un conjunto de propiedades es definido, a saber, la posición, el tipo de interconexión, los costos, los puntos de interconexión con la red principal que se pueden alcanzar, etc.
- Un conjunto de todos los postes p_j en el área metropolitana en los que puede ser colgado un punto de acceso inalámbrico. Para cada poste, se definen propiedades, a saber, la posición, los puntos de interconexión con la red principal que se pueden alcanzar, la altura, los costos, etc.

C. Variables de Decision

El algoritmo de optimización debe decidir, entre otras cosas:

- si un poste se usa o no para colgar un punto de acceso;
- cada punto de acceso es asignado a un conjunto determinado de puntos de acceso, para cada conjunto, un punto de acceso es elegido para ser conectados a la red principal;
- si un punto de interconexión a la red principal se utiliza o no para recibir conexiones entrantes;
- que tecnología de conexión para cada punto de acceso,
- si los puntos de acceso están conectados directamente a la red principal o a otro punto de interconexión.

D. Línea de vista y evaluación de la Cobertura

En el mapa 3D del área, se dice que los puntos están en *línea de vista* cuando, por cada posición ij , la altura z de la línea recta está por encima del área en cuestión m_{ij} , es decir, no habrá obstáculos en el medio. Para hacer frente a problemas de redondeo y aproximación, esta restricción es sosegada, permi-

tiendo la existencia de una limitada longitud total ocupada por los obstáculos.

Por cada punto ij en el mapa del área metropolitana, el *mapa de cobertura* $C = \{c_{ij}\}$ identifica el número de puntos de acceso que son capaces de alcanzar y cubrir un punto específico. Un punto ij se dice que es cubierto por un punto de acceso colocado en un poste, si el punto en 3D está a la vista del punto situado en la parte superior del poste y la distancia entre los dos puntos no es mayor que el identificado por el mapa del radio de cobertura r_{ij} .

E. Restricciones Adicionales

También otras restricciones aplican, a saber, el ratio de cobertura, que todos los puntos de interconexión estén conectados, que la misma tecnología de conexión es utilizada en ambos lados, el número máximo de conexiones para cada punto, el número máximo de puntos de acceso por grupo, que cada punto de acceso no conectado a la red principal esté en línea de vista con otro punto de acceso, etc.

F. Función Objetivo

La función objetivo a minimizar es el costo total de la red inalámbrica municipal, es decir, la suma de los siguientes elementos:

- suma de los costes de conexión de los puntos de interconexión utilizados (en función del número de conexiones entrantes para cada tecnología, más el costo de la tecnología de conexión específica para la conexión de salida);
- suma de los costos de conexión de los puntos de interconexión utilizados que no están conectados directamente a la red principal;
- suma de los costos de conexión de los postes que cuelgan un punto de acceso;
- suma de los costos de conexión de los postes que tienen un punto de acceso conectado a la red backbone.

IV. ALGORITMO DE OPTIMIZACION

Nuestra metodología heurística para la planificación de la red municipal se compone de dos fases: a) *cobertura* inalámbrica del área designada; b) la *conexión* de puntos de acceso a la *red backbone*. Las dos fases son independientes. Sin embargo, mientras la fase a) explora todo el espacio de soluciones, también tiene en cuenta el impacto de sus decisiones sobre la función objetivo debido a la fase b).

A. Cobertura Inalámbrica

Este algoritmo tiene por objetivo encontrar un conjunto de postes para instalar los puntos de acceso, de modo que los requisitos de cobertura sean cumplidos. El algoritmo heurístico explora iterativamente el espacio de soluciones, con el objetivo de minimizar el costo total.

Los puntos de acceso deben ser agrupados en grupos, donde la malla de comunicación de la red inalámbrica es posible. A pesar de que la minimización de solapamientos entre la cobertura inalámbrica de distintos puntos de acceso no es un requisito, nuestro algoritmo también trata de forma implícita minimizar esas zonas.

B. Conexión la red principal

El objetivo de esta fase es identificar, en cada grupo, el pun-

to de acceso a conectar a un punto de interconexión y los puntos de interconexión a usar. También en este caso, el algoritmo heurístico iterativamente explora el espacio de soluciones, con el objetivo de minimizar el costo total.

V. RESULTADOS DE LA PLANIFICACIÓN: LA RED DE MILÁN

A. Escenario de Optimización

Nuestro algoritmo ha sido aplicado a un área rectangular de de 51-km² del centro de la ciudad de Milán. Dado que la información acerca de la altura de los edificios no está ampliamente disponible, la matriz del mapa del área **M** sólo discrimina entre los puntos donde hay una calle o un edificio (dos valores posibles). El mapa requerido de cobertura específica que todas las calles y todos los parques en el área deben ser cubiertos por la red inalámbrica (Fig. 2). El parámetro de requerimiento del radio de cobertura se estableció en $cr^{req} = 0,97$. El mapa del tamaño del grupo **S** se ha establecido a 3 en todos los puntos. El radio de backhaul ha sido establecido de forma segura a $br = 200$ m.

La tecnologías disponibles de conexión a la red backbone son: dos clases de *fibra óptica* (respectivamente suministradas por una compañía tercera o por el Ayuntamiento de Milán), *PLC (Power Line Communication)* y *conexión directa* con un enlace de red de área local. Una conexión directa es una conexión que se puede alcanzar con un enlace local, por ejemplo, cuando el punto de acceso está localizado en el mismo edificio que el punto de interconexión. El costo tercerizado de la fibra óptica es de 7 €/ m, mientras que la fibra óptica del Municipio de Milán es gratuita. Un enlace PLC tiene costos fijos de 95 €, representados por la instalación del cliente PLC, además de 480 € cada 150 m (para repetidores de señal, si el enlace es más largo de 150 m). Una conexión directa tiene costo fijo de 500 €.

Consideramos cuatro tipos de puntos de interconexión troncal, cada uno con los costos de mercado asociado:

- *Gabinetes de terceros*, propiedad de una empresa tercera (8 en la zona) y conectados directamente con la red backbone, en los cuales pueden terminar ilimitadas conexiones de Fibra óptica de terceros y 3 conexiones PLC;
- *Edificios CampusII* propiedad del municipio de Milán (319 en el área) y directamente conectados al backbone, y que pueden terminar conexiones ilimitadas de Fibra Óptica de terceros, 3 conexiones PLC y una conexión directa;
- *Instalaciones de Control de Tránsito Municipal*, propiedad del Municipio de Milán (582 en el área considerada), conectados directamente al backbone, en los que pueden terminar conexiones ilimitadas de Fibra Óptica Municipal y una Conexión Directa;
- *Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión*, propiedad de la Compañía Local de la Malla Eléctrica de Milán (uno por celda eléctrica, 778 en el area) no están conectados directamente al backbone, pueden llegar a cualquier gabinete de terceros y a cualquier edificio CampusII con la Fibra óptica de terceros y terminar 3 conexiones PLC.

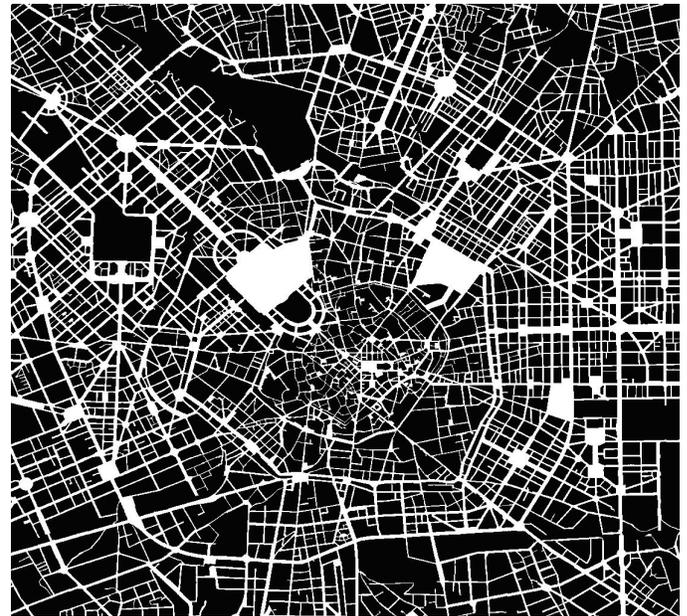


Figura 2. Mapa requerido de cobertura del área de 51-km² del centro de la ciudad de Milán en planificación (áreas a ser cubiertas en blanco).



Figura 3. Ejemplo de Planificación en MUWI del radio de cobertura y backhauling del área central de Milán (cerca de 5 km²).

Se consideraron tres tipos de postes:

- *postes de alumbrado público*, propiedad de la Compañía Local de la Malla Eléctrica de Milán (85.285 en el área), pueden llegar a cualquier Gabinete de terceros y a cualquier edificio CampusII con Fibra Óptica de Terceros, o a las Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión más cercana con tecnología PLC.
- *postes CampusII*, en los edificios CampusII, propiedad del Municipio de Milán (319 en el área considerada), pueden alcanzar los edificios CampusII con una conexión directa.

- *Postes de Semáforos y CCTV* (circuito cerrado de televisión), propiedad del Municipio de Milán (909 en el área considerada), pueden alcanzar a cualquier Instalación de Control de Tránsito Municipal con Fibra Óptica Municipal, a las Gabinetes Eléctricas de media a baja tensión más cercanas con la tecnología PLC, y una Instalación de Control de Tránsito Municipal con una Conexión Directa.

B. Resultados de la optimización

El optimizador MUWI se ejecutó en los escenarios descritos anteriormente, para diferentes valores de mapas del radio de cobertura. La figura 3 muestra un ejemplo de los resultados. Las optimizaciones se llevaron a cabo en los siguientes cinco escenarios.

1. TERCEROS: sólo con puntos de interconexión de Gabinetes de Terceros y postes de alumbrado público disponibles.
2. CAMP + TC: con Gabinetes de Terceros, Edificios CampusII, y puntos de interconexión de instalaciones de Control de Tráfico Municipal disponibles; con postes de alumbrado público, postes CampusII, postes de semáforos y CCTV disponibles.
3. TC + PLC: con Gabinetes de Terceros, puntos de interconexión de instalaciones de Control de Tráfico Municipal y Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión disponibles; postes de alumbrado público, postes de semáforos y CCTV disponibles.
4. CAMP + PLC: Gabinetes de Terceros, Edificios Campus-II y Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión disponibles; postes de alumbrado público, y postes CampusII disponibles.

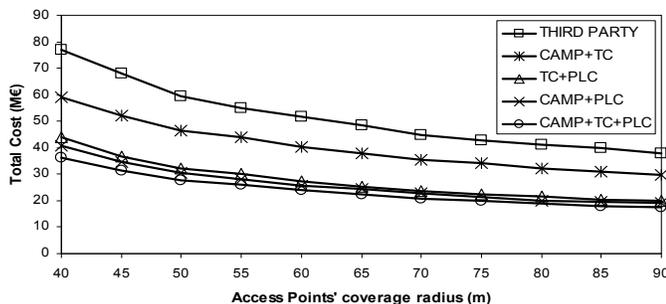


Figura 4. Costo total de las redes inalámbricas municipales en diferentes escenarios.

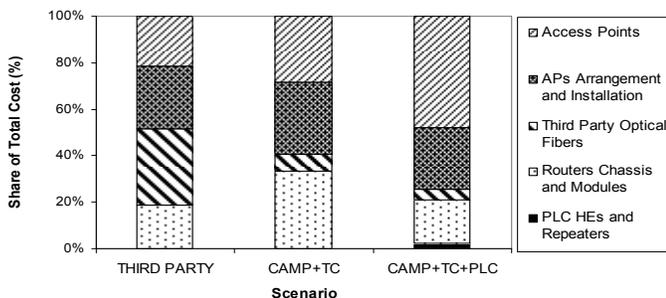


Figura 5. Costos compartidos de las soluciones en 3 escenarios (radio de cobertura = 50 m).

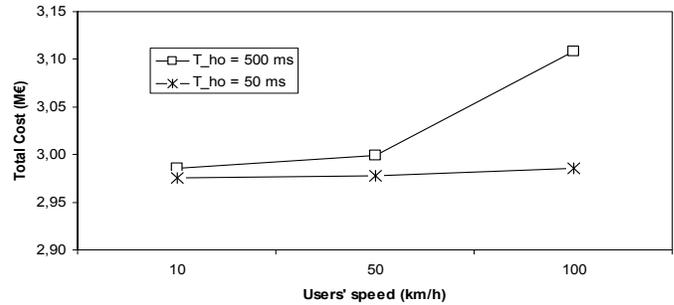


Figura 6. Costo total de la red inalámbrica municipal con diferentes requerimientos sobre movilidad de los usuarios y con diferentes tiempos de entrega.

5. CAMP + TC + PLC: Gabinetes de Terceros, edificios CampusII, instalaciones de Control de Tráfico Municipal y Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión disponibles; postes de alumbrado público, edificios CampusII, y postes de semáforos y CCTV disponibles (el escenario completo).

La ejecución del algoritmo para una optimización tomó cerca de 3 horas en un PC equipado con dos procesadores Intel Xeon quad-core E5440 2,83 GHz.

Los costes totales de la infraestructura de red inalámbrica municipal, evaluados por el algoritmo de optimización en los 5 escenarios considerados, se muestran en la figura. 4. El costo total se duplica cuando el radio de cobertura se reduce de 90 m a 40 m en todos los escenarios. Sin embargo, pequeños radios permiten ofrecer una mayor capacidad de ancho de banda por unidad de superficie, dependiendo de la tecnología inalámbrica específica. El uso de sólo infraestructura de compañías terceras incrementa mayormente el costo de la red. Cuando infraestructuras propietarias municipales preexistentes se tienen en cuenta (CAMP + escenario TC), se puede lograr una reducción de costos de alrededor del 20% en todas las opciones de radio de cobertura. La tecnología PLC tiene el mayor impacto positivo en la reducción de los costes de infraestructura, mientras que un 40% adicional (escenario CAMP + TC + PLC comparado con el escenario CAMP + TC) puede ser obtenido mediante la instalación de terminales PLC en Gabinetes Eléctricos de media a baja tensión designados y clientes PLC en los postes de la ciudad adecuadamente seleccionados.

Los costos compartidos de los dispositivos en tres diferentes variaciones de los escenarios, usando un radio de cobertura de 50 m, se presentan en la figura. 5. El uso infraestructuras de propiedad del municipio (escenarios CAMP + TC y TC CAMP + + PLC) permite una reducción de costos debido a una menor utilización de fibra óptica de terceros, de una cuota de 32% a 7% y 5%. El costo de los puntos de acceso es similar, en valor absoluto, en las tres variaciones de escenario. El uso de la tecnología PLC, con un impacto de 2% sólo en los costos, permite una reducción de los costes adicionales, debido a una menor cantidad de fibra óptica para conectarse a los puntos de acceso y que deben terminar en enrutadores.

La solución encontrada para el escenario completo (CAMP + TC + PLC), con un radio de cobertura de 50 m, tiene un costo total de 27.7M € y utiliza 6949 postes / puntos de acceso, de los cuales 6261 son postes de alumbrado público, 319 postes CampusII, y 369 postes de semáforos y CCTV. Un total de 2558 postes están conectados por medio de la tecnología PLC.

C. Soporte a la Movilidad

El soporte a la movilidad de los usuarios requiere que al trasladarse de un punto de acceso de un área de cobertura al área de cobertura de otro punto de acceso, los usuarios sean capaces de iniciar un procedimiento de traspaso de flujo de la comunicación desde el punto de acceso inicial al punto de acceso destino. Este procedimiento dura un tiempo determinado, llamado *tiempo de entrega*, por ejemplo 500 ms utilizando el protocolo 802.11 o 50 ms con el protocolo 802.11r [8].

Considerando la velocidad del cliente usuario, una mínima cantidad de solapamiento entre las áreas de cobertura adyacentes debe estar garantizada. Un usuario que se mueve a una velocidad v m / s requiere un solapamiento de las células adyacentes, con respecto a su trayectoria, en el orden de $d = v \cdot t_{HO}$ m, donde t_{HO} es el tiempo requerido para completar el procedimiento de entrega. Los puntos de acceso con radio de cobertura r deben ser colocados a una distancia $< 2r$, a fin de crear un solapamiento entre las áreas de cobertura. Nosotros lo llamamos planificación de distancia

$$pd = 2 \left(\sqrt{r^2 - L^2} - \frac{d}{2} \right) \quad (1)$$

donde L es el ancho máximo de las calles. Esta fórmula permite asegurar un solapamiento mínimo d en el peor casos de ubicación de puntos de acceso, y se mantiene aun cuando $L < r$.

Nuestro algoritmo de optimización actualizado con soporte a la movilidad se aplicó a un área rectangular de 7-km² del centro de la ciudad de Milán. Optimizaciones se han realizado utilizando variación del escenario CAMP + TC + PLC, con disponibilidad de todos los recursos tecnológicos y uso de radio de cobertura $r = 70$ m para todos los puntos. Las calles han sido clasificado en cuatro clases, con respecto a su anchura máxima (5m, 15m, 30m y 60m). Se ha utilizado el parámetro de requerimiento del radio cobertura igual a 0,97. El tamaño del mapa de grupos se ha fijado a 3 para todos los puntos. El radio de backhaul ha sido considerado en forma segura a 200 m.

Las optimizaciones se han llevado a cabo teniendo en cuenta diferentes velocidades v de los usuarios, y diferentes tiempos de traspaso t_{HO} . El coste total resultante de las soluciones se representa en la figura. 6.

Los resultados muestran que el costo adicional para soportar la movilidad de los usuarios se limita a unos pocos porcentajes. El costo adicional para permitir la entrega entre las células a una velocidad de 100 km/h, en comparación con la solución a una velocidad de 10 km/h, es del orden de +4% con un tiempo de entrega de 500 ms, y menos +1% con tiempo de entrega de 50 ms. La razón para el costo limitado requerido para el soporte a la movilidad de los usuarios se encuentra en las restricciones sobre las ubicaciones disponibles para la ubicación de los puntos de acceso: la disponibilidad de pocos espacios, obliga la elección de los postes a una distancia menor a la planificación de distancias pd permitida, por consiguiente, formando solapamiento de las áreas de cobertura.

VI. CONCLUSIONES

En este artículo se propuso un algoritmo de planificación de la Red Acceso Inalámbrico Municipal. El algoritmo se basa en un procedimiento heurístico iterativo de optimización, enca-

minado a minimizar los costos de las soluciones. El enfoque heurístico se ha aplicado debido a la gran complejidad del problema, que involucra millones de variables de decisión, las cuales deben ser tenidas en cuenta al mismo tiempo en una gran área metropolitana.

El algoritmo ha sido implementado como la herramienta de software MUWI y aplicado a escenarios representando a los 51 km² del área central de la ciudad de Milán. Se consideraron cinco variaciones del escenario.

Los resultados obtenidos muestran que la reutilización de la infraestructura preexistente, propiedad del municipio, permite la reducción de costos del orden del 20%. Una reducción adicional del 40% de costos puede ser obtenida con el uso extensivo de la tecnología PLC. El algoritmo heurístico propuesto se ha ampliado para soportar la movilidad. Los resultados muestran que el costo adicional para soportar la movilidad de los usuarios se limita a un bajo porcentaje.

REFERENCIAS

- [1] MuniWireless. Available: <http://www.muniwireless.com>.
- [2] Gibbons J., Ruth S., "Municipal Wi-Fi: big wave or wipeout?", IEEE Internet Computing, vol. 10(3), pp. 66-71, 2006.
- [3] Tapia A., Maitland C., Stone M., "Making IT work for municipalities: Building municipal wireless networks", Government Information Quarterly, Issues in Wireless Broadband, Elsevier, vol. 23(3-4), pp. 359-380, 2006.
- [4] Mandviwalla M. et al., "Municipal Broadband Wireless Networks", Communications of the ACM, vol. 51(2), pp. 72-80, 2008.
- [5] Reinwand C.C., "Municipal Broadband - The Evolution of Next Generation Wireless Networks", Proc. of IEEE Radio and Wireless Symposium, Long Beach, CA, USA, 2007.
- [6] Sirbu M., Lehr W., Gillett S., "Evolving wireless access technologies for municipal broadband", Government Information Quarterly, Issues in Wireless Broadband, Elsevier, vol. 23(3-4), pp. 480-502, 2006.
- [7] Abelém A.J.G., Stanton M.A., "Alternatives for community metropolitan networks for the major cities of the Amazon region of Brazil: the case of Belem", Proc. of 2nd Internat. Conf. on Broadband Networks (BROADNETS 2005), Boston, MA, USA 2005.
- [8] IEEE Std 802.11r-2008. Amendment to IEEE Std. 802.11-2007.



Stefano Bregni es Profesor Asociado del Politécnico di Milano, del curso de redes de telecomunicaciones. Nació en Milán, Italia, en 1965. En el 1990 se graduó en ingeniería de telecomunicaciones en el Politécnico di Milano. Desde 1991 trabaja en las áreas de SDH y sincronización de redes, con especial atención en medida de estabilidad del reloj, primero con SIRTI S.p.A. y, posteriormente con el consorcio CEFRIEL. En 1999, se unió al Politécnico di Milano como Profesor Asistente titular.

Ha sido Miembro Senior de IEEE desde 1999. Desde 2004, ha sido Conferencista Distinguido de la IEEE Communications Society, donde desempeña las siguientes posiciones oficiales: Vocal de la Junta de Gobernadores (2010 a 2012), Director de Educación (2008-2011), Presidente del Comité Técnico de Transmisión, Acceso y Sistemas Ópticos (TAOS) (2008-2009; Vicepresidente 2002-2003, 2006-2007; Secretario 2004-2005) y Vocal del comité Globecom/ICC Technical Content (2007-2010). Es o ha sido Vice-Presidente del Programa Técnico de IEEE GLOBECOM 2012, Presidente del Simposio GLOBECOM 2009 y Presidente de Simposio de otras ocho conferencias ICC/GLOBECOM. También fue Vicepresidente de la conferencia IEEE Optical Network Design and Modelling 2005. Editor del IEEE Global Communications Newsletter y Editor Asociado de la revista IEEE Communications Surveys and Tutorials) Fue Conferencista tutor en cuatro conferencias IEEE ICC y GLOBECOM. Sirvió en comités ETSI y UIT-T de sincronización de red digital.

Es autor de alrededor de 70 artículos, la mayoría en conferencias y revistas de la IEEE, y de los libros *Synchronization of Digital Telecommunications Networks* (Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2002; traducido y publicado en ruso por la Editorial MIR, Moscú, 2003) y *Sistemas de Transmisión PDH y Multiplexación SDH (Sistemi di trasmissione PDH e SDH - Multiplazione)*. Milano, Italia: McGraw-Hill, 2004). En la actualidad sus temas de investigación se enfocan principalmente en modelado de tráfico y redes ópticas.



Maurizio Dècina (M'73-SM'96-F'87) es profesor de telecomunicaciones en el Politecnico di Milano (Milán, Italia), Departamento de Electrónica e Información. Nació en 1943 en Pescasseroli, Italia, recibió el título de Doctorado en Ingeniería Electrónica de la Universidad de Roma, Italia, en 1966.

Comenzó su carrera en la Fundación Ugo Bordoni y en la Sede central de SIP/Telecom Italia en Roma, donde participó en la introducción de instalaciones de transmisión PCM. En 1976 ingresó en la Universidad de Roma, donde trabajó en el diseño de un cliente de acceso ISDN. De 1983 a 1987 fue director ejecutivo de I+D de Italtel en Milán, y contribuyó al desarrollo del sistema de conmutación digital Línea UT. En 1988 ingresó en el Politécnico de Milán, donde fue el fundador y director del consorcio de investigación y educación CEFRIEL hasta el año 2003, y ha participado activamente en investigación de conmutación ATM e IP. A comienzos de los 80 y 90, trabajó también como consultor científico de AT & T Bell Laboratories en Naperville, Illinois, EE.UU., en el área de exploración de paquetes de voz de banda ancha y de conmutación fotónica.

El Profesor Decina fue el Presidente de la Sociedad de Comunicaciones IEEE (Communications Society) en los años 1994-1995. In el año 1986 fue nombrado miembro del IEEE, en 1997 recibió el premio IEEE en Comunicaciones Internacionales, y en el año 2000, la IEEE le otorgó la (Third Millennium Medal Award. El profesor Decina fue miembro no ejecutivo del consejo de dirección de varias empresas de tecnologías de información y comunicaciones, tales como: Telecom Italia, Italtel, y Tiscali. También fue fundador de algunas recién creadas, tales como: Consultoría TIC y Securmatrics.



Paolo Giacomazzi Paolo Giacomazzi recibió el grado de maestría en ingeniería electrónica en el Politécnico de Milano en el año 1990 y el grado de especialización de CEFRIEL, Milán, en 1990. Se desempeñó como Teniente del Cuerpo de Ingenieros del Ejército Italiano desde 1990 hasta 1992. Desde abril 1992 hasta octubre 1998 ha estado como profesor asistente de redes de telecomunicaciones en el Politecnico di Milano. En 1995 ha sido investigador visitante del Centro de Comunicaciones Inalámbricas de

la Universidad de Mississippi, Oxford, MS. De noviembre 1998 a octubre 2001, ha sido profesor asociado de comunicaciones eléctricas y redes de telecomunicaciones en la Universidad de Messina. Desde noviembre de 2001, es profesor asociado de redes de telecomunicaciones en el Politecnico di Milano. Desde 1997, el Profesor Paolo Giacomazzi es un Editor Asociado de la revista IEEE Network y que actualmente se desempeña como Editor Asociado en el libro revisión de características de la revista IEEE Network.



Alessandro Poli Alessandro Poli nació en Cremona, Italia, en 1981. Recibió el título de pregrado y Máster en ciencias de Ingeniería de Computadores del Politecnico di Milano, Italia. En 2010 obtuvo el título de doctorado en Ingeniería de la Información del Departamento de Electrónica e Información del Politecnico di Milano. Sus intereses de investigación incluyen redes de videostreaming peer-to-peer, diseño de redes inalámbricas metropolitanas, optimización de la infraestructura tecnológica de información y comunicaciones, y descubrimiento de servicios semánticos.