

Eficiencia energética en las comunicaciones móviles

Silvina A. Grupalli^{1,2}, Miguel A. Cabrera², Martín G. Ferreyra³ y Fernando A. Miranda Bonomi²

(1) *Laboratorio de Instrumentación Industrial, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT).*

sgrupalli@herrera.unt.edu.ar

(2) *Laboratorio de Telecomunicaciones, Dpto. de Electricidad, Electrónica y Computación, FACET, UNT.*

(3) *Dpto. de Física, FACET, UNT.*

RESUMEN:

El pronóstico de mercado de las telecomunicaciones supone un aumento de clientes y con esto el despliegue de estaciones-base adicionales para las redes móviles de próxima generación. Así mismo, una consecuencia no deseada de este hecho es el crecimiento del consumo de energía de red inalámbrica que provocará un aumento en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) e impondrán costos de funcionamiento más elevados. La reducción de las emisiones de CO₂ sin duda está siendo considerada como un objetivo importante en el presente y en el futuro, y el diseño de los sistemas de comunicación no queda exento de esta situación. La mayoría de los avances en las comunicaciones de bajo consumo se centra en un aspecto estrechamente definido del ciclo de comunicación, como amplificadores de potencia o la incorporación de fuentes de energía renovables. En este trabajo se evalúan indicadores existentes para la medición de eficiencia energética que conducen a adaptaciones específicas. También se presenta un enfoque integral holístico que plantea la creación de una estrategia integral con la participación de todos los niveles del sistema de comunicación implementando técnicas como la eficiencia energética de capas cruzadas, la radio cognitiva y redes inteligentes. Este trabajo comunica resultados parciales de una propuesta para tesis doctoral a desarrollarse en la FACET-UNT.

I. INTRODUCCIÓN

La intersección de dos tendencias innegables, los crecientes costos de energía y un crecimiento en el uso de las comunicaciones, crea una necesidad urgente de abordar el desarrollo de las comunicaciones de bajo consumo. La red celular es el principal factor que contribuye al impacto ambiental de la industria móvil (Lamour, 2008) donde las emisiones medidas para el sector de las telecomunicaciones aportan un 1% de la huella de carbono del mundo (Singh, 2008) y en algunos mercados, los costos de energía representan hasta la mitad de los gastos de operación de un operador móvil. Recientemente, el término “Green Communications” o “Comunicaciones verdes” se presenta como una solución para hacer frente a los crecientes costos y al impacto ambiental de las telecomunicaciones. Sin embargo, hay una falta de definiciones explícitas de la eficiencia energética de telecomunicaciones inalámbricas

y las métricas para evaluar la mejora general y cuantificación de comunicaciones verdes.

Existen varios obstáculos que se deben superar para lograr verdaderamente importantes mejoras en la eficiencia energética en las comunicaciones.

II. LA NECESIDAD DE COMUNICACIONES VERDES

La demanda de Información y uso de la tecnología de las comunicaciones ha crecido a un ritmo alarmante en todo el mundo con un estimado de 6 mil millones de usuarios en 2007 (International Telecommunications Union, 2007). Con la introducción del iPhone y otros teléfonos inteligentes, Internet es ahora accesible desde cualquier plataforma móvil aumentando aún más la demanda de banda ancha. Para el 2015 se espera que el tráfico de enlace descendente desde teléfonos celulares crezca más de ocho veces respecto a los valores de referencia de 2007, aumentando de 56MB a 455MB por mes (Singh, 2008). Todos los años, nuevas estaciones base se despliegan para dar

servicio a 400 millones de nuevos suscriptores móviles en todo el mundo (Sistek, 2008). El efecto se ve agravado por el increíble crecimiento de las comunicaciones inalámbricas en el mundo, lo que convierte a la tecnología inalámbrica en una alternativa para reemplazar tecnologías instaladas sobre líneas cableadas tradicionales. Los sitios remotos prevalentes en las regiones en vías de desarrollo a menudo dependen de generadores de energía diesel ineficientes, ampliando la huella de carbono de la comunicación a un ritmo aún mayor. Una célula urbana de baja potencia requiere de 3 kW de potencia (70-80kWh de energía para una operación de 24 horas) y genera un estimado de 11 toneladas de dióxido de carbono (Walko, 2007). Muchas estaciones de base rurales utilizan significativamente más potencia debido a la mayor área de cobertura requerida por cada sitio.

Además, el creciente interés de los organismos reguladores de telecomunicaciones en temas de sostenibilidad ambiental y energética, es otra fuerza motriz para la implementación de comunicaciones verdes (Jarich, 2008).

Abordar esta cuestión tiene muchos beneficios para las partes interesadas, incluida la industria, los investigadores académicos y los organismos gubernamentales. La industria celular puede conseguir importantes ahorros de costos y reducir su impacto en el medio ambiente, los organismos gubernamentales dan cuenta de cumplimiento de las metas administrativas para el ahorro energético así como el desarrollo de normas y métricas, mientras que los investigadores pueden ampliar los límites de las tecnologías y de las teorías actuales. La investigación en este campo también tiene una gran sinergia con el desarrollo de una red inteligente dado el significativo impacto que las estaciones base celulares tienen sobre el uso de energía. El control de potencia coordinada de equipos celulares y balanceo de carga dinámico dentro de la red de energía puede conducir a mejoras de transformación, tanto en los sistemas de comunicaciones, como en los consumos de energía.

III. DEFINICIÓN DE LAS COMUNICACIONES VERDES, METRICAS Y ESCENARIOS

Existe una variación significativa en la definición de Comunicaciones verdes dentro de la comunidad de las telecomunicaciones y es más a menudo un término de marketing. En este trabajo, se define como comunicaciones verdes, a aquellas que persiguen una reducción de CO₂ en el marco del mantenimiento de la calidad de

servicio en función de las necesidades de cobertura, la capacidad y necesidades de los usuarios. Al comparar los diseños de sistemas y mejoras en los componentes de energía eficiente, la reducción de gases de efecto invernadero por sí sola no es suficiente. La calidad del servicio debe ser considerada al mismo tiempo que la eficiencia energética. Una difícil tarea, pero tal vez la más importante relacionada con las comunicaciones verdes es la cuantificación de la eficacia de los enfoques alternativos. Las métricas populares se centran principalmente en la medición de consumo de energía del sistema.

El factor de la eficiencia energética es importante cuando se utilizan fuentes de energía renovables. Sin indicadores que reflejen la eficiencia energética, las fuentes de energía renovables como la solar o la eólica no se pueden modelar con precisión.

La industria de la tecnología de la información (TI) ha asumido un papel de liderazgo en la mejora de la eficiencia energética en las tecnologías de comunicaciones e información del ecosistema. La asociación Green Grid de profesionales de TI ha publicado indicadores de eficiencia para centros de datos (Belady et al, 2008) y solicitó propuestas para las métricas mejoradas (Haas et al, 2009]. El informe inicial propuso la métrica de eficiencia Consumo de energía (PUE) y su recíproco, Datacenter Efficiency (DCE) para permitir a los operadores evaluar rápidamente la eficiencia energética de los centros de datos que consumen mucha energía. PUE representa el consumo total de energía del centro de datos dividida por la potencia utilizada sólo por los servidores, sistemas de almacenamiento y equipos de red ($PUE = \text{Total Facility Power} / \text{IT Equipment Power}$). Una clasificación PUE = 1 significa que la totalidad de la energía para el centro de datos se está utilizando para la infraestructura computacional y ninguna en la infraestructura no computacional como los sistemas de aire acondicionado. Si bien esta medida es un punto de partida, el enfoque es estrecho y sólo muestra una pequeña parte de la imagen completa. La desventaja principal es que no representa la eficiencia de los equipos de cómputo. Específicamente para los sistemas de comunicaciones, la eficiencia de los equipos de cómputo juega un papel importante en el consumo de energía del sistema.

Un método alternativo, quizás más apropiado para las telecomunicaciones, se esfuerza en cuantificar la eficiencia energética de un sistema computacional. En este método, se calcula la relación del consumo de energía del sistema de

comunicaciones en relación con el rendimiento del sistema computacional. Esto puede sonar como una solución intuitiva, sin embargo, cuantificar el rendimiento de la comunicación es mucho más difícil de cuantificar el rendimiento del hardware. Típicamente, en los centros de servidores o centros de datos, el rendimiento del hardware se mide mediante la observación de la utilización del procesador. Por ejemplo, un servidor típico consumirá entre 60% y 70% de su potencia total cuando funciona a bajos niveles de utilización del procesador. El aumento de la utilización del procesador tiene un impacto mínimo sobre el consumo de energía, sin embargo, que afecta a la proporción de consumo de energía para la utilización del procesador significativamente, aumentando así la eficiencia energética computacional. El reto, en la aplicación de esta medida a los sistemas de comunicación, es la forma de cuantificar adecuadamente el rendimiento.

En un nivel más estrictamente de métrica inalámbrica, la eficiencia espectral se refiere a la tasa de información que puede ser transmitida a través de un ancho de banda dado, y por lo general se expresa en bits por segundo por hertzio.

Desde un punto de vista más práctico y comercial, una métrica interesante para la industria celular es la utilización de los sitios celulares con respecto a la cantidad de llamadas o usuarios. Por ejemplo, la cantidad de consumo de energía por usuario en un sitio celular específico, proporciona información valiosa sobre la sobrecarga de hardware del sitio y la eficiencia en la conexión con ese punto. La ventaja de utilizar una métrica como esta, o cualquiera de las métricas de nivel físico, es que las modificaciones en las ondas que intervienen en la comunicación se reflejan en la métrica misma. Debido a la evolución de formas de onda y las normas de comunicación, estas se vuelven más eficientes, es decir, que pueden transportar más información y dar servicio a más usuarios para un ancho de banda determinado o un determinado conjunto de dispositivos de hardware.

La industria de las telecomunicaciones está abordando métricas y normas relacionadas con la eficiencia energética específicamente para los componentes de hardware celulares (Grigonis, 2009). Estos nuevos requisitos han llevado a la creación de metodologías de prueba para calcular una Clasificación de Eficiencia Energética para Equipos de Telecomunicaciones (TEEER) que permite la cuantificación de productos específicos desde una perspectiva de eficiencia energética [Verizon, 2009].

Por su parte, ATIS (Alliance for the Telecommunications Industry Solutions) enfocada en las normas de toda la industria, ha introducido la métrica TEER (Telecomunicaciones Energy Efficiency Ratio) para la eficiencia de la red de elementos. ATIS ha publicado normas para las necesidades generales, los equipos de transporte, y el equipo del servidor y están desarrollando normas para los routers, rectificadores de energía y equipos de acceso inalámbrico.

IV. AVANCES REALIZADOS EN LOS PUNTOS ESPECÍFICOS EN EL CICLO VIDA DE LAS COMUNICACIONES

La mayoría de las investigaciones realizadas en este campo están abordando la necesidad de eficiencia energética a nivel individual dentro de las capas de los protocolos de comunicación, así como a través de la arquitectura del sistema, la gestión operativa y los elementos físicos, tales como longitud de los cables de alimentación. Utilizando componentes reconfigurables es posible hacer la transición a las generaciones futuras de sistemas de comunicaciones con contribuciones al medio ambiente más razonables. Aunque beneficiosos, estos avances a menudo se aplican de forma aislada dentro del ciclo de vida de las comunicaciones.

El diseño de los sistemas de comunicaciones actuales sigue una arquitectura en capas heredadas del modelo OSI, que aísla una capa de otra. Si bien este punto de vista ha permitido una innovación técnica considerable, también crea un obstáculo potencial a los resultados de transformación. Por ejemplo, los ingenieros de la capa física raramente colaboran con los programadores de la capa MAC. Así mismo, reducir el uso de una estación base en un 15% puede resultar en ahorros de 39 millones de toneladas de CO₂ (Lamour, 2008), sin embargo estas reducciones deben ser optimizadas junto con la calidad de los requisitos de servicio y las demandas de los clientes.

Un enfoque holístico, pretende tener en cuenta una visión más integrada de los sistemas de comunicación, la interacción entre las capas, las interdependencias entre componentes y entidades a nivel de sistema en todo el ciclo de vida de la red de comunicaciones, el transporte de energía, las necesidades de infraestructura de equipos de refrigeración, la vida útil de los componentes, etc. Para ello es preciso establecer nuevos indicadores de eficiencia energética para la evaluación cuantitativa y cualitativa de las comunicaciones que permitan realizar

simulaciones y las plataformas de modelado para validar las teorías de comunicación verdes.

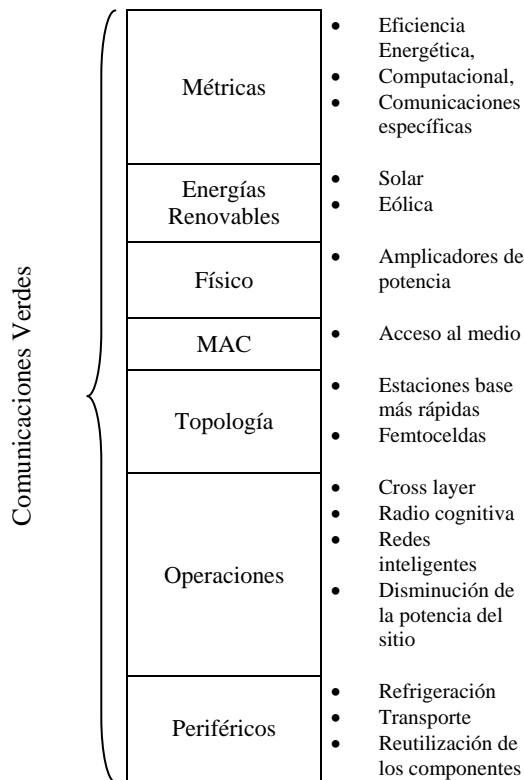


Figura 1. Enfoque Holístico sobre los sistemas de Comunicaciones verdes

El estudio de las comunicaciones verdes desde una perspectiva holística requerirá la investigación en muchas áreas como la eficiencia energética del hardware de RF, los protocolos MAC, la creación de redes, y la integración de las energías renovables con los equipos de comunicación, las estrategias de implementación de reutilización de frecuencias, y la política de uso del espectro. Si bien cada área contribuye de forma individual con el consumo energético, la investigación de la interacción a través de las distintas capas proporcionará verdaderas innovaciones.

V. SOLUCIONES INTEGRALES

En esta sección, se presentan varias nuevas vías de solución. Estas vías potenciales requieren la participación de todos los niveles del ciclo de comunicación.

A. Eficiencia energética Cross-Layer

Las redes de comunicaciones han seguido tradicionalmente una arquitectura en capas, donde las necesidades funcionales específicas

como la transmisión por aire (capa física) y el control de acceso al medio están completamente separadas e independientes. Esta jerarquía vertical permite que cada capa pueda utilizar la salida de la capa debajo de ella y que transmita sus propios servicios a la capa que se encuentra por encima de ella, permitiendo sólo la interacción entre las capas adyacentes. Un nuevo paradigma en la arquitectura de red, llamada diseño cross-layer, aborda ampliamente las ganancias de rendimiento dado por el diseño de protocolos con la interacción entre las diferentes capas (Sriastava et al, 2007). La eficiencia energética y la seguridad son los principales ejemplos de desempeño que podrían beneficiarse de una estrategia de diseño cross-layer que une la capa física a la capa MAC y otras funciones de red.

El diseño cross-layer para la asignación de recursos se ha aplicado a las redes de 3G desde el punto de vista de la maximización de los recursos de radio dentro de las limitaciones de tasa de error de bit (Hai et al, 2005). En este estudio, el intercambio de información a través de capas de protocolo muestra un mejor rendimiento, especialmente con datos heterogéneos y servicio de vídeo. Este análisis transversal de la capa se puede utilizar para desarrollar una metodología impulsado por el punto de vista de la eficiencia energética. La calidad de servicio y la capacidad, son indicadores típicos que conducen operaciones de los sistemas celulares diarios. Estas métricas son evaluadas fuera de la pila de protocolos en general, mientras que la eficiencia energética se mide generalmente en la capa más baja, la física. Se están investigando las limitaciones de calidad de servicio con el objetivo específico de reducir al mínimo el consumo de energía (Eberle et al, 2005).

B. Enfoque de Radio Cognitiva

Los recientes avances en el campo de la radio cognitiva (Le et al, 2007) tienen un potencial significativo para las comunicaciones verdes. Los dispositivos de radio cognitiva perciben su entorno, se adaptan a las diferentes condiciones e incorporan el aprendizaje a largo plazo. Con la integración del conocimiento de la situación del espectro inalámbrico, el uso de la red de energía y las necesidades de los usuarios de los sistemas con el control de potencia de los dispositivos de la estación base se abre un nuevo mundo de control de potencia cognitiva (Zhang, 2008). La producción de energía se puede escalar en relación con las necesidades de tráfico y en el contexto del uso de la energía dentro de toda la

red eléctrica. Por ejemplo, el control de la potencia de salida de los dispositivos consumidores de energía puede ayudar a equilibrar la carga con el suministro, mientras que el control de la potencia de los dispositivos generadores de energía, puede equilibrar el rendimiento global de la red. Actualmente, en las comunicaciones móviles una reducción del consumo de energía en la estación base, puede requerir un aumento de potencia en el dispositivo móvil que resulta en una pérdida neta.

Se necesita una estrategia no tradicional e interdisciplinaria que haga hincapié en un enfoque de capa cruzada para evitar las interacciones a nivel de componente que en un nivel muestran mejoras, pero en realidad resultan en una ganancia neta igual a cero o pérdida neta. Un marco de optimización de la energía basada en el paradigma de la radio cognitiva será desarrollado incorporando medidas para optimizar dinámicamente el consumo de energía en el contexto de la calidad de servicio deseada (QoS) para entornos y aplicaciones de radio específicas. La arquitectura incorpora dos niveles de las operaciones que implican la modulación adaptativa. Resultados de las simulaciones iniciales indican potencial teórico de ahorro energético de hasta el 75% (He et al, 2008).

C. Enfoque coordinado para mejorar la eficiencia

Una perspectiva tradicional ve el sistema de comunicación inalámbrica como una red aislada de usuarios y puntos de acceso controlados por los proveedores de servicios independientes y sistemas de conmutación propietarios. Mientras que cada nodo puede tener un objetivo específico en cuanto al rendimiento, capacidad, calidad de servicio o consumo de energía, las necesidades del sistema en general deben ser equilibrados con los objetivos de cada nodo. Además, cada estación base es también un consumidor de la red global de energía. La gestión conjunta de las estaciones base y el balance de carga sobre una red inteligente tienen el potencial para un impacto positivo en el consumo de energía sin afectar negativamente a la capacidad y calidad de servicio. Los acontecimientos recientes en la teoría de la computación distribuida por cable (Jai et al, 2005) proporcionan modelos iniciales para que la aplicación de las redes inalámbricas y la interacción entre las diferentes estaciones de base y entre toda la red de telecomunicaciones y red eléctrica.

La capacidad de aplicar los conceptos similares en un entorno inalámbrico sigue siendo un reto con limitaciones significativas. Características disruptivas del canal inalámbrico incluyen diferentes condiciones de canal, un medio compartido, y drásticamente diferentes costos de comunicación. En consecuencia, las nuevas metodologías deben aplicarse a una red WNDC (Wireless Distributed Computing) como el rendimiento en términos de alcance, eficiencia energética y escalabilidad se ve influenciada en gran medida por el entorno de radio subyacente. Por lo tanto, un diseño de compensaciones para un sistema WNDC implica la interacción entre el subsistema de cálculo (capa de aplicación en la que se ejecuta el proceso de cálculo) y el subsistema de comunicación (redes, acceso de radio subyacente y las capas físicas). Esta compleja interacción hace que sea difícil de desarrollar protocolos WNDC y arquitectura de servicios, asignación de recursos y el equilibrio de la carga de trabajo de cómputo y reducción al mínimo el consumo de energía.

Un WNDC requiere soluciones de compromiso entre la red de radio subyacente, así como la red y capas de aplicación. Un grupo de equipos de radios trabajando en forma cooperativa para el procesamiento distribuido en red, ofrece varias ventajas con respecto a una radio única, tales como: (1) reducir el consumo de potencia por nodo, así como para la red en su conjunto, (2) el dominio sobre la oferta y demanda, (3) Reunión de la informática de alto rendimiento y los requisitos de latencia mediante el aprovechamiento de los recursos informáticos en la red.

El subsistema de comunicaciones conecta los subsistemas de computación en varios nodos a través de enlaces inalámbricos y sirve al proceso de procesamiento distribuido en la difusión de la carga de trabajo de cómputo e inter-proceso de paso de mensajes. Un escenario de ejemplo es el de una red de difusión (el Nodo C) en el que un nodo maestro distribuye su carga computacional entre varios nodos esclavos como se observa en la Figura 2. Los nodos esclavos procesan su parte de la carga de trabajo total y devuelven los resultados al nodo principal.

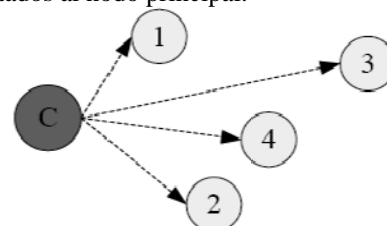


Figura 2. Escenario de red de difusión.

El ahorro en el consumo de energía obtenidos mediante la distribución de la carga de trabajo de cómputo en una red de nodos que colaboran en lugar de realizar la misma tarea computacional en un solo nodo, se pueden cuantificar como se explica en el trabajo de Datla (Datla et al, 2009). En tareas de cómputo distribuido inalámbrico, el ahorro en el consumo de potencia de procesamiento se ve afectado por la sobrecarga de la comunicación, donde el consumo de energía es proporcional al rango D . En computación distribuida inalámbrica, la mejora en el ahorro de energía de cómputo con un aumento en el número de nodos que colaboran es contrarrestado por un aumento en el consumo de energía de sobrecarga para la comunicación entre los nodos. Por lo tanto, como se muestra en la Figura 3, existe un punto de inflexión más allá del cual la computación distribuida inalámbrica resulta menos eficiente que el procesamiento local. El ahorro de energía de la red se ha determinado para una tarea informática que tiene un consumo de energía altamente no lineal - características de la frecuencia de reloj del procesador (Datla et al, 2009).

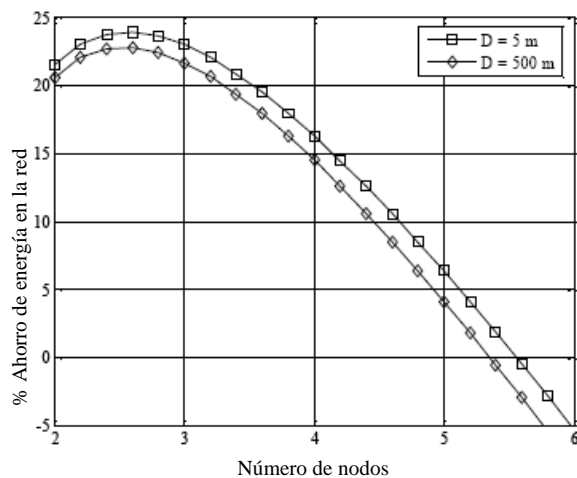


Figura 3. Ahorro de Energía logrado por procesamiento distribuido entre varios nodos para distintos rangos en la red (Datla et al, 2009)

D. Sistema de Consumo de energía

En el nivel de la plataforma de comunicación, el consumo de energía del sistema incluye el de cada componente. Investigaciones recientes han demostrado una reducción de potencia significativa a través de reconfiguraciones de las etapas de radio basadas en las condiciones del canal (Min et al, 2002; Lu et al 2003). Se han

propuesto diversos modelos de consumo de energía del sistema y que utiliza para la optimización de la energía, la adaptación de la modulación, la codificación, la potencia radiada y para reducir al mínimo el consumo. La etapa de Amplificadores de Potencia ha sido considerada como uno de los componentes clave en la optimización del consumo.

E. La necesidad de herramientas de diseño e implementación

Actualmente, el modelado de sistemas de telecomunicaciones y herramientas de software de planificación están optimizados para la capacidad del usuario. Como se discutió previamente, la incorporación de la eficiencia energética en uno de los aspectos del ciclo de diseño va a afectar a otros componentes del sistema. Para incorporar Comunicaciones verdes en el diseño y despliegue de redes en general, se requieren herramientas de modelado que ofrezcan suficiente modularidad al subsistema.

VI. CONCLUSIONES

Cuando se habla de una metodología de optimización de energía eficiente para redes de banda ancha móviles se hace referencia a nuevas actividades de investigación abordadas desde un nuevo concepto de sistemas de comunicaciones actualmente denominadas "Comunicaciones Verdes". Para ello es preciso realizar un profundo estudio en lo referido a las métricas de eficiencia energética, las estrategias de despliegue de red, gestión de redes, y gestión eficiente de la energía de los recursos de radio. En este trabajo, presentamos una visión de una estrategia integral para abordar las comunicaciones verdes que va más allá de las mejoras realizadas en forma aislada en un nivel del ciclo de comunicaciones. Revisamos avances existentes en red de comunicaciones, así como de las operaciones, el despliegue y la métrica. También se presentaron varias vías de investigación prospectivos que incorporan un punto de vista integral que abarca interacciones cross-layer para lograr la mejora de las comunicaciones de bajo consumo.

Se espera que esta línea de investigación, que enfrenta el estudio de la metodología del sistema comunicaciones de última generación y las tendencias sobre las técnicas claves relacionadas con la eficiencia energética, realice un aporte a la comunidad científica en el terreno de los sistemas de comunicación de banda ancha.

REFERENCIAS

- Lamour C., Energy Consumption of Mobile Networks, *The Basestation e-Newsletter*, 2008.
- Singh R., Wireless Technology: To Connect the Unconnected, 2008
- Sistek H., Green-tech base stations cut diesel usage by 80 percent, *CNET News Green Tech*, 2008.
- Walko J., Green Issues Challenge Basestation Power, *EE Times Europe*, 2007.
- International Telecommunications Union, The World Telecommunication/ICT Indicators Database, 2007.
- Jarich P., "Green" Telecom: More than Just Marketing?, *GLG News*, 2008.
- Belady C., A. Rawson, J. Pflueger & T. Cader, Green Grid Data Center Power Efficiency Metrics: PUE and DCIE, 2008.
- Haas J., M. Monroe, J. Pflueger, J. Pouchet, P. Snelling, A. Rawson & F. Rawson, Proxy Proposals for Measuring Data Center Productivity, 2009.
- Verizon, Verizon NEBS Compliance: TEEER Metric Quantification, *VZ.TPR.9207*, 2009.
- Alliance for Telecommunications Industry Solutions (ATIS), Energy Efficiency for Telecommunication Equipment: Methodology for Measurement and Reporting – General Requirements, *ATIS-0600015.2009*, 2009.
- Sriastava V. & M. Motani, Cross-Layer Design and Optimzation in Wireless Networks, *Cognitive Networks: Towards Self-Aware Networks*, Q. H. Mahmoud, Ed.: John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- Hai J., Z. Weihua & S. Xuemin, Cross-layer design for resource allocation in 3G wireless networks and beyond, *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, pp. 120-126, 2005.
- Eberle W., B. Bougard, S. Pollin, & F. Catthoor, From myth to methodology: cross-layer design for energy-efficient wireless communication, *Proceedings of the 42nd annual conference on Design automation* Anaheim, California, USA: ACM, 2005.
- Le B., T. W. Rondeau & C. W. Bostian, Cognitive radio realities, *Wireless Communications And Mobile Computing*, vol. 7, 2007.
- Zhang H., Cognitive Radio for Green Communications and Green Spectrum, *CHINACOM*, Hangzhou, China, 2008.
- He A., S. Srikanteswara, J. H. Reed, C. Xuetao, W. H. Tranter, B. K. Kyoon, & M. Sajadieh, Minimizing Energy Consumption Using Cognitive Radio, *Performance, Computing and Communications Conference*, 2008.
- IPCCC 2008. IEEE International*, 2008, pp. 372-377.
- Datla D., X. Chen, T. R. Newman, J. H. Reed & T. Bose, Power Efficiency in Wireless Network Distributed Computing, *IEEE Vehicle Technology Fall Conference*, Anchorage, 2009.
- Min R. & A. Chandrakasan, A framework for energy-scalable communication in high-density wireless networks, *ISLPED International Symposium on Low Power Electronics and Design*, Monterey, CA, 2002, pp. 36-41.
- Lu X., E. Erkip, Y. Wang & D. Goodman, Power Efficient Multimedia Communication over Wireless Channels, *IEEE Journal on Select Areas of Communications*, vol. 21, pp. 1738-1751, 2003.