

## Resumen

El mundo de las telecomunicaciones está cambiando de un escenario donde únicamente las personas estaban conectadas a un modelo donde prácticamente todos los dispositivos y sensores se encuentran conectados, también conocido como Internet de las cosas (IoT), donde miles de millones de dispositivos se conectarán a Internet a través de conexiones móviles y redes fijas. En este contexto, hay muchos retos que superar, desde el desarrollo de nuevos estándares de comunicación al estudio de la viabilidad económica de los posibles escenarios futuros. En esta tesis nos hemos centrado en el estudio de la viabilidad económica de diferentes escenarios mediante el uso de conceptos de microeconomía, teoría de juegos, optimización no lineal, economía de redes y redes inalámbricas. La tesis analiza la transición desde redes centradas en el servicio de tráfico HTC a redes centradas en tráfico MTC desde un punto de vista económico. El primer escenario ha sido diseñado para centrarse en las primeras etapas de la transición, en la que ambos tipos de tráfico son servidos bajo la misma infraestructura de red. En el segundo escenario analizamos la siguiente etapa, en la que el servicio a los usuarios MTC se realiza mediante una infraestructura dedicada. Finalmente, el tercer escenario analiza la provisión de servicios basados en MTC a usuarios finales, mediante la infraestructura analizada en el escenario anterior. En los párrafos siguientes se describe con más detalle cada escenario.

En primer lugar, analizamos un escenario de transición, donde las comunicaciones de tipo humano (HTC) y las comunicaciones de tipo máquina (MTC) comparten una única estructura de red. En el trabajo se analiza la viabilidad económica de la coexistencia de ambos tipos de tráfico mediante una aproximación de monopolio y una de duopolio. Los resultados de ambas aproximaciones se comparan con un caso base, en donde un operador monopolista ofrece servicio únicamente a usuarios HTC. La provisión de servicio de ambos tipos de tráfico es modelada mediante una cola de dos prioridades, donde el tráfico HTC se considera prioritario sobre el tráfico MTC. Por otro lado, la competencia entre los operadores se analiza como un juego de dos etapas. En la primera etapa, cada operador elige un precio que optimiza sus beneficios y lo anuncia, mientras que, en la segunda etapa, los usuarios deciden si suscribir o no al servicio en base a una función de utilidad basada en el retardo experimentado por los paquetes y el precio cobrado por los operadores. Como resultado, se muestra que la coexistencia HTC-MTC es provechosa para todos los actores cuando existe competencia entre los operadores que sirven a cada tipo de tráfico. Además, la entrada de un nuevo operador para servir a los usuarios MTC es deseable, no solo desde un punto de vista de eficiencia en el uso de la red o de los usuarios, sino también desde el punto de vista de ambos operadores. Por tanto, podemos concluir que la coexistencia es viable desde un punto de vista económico y, además, es más eficiente con respecto al caso base.

En segundo lugar, modelamos un escenario donde la conectividad para redes de sensores inalámbricos (WSN) es proporcionada por un operador de red (OP) dedicado. El escenario es modelado matemáticamente y analizado usando mecanismos de provisión de capacidad, con el objetivo de maximizar los beneficios del OP, asumiendo que el precio es fijado por un órgano regulador. En el escenario existen varios clústers de sensores con un nodo encargado de transmitir los datos recopilados en el clúster a Internet a través del servicio de conectividad inalámbrica del OP. El escenario es analizado mediante teoría de juegos como un juego estático y como un juego dinámico, con dos etapas cada juego. El comportamiento de los sensores es caracterizado, una vez más, por una función de utilidad relacionada con el retardo de los paquetes y el precio pagado al OP por el servicio. Por su parte, el OP busca maximizar sus beneficios ajustando el valor de la capacidad de la red. En el juego estático, la decisión de suscripción de los sensores se modela mediante juegos poblacionales, mientras que, en el juego dinámico, el comportamiento de los sensores se modela mediante un juego evolutivo y la dinámica del replicador. Por otro lado, la decisión de capacidad óptima se obtiene resolviendo un problema de optimización en el caso estático y un problema de control óptimo en el dinámico. En el trabajo se

muestra que el escenario es factible desde un punto de vista económico. Además, la optimización dinámica de la provisión de capacidad se muestra como un mecanismo válido para maximizar los beneficios del OP, así como una herramienta útil para analizar escenarios cambiantes. Por otro lado, el análisis dinámico nos permite estudiar escenarios más complejos mediante el empleo de juegos diferenciales.

Finalmente, analizamos un modelo de negocio completo basado en un escenario MTC, o equivalentemente, un escenario MTC end-to-end. En el escenario, dos proveedores de servicios del internet de las cosas (IoT-SPs) despliegan sus propias redes privadas de sensores WSN para poder obtener datos que les permitirán ofrecer servicios a usuarios finales. Los datos se obtienen a través de las WSN, y son transmitidos al IoT-SP por un nodo encargado de recolectar todos los datos de la WSN, a través de la conexión de un OP. Este escenario nos permite tener un punto de vista global de un modelo de negocio empleando datos de sensores, desde la recolección de los datos hasta la provisión de servicio a los usuarios finales. En análisis se estudia la viabilidad económica de proveer servicios basados en datos de WSN en un escenario IoT. El escenario es analizado como dos juegos interrelacionados empleando teoría de juegos. En el primer juego, el OP anuncia un precio y los sensores deciden suscribir o no para subir los datos al IoT-SP correspondiente. En el segundo juego, cada IoT-SP anuncia un precio y los usuarios deciden si suscribir o no al servicio basado en datos de los sensores de los IoT-SPs en función del modelo Logit de elección discreta, basado en la calidad de los datos de los sensores y el precio del servicio. Las etapas de suscripción de sensores y usuarios se analizan mediante el uso de juegos poblacionales y modelos de elección discreta, mientras que la selección de precios del OP y los IoT-SPs se analizan mediante técnicas de optimización y el equilibrio de Nash respectivamente. Los resultados muestran que el escenario es factible desde un punto de vista económico para todos los actores, siempre que haya suficientes usuarios finales interesados en el servicio. Por otro lado, si se combina con los resultados del primer escenario, existe la posibilidad de desarrollar modelos más eficientes con diferentes tipos de servicios.

Gracias al análisis de todos los escenarios, hemos observado que la transición de redes centradas en usuarios HTC a redes MTC es posible y que la provisión de servicios en tales escenarios es viable. Además, hemos observado que el comportamiento de los usuarios es esencial para determinar la viabilidad de los diferentes modelos de negocio, y por tanto, es necesario estudiar el comportamiento y las preferencias de los usuarios en profundidad en estudios futuros. Específicamente, los factores más relevantes son la sensibilidad de los usuarios al retardo en los datos recopilados por los sensores y la cantidad de los mismos. También hemos observado que la diferenciación del tráfico en categorías mejora el uso de las redes y permite crear nuevos servicios empleando datos que, de otro modo, no se aprovecharían, lo cual nos permite mejorar la monetización de la infraestructura. También hemos demostrado que la provisión de capacidad es un mecanismo válido, alternativo a la fijación de precios, para la optimización de los beneficios de los proveedores de servicio. Finalmente, se ha demostrado que es posible crear roles específicos para ofrecer servicios IoT en el mercado de las telecomunicaciones, específicamente, los IoT-SPs, que proporcionan servicios basados en sensores inalámbricos utilizando infraestructuras de acceso de terceros y sus propias redes de sensores.

En resumen, en esta tesis hemos intentado demostrar la viabilidad económica de modelos de negocio basados en redes futuras IoT, así como la aparición de nuevas oportunidades y roles de negocio, lo cual nos permite justificar económicamente el desarrollo y la implementación de las tecnologías necesarias para ofrecer servicios de acceso inalámbrico masivo a dispositivos MTC.