

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE COMUNICACIONES



TESIS DOCTORAL

**«ANÁLISIS DE MODELOS DE NEGOCIO PARA
OPERADORES DE REDES 5G SOPORTADOS POR
NETWORK SLICING»**

Autor: Edison Yuver Moreno Cardenas

Director: Dr. Luis Guijarro Coloma

Valencia, Abril 2024

Agradecimientos

La fortuna favorece a los valientes. Virgilio.

Aprovecho esta parte de la memoria de tesis para expresar mi agradecimiento a las personas e instituciones que me han acompañado en la realización de la tesis doctoral.

Quiero expresar mi profunda gratitud y reconocimiento a mi director de tesis doctoral, Luis Guijarro Coloma, quien ha sido mi mentor y guía en cada etapa de este arduo proceso. Agradezco infinitamente su incondicional paciencia, dedicación y apoyo constante durante todo el desarrollo del programa doctoral, lo que me ha permitido superar diversos desafíos que han surgido en el camino. También, valoro su respaldo y orientación desde el inicio de mi formación académica hasta la culminación de este proyecto, que hoy se materializa en la presente tesis doctoral.

Asimismo, deseo manifestar mi gratitud y reconocimiento a Patrick Maillé, por su invaluable dirección y orientación durante el desarrollo de mi estancia de investigación, llevada a cabo en la institución académica IMT Atlantique, ubicada en la hermosa ciudad de Rennes, Francia. Su guía, compromiso y dedicación con mi formación académica, así como su disposición constante a brindar su experiencia y conocimientos, han sido fundamentales en el logro de mis objetivos en esta tesis doctoral.

Al Gobierno de Perú por impulsar la inversión en formación académica fuera del país; mi gratitud por el apoyo económico a través de la Beca Presidente de la República gestionado por el PRONABEC (Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo), ya que me ha permitido desarrollar los estudios doctorales con total seguridad, de igual forma, a la Universidad Politécnica de Valencia por haberme proporcionado los recursos necesarios y las facilidades en las diferentes etapas de la vida del doctorado.

A las instalaciones del Departamento de Comunicaciones y del laboratorio de ingeniería de tráfico, así como a sus miembros por el ambiente de estudio y cooperación en el marco de la investigación. La amistad y ayuda de Jairo, Amal, Daniel, Valeria y de todos con quienes compartí el laboratorio, me han permitido profundizar mis conocimientos.

A los miembros del Departamento de Sistemas de Redes, Ciberseguridad y Derecho Digital (SRCD) del IMT Atlantique, a los colegas y amigos como Cesar, Sebastian, Camilo y Juan, quienes me ayudaron durante la estancia de investigación en la ciudad de Rennes, Francia.

A Dios por todo lo que me ha dado a lo largo de la vida, a mi madre, quien me ha enseñado la importancia del estudio y la perseverancia de seguir adelante, a mi padre y mis hermanas que estando lejos me han animado a continuar en este periodo de formación. Asimismo, a todos mis familiares que me han brindado su apoyo a lo largo de este camino.

Por último, a los amigos por su apoyo, confianza y amistad, quienes me han acompañado y han hecho pleno este periodo de realización profesional.

RESUMEN

La tesis doctoral se enmarca en la línea de investigación de Economía y Regulación de las Telecomunicaciones. El desarrollo de la tesis se ha llevado a cabo dentro del programa de doctorado en Telecomunicaciones y del Departamento de Comunicaciones de la Universitat Politècnica de València. A lo largo del desarrollo de la tesis, se ha participado en proyectos de I+D competitivos como: *Slicing dinámico en redes de acceso radio 5G - ATLAS (PGC2018-094151B-I00)* y *Evolución de la red de acceso hacia 6G para servicios masivos y de baja latencia (PID2021-123168NB-I00)*. Asimismo, se ha llevado a cabo un periodo de investigación en el IMT Atlantique en la ciudad de Rennes, localizada al norte de Francia, como parte del desarrollo de la tesis. Durante este periodo se ha analizado y finalizado dos escenarios y dos modelos de negocio propuestos para los operadores de redes. Los resultados obtenidos se han publicado en una revista científica de reconocimiento internacional.

En esta tesis, se plantean dos modelos de red y dos modelos de negocio basándonos en las características técnicas y económicas de las Redes de Quinta generación - *Fifth-Generation Networks (5G)* para la compartición de recursos de red entre dos servicios dentro de la red 5G, es decir, entre los servicios Comunicaciones ultra confiables de baja latencia - *Ultra Reliable Low Latency Communications (URLLC)* y Banda ancha móvil mejorada - *Enhance Mobile Broadband (eMBB)*, y entre los servicios URLLC y Comunicaciones masivas de tipo máquina - *Massive Machine Type Communications (mMTC)*, los cuales son ofrecidos por los operadores a sus usuarios, utilizando la tecnología de Segmentación de Red - *Network Slicing (NS)*. Parte del desarrollo de la tesis, se ha realizado una revisión exhaustiva del estado del arte en modelos de negocio existentes y nuevos modelos para los operadores de redes 5G, abordando tanto los aspectos técnicos como los económicos para determinar su viabilidad económica. Además, se han planteado dos escenarios. El primer escenario denominado escenario Red Compartida - *Shared Network (SN)* es una red 5G sin NS, donde todos los servicios son tratados de forma igual y el segundo escenario denominada escenario NS es una red 5G con NS, donde todos los servicios reciben un tratamiento diferente y el mecanismo que permite tratar los servicios diferentes es el NS. El escenario SN se ha modelado por medio de un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 sin prioridad de servicio (Primero en entrar, Primero en salir - *First In, First Out (FIFO)*), de modo que todos los paquetes de los servicios son tratados de forma igual. El escenario NS se ha modelado por medio de un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 con dos prioridades de servicio, asignando una prioridad alta al servicio URLLC por sus características en relación a la Calidad de servicio - *Quality of Service (QoS)*, es decir, los paquetes de los servicios son tratados de forma diferente. Se utiliza el modelo de cola M/M/1 para representar la provisión de dos servicios distintos (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) a los usuarios finales y para evaluar la compartición eficiente de los recursos de red entre estos servicios dentro de una red 5G. Además, los paquetes son generados de manera independiente por cada uno de los usuarios, siguiendo un proceso de Poisson, mientras que los tiempos de servicio de los paquetes se

distribuyen de manera exponencial. En el modelo de red 5G propuesto, las características de la QoS de cada uno de los servicios (URLLC, eMBB y mMTC) son la métrica de calidad más relevante, tales como: el tiempo de transmisión de paquetes, sensibilidad al retardo y prioridad de servicio. Asimismo, la compartición de recursos de red tanto para los servicios URLLC y eMBB, así como para los servicios URLLC y mMTC se ha analizado.

Además, se ha evaluado la viabilidad de los dos modelos de negocio propuestos para la prestación de los servicios URLLC y eMBB/mMTC en una red 5G sin NS y con NS a los usuarios finales desde un punto de vista económico, donde cada uno tiene su propia base de suscriptores sin competencia entre usuarios. Estos dos modelos de negocio propuestos son el Integrado, en el cual un único operador de red ofrece ambos servicios, y el Especializado, donde dos operadores distintos ofrecen un servicio cada uno. Por otro lado, Se realiza el análisis de los modelos de negocio desde el enfoque del sistema y la económica. Mientras que la parte económica se ha modelado con base en los beneficios de los operadores y las utilidades de los usuarios. La decisión de suscripción de los usuarios al operador de red que les provee el servicio se basa en la evaluación de la QoS que perciben y el precio que cobra el operador, mientras que el concepto del equilibrio de Wardrop es utilizado para realizar el análisis. Con relación a los beneficios de los operadores, se contempla que estos dependen de la cantidad de usuarios que se llegan a suscribir al servicio ofrecido. No se tienen en cuenta los costos de inversión en ambos modelos de negocio. Asimismo, la teoría de juegos es aplicado en cada modelo de negocio para la evaluación de su viabilidad económica. La evaluación consiste en un juego de dos etapas, donde el juego se resuelve a través de la inducción hacia atrás, de manera que, se optimizan las funciones de utilidad del usuario y los beneficios de los operadores en base a la resolución de las funciones de Mejor respuesta - *Best Response* (BR) y a diferentes valores de parámetros, consiguiendo el equilibrio de Nash. Además, se ha planteado el óptimo social, que es una situación que incorpora la participación de una entidad reguladora de servicios 5G en el mercado, quien tiene el objetivo de maximizar el bienestar social mediante la distribución de usuarios o recursos de red por servicio. Los resultados del óptimo social son utilizados para la comparación de sus resultados con los resultados de los dos modelos de negocio en función del bienestar social.

En esta investigación, se han empleado diferentes conceptos tales como de la microeconomía, la teoría de juegos y la teoría de colas para evaluar la viabilidad económica de los modelos de red 5G y los modelos de negocio. Esto nos ha permitido comprender las decisiones en equilibrio tomadas tanto por los operadores, así como por los usuarios, y analizar el impacto de estas decisiones en los beneficios de todos los actores involucrados en los modelos. Además, se han identificado los requisitos mínimos para viabilidad de los modelos de negocio propuestos en las redes 5G.

Por último, los resultados del análisis de los modelos de negocio y los modelos de red 5G para la provisión de los servicios URLLC y eMBB/mMTC con recursos de red compartidos demuestran que en una red 5G con NS, los servicios URLLC y eMBB/mMTC pueden compartir los recursos sin afectar la QoS del servicio URLLC. Sin embargo, en una red 5G sin NS, la QoS del servicio URLLC se ve perjudicada. Además, en una red 5G con NS, los operadores pueden establecer un precio más alto para el servicio URLLC, ya que los usuarios URLLC estarían dispuestos a pagar un precio mayor debido a sus características de QoS en comparación con los servicios eMBB y mMTC. Además, se ha realizado una comparación entre los dos modelos de negocio y el óptimo social, considerando el bienestar social como criterio de evaluación. Este análisis nos lleva a la conclusión de que la mejor opción para ofrecer los servicios URLLC y eMBB/mMTC es mediante la incorporación de NS en una red 5G, donde ambos servicios son ofrecidos por un único operador. La adopción de NS en una red 5G presenta diversas mejoras en términos de precios de servicios, tasas de transmisión, número de usuarios y beneficios del operador. Estos resultados respaldan los beneficios de compartir recursos de red entre los servicios URLLC y eMBB/mMTC.

En resumen, se destaca que la implementación de NS en una red 5G, junto con un modelo de negocio Integrado, donde un único operador ofrece los servicios URLLC y eMBB/mMTC, es la opción más favorable en cuanto al bienestar social. Esta conclusión se basa en la mejora de diferentes aspectos clave que impactan tanto a los usuarios como al operador, fortaleciendo la viabilidad económica en la prestación de servicios en redes 5G.

ABSTRACT

The doctoral thesis is framed within the research line of Economics and Regulation of Telecommunications. The thesis has been developed within the Ph.D. program in Telecommunications and the Department of Communications of the Universitat Politècnica de València. Throughout the development of the thesis, we have participated in competitive I+D projects such as *ATLAS - Dynamic network slicing in 5G Radio Access (PGC2018-094151B-I00)* and *Radio access network evolution towards 6G for massive and low latency services (PID2021-123168NB-I00)*. In addition, a research period has been carried out at the IMT Atlantique in the city of Rennes, located in the north of France, as part of the development of the thesis. During this period, two scenarios and two proposed business models for network operators were analyzed and finalized. The results obtained have been published in an internationally recognized scientific journal.

In this thesis, two business models and two network models have been proposed based on the technical and economic characteristics of 5G networks for sharing network resources between URLLC and eMBB/mMTC services offered by operators to end users, using NS technology. As part of the development of the thesis, an exhaustive review of the state of the art in existing and new business models for 5G network operators has been carried out, addressing both technical and economic aspects to determine their economic viability. In addition, two scenarios have been considered. The first scenario called the SN scenario, is a 5G network without NS, where all services are treated equally, and the second scenario, called the NS scenario, is a 5G network with NS, where all services are treated differently, and the mechanism to treat services differently is NS. The SN scenario has been modeled by means of a network model, where there is an M/M/1 queue with no priority of service (FIFO), and all service packets are treated equally. The NS scenario has been modeled by means of a network model, where there is an M/M/1 queue with two service priorities, assigning a high priority to the URLLC service because of its QoS characteristics, i.e., it treats the service packets differently. The M/M/1 queue model is used to represent the provision of two different services (URLLC and eMBB or URLLC and mMTC) to end users and to evaluate the efficient sharing of network resources between these services within a 5G network. Furthermore, each user generates packets independently following a Poisson process. The packet service times are exponentially distributed. In the proposed 5G network model, the most relevant quality metrics are the QoS characteristics of each of the services (URLLC, eMBB, and mMTC), such as packet transmission time, delay sensitivity, and service priority. Network resource sharing has been analyzed for both URLLC and eMBB services, as well as for URLLC and mMTC services.

In addition, the economic viability of the two business models for the provision of URLLC and eMBB/mMTC services in a 5G network without NS and with NS to end-users, where each has its own subscriber base without competition between users, has been assessed. The two business models

are Integrated, where a single network operator offers both services and Specialised, where two different operators offer one service each. The analysis of the business models is carried out from both a system and an economic perspective. The economic part has been modeled on the basis of users' utilities and operators' profits. Users decide whether or not to subscribe to the network operator providing the service, evaluating the perceived QoS and the price charged by the operator, and the analysis is performed using Wardrop equilibrium. As for the operators' profits, these are considered to depend on the number of users subscribing to the service offered. Investment costs are not taken into account in both business models. Furthermore, game theory is applied to each business model for the evaluation of its economic viability. The evaluation consists of a two-stage game, where the game is solved by backward induction so that the user utility functions and the network operators' profits are optimized based on the resolution of BR functions and different parameter values, achieving the Nash equilibrium. In addition, the social optimum has been considered, which is a situation that incorporates the participation of a 5G service regulator in the market, who aims to maximize social welfare through the distribution of users or network resources per service. The results of the social optimum are used to compare the results of the two business models in terms of social welfare.

In this research, concepts from microeconomics, game theory, and queuing theory have been used to assess the economic viability of 5G business models and network models. This has allowed us to understand the equilibrium decisions made by both network operators and users and to analyze the impact of these decisions on the benefits of all the actors involved in the models. In addition, the minimum requirements for the proposed business models to be viable in 5G networks have been identified.

The results of the analysis of 5G network models and business models for the provision of URLLC and eMBB/mMTC services with shared network resources show that in a 5G network with NS, URLLC, and eMBB/mMTC services can share resources without affecting the QoS of the URLLC service. However, in a 5G network without NS, the QoS of the URLLC service is impaired. Moreover, in a 5G network with NS, operators can set a higher price for the URLLC service, as URLLC users would be willing to pay a higher price due to its QoS characteristics compared to eMBB and mMTC services. Furthermore, a comparison has been made between the two business models and the social optimum, considering social welfare as an evaluation criterion. As a result of this analysis, it is concluded that the best option to offer URLLC and eMBB/mMTC services is by incorporating NS in a 5G network, where both services are offered by a single operator. The adoption of NS in a 5G network presents several improvements in terms of service prices, transmission rates, number of users, and operator profits. These results support the benefits of sharing network resources between URLLC and eMBB/mMTC services.

In summary, it is highlighted that the implementation of NS in a 5G network, together with an Integrated business model where a single operator offers URLLC and eMBB/mMTC services, is the most favorable option in terms of social welfare. This conclusion is based on the improvement of different key aspects that impact both the users and the operator, strengthening the economic viability and efficiency of service provision in 5G networks.

RESUM

La tesis doctoral s'emmarca en l'investigació d'Economia i Regulació de les Telecomunicacions, i s'ha desenvolupat en el programa de doctorat en Telecomunicacions dins del Departament de Comunicacions de la Universitat Politècnica de València. Durant el desenvolupament de la tesis doctoral, s'ha participat en projectes d'I+D competitius, com el Projecte *ATLES - Dynamic network slicing in 5G Radi Access (PGC2018-094151B-I00)* i el Projecte *Radio access network evolution towards 6G for massive and low latency services (PID2021-123168NB-I00)*. Aixina mateix, s'ha portat a terme una estància d'investigació en el IMT Atlantique en la ciutat de Rennes, França, com a part del desenvolupament de la tesis doctoral. Durant l'estància s'ha analitzat i finalitzat un dels escenaris sobre els models de negoci proposats per als operadors de xarxes, els resultats obtinguts de les quals s'han publicat en una revista científica d'àmbit internacional, que es detallen en aquesta tesi.

En aquesta tesi, s'han proposat dos models de negoci i dos models de xarxa sobre la base de les característiques tècniques i econòmiques de les xarxes 5G per a la compartició de recursos de xarxa entre els serveis URLLC i eMBB/mMTC oferits pels operadors als usuaris finals, utilitzant la tecnologia de NS. Part del desenvolupament de la tesi, s'ha realitzat una revisió exhaustiva de l'estat de l'art en models de negoci existents i nous models per als operadors de xarxes 5G, abordant tant els aspectes tècnics com els econòmics per a determinar la seua viabilitat econòmica. A més, s'han plantejat dos escenaris. El primer escenari denominat escenari SN és una xarxa 5G sense NS, on tots els serveis són tractats de manera igual i el segon escenari denominat escenari NS és una xarxa 5G amb NS, on tots els serveis reben un tractament diferent i el mecanisme que permet tractar els serveis diferents és el NS. L'escenari SN s'ha modelat per mitjà d'un model de xarxa, on hi ha una cua M/M/1 sense prioritat de servei (FIFO) i tots els paquets dels serveis són tractats de manera igual. L'escenari NS s'ha modelat per mitjà d'un model de xarxa, on hi ha una cua M/M/1 amb dues prioritats de servei, assignant una prioritat alta al servei URLLC per les seues característiques de QoS, és a dir, tracta diferent dels paquets dels serveis. S'utilitza el model de cua M/M/1 per a representar la provisió de dos serveis diferents (URLLC i eMBB o URLLC i mMTC) als usuaris finals i per a avaluar la compartició eficient dels recursos de xarxa entre aquests serveis dins d'una xarxa 5G. A més, cada usuari genera paquets de manera independent seguint un procés de Poisson. Els temps de servei dels paquets, es distribueixen exponencialment. En el model de xarxa 5G proposat, la mètrica de qualitat més rellevant, són les característiques de la QoS de cadascun dels serveis (URLLC, eMBB i mMTC) com: el temps de transmissió de paquets, sensibilitat al retard i prioritat de servei. S'ha analitzat la compartició de recursos de xarxa tant per als serveis URLLC i eMBB, així com per als serveis URLLC i mMTC.

A més, s'ha avaluat la viabilitat econòmica dels dos models de negoci per a la prestació dels serveis URLLC i eMBB/mMTC en una xarxa 5G sense NS i amb NS als usuaris finals, on cadascun té la seua

pròpia base de subscriptors sense competència entre usuaris. Els dos models de negoci són l'Integrat, en el qual un únic operador de xarxa ofereix tots dos serveis, i l'Especialitzat, on dos operadors diferents ofereixen un servei cadascun. L'anàlisi dels models de negoci es realitza des de la perspectiva del sistema i l'econòmica. La part econòmica s'ha modelat sobre la base de les utilitats dels usuaris i beneficis dels operadors. Els usuaris decideixen si se subscriuen o no a l'operador de xarxa que els brinda el servei, avaluant la QoS percebuda i el preu cobrat per l'operador, i l'anàlisi es realitza utilitzant l'equilibri de Wardrop. Quant als beneficis dels operadors, es considera que aquests depenen del nombre d'usuaris que se subscriuen al servei ofert. No es tenen en compte els costos d'inversió en tots dos models de negoci. Així mateix, la teoria de jocs és aplicat en cada model de negoci per a l'avaluació de la seua viabilitat econòmica. L'avaluació consisteix en un joc de dues etapes, on el joc es resol mitjançant la iducció cap endarrere, de manera que, s'optimitzen les funcions d'utilitat de l'usuari i els beneficis dels operadors de xarxa sobre la base de la resolució de les funcions de BR i a diferents valors de paràmetres, aconseguint l'equilibri de Nash. A més, s'ha plantejat l'òptim social, que és una situació que incorpora la participació d'una entitat reguladora de serveis 5G en el mercat, qui té l'objectiu de maximitzar el benestar social mitjançant la distribució d'usuaris o recursos de xarxa per servei. Els resultats de de l'òptim social són utilitzat per a comparar amb els resultats dels dos models de negoci en funció del benestar social.

En aquesta investigació, s'han emprat conceptes de microeconomia, teoria de jocs i teoria de cues per a avaluar la viabilitat econòmica dels models de negoci i models de xarxa 5G. Això ens ha permès comprendre les decisions en equilibri preses tant pels operadors de xarxa com pels usuaris, i analitzar l'impacte d'aquestes decisions en els beneficis de tots els actors involucrats en els models. A més, s'han identificat els requisits mínims perquè els models de negoci proposats siguin viables en les xarxes 5G.

Els resultats de l'anàlisi dels models de xarxa 5G i els models de negoci per a la provisió de serveis URLLC i eMBB/mMTC amb recursos de xarxa compartits demostren que en una xarxa 5G amb NS, els serveis URLLC i eMBB/mMTC poden compartir els recursos sense afectar la QoS del servei URLLC. No obstant això, en una xarxa 5G sense NS, la QoS del servei URLLC es veu perjudicada. A més, en una xarxa 5G amb NS, els operadors poden establir un preu més alt per al servei URLLC, ja que els usuaris URLLC estarien disposats a pagar un preu major a causa de les seues característiques de QoS en comparació amb els serveis eMBB i mMTC. A més, s'ha realitzat una comparació entre els dos models de negoci i l'òptim social, considerant el benestar social com a criteri d'avaluació. Com a resultat d'aquesta anàlisi, es conclou que la millor opció per a oferir els serveis URLLC i eMBB/mMTC és mitjançant la incorporació de NS en una xarxa 5G, on tots dos serveis són oferits per un únic operador. L'adopció de NS en una xarxa 5G presenta diverses millores en termes de preus de serveis, taxes de transmissió, nombre d'usuaris i beneficis de l'operador. Aquests resultats recolzen els beneficis de compartir recursos de xarxa entre els serveis URLLC i eMBB/mMTC.

En resum, es destaca que la implementació de NS en una xarxa 5G, juntament amb un model de negoci Integrat, on un únic operador ofereix els serveis URLLC i eMBB/mMTC, és l'opció més favorable quant al benestar social. Aquesta conclusió es basa en la millora de diferents aspectes clau que impacten tant als usuaris com a l'operador, enfortint la viabilitat econòmica i l'eficiència en la prestació de serveis en xarxes 5G.

Palabras Clave

5G; network slicing; URLLC; eMBB; mMTC; teoría de colas; teoría de juegos; operadores de redes; equilibrio de Wardrop; equilibrio de Nash; modelo de negocio; Integrado; Especializado; modelo de red; suscripción de usuarios; maximización de beneficios.

ÍNDICE GENERAL

Resumen	I
Abstract	V
Resum	VII
Índice de tablas	XV
Índice de figuras	XVII
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	2
1.3. Metodología	3
1.4. Herramientas	3
1.5. Contexto	4
1.6. Publicaciones	4
1.7. Estructura de la tesis	5
2. Estado del Arte	7

2.1. Evolución de las telecomunicaciones	8
2.2. Modelos de negocio	9
2.2.1. Modelos de negocio en redes 4G	10
2.3. Redes 5G	11
2.3.1. Network slicing	14
2.3.2. Modelos de negocio en redes 5G	18
2.4. Análisis económico de distintos modelos de negocio para servicios URLLC y eMBB/mMTC	23
2.5. Conclusiones	25
3. Escenarios y modelos para la prestación de los servicios URLLC y eMBB/mMTC sobre una red 5G	27
3.1. Aspectos generales	28
3.1.1. Escenarios	28
3.1.2. Modelo de red	28
3.1.3. Modelos de negocio	29
3.1.4. Juego	30
3.1.5. Óptimo social	32
3.2. Descripción de escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y eMBB	32
3.2.1. Modelo del sistema	33
3.2.2. Modelo económico	33
3.2.3. Juego estratégico	35
3.2.4. Óptimo social	38
3.3. Análisis de los escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y eMBB	41
3.3.1. Análisis de la Etapa II	41
3.3.2. Análisis de la Etapa I	45
3.4. Descripción de escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y mMTC	48
3.4.1. Modelo del sistema	48

3.4.2.	Modelo económico	49
3.4.3.	Juego	51
3.4.4.	Óptimo social	54
3.5.	Análisis de los escenarios y modelos para la prestación de los servicios URLLC y mMTC	58
3.5.1.	Análisis de la Etapa II	58
3.5.2.	Análisis de la Etapa I	62
4.	Resultados de los escenarios y modelos propuestos	67
4.1.	Resultados de la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G	67
4.1.1.	Integrado	68
4.1.2.	Especializado	71
4.1.3.	Comparación de los modelos de negocio con el óptimo social	74
4.1.4.	Conclusiones	77
4.2.	Resultados de la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G	77
4.2.1.	Modelo de negocio Integrado	78
4.2.2.	Modelo de negocio Especializado	81
4.2.3.	Comparación de los modelos en el escenario NS	83
4.2.4.	Conclusiones	85
5.	Conclusiones y trabajos futuros	87
5.1.	Conclusiones	87
5.1.1.	Principales contribuciones	88
5.1.2.	Trabajos futuros	90
	Bibliografía	93
	Términos y Abreviaturas	103
	Nomenclatura	107

ÍNDICE DE TABLAS

3.1. Notación general.	30
3.2. Precios inducidos por n_{us}^o y λ_{es}^o el escenario SN.	41
3.3. Precios inducidos por n_{un}^o y λ_{en}^o el escenario NS.	41
3.4. Precios inducidos por n_{us}^o y n_{ms}^o el escenario SN.	57
3.5. Precios inducidos por n_{un}^o y n_{mn}^o el escenario NS.	57
3.6. Equilibrio de Wardrop para la suscripción de usuarios URLLC y mMTC en el escenario SN.	61
3.7. Equilibrio de Wardrop para la suscripción de usuarios URLLC y mMTC en el escenario NS.	62
4.1. Valores de parámetros para los servicios URLLC y eMBB.	68

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. QoS en la red 5G.	12
2.2. Marco genérico de propuestas de la arquitectura 5G.	15
3.1. Modelo M/M/1.	29
3.2. Modelos de negocio y escenarios.	30
3.3. Notación específica.	31
3.4. Descripción del juego.	32
3.5. Modelo del sistema para la provisión de los servicios URLLC y eMBB.	33
3.6. SW_s^o en el escenario SN para los servicios URLLC y eMBB.	40
3.7. SW_n^o en el escenario NS para los servicios URLLC y eMBB.	40
3.8. Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario SN para los servicios URLLC y eMBB.	43
3.9. Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario NS para los servicios URLLC y eMBB.	44
3.10. Mejores respuestas (BRs) en el escenario SN para los operadores URLLC y eMBB.	46
3.11. Mejores respuestas (BRs) en el escenario NS para los operadores URLLC y eMBB.	47
3.12. Modelo del sistema para la provisión de los servicios URLLC y mMTC.	49
3.13. SW_s^o en el escenario SN para los servicios URLLC y mMTC.	56
3.14. SW_n^o en el escenario NS para los servicios URLLC y mMTC.	56
3.15. Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario SN para los servicios URLLC y mMTC.	59

3.16. Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario NS para los servicios URLLC y mMTC.	61
3.17. Mejores respuestas (BRs) en el escenario SN para los operadores URLLC y mMTC.	64
3.18. Mejores respuestas (BRs) en el escenario NS para los operadores URLLC y mMTC.	65
4.1. $\Lambda_{es}^i, \Lambda_{us}^i, \Lambda_{en}^i$, y Λ_{un}^i en función de μ .	68
4.2. $p_{es}^i, p_{us}^i, p_{en}^i$, y p_{un}^i en función de μ .	69
4.3. Π_s^i y Π_n^i en función de μ .	69
4.4. CS_s^i y CS_n^i en función de μ .	70
4.5. SW_s^i y SW_d^i en función de μ .	70
4.6. $\Lambda_{es}^e, \Lambda_{us}^e, \Lambda_{en}^e$ y Λ_{un}^e en función de μ .	71
4.7. $p_{es}^e, p_{us}^e, p_{en}^e$ y p_{un}^e en función de μ .	72
4.8. Π_s^e y Π_n^e en función de μ .	72
4.9. CS_s^e y CS_n^e en función de μ .	73
4.10. SW_s^e y SW_d^e en función de μ .	73
4.11. SW_n^i, SW_n^e y SW_n^o en función de μ .	74
4.12. $\Lambda_{en}^i, \Lambda_{un}^i, \Lambda_{en}^e, \Lambda_{un}^e, \Lambda_{en}^o$ y Λ_{un}^o en función de μ .	75
4.13. $p_{en}^i, p_{un}^i, p_{en}^e, p_{un}^e, p_{en}^o$ y p_{un}^o en función de μ .	75
4.14. CS_n^i, CS_n^e y CS_n^o en función de μ .	76
4.15. Π_n^i, Π_n^e y Π_n^o en función de μ .	76
4.16. Precios de los servicios URLLC y mMTC en función de μ (Integrado).	78
4.17. Número de usuarios URLLC y mMTC en función de μ , donde $n_{ms}^i = 0$ (Integrado).	79
4.18. Beneficio del operador en función de μ (Integrado).	80
4.19. Bienestar social en función de μ (Integrado).	80
4.20. Comparación de precios en el escenario NS.	81
4.21. Comparación del número de usuarios en el escenario NS.	82
4.22. Comparación del beneficio total en el escenario NS.	82
4.23. Comparación del bienestar social en el escenario NS.	84

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

El mercado de las telecomunicaciones móviles experimenta cambios continuos debido a la creciente demanda de conectividad y las innovaciones tecnológicas, particularmente con la introducción de la red 5G en este mercado. A diferencia de las generaciones anteriores, la red 5G está diseñada para conectar no solo a las personas con Internet, sino también las cosas entre sí y con las personas [1].

El diseño de la red 5G admite tres clases de servicios con requisitos muy heterogéneos [2]. Estos servicios son definidos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones - *International Telecommunication Union* (ITU) como: URLLC, eMBB y mMTC [3, 4], y son compatibles con la red 5G. Concretamente, URLLC es un servicio con características cruciales dentro de la red 5G, ya que permite la provisión de servicios de comunicación extremadamente fiables y de baja latencia [5], mientras que el servicio mMTC permite la transmisión de datos para un gran número de dispositivos con bajo consumo de energía, baja complejidad y bajo coste [6], y por último, eMBB es un servicio que proporciona comunicaciones de alta velocidad de datos y admite aplicaciones como streaming de vídeo, juegos en línea y realidad virtual [3]. Las aplicaciones críticas, como los sistemas avanzados de asistencia a la conducción de vehículos en ciudades inteligentes, los vehículos autónomos y la Industria 4.0 sensible a los retrasos para la automatización de fábricas a gran escala, requieren una baja latencia y una alta fiabilidad que no pueden verse comprometidas [5].

La importancia de los servicios URLLC, eMBB y mMTC en la red 5G, y su influencia en los modelos de negocio de los operadores de red, es clave y debe ser considerado al momento de analizar la viabilidad económica en la provisión de estos servicios para que los operadores puedan recuperar su inversión [7].

Por otro lado, como el mercado de las telecomunicaciones engloba a operadores de red, proveedores de servicios y usuarios, lo convierte en un sector clave en la economía global. En el mercado y en la industria hay una búsqueda constante de modelos de negocio viables que satisfagan los requisitos de servicio cada vez más exigentes de los usuarios [8]. Por esta razón, es importante realizar un análisis profundo sobre

la viabilidad económica de los modelos de negocio y de la red 5G con NS. Dicho análisis considera las perspectivas de los operadores de red y de los usuarios finales, lo que contribuye significativamente al campo de las telecomunicaciones y proporciona perspectivas nuevas para la toma de decisiones en el sector. Por lo tanto, para satisfacer las demandas de los usuarios cada vez más exigentes, se analizan modelos de negocio que incorporan NS. El NS es una técnica de virtualización de redes que permite la creación de múltiples redes lógicas dentro de una única red física, con el objetivo de proporcionar servicios eficientes y de alta calidad [9]. El NS permite la creación de redes virtuales para servicios específicos, lo que permite a los operadores de red ofrecer servicios personalizados y de alta calidad a sus clientes, mejorando así su competitividad en el mercado. La implantación del NS puede influir significativamente en la viabilidad económica de los modelos de negocio de los operadores de red. Por otro lado, con respecto a los usuarios, la QoS que llegan a percibir depende de los parámetros más críticos del servicio específico [6]. Comprender la relación entre la función de utilidad del usuario y la QoS percibida es esencial, ya que permite observar cómo influye en la satisfacción del usuario y en sus interacciones con otros usuarios. Además, el análisis del cambio constante del mercado de las telecomunicaciones, ayuda a comprender mejor las oportunidades y retos que surgen.

Esta tesis doctoral aborda un tema de gran relevancia en el campo de las telecomunicaciones: los modelos de negocio para la provisión de los servicios URLLC, eMBB/mMTC sobre una red 5G con la incorporación del NS. El estudio analiza la viabilidad económica de estas redes y los modelos de negocio subyacentes.

1.2. Objetivos

La implementación de la red 5G plantea un desafío complejo para los operadores de red, ya que deben encontrar formas de recuperar su inversión. En este sentido, es importante explorar nuevos modelos de negocio que permitan maximizar los beneficios generados por la provisión simultánea de servicios URLLC, eMBB y mMTC en una misma red 5G.

El objetivo principal de la tesis es el análisis de modelos de negocio para operadores de redes 5G soportados sobre Network Slicing. La expresión de la función de utilidad del usuario es en base a los parámetros más importantes de QoS de los servicios URLLC, eMBB y mMTC. La viabilidad para los operadores de red 5G es por medio de sus funciones de beneficios, mientras que la viabilidad para los usuarios es por medio de la función de utilidad del usuario.

A través del análisis de los modelos, se logra:

- Formular nuevas expresiones de la utilidad del usuario, con base en la identificación de los parámetros de QoS en la provisión e interacción de los servicios URLLC y eMBB/mMTC en un mercado con un operador de red, dos operadores de red y los usuarios. Desde un punto de vista económico para modelar el comportamiento de los mercados por medio de los conceptos de microeconomía.
- Analizar la provisión de dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) en una red 5G con la incorporación del NS, a través de un modelo de una cola con dos servicios diferentes, en un mercado con un único operador de red que ofrece los dos servicios y con dos operadores de red que ofrecen un servicio cada uno.
- Estudiar una situación de óptimo social en el mercado, donde se busca maximizar el bienestar

social en general. El óptimo social se utiliza como referencia para comparar y evaluar los modelos de negocio en función del bienestar social; en base a la nueva expresión de la utilidad del usuario sujeto a los parámetros de QoS en la provisión e interacción de los servicios URLLC y eMBB/mMTC en un mercado con un operador o dos operadores y los usuarios.

1.3. Metodología

Para alcanzar los objetivos previamente establecidos, se ha utilizado una metodología basada en el método científico [10], que se enfoca en obtener nuevos conocimientos a través de una observación sistemática y metódica que puede ser verificada en el proceso de investigación. Iniciando con un análisis de las expresiones de utilidad del usuario a través del estudio del estado del arte de modelos de negocio, modelos de una cola con dos servicios y enfoques diferentes [11, 12]. Este análisis nos ha brindado una visión general del área de investigación y ha permitido la formulación de nuevas expresiones basadas en los parámetros de QoS en la provisión e interacción de los servicios URLLC, eMBB y mMTC en la red 5G con la incorporación de NS [13] enfocado en evaluar la interacción de transmisión de datos del servicio eMBB, el nivel de tolerancia al retraso del servicio URLLC y un gran número de usuarios (Dispositivos de Internet de las Cosas - *Internet of Things* (IoT)) conectados a la red 5G del servicio mMTC. Posteriormente, se ha analizado los escenarios de competencia entre operadores de red y usuarios. Se ha empleado conceptos de la teoría de colas, microeconomía, así como la teoría de juegos, que comprende los equilibrios de Nash y Wardrop, modelos de inducción hacia atrás [14]. Estos conceptos se emplean para profundizar el análisis de las interacciones que surgen entre los operadores y usuarios, con el objetivo de establecer un equilibrio entre estos actores del mercado. Se ha buscado y encontrado soluciones a los diferentes escenarios a través de problemas de optimización y su estudio analítico, teniendo en cuenta los diferentes tipos de restricciones [15]. Se ha ejecutado simulaciones numéricas de los modelos de negocio y modelos de red para analizar su comportamiento en función de las características de cada modelo. Finalmente, se ha analizado los resultados y se han extraído las conclusiones que se han presentado en revistas y estancias de investigación.

1.4. Herramientas

Para la realización de la tesis se ha empleado las herramientas que se describen a continuación:

- Un ordenador de escritorio y otro portátil con unos recursos de sistema mínimos necesarios para ejecutar programas informáticos con el objetivo de analizar los modelos propuestos. Programas informáticos como Wolfram Mathematica 12.3 para las resoluciones analíticas y numéricas de la investigación, LaTeX para la redacción y elaboración de los documentos científicos, y otros programas informáticos complementarios.
- Acceso a las investigaciones científicas y a los diferentes documentos requeridos para el desarrollo de la investigación. La bibliografía incluye conceptos de microeconomía, teoría de colas, teoría de juegos, redes 5G, NS y la teoría de optimización clásica.
- La óptima gestión de los recursos que fueron necesarios para la realización de la estancia de investigación de ámbito internacional, lo que ha podido profundizar los aspectos teóricos generales y su aplicación en el análisis de los modelos estudiados, asimismo, permitió formar parte de un

nuevo grupo de investigación y desarrollar nuevas habilidades en el marco de la investigación, los cuales fortaleció el desarrollo investigativo.

- Los recursos y herramientas necesarios para compartir y difundir los resultados del trabajo a una audiencia más amplia por medio de publicaciones en revistas especializadas, con el fin de garantizar una mayor visibilidad e impacto del trabajo realizado.

1.5. Contexto

Durante la realización de esta tesis doctoral en el Departamento de Comunicaciones de la Universitat Politècnica de València, se ha tenido la oportunidad de participar en proyectos de investigación de gran relevancia en el ámbito de las redes inalámbricas heterogéneas y la segmentación de la red. Algunos de los proyectos en los que se ha colaborado activamente son:

- Proyecto *ATLAS - Dynamic network slicing in 5G Radio Access* (PGC2018-094151B-I00). En este proyecto, se ha desempeñado como investigador y se ha contribuido en la actividad de la tesis doctoral. Los esfuerzos realizados en este proyecto dieron como resultado la aceptación del artículo (ver 1.6). Este artículo representa un aporte al avance del conocimiento en esta área de estudio.
- Proyecto *Radio access network evolution towards 6G for massive and low latency services* (PID2021-123168NB-I00). En este proyecto, se ha colaborado como investigador durante los estudios de doctorado, aplicando y ampliando los conocimientos en investigación científica y trabajando en conjunto con expertos en el campo. El resultado del esfuerzo y dedicación en este proyecto fue la publicación del artículo [16] y el envío del artículo previamente mencionado (ver 1.6).

Por otro lado, durante el desarrollo del doctorado, se ha realizado una estancia de investigación de tres meses en el IMT ATLANTIQUE que está ubicado en la ciudad de Rennes, Francia, bajo la supervisión del Dr. Patrick Maillé. Esta experiencia ha permitido finalizar el análisis de uno de los escenarios presentados en esta tesis doctoral y publicar el artículo científico [16]. Quiero destacar que el Gobierno de Perú, a través de la Beca Generación del Bicentenario, ha financiado todas las actividades relacionadas con el programa de estudios doctorales.

1.6. Publicaciones

Las publicaciones de los siguientes artículos científicos, que abordan diferentes aspectos de la tesis, son los resultados de la investigación.

Capítulo 3:

El capítulo 3 examina la viabilidad económica de dos escenarios y dos modelos de negocio para la provisión de dos tipos de servicios (URLLC y eMBB, URLLC y mMTC), dando lugar a:

Aceptación del artículo siguiente por la revista *Journal of Network and Systems Management*, el cual se encuentra en proceso de publicación.

Moreno-Cardenas, E., Sacoto-Cabrera, E.J., and Guijarro, L., Economic alternatives for the provision of URLLC and eMBB services over a 5G network, *Journal of Network and Systems Management*.

Y la publicación del artículo.

Moreno-Cardenas, E., Guijarro, L., Market and Sharing Alternatives for the Provision of Massive Machine-Type and Ultra-Reliable Low-Latency Communications Services over a 5G Network, *Electronics*, 2023, vol. 12, no 24, p. 4994. <https://doi.org/10.3390/electronics12244994>

Capítulo 4:

El capítulo 4 presenta los resultados de las investigaciones sobre los escenarios y modelos de negocio propuestos. Se profundiza el análisis y las interpretaciones sobre los resultados más importantes.

1.7. Estructura de la tesis

La organización del resto de la tesis es de la siguiente manera:

- **Capítulo 2:** Se lleva a cabo una exhaustiva revisión de los antecedentes y el estado actual del arte, explorando en profundidad los conceptos de operadores de red y los diversos modelos de negocio que se desarrollan para las redes 5G con la incorporación del NS. Además, se proporciona una detallada descripción de las características de QoS de los servicios URLLC, eMBB y mMTC, así como de las características técnicas de la red 5G y de la tecnología de NS. Asimismo, se realiza una revisión detallada de diversos trabajos relacionados con el análisis económico de distintos modelos de negocio para los servicios URLLC y eMBB/mMTC, los cuales se relacionan con el marco conceptual de la presente tesis doctoral.
- **Capítulo 3:** Se presenta los diferentes escenarios, modelos de red 5G y modelos de negocio analizados en el marco de la tesis doctoral. Se proponen dos escenarios y dos modelos de negocio para la provisión de los servicios URLLC y eMBB/mMTC por los operadores de red a los usuarios finales. El capítulo se divide en tres subsecciones. La primera presenta los aspectos generales en común. La segunda se enfoca en la prestación de los servicios URLLC y eMBB. La tercera se enfoca en la prestación de los servicios URLLC y mMTC. Para el análisis de los escenarios y modelos de negocio propuestos, se utilizan modelos que permiten interrelacionar tanto las características del sistema como las económicas. En este sentido, se modelan los incentivos a través de las utilidades de los usuarios y los beneficios de los operadores de red, mientras que se utiliza la teoría de los juegos para modelar la interacción estratégica entre la decisión de suscripción de los usuarios y la decisión de fijación de precios de los operadores de red.

- **Capítulo 4:** Se presenta los resultados numéricos de los dos escenarios analizados en cada uno de los modelos de negocio propuestos en el capítulo 3. Se aborda en profundidad los resultados y sus interpretaciones que corresponde. Los resultados más relevantes son los precios de los servicios, el número de usuarios suscritos a un servicio en específico, los beneficios de los operadores de red y por último, el bienestar social. Se presenta una comparación de los resultados entre los dos modelos de negocio con los resultados del óptimo social. En base a estos resultados, se presenta las conclusiones concretas de la segunda y tercera parte de este capítulo. Las interpretaciones permiten tener una comprensión más profunda de las implicaciones de cada modelo y cómo estos influyen en el bienestar social, en los beneficios de los operadores y en el número de usuarios suscritos a cada servicio.
- **Capítulo 5:** Se presenta las conclusiones de esta tesis doctoral, donde se resumen todos los escenarios y modelos de negocio estudiados, y se destacan los resultados más relevantes. Además, en este capítulo, se proporciona algunas recomendaciones para futuros trabajos en esta área. Con esto se finaliza la presente tesis doctoral.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

El planteamiento de los escenarios, los modelos de negocios y su análisis en esta tesis, se basa en una revisión exhaustiva y profunda de investigaciones relacionadas con los operadores de red, las redes 5G, los servicios dentro de esta red (URLLC, mMTC y eMBB) y las tecnologías emergentes que mejoran la interacción entre operadores de red y usuarios. El análisis de estas investigaciones proporciona un sólido marco teórico para abordar de manera integral los aspectos clave relacionados con los modelos de negocio y su aplicabilidad en el contexto de las redes de telecomunicaciones actuales. Uno de estos aspectos clave es el NS, que permite la compartición de los recursos de red entre operadores de red que ofrecen distintos servicios a sus respectivos grupos de usuarios.

La revisión de los trabajos relacionados con la tesis, ofrece definiciones y análisis sobre los operadores de red, los modelos de negocio existentes y nuevos en las redes 5G, enfocados en las decisiones estratégicas tomadas por los actores en cada uno de los escenarios para evaluar su viabilidad económica. Además, se han revisado investigaciones que brindan un marco teórico y práctico de la teoría de juegos utilizada para analizar la toma de decisiones óptimas entre los operadores de red y los usuarios en cada modelo de negocio y escenario. Los resultados de esta investigación ofrecen información para comprender y mejorar los modelos de negocios en el ámbito de las telecomunicaciones.

En este capítulo, se estructuran cuatro subsecciones principales. La Sección 2.1 presenta una revisión exhaustiva de los trabajos previos realizados sobre el desarrollo de las telecomunicaciones a lo largo del tiempo dentro de este sector en general. La Sección 2.2 se centra en realizar una revisión profunda de trabajos que definen el concepto de modelo de negocio, asimismo, destaca los trabajos relevantes e influyentes sobre los modelos de negocio en las Redes de Cuarta generación - *Fourth-Generation Networks* (4G) para los operadores de red. La Sección 2.3 se enfoca en resaltar los trabajos más relevantes e influyentes en las redes 5G, haciendo especial énfasis en el NS, sus características y aplicaciones. Además, presenta la revisión de aquellas investigaciones relacionadas con los modelos de negocio disruptivos y actuales para operadores de red 5G. La Sección 2.4 presenta la revisión de aquellas investigaciones relacionadas con el análisis económico de distintos modelos de negocio para la prestación de los servicios URLLC y eMBB/mMTC. Finalmente, la Sección 2.5 presenta las

conclusiones derivadas de la revisión del estado del arte en su conjunto.

2.1. Evolución de las telecomunicaciones

En esta parte de la tesis, se lleva a cabo una revisión de investigaciones relevantes sobre la evolución de las telecomunicaciones, con énfasis en los operadores de red y aquellos conceptos fundamentales relacionados con los modelos de negocio, como punto de partida. Esta primera revisión se realiza como parte de la línea de investigación de la tesis.

La historia y evolución de la prestación de servicios en el sector de las telecomunicaciones comienza desde las Redes de Primera generación - *First-Generation Networks* (1G) hasta lo que hoy en día es, las redes 5G. La red 1G se desarrolló en la década de 1970 y los sistemas analógicos que predominaban era la voz como el tráfico principal, asimismo, los estándares de la red 1G utilizaban métodos simples como el Acceso Múltiple por División de Tiempo - *Time-Division Multiple Access* (TDMA) y Acceso Múltiple por División de Frecuencia - *Frequency-Division Multiple Access* (FDMA) [17]. Las Redes de Segunda generación - *Second-Generation Networks* (2G) fueron una innovación tecnológica en los años 80 e introdujeron la tecnología digital y técnicas de procesamiento de señales digitales, permitiendo servicios de comunicación de voz y datos a baja velocidad. Los estándares de la red 2G eran digitales y se enfocaban en el mercado, lo que contribuyó a su éxito. Además de mejorar la calidad de voz, la movilidad global fue un factor atractivo para los usuarios, impulsando la adopción de dispositivos 2G [18]. Antes del despliegue de la cobertura de las Redes de Tercera generación - *Third-Generation Networks* (3G) a principios de los años 2000, la red 2G era ampliamente utilizada en los Estados Unidos, con una alta tasa de suscripción celular [19]. Sin embargo, las velocidades de descarga prometidas en la red 2G eran difíciles de alcanzar para la mayoría de los usuarios. Con el lanzamiento de la red 3G, las velocidades de descarga aumentaron significativamente, pero los primeros dispositivos 3G presentaban limitaciones en términos de funcionalidad. Fue en la segunda mitad de la década de 2000 cuando se introdujeron los teléfonos inteligentes diseñados específicamente para aprovechar al máximo las velocidades más altas de la cobertura de la red 3G [20]. Con el objetivo de atender la creciente demanda de capacidad de red, velocidades más rápidas para la transferencia de datos y aplicaciones multimedia, los estándares de la red 3G comenzaron a evolucionar. Estos sistemas representan una mejora progresiva de la red 2G y se basan en dos infraestructuras troncales: una basada en conmutación de circuitos y otra en conmutación de paquetes. La red 4G aportó mejoras significativas respecto a su predecesora, la red 3G, ya que ofrecía mayor rendimiento, interoperabilidad global, servicios totalmente convergentes, rentabilidad, dispositivos fáciles de usar, capacidades del Sistema de Posicionamiento Global - *Global Positioning System* (GPS) mejoradas, escalabilidad y aplicaciones de gestión de crisis [21]. En conjunto, la red 4G representó un avance sustancial en los sistemas de comunicaciones móviles. La red 4G se basaba en una visión que hacía énfasis en los servicios totalmente convergentes, el acceso móvil ubicuo, los diversos dispositivos de usuario, las redes autónomas y la dependencia del software. Esta visión se desarrolló desde una perspectiva tecnológica, centrándose en áreas clave como redes y servicios, sistemas de software y acceso inalámbrico. Sin embargo, el crecimiento exponencial de dispositivos inalámbricos, la Calidad de Experiencia - *Quality of Experience* (QoE) del usuario y el aumento en el uso de datos cada vez requería mayor capacidad y eficiencia, ya que para el año 2020 fueron más de 50 mil millones de dispositivos conectados a la red móvil [22]. Dado el crecimiento continuo del tráfico de datos móviles, la red 4G ya no era suficiente para brindar soporte a dicha demanda. Por lo tanto, la adopción de la red 5G surge como una solución viable a esta necesidad, ya que la red 5G es capaz de proporcionar hasta 1000 veces más capacidad que la red 4G. El marco de las redes 5G se describe a detalle más adelante.

Por lo tanto, las redes de telecomunicaciones han adquirido una importancia cada vez mayor en nuestra vida cotidiana. El acceso a Internet a través de dispositivos móviles, se ha vuelto imprescindible y existe una presión social para formar parte de esta tendencia. Las redes móviles han ganado terreno rápidamente desde sus inicios, con varios millones de suscriptores móviles a nivel mundial a finales del 2010, mientras que según la ITU, en su documento sobre “Facts and Figures 2022”, revela un incremento de 4.900 millones de usuarios conectados a Internet en el 2021 a nivel mundial, asimismo, indica que aproximadamente las tres cuartas partes de la población mundial eran propietarios de un teléfono móvil para el 2022. El tiempo dedicado a Internet continúa aumentando, superando el tiempo dedicado a otras actividades. Las propias redes han evolucionado considerablemente a lo largo del tiempo. Internet se ha convertido en la red central en la que convergen todas las demás y se ha abierto a las organizaciones comerciales [23]. El crecimiento de las comunicaciones inalámbricas, así como las redes celulares y Fidelidad Inalámbrica - *Wireless Fidelity* (WiFi), ha llevado a un aumento masivo del tráfico en todo el mundo, por lo cual, el modelo de negocio inicial de Internet ha ido cambiando en el sector de las telecomunicaciones, teniendo en cuenta la historia de los mecanismos de fijación de precios de los servicios por los operadores de red, para garantizar la aceptación de los usuarios.

2.2. Modelos de negocio

A lo largo de la evolución de las telecomunicaciones, los modelos de negocio han ido cambiando en función de la generación de tecnología de red disponible. Por lo cual, la definición de un modelo de negocio es importante al momento de abordar la investigación en la industria de las telecomunicaciones.

El término de modelo de negocio carece de una definición estandarizada, ya que posee una amplia utilización en la literatura académica. La razón de este hecho se debe a que existen diversos modelos de negocios que se aplican a distintas categorías de la industria. En [24], los autores definen que un modelo de negocio es una organización que crean, entrega y capta valor. Por lo tanto, el concepto de modelo de negocio tiene una importancia significativa en la investigación científica. Además, en el sector de las telecomunicaciones, las nuevas oportunidades de negocio y propuestas de valor se aprovechan a través de modelos de negocio, creando valor dentro de un ecosistema completo, a la vez que enfatizan la alineación entre control y valor [25]. Por otra parte, un modelo de negocio es un conjunto de diversos componentes, como la propuesta de valor, que representa el valor creado para los clientes (precio, calidad, servicio); el mercado objetivo y los segmentos de clientes (sensibilidad, política); la estructura y el alcance de la cadena de valor desde los proveedores hasta los clientes; los procesos y sistemas de generación de ingresos (fijación de precios, establecimiento de márgenes, explotación de posiciones cuasi monopolísticas); la posición de la empresa en el ecosistema del que forma parte, incluidas las cadenas de valor extendidas tanto verticales como horizontales; y las partes interesadas pertinentes [26]. Por tanto, un modelo de negocio está relacionado con tres procesos empresariales estratégicos: exploración y explotación de oportunidades, cocreación y co-captura de valor, y exploración y explotación de ventajas competitivas, al tiempo que se ofrece valor a los clientes [27–30]. Por otro lado, un modelo de negocio se define como un sistema de componentes interdependientes, como recursos y competencias, organizaciones, propuesta de valor para el cliente y costes e ingresos [31–33]. Mientras que en las investigaciones recientes, [28,34], surge la conceptualización que incorpora procesos clave para modelos de negocio que los conectan con el contexto, procesos de oportunidad, procesos de valor y procesos de ventajas. El análisis de los modelos de negocio que se centran en el diseño de negocios exitosos se discute con base en aspectos esenciales como la viabilidad [35], sostenibilidad [36], escalabilidad y crecimiento rentable para determinar que un modelo de negocio llega a tener éxito [37, 38]. Un modelo de negocio viable demuestra la viabilidad de la propuesta de valor y su capacidad

para generar ingresos superiores a los costes. La sostenibilidad se refiere a la viabilidad a largo plazo y la adaptabilidad del modelo de negocio en un entorno cambiante. La escalabilidad evalúa el potencial del modelo de negocio para crecer y expandirse eficientemente. Otras investigaciones [39–48], describen las definiciones de un modelo de negocio en diferentes campos de la literatura, estas definiciones sugieren que un modelo de negocio se estructura como empresa que crea, entrega y captura valor para sus clientes, así como se apropia de dicho valor.

El sector de las telecomunicaciones, una parte de los modelos de negocios, se enfoca en los operadores de red, que son entidades que poseen infraestructura de red y licencias de espectro de radiofrecuencia. En el contexto de la red 5G, los operadores de red utilizan nuevas tecnologías para optimizar sus recursos de red y ofrecer servicios a sus clientes. Sin embargo, la industria de las telecomunicaciones ha presentado desafíos significativos para el desarrollo de modelos de negocio efectivos en el ámbito de los operadores de red. La creación de un modelo de negocio para un operador de red es una tarea compleja que requiere equilibrar múltiples requisitos de diseño. En este sentido, la mejora de la capacidad de los operadores de red es importante para que puedan identificar y establecer el modelo de negocio más adecuado que les permita alcanzar sus objetivos estratégicos y económicos en este entorno en constante cambio y altamente desafiante. La compartición de los recursos de red, como el espectro radioeléctrico o la infraestructura física, es clave dentro de esta industria debido a que estos recursos son limitados. Por lo tanto, los escenarios para compartir los recursos en los diferentes modelos de negocios se pueden plantear de diferentes formas, como por ejemplo, dos operadores de red comparten el mismo recurso de red sin diferenciación de sus usuarios o de ellos. Otro sería cuando los usuarios del primer operador tienen una mayor prioridad de servicio con base en las características de QoS del servicio que suscriben en comparación a los usuarios del otro operador de red.

Con base en las diversas definiciones del modelo de negocio en el contexto de esta tesis, se define al modelo de negocio como la lógica a través de la cual un operador de red puede entregar un valor (servicio que ofrece a sus usuarios) dentro del ecosistema de las redes 5G, y que además, le permita generar ingresos y obtener beneficios por el valor ofrecido. Esto implica elementos interconectados como las relaciones con los usuarios, la propuesta de valor y la gestión de sus infraestructuras de red.

2.2.1. Modelos de negocio en redes 4G

En esta parte de la tesis, hemos examinado los modelos de negocio actuales utilizados por los operadores de red. Con la llegada de las tecnologías disruptivas 5G, es necesario que estos operadores de red innoven sus modelos de negocio existentes para mantenerse en el nuevo entorno de negocio. Durante las últimas dos décadas, los modelos de negocio convencionales de los operadores de red se han visto más influenciados por el mercado que por la tecnología. Esto se debe a que la transición de las redes 2G/3G a 4G ha sido una mejora evolutiva sin muchas interrupciones tecnológicas en la industria de las comunicaciones móviles.

Por otro lado, en [7], los autores describen aquellos modelos de negocios utilizados por los operadores de red antes de la implementación de las redes 5G. En el *modelo de negocio de servicios gestionados y subcontratados*, los operadores de red subcontratan a proveedores de equipos, la gestión tecnológica y el mantenimiento de la red, centrándose en la adquisición de mercado y la generación de ingresos adicionales a través de servicios de valor agregado [49]. En el *modelo de negocio del Operador de Red Virtual Móvil - Mobile Virtual Network Operator (MVNO)*, los operadores de red alquilan, arriendan o venden su capacidad de red e infraestructura a un MVNO, que crean sus propias plataformas de servicios y revenden con valor agregado a grupos específicos de clientes [50]. En el *modelo de negocio*

de adquisición de mercado, los operadores de red consolidados buscan expandirse a nuevos mercados mediante alianzas estratégicas o adquisiciones para atender a segmentos de clientes adicionales y explorar nuevas oportunidades comerciales [49, 50]. En el *modelo de negocio de servicio de banda ancha móvil*, los operadores de red proporcionan conectividad de Internet móvil a través de tecnologías 3G y 4G en regiones en desarrollo. Este modelo de negocio es popular debido al uso de aplicaciones como WhatsApp, Facebook y Twitter. Inicialmente, se utilizaba un modelo de tarifa plana, pero ahora los operadores de red están implementando planes basados en la demanda debido al aumento en el consumo de servicios por parte de los usuarios. Esto beneficia a los usuarios con estrategias de precios simples y a los operadores de red con flujos de ingresos constantes [49, 50]. El *modelo de negocio WLAN-celular integrado* surge como una evolución del punto de acceso de la Red de Área Local Inalámbrica - *Wireless Local Area Network* (WLAN), brindando conectividad inalámbrica a Internet a los suscriptores de los operadores de red. Se posiciona como un complemento de las redes 3G/4G y puede reemplazar la Estación Base - *Base Station* (BS) de la red celular, reduciendo así los costos de implementación y operativos al eliminar la necesidad de actualizar de 3G a 4G [51].

Por otro lado, otros estudios [52–54], describen las ventajas de la virtualización de las redes de Evolución a Largo Plazo - *Long Term Evolution* (LTE) con base en el intercambio de recursos entre diferentes distintos operadores de red. Los estudios concluyen que las redes LTE pueden compartir de forma eficiente los recursos de red entre múltiples MVNOs, manteniendo al mismo tiempo las características de QoS de cada MVNO participante. Basándose en estas conclusiones y en [55], se describe los tres modelos de negocio para los operadores de red en las redes 4G. En el modelo de negocio "Full-MVNO", el operador de red y el MVNO comparten el recurso común (espectro radioeléctrico), y las tarifas de acceso se fijan en función del espacio del espectro alquilado. Este modelo de negocio permite gestionar distintos niveles de QoS en función de los perfiles y servicios. Mientras que en el modelo de negocio "Multi-Operador de red", el modelo permite a un MVNO conectarse a múltiples operadores de red, considerando diferentes servicios ofrecidos por los operadores de red especializados con distintos niveles de QoS. El recurso compartido con cada operador de red es el espectro radioeléctrico, asimismo, este modelo permite una negociación competitiva de los precios de red, pero reduce la posibilidad de descuentos por volumen a medida que el tráfico de usuarios se extiende por múltiples operadores de red. Por último, el modelo de negocio "Modelo ABC" se basa en el modelo Multi-Operador de red y pretende establecer conexiones con los operadores de red a través de políticas de tráfico y QoS. El objetivo de este modelo fue conectar a los usuarios con el operador de red requerido para sus suscripciones mediante la asignación dinámica de recursos de red. Esta asignación de recursos se basaba en la congestión, los descuentos por volumen, los precios máximos y QoE de los usuarios. Estos modelos de negocio reflejan la evolución de la industria de las comunicaciones móviles y la necesidad de adaptación a los cambios tecnológicos y de mercado.

2.3. Redes 5G

La red 5G proporciona velocidades más rápidas, baja latencia, mayor capacidad y conectividad masiva de dispositivos. Su despliegue y adopción están transformando la forma en que nos comunicamos, interactuamos con la tecnología y abriendo nuevas oportunidades para una amplia gama de sectores y aplicaciones. Según [9], los autores definen que la red 5G tiene como objetivo abarcar una amplia variedad de servicios y dispositivos. Por lo cual, la red 5G se ha vuelto imprescindible en las infraestructuras urbanas, ya que con el avance del despliegue de esta red, IoT [56] y las tecnologías de Datos Masivos (Big Data), ha producido una expansión en la cantidad de clientes y dispositivos conectados a través de métodos de recopilación de datos [57]. A lo largo de la evolución de las

redes móviles, se observa que los cambios generacionales están impulsados principalmente por la necesidad de brindar servicios de datos más rápidos, como por ejemplo: la eficiencia espectral en la Red de Acceso de Radio - *Radio Access Network* (RAN) ha aumentado significativamente de la red 2G al 4G incrementando en un factor de 30. Se espera que la red 5G sea una convergencia de dos perspectivas complementarias que impulsan la investigación y la actividad industrial en esta generación de redes. La primera perspectiva es evolutiva y busca mejorar de manera significativa la eficiencia de las redes móviles, con aumentos significativos en el volumen de tráfico, el número de dispositivos y el rendimiento. La mayor parte de la investigación se centra en este enfoque, especialmente en el acceso de radio, analizando nuevas tecnologías y bandas de espectro, como Entradas Múltiples, Salidas Múltiples - *Multiple-Input, Multiple-Output* (MIMO) y ondas milimétricas. La segunda perspectiva está orientada a los servicios y prevé que la red 5G atienda una amplia gama de servicios con requisitos y dispositivos diversos, incluso más allá de las comunicaciones tradicionales entre humanos, incluyendo comunicaciones Máquina a Máquina - *Machine to Machine* (M2M). Este hecho implica que la red 5G debe adaptarse según el tipo de servicio, lo que lleva a la noción de segmentar la red por servicio. Además, será necesario desarrollar e implementar nuevas capacidades mejoradas, esquemas de tráfico inteligente y descarga para satisfacer los diferentes requisitos de las diversas aplicaciones en la red 5G. Para lograr un rendimiento óptimo, es importante explorar los requisitos desde la perspectiva de los usuarios y la red [58, 59], como se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1: QoS en la red 5G.

Por otra parte, en [60, 61], los autores describen que la red 5G se caracteriza por admitir tres servicios distintos según el Sector de Radiocomunicaciones de la ITU (ITU-R): eMBB, URLLC y mMTC. Mientras que en otra investigación [3], se ha estudiado la coexistencia de estos tres servicios heterogéneos dentro de la misma arquitectura de la RAN. La descripción de las características de QoS de estos tres servicios es la siguiente:

- **eMBB** es un servicio que está diseñado para satisfacer las grandes demandas de ancho de banda de los servicios como el trabajo y entretenimiento en la nube, así como la Realidad Aumentada - *Augmented Reality* (AR) y Realidad Virtual - *Virtual Reality* (VR). eMBB permite conexiones estables con tasas de datos máximas muy altas al nivel de velocidades de datos de gigabits por segundo, así como tasas moderadas para usuarios ubicados en los bordes de la celda. El tráfico eMBB es una extensión directa del servicio de banda ancha 4G, con grandes cargas útiles y un patrón de activación de dispositivos que se mantiene estable durante períodos de tiempo prolongados [3]. Esta característica del servicio eMBB permite que la red 5G programe los recursos inalámbricos, de manera que no haya interferencia entre dispositivos eMBB al acceder a un mismo recurso simultáneamente. El objetivo principal del servicio eMBB es maximizar la tasa de datos, al mismo tiempo que garantiza una confiabilidad moderada con una tasa de error de paquete del orden de 10^{-3} y una latencia moderada (unos pocos milisegundos) [62].
- **mMTC** es un servicio orientado a admitir conexiones de una gran cantidad de dispositivos IoT que generan una baja cantidad de datos y tienen una alta tolerancia a la latencia [63–65]. Estos servicios requieren dispositivos con un bajo costo de fabricación y una batería de larga duración, ya que están activos de forma esporádica. En un área determinada, puede haber aproximadamente 1 millón de dispositivos IoT por kilómetro cuadrado [66]. Cada dispositivo mMTC se activa intermitentemente y utiliza una velocidad de transmisión fija, generalmente baja, en el enlace ascendente. Aunque se pueden conectar una gran cantidad de dispositivos mMTC a una BS específica, solo un subconjunto aleatorio de ellos se activa y trata de enviar sus datos en un determinado momento. Debido al gran número de dispositivos potencialmente activos, resulta inviable asignar recursos individuales a cada dispositivo mMTC. Por lo tanto, se deben proporcionar recursos compartidos mediante acceso aleatorio. El tamaño del subconjunto activo de dispositivos mMTC es una variable aleatoria, y su valor promedio mide la tasa de llegada de tráfico mMTC. El objetivo en el diseño del servicio mMTC es maximizar la tasa de llegada que se puede soportar en un recurso de radio dado. La tasa de error de paquete objetivo para una transmisión individual de mMTC suele ser bajo, del orden de 10^{-1} [5, 6].
- **URLLC** es un servicio que comprende requisitos extremadamente estrictos en términos de rendimiento, latencia y confiabilidad de los datos. Estos servicios abarcan una amplia gama de aplicaciones, como la automatización industrial, la cirugía remota [67], la automatización de redes de distribución inteligentes, la seguridad en el transporte y los Vehículos Aéreos no Tripulados - *Unmanned Aerial Vehicle* (UAV) [68]. Los servicios URLLC admiten transmisiones intermitentes de pequeñas cargas útiles con una latencia mínima y una confiabilidad excepcionalmente alta desde un conjunto limitado de terminales que se activan según patrones específicos, generalmente impulsados por eventos externos como alarmas. Aunque las transmisiones URLLC también son intermitentes, el conjunto potencial de transmisiones URLLC es considerablemente más reducido en comparación con el servicio mMTC [5, 69, 70]. El soporte para transmisiones URLLC intermitentes requiere una combinación de programación para garantizar un nivel de previsibilidad en los recursos disponibles, lo cual resulta fundamental para mantener una alta confiabilidad. Además, se emplea acceso aleatorio para evitar que demasiados recursos permanezcan inactivos debido al tráfico intermitente. Dado que se requiere una baja latencia en las transmisiones URLLC, es esencial que cada transmisión sea localizada de manera oportuna. La diversidad, que desempeña un papel crítico en la consecución de una alta confiabilidad, solo se puede lograr mediante el uso de múltiples frecuencias [71]. En términos de velocidad de transmisión, las transmisiones URLLC tienden a ser relativamente bajas, ya que el objetivo principal de URLLC es minimizar la latencia hasta a niveles extremadamente bajos (0.25 - 0.3 ms/paquete) al mismo tiempo que garantiza tasas de errores de paquetes inferiores a 10^{-5} , a pesar de las reducidas longitudes de bloque utilizadas y garantizar un nivel de confiabilidad muy alta (99,999 %) [62–64, 72].

En concreto, los objetivos para la red 5G del Proyecto Asociación de Tercera Generación - *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) se puede resumir de la siguiente manera. Primero, producir hasta 20 Gbps de velocidad para el servicio eMBB y aumentar la capacidad de suscriptores unas cien veces los niveles actuales. Las expectativas de las velocidades de enlace descendente son un incremento de 100 Mbps a Gbps en la práctica. Segundo, para el servicio URLLC conseguir una de tasa de error de paquetes URLLC menor a 10^{-5} y un retardo menor a 1 milisegundo (ms) para algunos dominios de IoT verticales. Tercero, permitir la conectividad masiva de dispositivos para el servicio mMTC, así como la incorporación de requisitos de Red de Área Amplia - *Wide Area Network* (WAN) de baja potencia para fortalecer las soluciones de IoT.

Por lo tanto, para satisfacer los requisitos de QoS de los servicios eMBB, mMTC y URLLC, las redes 5G implementan la clasificación de paquetes en grupos específicos y aprovechan tecnologías como NS [73], la Red Definida por Software - *Software Defined Networking* (SDN) y la Virtualización de Funciones de Red - *Network Function Virtualization* (NFV). Estas tecnologías permiten asignar adecuadamente los recursos de red, como la reserva de ancho de banda, en función de las necesidades de cada servicio.

En general, la combinación de los servicios URLLC, eMBB y mMTC permite a las redes 5G soportar una amplia gama de aplicaciones y servicios con diferentes requisitos de fiabilidad, latencia, velocidad de datos y número de dispositivos. Esto hace que las redes 5G sean adaptables para soportar una amplia gama de casos de uso, aplicaciones y modelos de negocio debido a su alto nivel de versatilidad.

2.3.1. Network slicing

Las redes 5G utilizan NS para proporcionar personalización y flexibilidad, permitiendo que diferentes aplicaciones y servicios sean compatibles con la misma red. En [74], los autores definen NS como un concepto para ejecutar múltiples redes lógicas como operaciones de negocios independientes sobre una infraestructura física en común. NS es clave en las redes 5G porque permite crear múltiples redes virtuales con características y capacidades diferentes en una infraestructura física compartida. Esto permite a los operadores de red ofrecer servicios diferenciados a distintos clientes, con diferentes requisitos de velocidad, latencia, seguridad y fiabilidad. NS también permite un uso más eficiente de los recursos de red, reduce los costes operativos y facilita el despliegue de nuevos servicios y aplicaciones.

Con base en lo descrito, se profundiza la revisión de los elementos más importantes sobre el concepto de NS, tomando como base la literatura revisada. En dicho análisis se consideran los elementos clave de la arquitectura, el diseño, las tecnologías y los requisitos del NS, con el enfoque puesto en la creación de varios modelos de negocio potenciales que podrían desarrollarse en las redes 5G.

- Arquitectura del NS para la red 5G.

Aunque, NS para la red 5G fue introducido por primera vez por las Redes Móviles de Próxima Generación - *Next Generation Mobile Networks* (NGMN) [75], la arquitectura del NS tiene dos visiones principales. La primera es la visión de la Asociación público-privada de la Infraestructura 5G - *5G Infrastructure Public Private Partnership* (5G-PPP) [9, 76] que ofrece un estudio sobre los roles y las relaciones entre las diferentes partes de la red 5G. Esta visión promueve la softwarización y el enfoque de *slice* para admitir diversos casos de uso. 5G-PPP se divide en cinco capas: la capa de infraestructura, la capa de función de red, la capa de orquestación, la capa de servicio y la capa de función comercial. La segunda es la visión de NGMN, que propone una arquitectura flexible de redes software que permite la coexistencia de diferentes verticalidades en una misma infraestructura. Inicialmente, se enfocaba en dividir la Red Principal - *Core Network*

(CN), pero ahora aboga por un enfoque de Extremo a Extremo - *End-to-End* (E2E) que incluye la RAN [58]. La arquitectura de NGMN se compone de tres capas: recursos de infraestructura, habilitación comercial y aplicación comercial. La implementación de servicios sigue un enfoque descendente a través de un proyecto de segmento de red que controla la instancia del segmento durante su ciclo de vida. Este segmento puede estar compuesto por varias subredes con funciones y recursos específicos para cumplir con los requisitos del servicio. En general, según NGMN, una arquitectura de NS consta de tres capas: una capa de infraestructura de red, una capa de instancia de segmento de red y una capa de instancia de servicio [77], como se muestra en la Figura 2.2. La Capa de Instancia de Servicio 5G (5GSIL) representa los diferentes servicios que deben ser compatibles, donde cada instancia de servicio representa un servicio específico que puede ser proporcionado por el operador de red o por terceros. La capa de instancia de NS 5G (5GNSI) proporciona las características de red requeridas por un 5GSI. Un 5GNSI puede ser compartido entre varios 5GSI proporcionados por el operador de red. El 5GNSI puede estar compuesto por ninguna, una o más instancias de subred. La Capa de Recursos 5G (5GRL) incluye recursos físicos (como recursos de computación, almacenamiento, transporte y acceso de radio) y recursos lógicos (como la partición de un recurso físico o la agrupación de múltiples recursos físicos dedicados o compartidos por un conjunto de funciones de red).

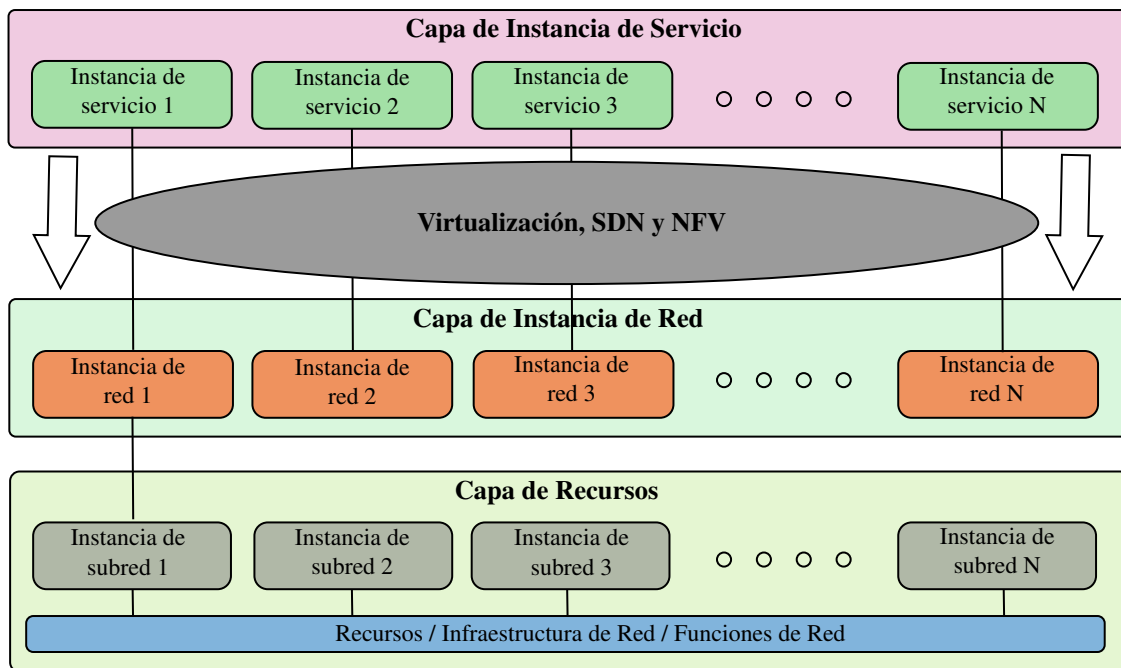


Figura 2.2: Marco genérico de propuestas de la arquitectura 5G.

- Principios de diseño clave de NS.

El NS permite crear múltiples redes lógicas en una infraestructura física compartida para atender a diversas aplicaciones de mercado. Además, NS se rige por tres principios clave: El aislamiento, elasticidad y personalización de E2E [9, 78–81].

El aislamiento es una propiedad fundamental que garantiza la separación y la independencia entre los diferentes segmentos creadas. Consiste en asegurar que cada segmento sea aislada y no interfiera con otros segmentos, tanto en términos de rendimiento como de seguridad. Esto implica que los recursos asignados a un segmento estén completamente separados y no sean compartidos

o afectados por otros segmentos. Asimismo, el aislamiento permite que cada inquilino (operador de red, proveedor de servicio) de un segmento tenga un entorno virtual dedicado y protegido, sin interferencias ni accesos no autorizados por parte de otros inquilinos [82]. Además, garantiza que el rendimiento y la QoS de un segmento no se vean afectados por el uso de recursos de otros segmentos. *La elasticidad* se refiere a la capacidad de ajustar dinámicamente los recursos asignados a cada segmento de acuerdo con las necesidades y demandas cambiantes. Permite una asignación flexible y eficiente de los recursos de red para adaptarse a las variaciones en el tráfico y las demandas de los usuarios [78]. Asimismo, la elasticidad se logra mediante la reubicación de la NFV, el escalado hacia arriba o hacia abajo de los recursos asignados y la reprogramación de las funcionalidades de control y datos. Esto permite optimizar el uso de los recursos disponibles y garantizar que cada segmento tenga la capacidad necesaria para proporcionar el rendimiento requerido [81]. Un desafío importante en la implementación de la elasticidad en NS es establecer políticas adecuadas para la negociación entre segmentos, de modo que los cambios en un segmento no afecten negativamente el rendimiento de otros segmentos. *La personalización de E2E* en NS permite a los operadores de red adaptar y personalizar los recursos compartidos para diferentes inquilinos y aplicaciones [81]. Asimismo, permite controlar y adaptar con precisión los recursos en función de los requisitos específicos del proveedor. Esta personalización incluye configuraciones, garantías de rendimiento, medidas de seguridad y el Acuerdo de Nivel de Servicio - *Service Level Agreement* (SLA) adaptados a las necesidades de cada inquilino. Aprovechando NFV, SDN y la orquestación de red, los operadores de red pueden asignar y gestionar dinámicamente los recursos, garantizando una utilización eficiente dentro del segmento. Esta flexibilidad permite a los operadores de red ofrecer servicios personalizados, satisfacer las diversas demandas de los sectores verticales y optimizar la asignación de recursos y la eficiencia de la red.

- **Habilitadores de tecnología de red 5G.**

NS es habilitado por NFV, SDN, Computación en la Nube (Cloud Computing) y Computación en el Borde (Edge Computing) proporcionando flexibilidad, escalabilidad, gestión centralizada y proximidad a los usuarios necesarios para crear segmentos de red personalizadas y adaptadas a las necesidades específicas de los usuarios, aplicaciones y casos de uso [58, 81]. *NFV* permite desacoplar las funciones de red de los equipos físicos y ejecutarlas como instancias virtuales en infraestructuras compartidas. Esto facilita la creación de segmentos independientes y personalizadas, ya que las funciones de red pueden asignarse y adaptarse según las necesidades específicas de cada segmento [83]. Además, NFV proporciona flexibilidad y escalabilidad al permitir la asignación dinámica de recursos según la demanda. Mientras que *SDN* desacoplan el plano de control del plano de datos en una red, lo que permite una gestión centralizada y programable de los recursos de red. Asimismo, SDN permite la segmentación de la red en múltiples segmentos y proporciona un control granular sobre el flujo de datos y la asignación de recursos en cada segmento [84]. Esto garantiza una gestión eficiente y adaptable de los recursos, lo que es esencial para satisfacer las necesidades específicas de cada segmento [85, 86]. Por otro lado, *Cloud Computing* es una tecnología clave que respalda el NS al proporcionar una infraestructura compartida y elástica para alojar los segmentos. Las capacidades de escalabilidad y recursos bajo demanda de Cloud Computing permiten la asignación flexible de recursos a cada segmento según sus requisitos [87]. Además, Cloud Computing facilita la implementación rápida y la gestión centralizada de los segmentos. Según [83], en un entorno de Cloud Computing, el papel del Proveedor de Servicio - *Service Provider* (SP) se divide en dos categorías: Proveedor de Infraestructura - *Infrastructure Provider* (InP) y SPs. Los InPs gestionan plataformas en la nube y alquilan recursos según el modelo de precios basado en el uso, mientras que los SPs alquilan recursos de los InPs para atender a los usuarios finales. La Cloud Computing consta de tres modelos de servicio [87]. Software como Servicio - *Software as a Service* (SaaS), Plataforma

como Servicio - *Platform as a Service* (PaaS) e Infraestructura como Servicio - *Infrastructure as a Service* (IaaS). El SaaS permite a los usuarios acceder a aplicaciones y servicios alojados en la nube a través de un navegador web. El PaaS proporciona una plataforma para desarrollar y gestionar aplicaciones sin preocuparse por la infraestructura. El IaaS permite a los usuarios acceder y gestionar recursos de infraestructura remotos, como computación, almacenamiento y redes. Por último, *Edge Computing* es fundamental para el NS al acercar el procesamiento y los recursos de almacenamiento más cerca de los usuarios y las aplicaciones. Esto permite una baja latencia y un mayor rendimiento al alojar las funciones de red y los servicios en los puntos de acceso más cercanos a los usuarios. Con *Edge Computing*, los segmentos pueden ofrecer servicios personalizados y optimizados en tiempo real, lo que es especialmente importante para aplicaciones sensibles a la latencia y de baja latencia, como IoT y las aplicaciones de VR/AR [88, 89]. Otros habilitadores son los hipervisores de red que abstraen la infraestructura física en NS virtual lógicamente aislada [90]; la Máquina Virtual - *Virtual Machine* (VM) que permite la virtualización de un recurso físico donde un experimentador puede ejecutar su propio Sistema Operativo - *Operating System* (OS) [91]; los contenedores que son alternativas ligeras a las VMs basadas en hipervisor de red y se crean sobre la base de la virtualización a nivel del OS [91].

- Segmentación de la red basada en recursos.

La NS implica segmentar la infraestructura física en diferentes niveles para lograr una mayor flexibilidad y eficiencia. Estos niveles incluyen los equipos de usuario, la red de acceso, la red central y el corte de la red periférica. En el nivel de equipo de usuario, los dispositivos pueden comunicarse directamente entre sí, lo que permite la comunicación de Dispositivo a Dispositivo - *Device to Device* (D2D). Además, la capacidad de almacenamiento en caché de los equipos de usuario permite un acceso instantáneo a los contenidos. Sin embargo, para incentivar a los equipos de usuario a proporcionar almacenamiento en caché y comunicación de D2D, se necesita un mecanismo de incentivos atractivo [78, 92]. Para asignar los recursos a nivel de equipo de usuario se necesitan estrategias de segmentación eficaces [81]. Estas estrategias garantizan que los recursos se utilicen de forma eficiente y se asignen a distintos segmentos, cada uno de los cuales responde a las necesidades y casos de uso específicos de los usuarios. En el contexto de la RAN, se han considerado diversas técnicas, como el Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencias - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) y el Acceso Múltiple no Ortogonal - *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA) [93, 94]. Estas técnicas permiten una utilización eficiente del espectro radioeléctrico y dan cabida a múltiples usuarios simultáneamente, mejorando la capacidad y el rendimiento de la RAN. Más allá de los equipos de usuario y la RAN, es esencial compartir eficazmente los recursos informáticos en la red central, la nube y el borde. Estos recursos deben asignarse de manera eficiente entre los distintos operadores de red, cumpliendo al mismo tiempo los requisitos generales de diseño y garantizando una prestación de servicios fiable y escalable. NS permite personalizar y asignar recursos a distintos niveles, lo que posibilita servicios a medida y una utilización eficiente de los recursos en toda la infraestructura de red.

En relación a la revisión bibliográfica sobre NS en esta sección, se realiza un resumen sobre sus aspectos más relevantes.

- Flexibilidad y personalización: El NS permite a los operadores de red adaptar y personalizar sus redes para satisfacer las necesidades específicas de diferentes casos de uso y aplicaciones. Esto les brinda la capacidad de ofrecer servicios diferenciados y adaptados a los requisitos de diversos segmentos de mercado, como la industria manufacturera, la salud, el transporte, entre otros.

- **Eficiencia de recursos:** Mediante la segmentación de la infraestructura física, los operadores de red pueden asignar los recursos de red de manera más eficiente. Esto significa que pueden utilizar y compartir recursos de manera óptima, evitando el sub aprovechamiento de la capacidad y optimizando el uso de la infraestructura existente. Esto conduce a una mejor utilización de los recursos y ahorros significativos en costos operativos.
- **Habilitador para la innovación:** El NS proporciona un entorno flexible y adaptable que fomenta la innovación. Permite a los operadores de red probar y desplegar nuevos servicios y aplicaciones de forma más rápida y segura, sin interferir con otros servicios existentes en la red. Esto impulsa la experimentación y la introducción de nuevos modelos de negocio, promoviendo la competitividad y la diferenciación en el mercado.
- **Gestión simplificada:** Al segmentar la red en segmentos lógicos independientes, los operadores de red pueden simplificar la gestión y el mantenimiento de la red. Cada segmento puede ser gestionado de manera individual, lo que facilita la implementación de políticas de servicio, la monitorización, la solución de problemas y la optimización de rendimiento de manera más específica y eficiente.
- **Capacidad de escalabilidad y adaptabilidad:** El NS permite a los operadores de red adaptar rápidamente su infraestructura para satisfacer la creciente demanda de ancho de banda y capacidad. Pueden escalar y asignar recursos adicionales a los segmentos según sea necesario, lo que les brinda la flexibilidad de responder a cambios en los patrones de tráfico y requerimientos de los usuarios.

En resumen, NS genera un gran interés en la industria de las telecomunicaciones debido a su potencial para brindar servicios personalizados, optimizar recursos, fomentar la innovación, simplificar la gestión, ofrecer escalabilidad y adaptabilidad en las redes de telecomunicaciones.

2.3.2. Modelos de negocio en redes 5G

Sobre la base de la definición del modelo de negocio en la Sección 2.2 y los conceptos de las redes 5G abordados en la Sección 2.3, se realiza una exhaustiva revisión bibliográfica de los modelos de negocios disruptivos y existentes en el ecosistema de las redes 5G, con un enfoque en los operadores de red. Esta revisión proporciona una visión general y comprensión de los diferentes modelos de negocios que se abordarán en las secciones subsiguientes. Se examinan en detalle los aspectos clave de cada modelo de negocio, lo que permite una comprensión más profunda de su contexto y su impacto en el sector de las telecomunicaciones. A continuación, se describe en detalle los modelos de negocio disruptivos y actuales para los operadores de red 5G.

2.3.2.1. Modelos de negocio disruptivos para operadores de red 5G

Los modelos de negocio disruptivos en el contexto de las redes 5G son clave para crear ventajas competitivas sostenibles y abordar las disrupciones tecnológicas y económicas. Estos modelos reemplazan o reconfiguran los modelos existentes, ofreciendo valor diferenciado, ventaja competitiva y la apertura de nuevos mercados [95]. Los operadores de red deben desarrollar modelos de negocio que se adapten a las redes 5G y aprovechen las oportunidades de ingresos. La falta de adaptación puede resultar en la obsolescencia de los modelos existentes y la aparición de nuevos competidores. Se identifican cinco categorías de modelos de negocio disruptivos en relación con las redes 5G.

- Modelos de negocios de asociación.

Estos modelos permiten brindar servicios especializados y competitivos a diversos sectores verticales. Estos modelos se basan en una arquitectura de red avanzada que incluye tecnologías como Cloud Computing, SDN, NFV, Inteligencia Artificial - *Artificial Intelligence* (AI) y Aprendizaje Automático - *Machine Learning* (ML). Aunque se han propuesto modelos de negocio de alto nivel para distintos mercados verticales, se requiere más información sobre las relaciones entre las industrias verticales y los operadores de red [96]. Algunos modelos de negocios de asociación discutidos en la literatura son los siguientes. *El modelo de negocio del proveedor de conectividad* se enfoca en ofrecer servicios de conectividad de Protocolo de Internet - *Internet Protocol* (IP) tanto a clientes mayoristas como minoristas. Este modelo se distingue entre un modelo básico de conectividad de mejor esfuerzo y un modelo mejorado que garantiza una QoS superior en la conexión. *El modelo de negocio del proveedor de servicios digitales* busca que los operadores de red amplíen su oferta más allá de la conectividad básica, incursionando en servicios digitales como contenido de video/TV móvil, servicios financieros y hogares inteligentes. Esto se debe al estancamiento de los ingresos en comparación con el crecimiento de los datos. Los operadores de red pueden optar por crear sus propias aplicaciones y brindar acceso abierto a suscriptores de otros operadores de red o asociarse con proveedores de servicios de Libre Transmisión - *Over the Top* (OTT) [49]. Se considera de mayor beneficio para el operador de red, crear sus propias aplicaciones y ofrecer acceso abierto para expandir su mercado. *El modelo de negocio del proveedor de servicios de latencia ultrabaja* se centra en las aplicaciones 5G de latencia ultrabaja y su impacto económico. Establecer asociaciones sólidas con industrias verticales es clave para el éxito de este modelo y se requiere una cuidadosa elección de nuevos modelos de negocio para garantizar los ingresos generados por las aplicaciones de latencia ultrabaja, aunque no se especifican los procesos y parámetros necesarios [97]. *El modelo de negocio de ciudad inteligente* propuesto en [98], se basa en el marco de modelo de negocio estándar de las empresas y se conoce como Cuadro del Modelo de la Ciudad (CMC). Este enfoque aborda cómo los gobiernos de las ciudades pueden gestionar proyectos de ciudades inteligentes para crear valor para sus residentes. *El modelo de negocio de comunicación de datos 5G* se enfoca en la importancia de las políticas de precios de datos en la red 5G, considerando el crecimiento exponencial del tráfico de datos móviles a nivel global. Este modelo implica un análisis de los roles de los actores clave en el negocio.

- InP o Proveedor de activos, este modelo de negocio se enfoca en el concepto de Todo como servicio - *Anything as a Service* (XaaS), X como un servicio y el uso compartido de redes, donde se accede a infraestructura y servicios bajo demanda a través de la nube, asimismo, este modelo permite a dos o más operadores de red compartir infraestructura basándose en políticas estáticas o dinámicas según sus necesidades y los usuarios tienen acceso remoto a los servicios, independientemente del dispositivo utilizado [75].
- Proveedores de conectividad, este modelo de negocio se enfoca a la conectividad básica basada en IP de mejor esfuerzo y conectividad mejorada basada en QoS, y se aplica tanto a relaciones comerciales al por menor como al por mayor. Con la red 5G, los operadores de red pueden configurar el flujo de datos de manera programable y bajo demanda, utilizando solo las funciones necesarias en la red con el objetivo de optimizar los costos operativos y de gestión. Para lograr esto, los sistemas 5G deben tener una arquitectura de red modular que permita el aprovisionamiento y la configuración [75].
- Proveedores de servicio de socios, en este modelo de negocio (oferta de operador enriquecida por socio y oferta de socio enriquecida por operador), los operadores de red evolucionan hacia un enfoque de precios basado en el valor, que incluye métricas de QoS, disponibilidad, priorización, latencia, entre otras. Los operadores de red pueden enriquecer

su oferta mediante asociaciones con otros operadores de red, mientras que los socios pueden mejorar su oferta aprovechando las capacidades y servicios de los operadores de red [75,99].

Por otro lado, en [99], el estudio examina dos modelos de fijación de precios: el modelo de fijación de precios basado en los costes (fijación de precios basada en el Gasto de Capital - *Capital Expenditure* (CAPEX) y Gasto Operativo - *Operational Expenditure* (OPEX) del operador) y el modelo SBIFT (diferenciación de precios basada en las cinco dimensiones de Alcance, Base, Influencia, Fórmula y Derechos Temporales). El estudio concluye que no existe un único modelo clásico de fijación de precios que se considere adecuado. Sin embargo, dado que el estudio se centra únicamente en los servicios de datos, las políticas de precios analizadas tienen aplicaciones limitadas para las redes 5G multiservicio emergentes (eMBB, mMTC y URLLC).

- Modelos de negocio de plataformas digitales.

Este modelo incorpora aspectos técnicos y económicos, ya que la red 5G transforma los modelos de negocio de las comunicaciones inalámbricas a plataformas con algoritmos complejos y Big Data. La introducción de plataformas *como servicio* y economía compartida permite a nuevos participantes compartir recursos de red. En [100], los autores analizan modelos de negocio basados en escenarios para el mercado 5G, proponiendo una plataforma que integre cambios tecnológicos y de valor. Sin embargo, no realiza el análisis de costos y las estrategias de maximización de ingresos fundamentales para los proveedores de servicios.

- Modelos de negocio de NS.

Como se ha explicado en la Subsección 2.3.1, NS es una tecnología clave que permite a las redes 5G soportar servicios compuestos mediante la transición de un modelo basado en infraestructuras a una plataforma orientada a servicios [78], además, NS consiste en segmentar una red física en redes lógicas aisladas (segmento) con características de servicio y requisitos de rendimiento únicos [9]. Cada segmento requiere un modelo de negocio específico para alcanzar sus objetivos de negocio en términos de valor económico y rentabilidad. En [101], el estudio se centra en la estrategia NS e introduce un nuevo mecanismo de subasta para maximizar los ingresos de la red. Optimiza tanto los recursos de la red como los ingresos a través de un modelo basado en subastas, demostrando una asignación eficiente de los recursos y un aumento de los ingresos de la red por segmento. Sin embargo, aunque la contribución aborda de manera integral la estrategia de maximización de ingresos, el estudio ignora las políticas de precios, críticas para el éxito de la implementación práctica en la maximización de ingresos. Por otro lado, en [102], se discuten y analizan los modelos de negocio que permite NS denominado como modelo de negocio NS de dominio único, el cual asume proveedores únicos de hardware e infraestructura virtual, lo que permite la creación de segmentos de E2E. Los roles que se identifican son el proveedor de infraestructura física, proveedor de infraestructura virtual, proveedor de segmento, proveedor de plantilla de segmento, proveedor de funciones de segmento, arrendatario de segmento, cliente de segmento y proveedor de servicios, interconectados a través de interfaces definidas. Los autores señalan que este modelo es poco realista y no aprovecha plenamente el potencial de la tecnología NS. Adicionalmente, el estudio propone un modelo de negocio multidominio de NS, que permite un ecosistema multiproveedor con proveedores de infraestructuras físicas y virtuales, proveedores de segmentos e intermediarios de aprovisionamiento de segmentos. El modelo multidominio introduce roles de intermediario: intermediario de infraestructura, de segmento y de servicio. Los autores afirman que el concepto multidominio admite la agregación dinámica de múltiples proveedores de segmentos si la solución permite la creación de orquestadores de segmentos. Sin embargo, el modelo multidominio propuesto es incompatible con el marco estándar de gestión

y orquestación de NFV descrito en [103], lo que podría dificultar su adopción a los modelos de negocio para los operadores de red.

- Los modelos de negocio de los microoperadores.

Este modelo se enfocan en brindar servicios especializados en mercados verticales específicos dentro de áreas locales. La participación de los reguladores de servicios 5G y los responsables políticos es importante, ya que pueden facilitar la adquisición de espectro a precios accesibles para que los microoperadores locales de 5G puedan llevar a cabo esta iniciativa [104].

- Los modelos de negocio ecosistémicos.

Este modelo se centra en la interacción de múltiples empresas para crear valor en ecosistemas de negocios complejos [105]. El modelo 4C (conexión, contenido, contexto y comercio) se utiliza en el marco del ecosistema empresarial 5G. Cada modelo de negocio se enfoca en monetizar diferentes aspectos, como la conectividad, el contenido y el contexto. Sin embargo, la propuesta no considera el costo de implementación ni los medios reales de monetización. La inclusión de mecanismos de fijación de precios mejoraría la practicidad del marco propuesto. En [37], los autores desarrollan un modelo ecosistémico 4C basado en la lógica empresarial y tecnológica en la red. El estudio se centra en la creación y captura de valor en un entorno de negocio hiperconectado, empleando una metodología de investigación basada en la acción, asimismo, identificaron las cuatro dimensiones de la hiperconectividad: hiperconectabilidad, hipermemorabilidad, hiperdifusibilidad e hiperescalabilidad. Aunque el estudio se enfoca en aplicaciones existentes y no considera otros elementos del modelo de negocio, como la gestión de la infraestructura y las relaciones con los clientes, sus resultados sirven como base para futuras investigaciones en el mercado emergente de redes inteligentes 5G.

2.3.2.2. Modelos de negocio actuales para operadores de red 5G

A medida que las redes 5G se implementan rápidamente a nivel global, los operadores de red analizan que modelo de negocio les resultaría más óptimo para responder de forma adecuada a estas redes 5G. Por lo tanto, en la medida en que los operadores de red intensifiquen sus despliegues de redes 5G, los modelos de negocio viables y sostenibles desempeñan un papel fundamental para garantizar que se logre el valor económico objetivo. Los operadores de red son responsables de establecer y mantener la infraestructura de comunicaciones móviles. Sin embargo, debido a la alta inversión requerida, se priorizan las áreas con alto retorno de inversión, lo que deja a las áreas rurales sin acceso a nuevas tecnologías móviles y en desventaja digital. Esto representa un desafío para los operadores de red en regiones rurales. Además de los modelos de negocio disruptivos para las redes 5G, existen otros modelos de negocio actuales para los operadores de red.

- Modelos de negocio de asociación de mercados verticales.

Los operadores de red pueden establecer colaboraciones estratégicas con industrias verticales para crear y capturar valor en el contexto de las redes 5G. Estos modelos de negocio permiten a los operadores de red ofrecer propuestas de valor únicas a los usuarios, empresas y otros socios simultáneamente. Algunos modelos de negocio de asociación de mercado vertical pueden ser los siguientes. *Modelo de negocio de aprendizaje inteligente* donde los operadores de red pueden colaborar con el sector educativo para brindar educación a distancia de alta calidad a través de la interacción inmersiva en tiempo real de eMBB utilizando aplicaciones de presencia virtual, VR y AR con retrasos visuales o de audio mínimos [106]. *Modelo de negocio e-Salud* donde los

operadores de red pueden asociarse con el sector de la salud para ofrecer servicios de atención médica conectada, medicina de precisión, cirugía remota y diagnóstico a distancia [107], con base en las características del servicio URLLC. *Modelo de negocio de agricultura inteligente* donde los operadores de red pueden asociarse con el sector de la agricultura para implementar soluciones sobre la base de IoT (servicio mMTC) para optimizar la agricultura mediante el monitoreo del contenido de humedad del suelo y el uso eficiente del agua y los fertilizantes [108]. *Modelo de Negocio de redes inteligentes* donde los operadores de red pueden asociarse con el sector de la energía para el desarrollo de redes de distribución de energía eficientes e inteligentes con análisis predictivo de Big Data para mejorar el suministro de energía y su consumo [109]. *Modelo de negocio de ciudades inteligentes* donde los operadores de red pueden implementar conceptos de ciudades inteligentes en colaboración con gobiernos locales y organizaciones para mejorar la gestión urbana y ofrecer servicios como monitoreo remoto, estacionamientos inteligentes y sistemas de gestión de desechos [49]. *Modelo de negocio de transporte inteligente* donde los operadores de red pueden asociarse con el sector del transporte como ministerios para el desarrollo de sistemas de transporte inteligentes con el objetivo de mejorar la planificación de rutas y reducir la congestión del tráfico y los accidentes, en asociación con organismos gubernamentales y proveedores de sistemas de tránsito.

- Operadores de red como modelos de negocio de OTT/proveedores de contenido.

Los operadores de red se enfrentan al desafío de que los proveedores de contenido y OTT utilizan su infraestructura con un pago mínimo. Esto crea competencia directa para los operadores de red sin que los proveedores inviertan en infraestructura [49]. Un ejemplo es el modelo de negocio de servicios de transmisión de video, que aprovecha la creciente demanda de aplicaciones de video y smartphones asequibles (servicios eMBB). Por lo cual, los operadores de red pueden desarrollar este modelo ofreciendo servicios de transmisión de video a sus propios usuarios, brindando acceso abierto para usuarios registrados y no registrados, o asociarse con proveedores de contenido/OTT. Los ingresos se compartirían entre ambas partes.

- Modelos de negocio de juegos en línea en tiempo real.

Estos modelos se ven afectados positivamente por el despliegue de la red 5G. Con mejoras en el rendimiento, como velocidades más rápidas, menor latencia y mayor capacidad, la red 5G ofrece beneficios a la industria de los juegos en línea [110]. Por lo cual, los operadores de red pueden aprovechar estas oportunidades dentro del mercado al crear sus propias aplicaciones de juegos en línea o asociarse con desarrolladores externos para ofrecer servicios de juegos bajo un acuerdo de reparto de ingresos.

- Modelos de negocio de IoT habilitados para 5G.

Estos modelos abarcan aplicaciones en diversos sectores como la industria automotriz, seguridad pública, servicios de emergencia y campo médico [111]. Estas aplicaciones se distinguen entre IoT de consumo e IoT industrial con enfoques diferentes. En la era 5G, la logística de producción en tiempo real y la innovación de productos inteligentes se expande progresivamente. Por lo cual, las redes 5G permiten que los modelos de negocio sean sostenibles para mejorar la cadena de suministro y la economía circular. La adopción de IoT no se limita a países desarrollados, y se observa un crecimiento gradual en regiones en desarrollo. Sin embargo, la baja tasa de penetración en estas regiones se atribuye a una infraestructura limitada, unos bajos niveles de inversión y las incertidumbres que rodean el retorno de la inversión (RoI) [112].

A partir de la revisión de los diferentes modelos de negocio dentro del ecosistema de la red 5G para operadores de red, se han seleccionado modelos específicos para su análisis. Estos modelos de negocio

seleccionados entran dentro de la clasificación de modelos de negocio disruptivos para los operadores de red 5G y son los siguientes.

- El modelo de negocio de comunicación de datos 5G, categorizado como modelo de negocio de asociación. Nuestro análisis se centra en el rol del operador de red 5G como proveedor de infraestructura, ya que este modelo permite a dos o más operadores de red compartir una infraestructura de red común basada en políticas estáticas o dinámicas en función de sus necesidades, además, los usuarios tienen acceso a los servicios con independencia del dispositivo utilizado.
- Modelos de negocio de NS. El análisis de estos modelos de negocio se centra en la incorporación del NS en las redes 5G. El NS permite a los operadores de red segmentar su red física en redes lógicas aisladas con características de servicio y requisitos de rendimiento únicos. Además, el NS permite a los operadores de red ofrecer servicios compuestos (URLLC, eMBB y mMTC) mediante la transición de un modelo basado en infraestructuras a una plataforma orientada a servicios.

2.4. Análisis económico de distintos modelos de negocio para servicios URLLC y eMBB/mMTC

En esta sección de la tesis, se realiza un análisis económico detallado de los diversos modelos de negocios para la prestación de servicios en el ecosistema de las redes 5G. El objetivo es analizar la viabilidad económica y su capacidad para generar beneficios tanto para los operadores de red como para los usuarios finales. Se examinan los casos de modelado económico, la monetización de servicios y las interacciones entre los actores del mercado. El enfoque principal se centra en el uso de conceptos como la microeconomía en las telecomunicaciones, la teoría de colas y la teoría de juegos para estudiar la prestación de servicios en la red 5G. Esta red 5G se caracterizan por ofrecer cobertura para servicios orientados a una alta velocidad de transferencia de datos, comunicación con una latencia ultrabaja y una conectividad ininterrumpida para una multitud de dispositivos. Específicamente, se examinan los servicios URLLC, eMBB y mMTC, así como su aplicación y prestación por parte de los operadores de red a los usuarios. Estas investigaciones se han abordado en [3, 4, 6], donde los autores realizan un análisis enfocado en comprender cómo se han abordado los desafíos y oportunidades asociados con estos servicios en las redes 5G, considerando aspectos como la eficiencia en la asignación de recursos de red, las características de QoS, la fijación de precios por servicio, la maximización de beneficios y la toma de decisiones estratégicas por parte de los operadores de red. Asimismo, estas tres clases de servicios, han sido objeto de una gran atención por parte de los investigadores, quienes han profundizado en varios aspectos asociados a los casos de uso, como la arquitectura de red, la asignación eficiente de recursos, la importancia sobre las características de QoS en cada uno de los servicios y los nuevos modelos de negocio. En consecuencia, un amplio estudio enfocado en estos servicios han propuesto diversas soluciones innovadoras que permita la coexistencia y la interacción entre los servicios URLLC, mMTC y eMBB. El objetivo de estas investigaciones fueron maximizar las utilidades de los usuarios finales como los beneficios para los operadores de red en esta industria cambiante de las telecomunicaciones.

En [113], los autores examinan la competencia entre las industrias de servicios en relación con el tiempo de espera y el precio. El objetivo de este trabajo es comprender cómo el comportamiento de los sistemas de colas de los proveedores de servicios influye en la dinámica competitiva de la industria. Asimismo, los autores proponen un enfoque que analiza diferentes modelos de colas y demuestran que la función de coste de capacidad sigue un patrón específico con cuatro parámetros. Además, esta investigación trata

los casos en los que las empresas compiten en términos de precio, nivel de servicio o ambos, y presenta un sistema de ecuaciones generales que relaciona las tasas de demanda de las empresas con los precios y los niveles de tiempo de espera en la industria. En otro estudio, [114], los autores se centran en la monetización y fijación de precios de los servicios URLLC, eMBB y mMTC, analizando las diversas formas en que los proveedores de servicios generan ingresos. Asimismo, esta investigación analiza las estrategias de precios como el pago por uso y los modelos de suscripción, así como modelos de reparto de ingresos como la compartición del espectro y el NS. Adicionalmente, en [115], los autores investigan de que manera monetizar las redes 5G para usuarios residenciales mediante el uso de NS y estrategias de precios efectivas. Mientras que una parte del enfoque general de la tesis se centra en proporcionar un análisis económico de los servicios URLLC, eMBB y mMTC en las redes 5G, basado en investigaciones previas que han demostrado la viabilidad económica de estos servicios.

La red 5G que incorpora NS permite cumplir aquellos requisitos de QoS de los servicios (URLLC, eMBB y mMTC) y aplicaciones. En [116], los autores analizan la flexibilidad y el despliegue rápido de servicios mediante NS, asimismo, la investigación explora las ventajas de NS, el cual permite a los operadores de red diseñar múltiples redes virtuales sobre una misma infraestructura compartida para diferentes casos de uso. De igual forma, los autores mencionan algunos desafíos y direcciones futuras sobre la investigación asociadas a la aplicación del NS. En [117], la investigación examina la influencia de los retrasos en las colas y los costos de los usuarios en la gestión y control de los recursos informáticos. Los autores en esta investigación proponen una metodología que considera el valor del tiempo de los usuarios para determinar los precios, la utilización y la capacidad de los recursos informáticos. En relación con la fijación de precios, en [118], los autores analizan el uso de colas prioritarias para maximizar los ingresos de los operadores de red. Asimismo, en esta investigación, se comparan diferentes enfoques y demuestran que las colas prioritarias son más eficientes en términos económicos que otros métodos de compartición de recursos de red (procesadores). De manera similar, los autores en [119], utilizan la disciplina Reparto Discriminatorio del Procesador - *Discriminatory Processor Sharing* (DPS) a dos modelos de servicio con QoS variable con el objetivo de diferenciar los servicios y determinar los precios óptimos que maximizan el beneficio del proveedor. Los estudios mencionados resaltan la relación entre precio y QoS a través de la utilidad del usuario. Sin embargo, la presente tesis tiene un enfoque en la fijación de precios utilizando una cola no prioritaria, donde dos servicios (URLLC y eMBB, o URLLC y mMTC) son tratados por igual, y una cola de dos prioridades, donde URLLC tiene una mayor prioridad que el segundo servicio debido a sus características particulares de QoS, tales como la baja tolerancia al retraso en la transmisión de paquetes.

Por otro lado, en [118], los autores emplean la teoría de juegos para examinar la maximización de los ingresos del operador de red, considerando el equilibrio de Nash como solución. De igual forma, en [11], los autores analizan la prestación de servicio a un perfil de tráfico homogéneo mediante una cola prioritaria, donde un operador de red primario es propietario de los recursos y un operador de red secundario puede acceder a dichos recursos alternativamente.

En el contexto de la teoría de colas, se aborda el tema de las prioridades de acceso de los usuarios a través de una cola de prioridad, utilizando el equilibrio de Nash como la forma más adecuada de resolución. Sin embargo, las investigaciones [120, 121], han aplicado la teoría de juegos para resolver el problema de maximización del beneficio de un grupo de MVNO, en situaciones donde varios MVNO independientes solicitan recursos a un operador de red. Además, la teoría de juegos ha sido utilizada en otros estudios, como [12, 122, 123], donde los autores aplican los conceptos de la teoría de juegos para analizar la provisión de servicios en un entorno competitivo dentro de la industria de las telecomunicaciones. Sin embargo, estos estudios no han analizado la coexistencia de diferentes perfiles de tráfico, como la interacción entre usuarios de servicios URLLC y eMBB o servicios URLLC y mMTC, ni han considerado si los recursos de red son compartidos o no entre los dos servicios. Por lo que, en esta tesis,

se proponen dos modelos de red 5G que se analizan utilizando la teoría de juegos. El primer modelo es una red 5G sin NS, donde los recursos de red son compartidos entre los dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) sin prioridad de servicio, mientras que el segundo modelo es una red 5G con NS, donde los recursos de red se comparten entre los dos servicios mencionados con prioridad de servicio. Por último, los autores en [12] investigan el aprovisionamiento de servicios para las Comunicaciones de Tipo Máquina - *Machine Type Communications* (MTC) y las Comunicaciones de Tipo Humano - *Human Type Communications* (HTC), utilizando un sistema de colas con dos prioridades. Esta investigación presenta y analiza dos juegos. En el primer juego, los sensores deciden si suscribirse al operador de red para cargar datos de detección, considerando el precio cobrado por el operador de red y el tiempo medio de servicio como factores de utilidad que perciben por el servicio suscrito. En el segundo juego, los usuarios deciden si suscribirse al servicio proporcionado por el sensor en base en un modelo Logit de elección discreta que tiene en cuenta la calidad de los datos recogidos y el precio de suscripción. En esta investigación, la teoría de juegos se aplica para modelar la interacción estratégica entre las suscripciones de los usuarios y la decisión sobre la capacidad de la red del operador de red.

Por lo tanto, la tesis aborda el tema de las prioridades de acceso en las redes 5G utilizando la teoría de colas, mientras que el análisis de la interacción estratégica entre los operadores de red y los usuarios se aplican conceptos de la teoría de juegos como enfoque de resolución. Asimismo, se analizan diferentes modelos de red 5G, considerando la coexistencia de dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC), así como la compartición de los recursos de red. También se investiga el aprovisionamiento de servicios para diferentes perfiles de tráfico (URLLC, eMBB y mMTC) teniendo en cuenta aspectos de QoS y precio de cada uno de los servicios. Estos estudios previos proporcionan una base sólida de conocimiento y resultados que respaldan la investigación en la tesis y permiten identificar áreas de mejora en el estado actual del campo de estudio.

2.5. Conclusiones

En este capítulo se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión de investigaciones relevantes en el ámbito de las telecomunicaciones, abarcando desde la evolución de las redes hasta la implementación global de la red 5G. Se ha destacado la importancia del NS y los modelos de negocio disruptivos y actuales para los operadores de red en el contexto de la red 5G. A medida que las telecomunicaciones han evolucionado, los modelos de negocio para los operadores de red han experimentado transformaciones significativas para adaptarse a las tecnologías emergentes. Han pasado de modelos de negocio centrados en la transmisión de voz a modelos de negocio enfocados en la creación, entrega y captura de valor en el ecosistema de las redes 5G. La implementación del NS en las redes 5G se ha revelado clave para la viabilidad de estos nuevos modelos de negocio, ya que permite la segmentación de la red en diferentes redes lógicas, cada una con características únicas y adaptadas a las necesidades específicas de cada segmento. Esto permite a los operadores de red ofrecer servicios como URLLC, eMBB y mMTC a través de una red 5G. Sin embargo, los modelos de negocio analizados en el contexto de las redes 5G, como el monopolio y el duopolio, no han sido suficientemente explorados en términos de su viabilidad económica en la provisión de servicios 5G a los usuarios finales. Por lo que es necesario analizar la prestación de servicios (URLLC, eMBB o mMTC) tanto por un único operador como por dos operadores, teniendo en cuenta diferentes perfiles de usuarios. En este sentido, en el Capítulo 3 de la tesis se proponen dos modelos de negocio con sus respectivas características y se realiza un análisis detallado para evaluar su viabilidad económica.

Además, se propone una situación de óptimo social, que se consigue maximizando el bienestar social,

y una forma de interpretar esta maximización del bienestar social es la presencia de un regulador de servicios 5G en el mercado. Los estudios analizados hasta el momento carecen de análisis la participación de un regulador en escenarios donde la compartición de recursos de red entre dos tipos de servicios se lleva a cabo sobre una misma red 5G, ya sea con o sin la incorporación del NS. Por lo tanto, en el Capítulo 3 se lleva a cabo un análisis considerando estas características específicas con relación al regulador de servicios 5G.

En resumen, este estado de arte ha proporcionado una visión general de la evolución de las redes de telecomunicaciones hasta la red 5G, así como de los modelos de negocio para los operadores de red. Además, se ha destacado la importancia del NS en el desarrollo de nuevos modelos de negocio y se ha identificado la necesidad de un análisis más profundo sobre la viabilidad económica de los servicios 5G en diferentes escenarios. Asimismo, se ha señalado la falta de análisis con relación a la compartición de recursos de red y la intervención del regulador. Estos aspectos constituyen las bases para la investigación en el marco de esta tesis doctoral, abriendo nuevas perspectivas y áreas de estudio para contribuir al avance del conocimiento en el campo de las redes 5G y sus modelos de negocio.

CAPÍTULO 3

ESCENARIOS Y MODELOS PARA LA PRESTACIÓN DE LOS SERVICIOS URLLC y eMBB/mMTC SOBRE UNA RED 5G

En este capítulo, se presentan los escenarios y modelos planteados, con el propósito de analizar la prestación de los servicios URLLC y eMBB/mMTC en una red 5G. Para abordar los temas de investigación relacionados con la viabilidad económica de la prestación de los servicios URLLC y eMBB/mMTC en las redes 5G, se proponen dos escenarios y dos modelos de negocio. Concretamente, el objetivo general es examinar, desde una perspectiva económica, qué escenario y modelo de negocio son los más adecuados en la prestación de los servicios dentro de la red 5G a los usuarios finales. Todo esto con base en las exigencias de las características de QoS de los servicios URLLC, eMBB y mMTC, y la disponibilidad de los recursos de red para los operadores de red.

Para lograr dicho objetivo, en primer lugar, se ha analizado dos escenarios. El primero escenario denominado red compartida (SN), es una red 5G sin NS. El segundo escenario denominado red network slicing (NS), es una red 5G con NS. En segundo lugar, se ha analizado dos modelos de negocio para los operadores de red. El primer modelo de negocio denominado Integrado y el segundo modelo de negocio denominado Especializado. Describimos detalladamente los elementos que componen cada escenario y modelo, así como su relevancia en el estudio en las secciones siguientes.

Por otro lado, el enfoque conciso del estudio es realizar un análisis de cada modelo de negocio con cada escenario propuesto y evaluar la viabilidad económica de cada una de las combinaciones desde un punto de vista de las utilidades de los usuarios, beneficios de los operadores y bienestar social en general. Además, para el desarrollo del análisis, se ha utilizado unas herramientas descritas en las subsecciones siguientes para examinar la viabilidad económica de cada combinación de modelo de negocio y escenario.

En resumen, en las secciones siguientes, se describen el planteamiento y análisis detallado de cada escenario y modelo de negocio, además, se plantea una situación de óptimo social que se utiliza como una referencia para la comparación con cada uno de los modelos de negocio en función del bienestar social. Esta comparación tiene como objetivo, determinar que modelo de negocio es el más adecuado desde el punto de vista del bienestar social.

La estructura de este capítulo se organiza de la siguiente manera. En Sección 3.1, se abordan los aspectos generales compartidos. A continuación, en las Secciones 3.2 y 3.3, se describen y analizan los escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y eMBB en una red 5G. Seguidamente, en las Secciones 3.4 y 3.5, se presentan y examinan los escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y mMTC en una red 5G.

3.1. Aspectos generales

Los aspectos generales aborda los elementos fundamentales del estudio, tales como los dos escenarios considerados, el modelo de red empleado para cada escenario y los modelos de negocio analizados para los operadores de red.

3.1.1. Escenarios

Para representar la prestación de dos servicios distintos a los usuarios dentro de una red 5G, se proponen dos escenarios, asimismo, se explica el tratamiento de los servicios dentro de la red 5G.

- El primer escenario denominado escenario SN es una red 5G sin NS, donde todos los servicios son tratados de forma igual.
- El segundo escenario denominado escenario NS es una red 5G con NS, donde todos los servicios reciben un tratamiento diferente y el mecanismo que permite tratar los servicios diferentes es el NS.

3.1.2. Modelo de red

El modelamiento de los dos escenarios es a través de dos modelos de red.

- El escenario SN lo simplificamos y reducimos a un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 sin prioridad de servicio (FIFO), que trata a todos los paquetes de los servicios de forma igual, en otras palabras, el escenario SN es modelada como una cola sin prioridad de servicio.
- El escenario NS lo simplificamos y reducimos a un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 con dos prioridades de servicio, que trata diferente a los paquetes de los servicios, en otras palabras, el escenario NS es modelada como una cola con prioridad de servicio, asignando una prioridad alta al servicio URLLC por sus características de QoS.

Se utiliza el modelo de cola M/M/1, que permiten la compartición eficiente de los recursos de red entre los dos servicios. En este sentido, la selección del modelo de cola M/M/1 es para representar la prestación de los servicios URLLC y eMBB, así como para los servicios URLLC y mMTC. La figura 3.1 muestra el funcionamiento de este modelo, y se detalla en secciones posteriores de manera exhaustiva. Se utiliza la simplificación de modelar la red completa como una sola cola M/M/1 debido a la necesidad de obtener fórmulas manejables para calcular la utilidad de los usuarios de la red.

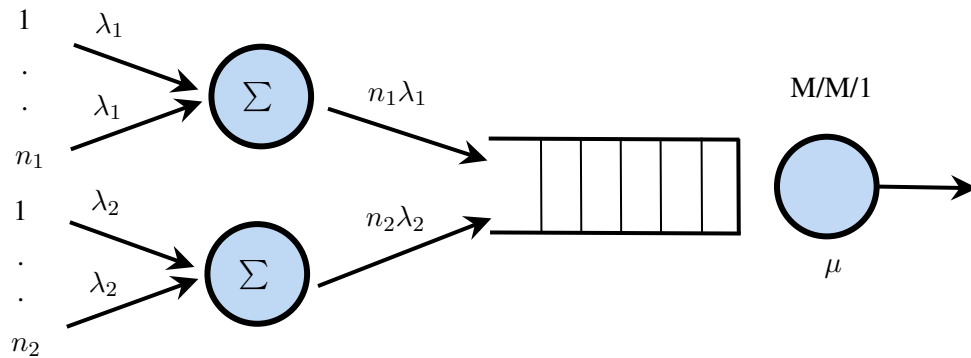


Figura 3.1: Modelo M/M/1.

3.1.3. Modelos de negocio

Se proponen dos modelos de negocio para que los operadores de red ofrezcan dos tipos de servicios a los usuarios finales, cada uno con su propia base de suscriptores, de modo que no se produce competencia entre usuarios. Las características de cada modelo de negocio son los siguientes:

- El primer modelo de negocio se denomina Integrado, donde un único operador de red ofrece los dos tipos de servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC), y se analizan con base en los escenarios SN y NS, como se muestra en la Figura 3.2.
- El segundo modelo de negocio se denomina Especializado, donde hay dos operadores de red, un operador de red ofrece un servicio y el otro operador de red ofrece el otro servicio (entre URLLC y eMBB o URLLC y mMTC), y se analizan con base en los escenarios SN y NS, como muestra la Figura 3.2.

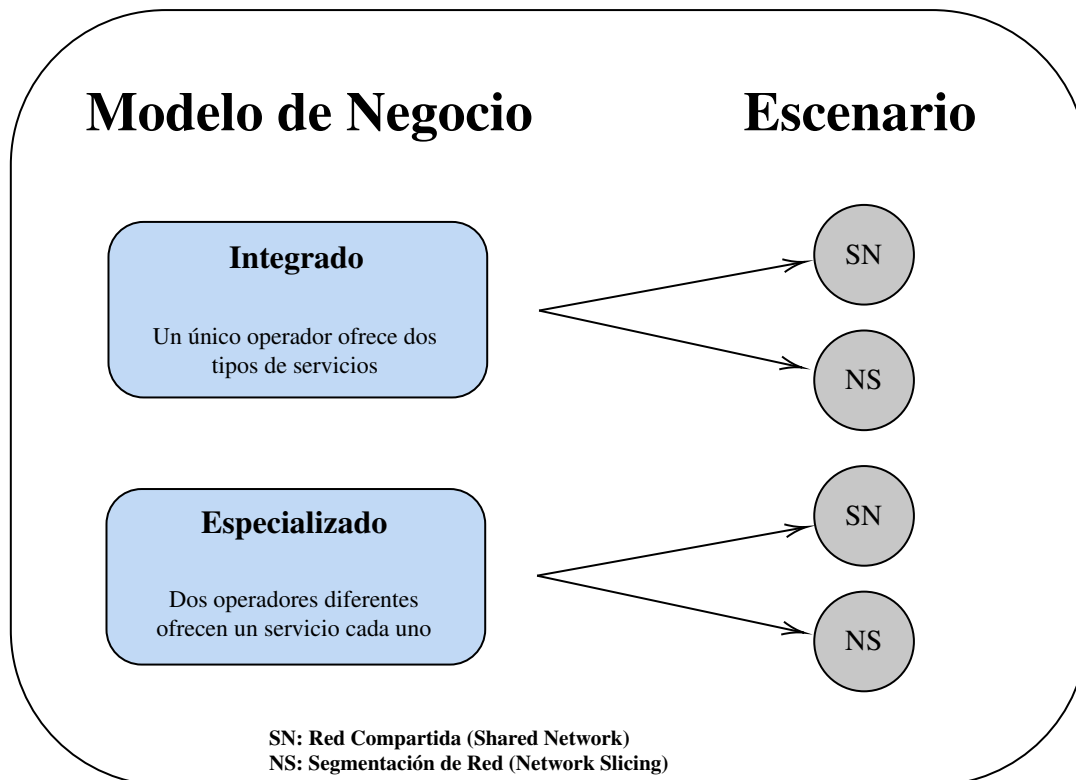


Figura 3.2: Modelos de negocio y escenarios.

La Tabla 3.1 muestra la definición, la notación general para identificar el escenario y los modelos de negocio.

Tabla 3.1: Notación general.

Escenario	Subíndice	Notación
Red Compartida (Shared Network)	y	s
Segmentación de red (Network Slicing)		n
Modelo de negocio	Superíndice	Notación
Integrado	z	i
Especializado		e
Óptimo social		o

Mientras que la Figura 3.3 muestra de forma más detallada la notación específica para identificar los escenarios, los modelos de negocio y los servicios (URLLC, eMBB y mMTC) analizados en esta tesis.

3.1.4. Juego

Las interacciones estratégicas presentes en los escenarios SN y NS son analizadas mediante la Teoría de Juegos, la cual considera tanto al operador de red en el Integrado como a los dos operadores de red en el Especializado y sus respectivos usuarios. En este contexto, los incentivos de los actores están representados por las utilidades para cada usuario y el beneficio para cada operador de red. El modelo de juego propuesto para el análisis es un juego de dos etapas, tal como se muestra en la figura 3.4, con

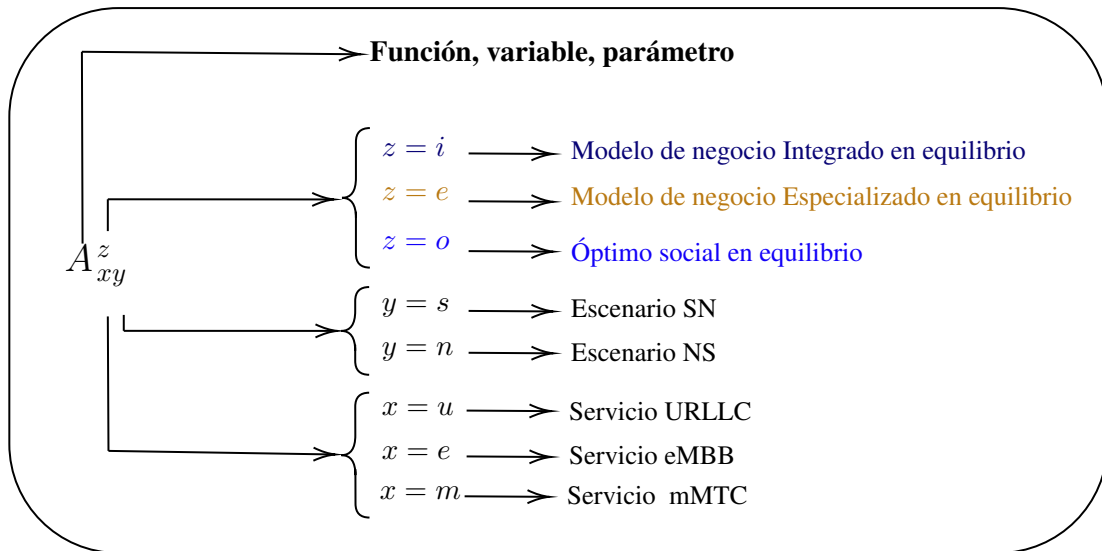


Figura 3.3: Notación específica.

una estructura diferente para cada escenario y modelo de negocio en consideración.

El juego de dos etapas propuesto se resuelve usando inducción hacia atrás, como es común en la literatura de teoría de juegos [124]. Esto significa que en la Etapa I, los jugadores anticipan la solución de la Etapa II. Como los jugadores de la Etapa II eligen sus acciones basándose en las elecciones de los jugadores de la Etapa I, los jugadores de la Etapa I anticipan las elecciones de los jugadores de la Etapa II. Este enfoque justifica resolver el juego en dos etapas, encontrando primero las estrategias de equilibrio de la Etapa II, dadas las mejores respuestas de los jugadores de la Etapa I, y luego resolviendo las estrategias de equilibrio de la Etapa I. Así, el cálculo del equilibrio se presenta en el siguiente orden: primero, Etapa II, y segundo, Etapa I. La solución del juego es una estrategia de equilibrio para cada jugador, lo que se conoce como equilibrio de Nash. En este equilibrio, ningún jugador tiene el incentivo de desviarse de su estrategia elegida mientras los otros jugadores continúen jugando sus estrategias de equilibrio.

En estudios previos similares al modelo propuesto en esta tesis, como [12, 23, 123, 125, 126], se ha utilizado el método de inducción hacia atrás para analizar el juego. Este método se utiliza para maximizar las funciones de utilidad de los usuarios y los beneficios de los operadores, y a continuación se describen las etapas del juego y los métodos de análisis utilizados.

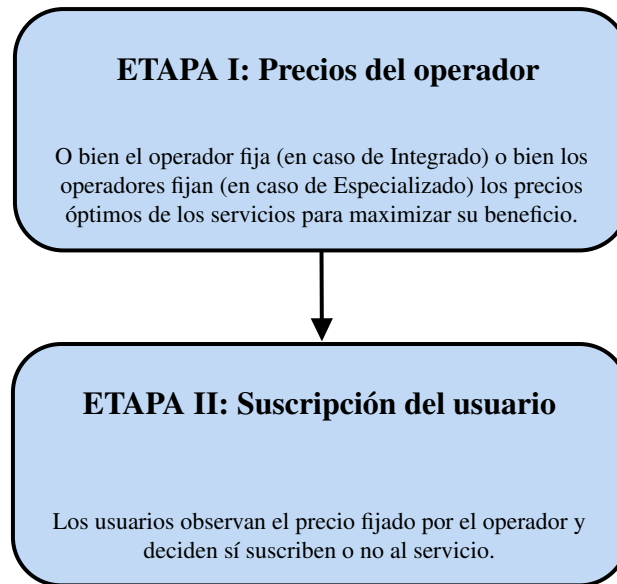


Figura 3.4: Descripción del juego.

3.1.5. Óptimo social

En esta subsección analizamos una situación de óptimo social. El óptimo social para este estudio se consigue maximizando el Bienestar Social - *Social Welfare* (SW). Una forma de interpretación de la maximización del SW es la presencia de un regulador de servicios 5G en el mercado, quien no busca ni maximizar los beneficios de un operador de red ni maximizar el Excedente de Consumidor - *Customer Surplus* (CS) si no busca maximizar una media agregada de todo. La importancia del análisis del óptimo social es para determinar el SW óptimo (SW_y^o), y este, a su vez, se utiliza como referencia para comparar con cada uno de los modelos de negocio, Integrado y Especializado, en función del bienestar social óptimo de cada uno de ellos (SW_y^i y SW_y^e).

El SW se define como la suma de las utilidades de todos los usuarios y los beneficios de los operadores de red, es decir:

$$SW_y = CS_y + \Pi_y \quad (3.1)$$

La búsqueda SW_y^o consiste en maximizar esta suma.

3.2. Descripción de escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y eMBB

El modelo propuesto para la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G se basa en las Secciones 3.1.2 - 3.1.3, donde se presentan los escenarios y modelos de negocio para que los operadores de red puedan ofrecer los servicios dentro de una red 5G. Esta sección aborda el análisis de la prestación de los servicios URLLC y eMBB por los operadores de red a los usuarios finales, desde dos perspectivas: la del sistema y la económica.

3.2.1. Modelo del sistema

La red 5G se modela como una cola M/M/1 con dos servicios como se muestra en la Figura 3.5. Se utiliza la simplificación de modelar la red completa como una sola cola M/M/1 debido a la necesidad de obtener fórmulas manejables para calcular la utilidad de los usuarios de la red. Los servicios de los usuarios URLLC y eMBB se modela como fuentes de paquetes Poisson independientes con tasas de generación de paquetes individuales de λ_u y λ_{ey} , respectivamente. Se define la tasa agregada URLLC como $\Lambda_{uy}^z = n_{uy}\lambda_u$ (donde n_{uy} es el número de suscriptores al servicio URLLC) y la tasa agregada eMBB como $\Lambda_{ey}^z = N_e\lambda_{ey}$ (donde N_e es el número suscriptores al servicio eMBB, que para este análisis se considera un parámetro y de valor fijo). Este modelado se puede observar en la Figura 3.5. Se asume que los tiempos medios de servicio de los paquetes se distribuyen exponencialmente con una media de $\frac{1}{\mu}$, donde μ representa la capacidad de la red. Para garantizar la estabilidad del sistema, se asume $\lambda < \mu$.

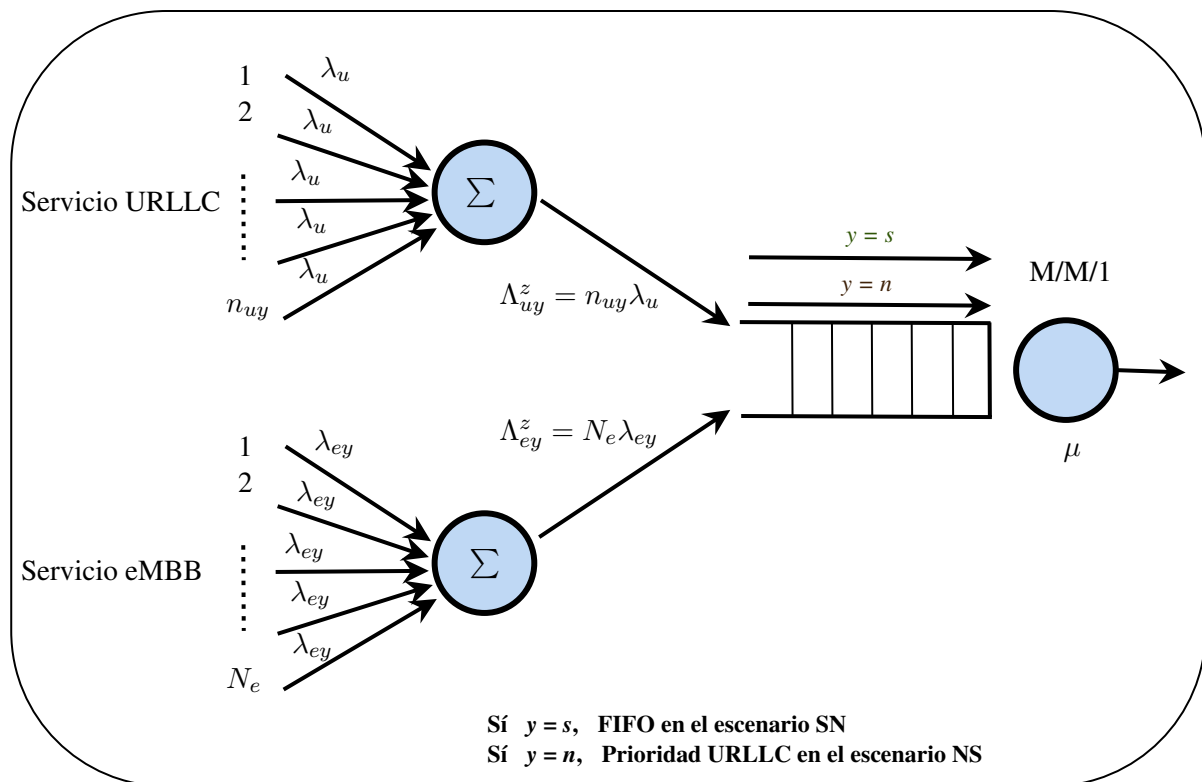


Figura 3.5: Modelo del sistema para la provisión de los servicios URLLC y eMBB.

3.2.2. Modelo económico

Los usuarios están interesados en recibir los servicios que provee un operador de red determinado. Por lo tanto, cada usuario URLLC paga un precio de suscripción, p_{uy} , por el servicio URLLC a un operador de red y recibe una QoS, mientras que cada usuario eMBB paga un precio por paquete eMBB, π_{ey} , a un operador de red y recibe una QoS correspondiente, por lo que el precio de suscripción para un usuario eMBB será p_{ey} , donde $p_{ey} \triangleq \pi_{ey} \lambda_{ey}$. De modo que, los precios fijados por uno o dos operadores de red es observado por los usuarios, quienes decidirán si suscribe o no al servicio en función de los mismos. En este sentido, para los escenarios SN y NS, se proponen expresiones de QoS para los servicios URLLC y eMBB basadas en la teoría de colas [127].

$$Q_{ey} = k_e \ln(\lambda_{ey} + 1) \quad (3.2)$$

$$Q_{us} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}\lambda_u - N_e\lambda_{es})} \quad (3.3)$$

$$Q_{un} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)} \quad (3.4)$$

- Con la Ecuación (3.2), se modela la QoS del servicio eMBB para los escenarios SN y NS. Q_{ey} es una función creciente, entonces en la Ecuación (3.2), a mayor λ_{ey} , aumenta la QoS percibida por el usuario en el servicio eMBB. Además, tiene una dependencia logarítmica. Q_{ey} es una función cóncava cuya pendiente disminuye al aumentar Q_{ey} , por lo que un aumento de λ_{ey} en Q_{ey} con valores bajos se percibe como un mayor aumento de Q_{ey} , mientras que un aumento de λ_{ey} en Q_{ey} con valores muy altos se percibe como un menor aumento de Q_{ey} . En la Ecuación (3.2), se añade 1 a λ_{ey} de forma que cuando $\lambda_{ey} = 0$, entonces, $\ln(1) = 0$. Esto se debe a que el usuario de eMBB valora más una alta transmisión de paquetes que un retraso en el tiempo de transmisión, por lo que Q_{ey} depende solo de la λ_{ey} que consiga.
- Con las Ecuaciones (3.3) y (3.4), se modela la QoS del servicio URLLC para los escenarios SN y NS. El enfoque se basa en el resultado de considerar la probabilidad de una cola M/M/1. En concreto, $Q_{uy} = \frac{k_u}{P[t > \epsilon_u]}$. La probabilidad del tiempo, t , que tarda un paquete del usuario URLLC en atravesar la red sea mayor que ϵ_u , donde ϵ_u es el umbral de retardo del servicio URLLC. Por tanto, cuanto mayor sea el retardo, menos QoS percibirá un usuario URLLC.
 - Con la Ecuación (3.3), se modela la QoS del servicio URLLC para el escenario SN, además, Q_{us} tiene una dependencia del retardo y está bajo la disciplina de programación FIFO sin prioridad. La tasa del servicio eMBB genera un retraso en el servicio URLLC porque ambos servicios comparten el mismo recurso de red y se sirven con la misma prioridad, de modo que $P[t \leq \epsilon] = 1 - e^{-\epsilon_u(\mu - n_{us}\lambda_u - N_e\lambda_{es})}$.
 - Finalmente, con la Ecuación (3.4), se modela la QoS del servicio URLLC para el escenario NS. En concreto, la Ecuación (3.4) permite asignar una prioridad alta al servicio URLLC debido a su sensibilidad al retardo y una prioridad baja al servicio eMBB debido a su no dependencia del retardo. Por lo tanto, la tasa del servicio eMBB no genera un retraso en el servicio URLLC porque los paquetes del usuario URLLC se sirven primero, mientras que los paquetes del usuario eMBB se sirven después. De modo que $P[t \leq \epsilon] = 1 - e^{-\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)}$.

Por otro lado, la utilidad de los usuarios de URLLC y eMBB definidas como U_{uy} y U_{ey} , se define como la diferencia entre la QoS percibida por los usuarios en unidades monetarias menos el precio cobrado por el operador [122]. Suponemos que U_{uy} y U_{ey} es igual a cero cuando los usuarios no se suscriben al servicio correspondiente. La función de utilidad se puede relacionar con la función cuasilineal utilizada en las telecomunicaciones y los análisis microeconómicos descritos en [23]. Por lo tanto, la utilidad del usuario eMBB para los escenarios SN y NS será la Ecuación (3.5), mientras que la utilidad del usuario URLLC para el escenario SN será la Ecuación (3.6) y para el escenario NS, será la Ecuación (3.7):

$$U_{ey} = k_e \ln(\lambda_{ey} + 1) - \pi_{ey}\lambda_{ey} \quad (3.5)$$

$$U_{us} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}\lambda_u - N_e\lambda_{es})} - p_{us} \quad (3.6)$$

$$U_{un} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)} - p_{un} \quad (3.7)$$

El beneficio que obtiene un operador está relacionado con el servicio que ofrece a los usuarios. Además, la cantidad de ingresos y costos de cada operador depende del modelo de negocio utilizado.

Integrado. Los ingresos generados por el operador de red proceden de la base de suscriptores URLLC y eMBB, donde los precios aplicados a cada uno de ellos se denotan por p_{uy} y $\lambda_{ey}\pi_{ey}$, respectivamente, donde π_{ey} es el precio por paquete eMBB que cobra el operador. Por consiguiente, el beneficio total del operador será la suma de los beneficios obtenidos de los servicios URLLC y eMBB. Suponiendo que el operador de red no incurre en ningún coste, su beneficio puede expresarse por:

$$\Pi_y = n_{uy} p_{uy} + N_e \lambda_{ey} \pi_{ey} \quad (3.8)$$

Especializado. El operador URLLC cobra a los usuarios de su base de suscriptores URLLC un precio p_{uy} , mientras que el operador eMBB cobra a los usuarios de su base de suscriptores eMBB un precio $\lambda_{ey}\pi_{ey}$. Ambos operadores comparten los mismos recursos para brindar los servicios a sus respectivos usuarios. Por lo demás, ninguno de los dos operadores incurre en costes. Por lo tanto, el beneficio de cada operador está determinada por:

$$\Pi_{uy} = n_{uy} p_{uy} \quad (3.9)$$

$$\Pi_{ey} = N_e \lambda_{ey} \pi_{ey} \quad (3.10)$$

El beneficio del operador podría haber disminuido debido a los costes de inversión y explotación. Sin embargo, en el análisis no se han considerado los costes de explotación debido a que no están relacionados con el precio del servicio, lo que hace menos explícita la expresión del beneficio. Además, tampoco se han incluido los costes de inversión, ya que se afirma que son un valor constante.

3.2.3. Juego estratégico

Las interacciones estratégicas sobre los dos modelos de negocio para los escenarios SN y NS previamente mencionados, se pueden identificar entre la decisión de suscripción del usuario y las decisiones de fijación de precios por los operadores para los servicios URLLC y eMBB de la siguiente manera:

- La decisión de suscripción de los usuarios de URLLC está influenciada por la decisión de fijación de precio del servicio URLLC. Asimismo, la decisión de suscripción de los usuarios de eMBB está influenciada por la decisión de fijación de precio del servicio de eMBB.
- La decisión de suscripción de los usuarios de URLLC depende de la decisión de suscripción de los usuarios de eMBB a través de su QoS. Asimismo, la decisión de suscripción de los usuarios de eMBB depende de la decisión de suscripción de los usuarios de URLLC a través de su QoS.
- El beneficio obtenido por el servicio de URLLC depende de la decisión de suscripción de los usuarios de URLLC. Asimismo, el beneficio obtenido por el servicio eMBB depende de la decisión de suscripción de los usuarios de eMBB.

- El beneficio obtenido por el servicio URLLC está influenciado por el precio del servicio eMBB indirectamente a través de la decisión de suscripción de los usuarios de eMBB.

Con base de lo descrito en la sección 3.1.4, podemos definir las etapas del juego en cada modelo de negocio de la siguiente manera:

- Integrado
 - La Etapa I comprende un único jugador (un único operador de red) quien fija el precio de los dos servicios.
- Especializado
 - La Etapa I comprende dos jugadores (operador URLLC y operador eMBB) quienes fijan el precio del servicio que provee.

Asimismo, con base en la Sección 3.1.4, se describe que tanto en el Integrado como en el Especializado, la Etapa II comprende las bases de usuarios de URLLC y eMBB, dentro de las cuales cada usuario decide si suscribe o no a su operador.

3.2.3.1. Etapa II: Suscripción de los usuarios

En la Etapa II, cada usuario de URLLC paga un precio de suscripción, p_{uy} , por el servicio de URLLC a un operador y recibe una U_{uy} , mientras que cada usuario de eMBB paga un precio por paquete de eMBB, π_{ey} , a un operador y recibe una U_{ey} , por lo que el precio de suscripción para un usuario de eMBB es $p_{ey} \triangleq \pi_{ey}\lambda_{ey}$. Los usuarios observarán los precios fijados por el operador y decidirán si se suscriben o no al servicio. Por otro lado, en cuanto al análisis del servicio eMBB, U_{ey} es tal que no se ve afectada por la decisión de suscripción de otros usuarios eMBB. Por lo tanto, la determinación de λ_{ey} que es individual se resuelve como un problema clásico de la teoría del consumidor, donde no existen externalidades entre los consumidores. En el servicio eMBB no hay juego y se resuelve como un problema de maximización de U_{ey} por el teorema de Karush-Kuhn-Tucker (KKT) definido en (3.11) y (3.12), obteniendo λ_{ey} en (3.13) como solución al problema de maximización, es decir, existen dos soluciones posibles: $\lambda_{ey} \geq 0$ y $\lambda_{ey} = 0$.

$$\max_{\lambda_{ey}} U_{ey} = k_e \ln(\lambda_{ey} + 1) - \pi_{ey}\lambda_{ey} \quad (3.11)$$

$$s.t. \quad \lambda_{ey} \geq 0 \quad (3.12)$$

$$\lambda_{ey} = \begin{cases} \frac{k_e}{\pi_{ey}} - 1 & 0 \leq \pi_{ey} < k_e \\ 0 & k_e \leq \pi_{ey} \end{cases} \quad (3.13)$$

Donde λ_{ey} es la tasa que un usuario eMBB generará de acuerdo a un precio que maximice su utilidad.

En el análisis del servicio URLLC, la utilidad del usuario depende del retardo que experimenta la cola M/M/1, que a su vez es influenciado por las decisiones individuales de todos los usuarios URLLC. En otras palabras, cuanto más usuarios se suscriban al servicio, mayor será el retardo experimentado por todos los usuarios, de ahí la externalidad. En este contexto, los usuarios tienen que decidir si se suscriben o no, lo que resulta en una interacción estratégica que afecta la utilidad de cada uno (U_{uy}). En estas condiciones, utilizamos el principio de Wardrop de 1952 para resolver este problema, que se aplica comúnmente en la selección de rutas en las redes de transporte. En particular, se aplica el primer principio de Wardrop, que establece que los tiempos de viaje en todas las rutas utilizadas deben ser iguales y menores que el tiempo requerido por un solo vehículo en cualquier ruta nueva. Por lo tanto, en este análisis, esto se traduce en que el equilibrio alcanzado implica que todos los usuarios reciben el mismo nivel de utilidad de las alternativas seleccionadas.

Se distingue cuatro posibles casos de equilibrio basados en el principio de Wardrop. Cada caso depende de qué alternativa (suscribirse o no suscribirse) eligen los usuarios de URLLC y qué alternativa (suscribirse o no suscribirse) eligen los usuarios de eMBB, lo que da lugar a cuatro casos. En primer lugar, $U_{uy} = 0$ (algunos usuarios de URLLC se suscriben y otros no, $n_{uy} \geq 0$). En segundo lugar, $U_{uy} < 0$ (ningún usuario de URLLC se suscribe, $n_{uy} = 0$). Por otro lado, se tiene $\Lambda_{uy} = n_{uy} \lambda_u$ donde n_{uy} es el número de usuarios de URLLC en el equilibrio que se suscriben y λ_u es la tasa media de llegada de paquetes de los usuarios de URLLC a la red; por lo tanto, n_{uy} es endógeno. Mientras que para el servicio eMBB lo que es endógeno es λ_{ey} y N_e es un parámetro. Con base en las condiciones de Wardrop y la solución del problema de maximización en (3.13) ($\lambda_{ey} \geq 0$ y $\lambda_{ey} = 0$), Se describe los cuatro casos (situaciones) en (3.14)-(3.17).

$$n_{uy} \geq 0, \lambda_{ey} \geq 0, U_{ey} = 0, U_{uy} = 0, n_{uy} \lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha \mu \quad (3.14)$$

$$n_{uy} = 0, \lambda_{ey} \geq 0, U_{ey} = 0, U_{uy} < 0, n_{uy} \lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha \mu \quad (3.15)$$

$$n_{uy} \geq 0, \lambda_{ey} = 0, U_{ey} < 0, U_{uy} = 0, n_{uy} \lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha \mu \quad (3.16)$$

$$n_{uy} = 0, \lambda_{ey} = 0, U_{ey} < 0, U_{uy} < 0, n_{uy} \lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha \mu \quad (3.17)$$

Donde las funciones $n_{uy}(p_{uy}, \pi_{ey})$ y $\lambda_{ey}(p_{uy}, \pi_{ey})$ son expresados en términos de p_{uy} y π_{ey} , como se explica en la Sección 3.3 que analiza los modelos. Además, se aplica la restricción $n_{uy} \lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha \mu$ para garantizar la estabilidad de sistema.

3.2.3.2. Etapa I: Fijación de precios por el operador

En el Integrado, el operador fija p_{uy} y π_{ey} para maximizar su beneficio en los escenarios SN y NS. El operador predice que la suscripción de los usuarios se consolidará dentro del equilibrio descrito en (3.14)-(3.17), donde se han encontrado las regiones de equilibrio de Wardrop. El beneficio del operador dependerá de los precios.

$$(p_{uy}^i, \pi_{ey}^i) = \arg \max_{p_{uy}, \pi_{ey}} \Pi_y^i(p_{uy}, \pi_{ey}) \quad (3.18)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.19)$$

$$\pi_{ey} \geq 0 \quad (3.20)$$

$$N_e \lambda_{ey} + n_{uy} \lambda_u \leq \alpha \mu \quad (3.21)$$

En el contexto del Especializado, cada operador establece el precio de su servicio de forma instantánea e independiente en los escenarios SN y NS. Ambos operadores no solo son conscientes de la decisión de suscripción en la Etapa II y su beneficio, sino también del comportamiento racional del otro operador. El precio óptimo para maximizar el beneficio de cada operador dependerá de la decisión tomada por el otro operador, y será determinado por su función de BR, que se expresa de la siguiente manera:

$$BR_u(\pi_{ey}) = \arg \max_{p_{uy}} \Pi_{uy}^e(p_{uy}, \pi_{ey}^e) \quad (3.22)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.23)$$

$$\pi_{ey} \geq 0 \quad (3.24)$$

$$n_{uy}\lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha\mu \quad (3.25)$$

$$BR_e(p_{uy}) = \arg \max_{\pi_{ey}} \Pi_{ey}^e(p_{uy}^e, \pi_{ey}) \quad (3.26)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.27)$$

$$\pi_{ey} \geq 0 \quad (3.28)$$

$$n_{uy}\lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha\mu \quad (3.29)$$

Finalmente, p_{uy}^e y π_{ey}^e es un equilibrio de Nash siempre que la elección del operador URLLC sea óptima dada la elección del operador eMBB y la elección del operador eMBB es óptima dada la elección del operador URLLC [128]. Asimismo, el equilibrio de Nash en la Etapa I será p_{uy}^e y π_{ey}^e , tal que cada operador está fijando un precio de mejor respuesta al precio del otro operador, anticipando el equilibrio de la Etapa II. La solución viene dada por el siguiente sistema de ecuaciones [23].

$$p_{uy}^e = BR_u(\pi_{ey}^e) \quad (3.30)$$

$$\pi_{ey}^e = BR_e(p_{uy}^e) \quad (3.31)$$

3.2.4. Óptimo social

En esta subsección, se plantea una situación de óptimo social con base en la sección 3.1.5, donde se define qué $SW_y = CS_y + \Pi_y$. Por otro lado, se define el CS como la suma de las utilidades de todos los usuarios URLLC y eMBB, que se expresa de la siguiente manera.

$$CS_y = CS_{uy} + CS_{ey} \quad (3.32)$$

Donde CS_{uy} es la suma de la utilidad de todos los usuarios de URLLC y CS_{ey} es la suma de la utilidad de todos los usuarios de eMBB. Por lo tanto, con base al número de usuarios que suscriben a cada servicio y las ecuaciones (3.5)-(3.7), se tiene:

$$CS_{ey} = N_e(Q_{ey} - \lambda_{ey}\pi_{ey}) \quad (3.33)$$

$$CS_{uy} = n_{uy}(Q_{uy} - p_{uy}) \quad (3.34)$$

Por otro lado, en el equilibrio del usuario, $Q_{uy} = p_{uy}$, en consecuencia, CS_{uy} será cero porque CS_{uy} no depende del modelo de negocio, sino del equilibrio de usuarios, por lo tanto, da lo siguiente:

$$CS_y = CS_{ey} \quad (3.35)$$

Asimismo, con base en (3.8) y (3.35), se tiene:

$$SW_y = CS_y + \Pi_y \quad (3.36)$$

$$= N_e(Q_{ey} - \lambda_{ey}\pi_{ey}) + n_{uy} p_{uy} + N_e \lambda_{ey} \pi_{ey} \quad (3.37)$$

$$= n_{uy} Q_{uy} + N_e Q_{ey} \quad (3.38)$$

Por consiguiente, el problema de maximización del SW_y será:

$$\max_{n_{uy}, \lambda_{ey}} n_{uy} Q_{uy} + N_e Q_{ey} \quad (3.39)$$

$$s.t. \quad n_{uy} \geq 0 \quad (3.40)$$

$$\lambda_{ey} \geq 0 \quad (3.41)$$

$$n_{uy}\lambda_u + N_e \lambda_{ey} \leq \alpha\mu \quad (3.42)$$

La obtención de SW_{uy}^o y el par de variables endógenas (n_{uy}^o, λ_{ey}^o) se realiza mediante el problema de maximización de SW_y . Además, las expresiones (3.43)-(3.46) indican cómo encontrar n_{us}^o, λ_{es}^o que maximiza el SW_s para el escenario SN.

$$(n_{us}^o, \lambda_{es}^o) \in \arg \max_{n_{us}, \lambda_{es}} n_{us} k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}\lambda_u - N_e\lambda_{es})} + N_e k_e \ln(\lambda_{es} + 1) \quad (3.43)$$

$$s.t. \quad n_{us} \geq 0 \quad (3.44)$$

$$\lambda_{es} \geq 0 \quad (3.45)$$

$$n_{us}\lambda_u + N_e \lambda_{es} \leq \alpha\mu \quad (3.46)$$

De la misma manera, las expresiones (3.47)-(3.50) indican cómo encontrar el par de variables (n_{un}^o, λ_{en}^o) que maximiza el SW_n para el escenario NS.

$$(n_{un}^o, \lambda_{en}^o) = \arg \max_{n_{un}, \lambda_{en}} n_{un} k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)} + N_e k_e \ln(\lambda_{en} + 1) \quad (3.47)$$

$$s.t. \quad n_{un} \geq 0 \quad (3.48)$$

$$\lambda_{en} \geq 0 \quad (3.49)$$

$$n_{un}\lambda_u + N_e \lambda_{en} \leq \alpha\mu \quad (3.50)$$

Además, con base en (3.43)-(3.50) se obtiene los gráficos del bienestar social siguientes.

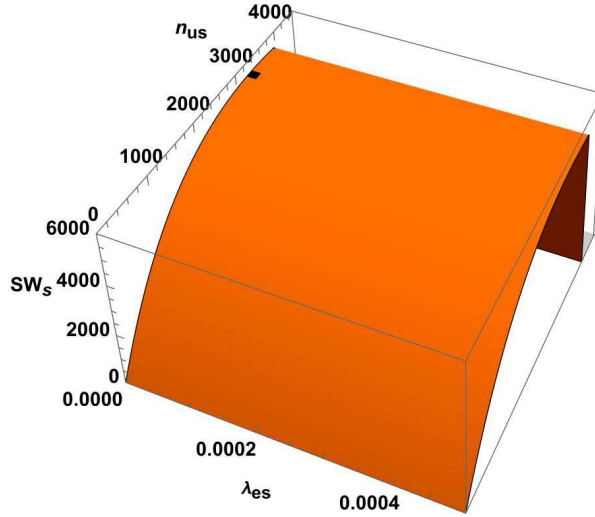


Figura 3.6: SW_s^o en el escenario SN para los servicios URLLC y eMBB.

La Figura 3.6 muestra la representación gráfica del SW_s y la localización de su valor máximo ($SW_s^o = 5495,74$ u. m.) para el número de usuarios URLLC ($n_{us}^o = 3333,33$ usuarios) y la tasa de paquetes eMBB ($\lambda_{es}^o = 0$ paquetes/s) que lo maximiza.

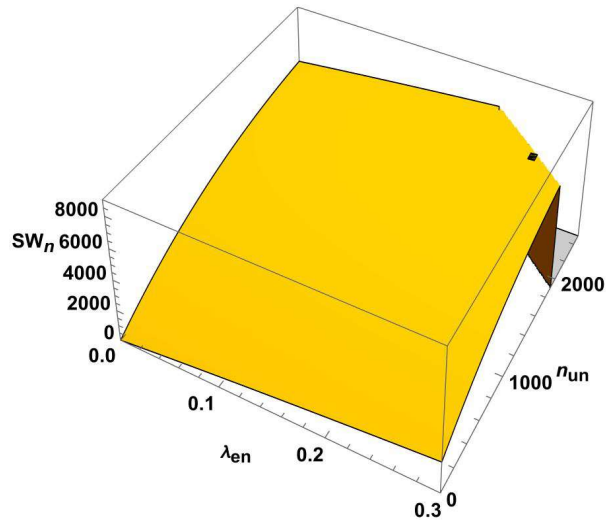


Figura 3.7: SW_n^o en el escenario NS para los servicios URLLC y eMBB.

Asimismo, la Figura 3.7 muestra la representación gráfica de SW_n y la ubicación de su valor máximo

($SW_n^o = 6861,75$ u. m.) para el número de usuarios URLLC ($n_{un}^o = 2116,75$ usuarios) y la tasa de paquetes eMBB ($\lambda_{en}^o = 0,269036$ paquetes/s) que lo maximiza.

Por otro lado, como en el óptimo social, el operador no es quien fija un precio para maximizar su beneficio, sino un regulador que busca maximizar SW_y a través de la distribución de los recursos, los precios ya no son necesarios; por tanto, aunque maximizar SW_y sólo tiene sentido desde el punto de vista de la distribución de recursos, las variables que maximizan el bienestar social son n_{uy} y λ_{ey} ; por lo tanto, existe una correspondencia entre estas variables con p_{uy}^o y π_{ey}^o , es decir, para cada n_{uy}^o y λ_{ey}^o se corresponde un precio. Además, al maximizar SW_y no existen regiones porque SW_y es una función de n_{uy}^o y λ_{ey}^o , sino que se hace un cálculo a base de expresiones de equilibrio de suscripción (3.14)-(3.17) obteniendo los precios inducidos por n_{uy}^o y λ_{ey}^o . Estos precios se muestra en Tabla 3.2 para el escenario SN y la Tabla 3.3 para el escenario NS.

Tabla 3.2: Precios inducidos por n_{us}^o y λ_{es}^o el escenario SN.

π_{es}^o	p_{us}^o	n_{us}^o	λ_{es}^o
$\frac{k_e}{\lambda_{es}^o + 1}$	$k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}^o \lambda_u - N_e \lambda_{es}^o)}$	$0 < n_{us}^o$,	$0 < \lambda_{es}^o$
		$n_{us}^o \lambda_u + N_e \lambda_{es}^o \leq \alpha \mu$	

Tabla 3.3: Precios inducidos por n_{un}^o y λ_{en}^o el escenario NS.

π_{en}^o	p_{un}^o	n_{un}^o	λ_{en}^o
$\frac{k_e}{\lambda_{en}^o + 1}$	$k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}^o \lambda_u)}$	$0 < n_{un}^o$,	$0 < \lambda_{en}^o$
		$n_{un}^o \lambda_u + N_e \lambda_{en}^o \leq \alpha \mu$	

Finalmente, con base en (3.8)-(3.10) y los precios de las Tablas 3.2 y 3.3, se determina la expresión del beneficio de cada operador y del beneficio total en el óptimo social para los escenarios SN y NS, es decir, Π_{uy}^o , Π_{ey}^o , y Π_y^o .

3.3. Análisis de los escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y eMBB

En esta sección, se comienza con el equilibrio analítico de Wardrop para la Etapa II en los dos escenarios. Luego, se presenta la solución para la Etapa I en los casos del Integrado y Especializado. Por lo tanto, sobre la base de la Sección 3.1.4, se analiza los escenarios SN y NS, y modelos para los servicios URLLC y eMBB.

3.3.1. Análisis de la Etapa II

3.3.1.1. Escenario SN

El análisis para el escenario SN en el Integrado y Especializado se realiza con base en (3.13)-(3.17). Los resultados que se obtienen son 4 regiones.

Región a:

$$\lambda_{es} = \frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \quad (3.51)$$

$$n_{us} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \right) - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) \quad (3.52)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{us} < k_u e^{\epsilon_u \left(\mu - N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \right) \right)} \quad (3.53)$$

$$0 \leq \pi_{es} < k_e \quad (3.54)$$

Región b:

$$\lambda_{es} = \frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \quad (3.55)$$

$$n_{us} = 0 \quad (3.56)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \left(\mu - N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \right) \right)} < p_{us} \quad (3.57)$$

$$\frac{k_e}{1 + \frac{\alpha \mu}{N_e}} \leq \pi_{es} < k_e \quad (3.58)$$

Región c:

$$\lambda_{es} = 0 \quad (3.59)$$

$$n_{us} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) \quad (3.60)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{us} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.61)$$

$$k_e < \pi_{es} \quad (3.62)$$

Región d:

$$\lambda_{es} = 0 \quad (3.63)$$

$$n_{us} = 0 \quad (3.64)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{us} \quad (3.65)$$

$$k_e \leq \pi_{es} \quad (3.66)$$

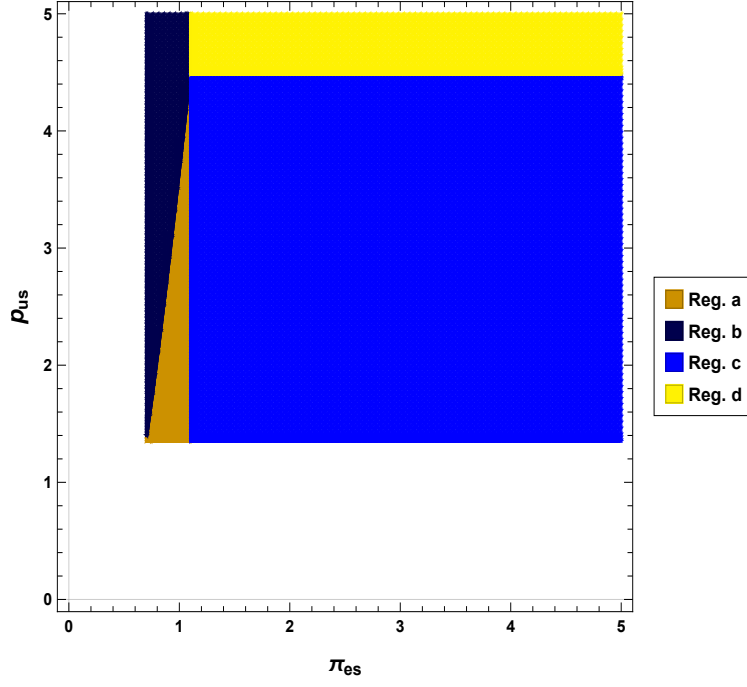


Figura 3.8: Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario SN para los servicios URLLC y eMBB.

La Figura 3.8 muestra la representación gráfica de las regiones en equilibrio en el plano $p_{us}-\pi_{es}$ para una asignación específica de valores de los parámetros descritos en la Tabla 4.1.

3.3.1.2. Escenario NS

De igual forma, el análisis para el escenario NS en el Integrado y Especializado se realiza con base en (3.13)-(3.17). Los resultados que se obtienen son 4 regiones.

Región a:

$$\lambda_{en} = \frac{k_e}{\pi_{en}} - 1 \quad (3.67)$$

$$n_{un} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) \quad (3.68)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \left((1-\alpha)\mu + N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{en}} - 1 \right) \right)} \leq p_{un} \leq k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.69)$$

$$0 \leq \pi_{en} < k_e \quad (3.70)$$

Región b:

$$\lambda_{en} = \frac{k_e}{\pi_{en}} - 1 \quad (3.71)$$

$$n_{un} = 0 \quad (3.72)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} < p_{un} \quad (3.73)$$

$$\frac{k_e}{\frac{\alpha \mu}{N_e} + 1} \leq \pi_{en} < k_e \quad (3.74)$$

Región c:

$$\lambda_{en} = 0 \quad (3.75)$$

$$n_{un} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) \quad (3.76)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{un} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.77)$$

$$k_e < \pi_{en} \quad (3.78)$$

Región d:

$$\lambda_{en} = 0 \quad (3.79)$$

$$n_{un} = 0 \quad (3.80)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{un} \quad (3.81)$$

$$k_e \leq \pi_{en} \quad (3.82)$$

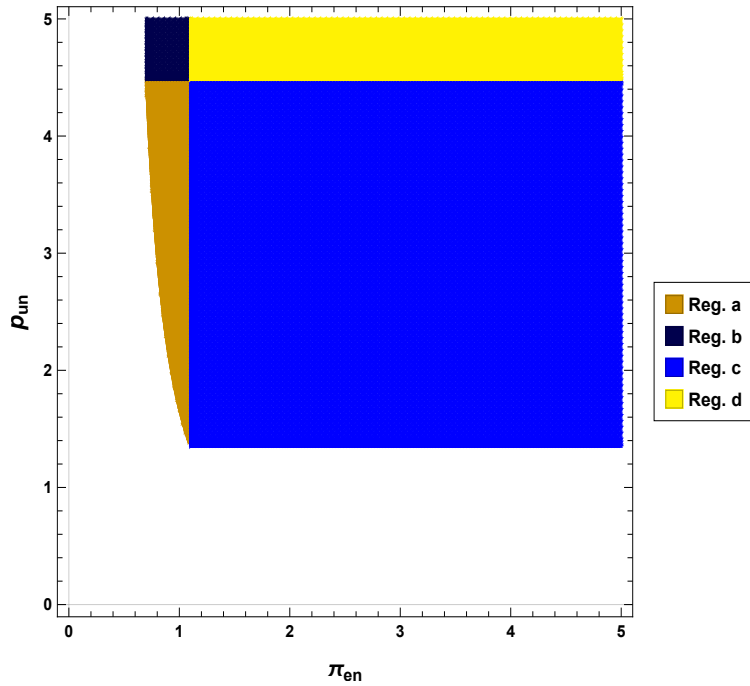


Figura 3.9: Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario NS para los servicios URLLC y eMBB.

La Figura 3.9 muestra la representación gráfica de las regiones en equilibrio en el plano $p_{un}-\pi_{en}$ para una asignación específica de valores de los parámetros descritos en la Tabla 4.1.

3.3.2. Análisis de la Etapa I

En esta parte se presenta un análisis detallado y la solución de la Etapa I. En particular, se analizan las expresiones de los beneficios de los operadores para los escenarios SN y NS, y los modelos de negocio.

3.3.2.1. Integrado en los escenarios SN y NS:

La solución de la Etapa I para el Integrado no es analizable. Por lo tanto, la solución de la Etapa I para este modelo se realiza numéricamente en la Sección 4.1.1, con base en el problema de maximización (3.18)-(3.21) definido en la Sección 3.2.3.2, se obtiene lo siguiente:

$$\Pi_s^i = \begin{cases} \frac{N_e \epsilon_u (k_e - \pi_{es}) (\pi_{es} \lambda_u - p_{us}) + \pi_{es} p_{us} \left(\epsilon_u \mu - \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right)}{\epsilon_u \pi_{es} p_{us}} & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } a \\ N_e (k_e - \pi_{es}) & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } b \\ \frac{p_{us}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.83)$$

$$\Pi_n^i = \begin{cases} N_e (k_e - \pi_{en}) + \frac{p_{un}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } a \\ N_e (k_e - \pi_{en}) & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } b \\ \frac{p_{un}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.84)$$

En conclusión, la solución de la Etapa I se obtiene a partir del problema de maximización en (3.18) para los escenarios SN y NS, y los modelos de negocio.

3.3.2.2. Especializado en el escenario SN

Según (3.9)-(3.10) y dado el equilibrio de Wardrop para n_{us} y λ_{es} obtenido en (3.51)-(3.66), las expresiones de beneficios a maximizar por el operador URLLC y eMBB son las siguientes:

$$\Pi_{us}^e = \begin{cases} \frac{p_{us} \left(\epsilon_u \pi_{es} (N_e + \mu) - \epsilon_u k_e N_e - \pi_{es} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right)}{\epsilon_u \lambda_u \pi_{es}} & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } a \\ 0 & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } b \cup \text{Reg. } d \\ \frac{p_{us}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } c \end{cases} \quad (3.85)$$

$$\Pi_{es}^e = \begin{cases} N_e (k_e - \pi_{es}) & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } a \cup \text{Reg. } b \\ 0 & (p_{us}, \pi_{es}) \in \text{Reg. } c \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.86)$$

La resolución de las BRs se basa en las restricciones y regiones analizadas en la Sección 3.3.1.1 y se obtiene lo siguiente.

$$BR_e(p_{us}) = \begin{cases} \frac{k_e}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} & k_u e^{\epsilon_u \mu(1-\alpha)} \leq p_{us} \end{cases} \quad (3.87)$$

$$BR_u(\pi_{es}) = \begin{cases} k_u e^{\epsilon_u \mu(1-\alpha)} & \frac{k_e}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} \leq \pi_{es} < \frac{k_e}{\frac{1}{N_e} \left(\alpha\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1} \\ k_u e^{\epsilon_u \left(\mu - N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{es}} - 1 \right) \right) - 1} & \frac{k_e}{\frac{1}{N_e} \left(\alpha\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1} \leq \pi_{es} < k_e \\ k e^{\epsilon_u \mu - 1} & k_e \leq \pi_{es} \end{cases} \quad (3.88)$$

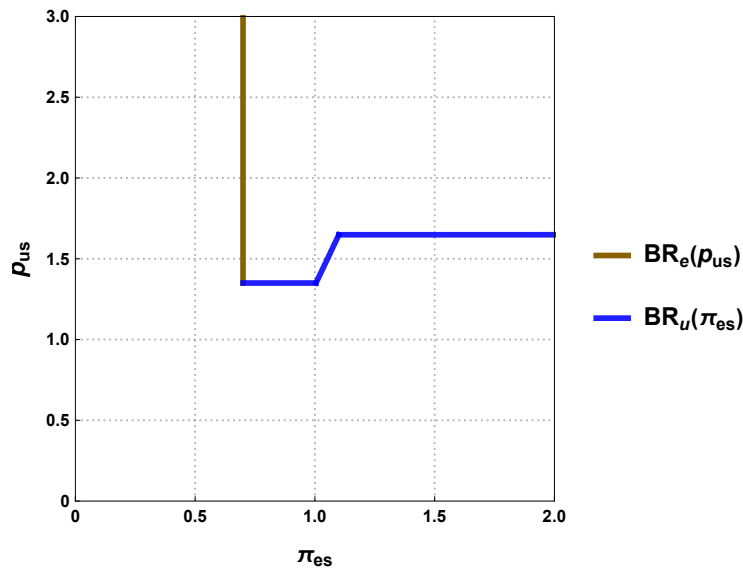


Figura 3.10: Mejores respuestas (BRs) en el escenario SN para los operadores URLLC y eMBB.

La Figura 3.10 muestra la representación gráfica de $BR_e(p_{us})$ y $BR_u(\pi_{es})$. Por otro lado, observamos que los precios fijados por los operadores alcanzan el equilibrio en el punto inicial donde las BRs divergen, por tanto, el Equilibrio de Nash es:

$$(p_{us}^e, \pi_{es}^e) = \left(k_u e^{\epsilon_u \mu(1-\alpha)}, \frac{k_e}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} \right) \quad (3.89)$$

3.3.2.3. Especializado en el escenario NS

De acuerdo con (3.9)-(3.10) y dado el equilibrio de Wardrop para n_{un} y λ_{en} obtenido en (3.67)-(3.82), las expresiones de beneficios a maximizar por el operador URLLC y mMTC son las siguientes:

$$\Pi_{un}^e = \begin{cases} \frac{p_{un}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } a \cup \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } b \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.90)$$

$$\Pi_{en}^e = \begin{cases} N_e(k_e - \pi_{en}) & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } a \cup \text{Reg. } b \\ 0 & (p_{un}, \pi_{en}) \in \text{Reg. } c \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.91)$$

Las resoluciones de las BRs se obtienen con base en las restricciones y regiones analizadas en la Sección 3.3.1.2 y se obtiene lo siguiente.

$$BR_e(p_{un}) = \begin{cases} \frac{\frac{k_e}{N_e} \left(\frac{1}{\epsilon_u} \ln \left(\frac{p_{un}}{k_u} \right) - \mu(1-\alpha) \right) + 1}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} & k_u e^{\epsilon_u \mu(1-\alpha)} \leq p_{un} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \\ \frac{k_e}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} & k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{un} \end{cases} \quad (3.92)$$

$$BR_u(\pi_{en}) = \begin{cases} k_u e^{\epsilon_u \left((1-\alpha)\mu + N_e \left(\frac{k_e}{\pi_{en}} - 1 \right) \right)} & \frac{k_e}{\frac{\alpha\mu}{N_e} + 1} \leq \pi_{en} < \frac{k_e}{\frac{1}{N_e} \left(\alpha\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1} \\ k_u e^{\epsilon_u \mu - 1} & \frac{1}{N_e} \left(\alpha\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1 \leq \pi_{en} \end{cases} \quad (3.93)$$

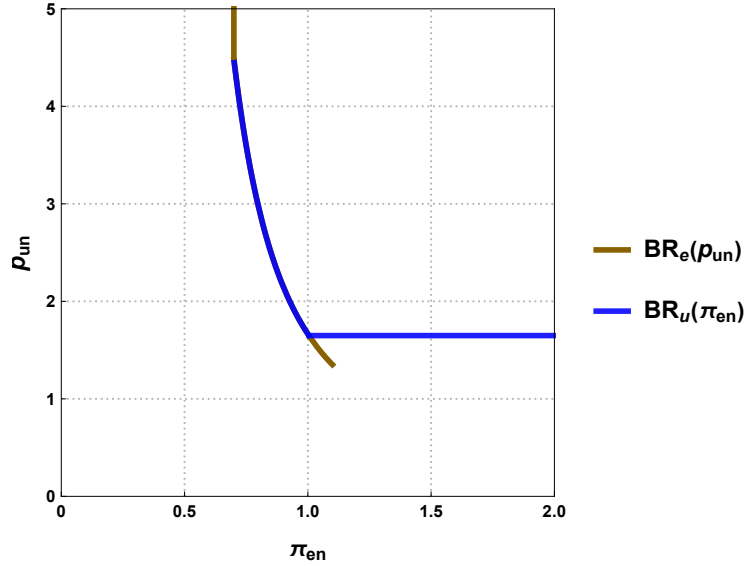


Figura 3.11: Mejores respuestas (BRs) en el escenario NS para los operadores URLLC y eMBB.

En la Figura 3.11 se muestra la representación gráfica de $BR_e(p_{un})$, $BR_u(\pi_{en})$, y los puntos cruzados entre ellos en el plano $p_{un}-\pi_{en}$ para el escenario NS con una asignación concreta de los valores de los parámetros descritos en la Tabla 4.1.1.

Se observa en la Figura 3.11, que los precios fijados por los operadores alcanzan el equilibrio dentro de un rango de valores. Este rango de valores comprende los distintos pares de precios, p_{un} , y π_{en} .

Estos precios están dentro de un intervalo correspondiente, es decir, $p_{uy} \subset [k_u e^{\epsilon_u \mu - 1}, k_u e^{\epsilon_u \mu}]$, mientras que $\pi_{ey} \subset \left[\frac{k_e}{\frac{\alpha \mu}{N_e} + 1}, \frac{k_e}{\frac{1}{N_e} \left(\alpha \mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1} \right]$.

Sin embargo, (p_{un}, π_{en}) verticalmente en el punto extremo superior es $\left(k_u e^{\epsilon_u \mu}, \frac{k_e}{\frac{\alpha \mu}{N_e} + 1} \right)$, mientras que en el punto extremo inferior es $\left(k_u e^{\epsilon_u \mu - 1}, \frac{k_e}{\frac{1}{N_e} \left(\alpha \mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right) + 1} \right)$. Sobre la base de esto, se encuentra que el beneficio del operador URLLC es mucho menor en el punto alto que en el punto bajo para el par de precios, mientras que el beneficio del operador eMBB es mayor en el punto alto que en el punto bajo. El punto medio del intervalo de valores de π_{en}^e y su correspondiente p_{un}^e se toma como la solución para ambos operadores que se muestra a continuación:

$$\pi_{en}^e = \frac{k_e N_e}{2} \left(\frac{1}{N_e + \alpha \mu} + \frac{\epsilon_u}{\epsilon_u (N_e + \alpha \mu) - 1} \right) \quad (3.94)$$

$$p_{un}^e = k_u e^{\epsilon_u \mu - \frac{1}{2} + \frac{1}{2 - 4\epsilon_u (N_e + \alpha \mu)}} \quad (3.95)$$

3.4. Descripción de escenarios y modelos para la prestación de servicios URLLC y mMTC

Los modelos y escenarios propuestos para la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G se basa en las Secciones 3.1.2 y 3.1.3, donde se presentan a detalle los escenarios y modelos de negocio para que los operadores puedan ofrecer los servicios dentro de una red 5G. Asimismo, esta sección aborda el análisis de la prestación de los servicios URLLC y mMTC por los operadores a los usuarios finales, desde dos perspectivas: la del sistema y la económica.

3.4.1. Modelo del sistema

El modelo del sistema utilizado para representar la prestación de los servicios URLLC y mMTC está con base en la Figura 3.1. Por lo tanto, el modelo de red 5G es una cola M/M/1 con dos servicios como se muestra en la Figura 3.12. Se modela un usuario URLLC (mMTC) como una fuente de paquetes Poisson con una tasa de generación de paquetes λ_u (λ_m). El número de suscriptores URLLC y mMTC se denota por n_{uy} y n_{my} , correspondientemente. Los tiempos de servicio de los paquetes se distribuyen exponencialmente con una media de $\frac{1}{\mu}$, donde μ representa la capacidad de la red. Para garantizar la estabilidad, se asume $\lambda < \mu$.

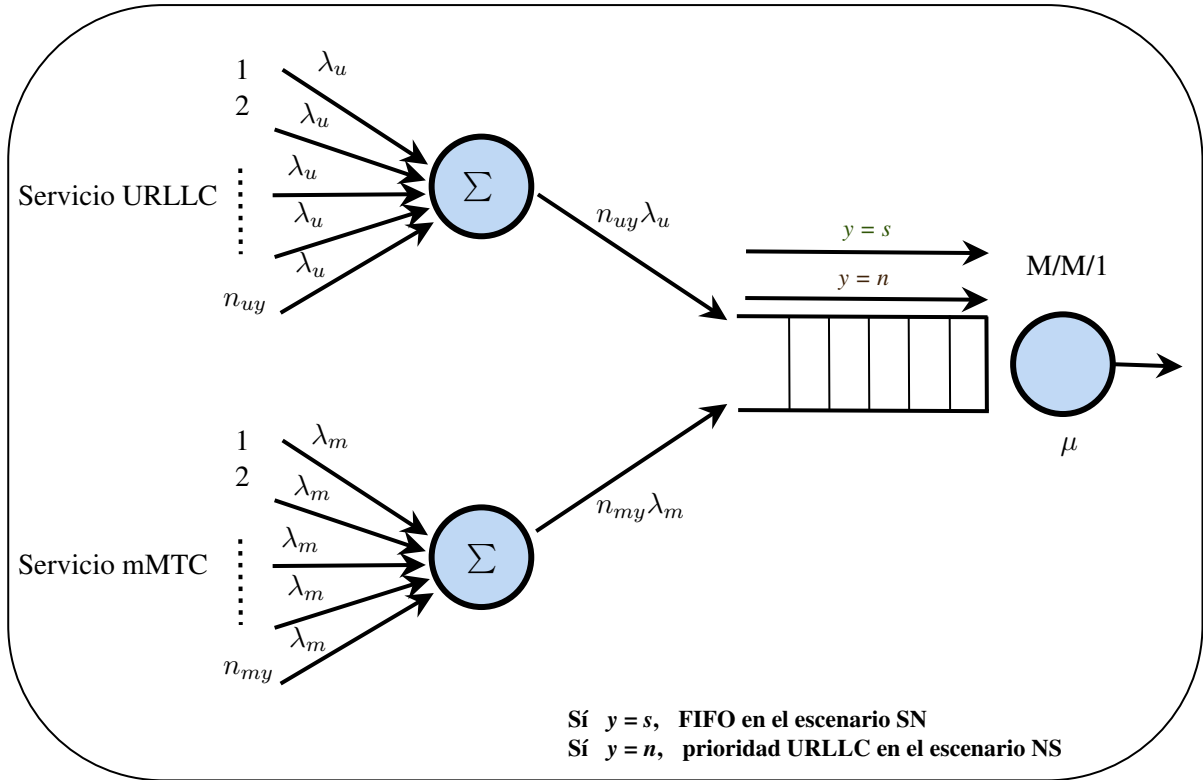


Figura 3.12: Modelo del sistema para la provisión de los servicios URLLC y mMTC.

3.4.2. Modelo económico

El operador provee servicios a los usuarios que se suscriben a los mismos. Por lo tanto, cada usuario URLLC paga un precio de suscripción p_{uy} al operador por el servicio de URLLC y recibe una QoS determinada. De manera similar, cada usuario mMTC paga un precio de suscripción p_{my} al operador por el servicio de mMTC y recibe una QoS correspondiente. Los usuarios observan los precios fijados por el operador, la QoS y toman la decisión de suscribirse o no al servicio. Sobre la base de lo anterior, se propone expresiones para la QoS de los servicios URLLC y mMTC en los escenarios SN y NS, con base en la teoría de colas [127] y las características particulares de QoS para cada servicio [6]. Las expresiones están dadas por (3.96)-(3.99).

Para la definición de la QoS en los escenarios SN y NS para ambos servicios, se considera la distribución de probabilidad $P[t \leq \epsilon]$ del tiempo t que tarda un paquete de usuario en atravesar la red. En concreto, $Q_{uy} = \frac{k_u}{P[t > \epsilon_u]}$ y $Q_{my} = \frac{k_m}{P[t > \epsilon_m]}$. El umbral ϵ es diferente para cada servicio, es decir, ϵ_u es el umbral de retardo del servicio URLLC y ϵ_m es el umbral de retardo del servicio mMTC. Se fija $\epsilon_m > \epsilon_u$ y $\lambda_m < \lambda_u$ con base en que la cantidad de datos enviados es menor y la tolerancia al retardo es mayor para el servicio mMTC que para el servicio URLLC [6].

3.4.2.1. Escenario SN

En este modelo, las tasas de paquetes URLLC y mMTC comparten la capacidad del servidor, de modo que el retardo t se ve afectado por ambas tasas, con una tasa agregada $n_{us}\lambda_u + n_{ms}\lambda_m$, lo que implica que $P[t \leq \epsilon] = 1 - e^{-\epsilon(\mu - n_{us}\lambda_u - n_{ms}\lambda_m)}$. Así, la ecuación (3.96) modela la QoS del servicio URLLC y

la Ecuación (3.97) modela la QoS del servicio mMTC.

$$Q_{us} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}\lambda_u - n_{ms}\lambda_m)} \quad (3.96)$$

$$Q_{ms} = k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{us}\lambda_u - n_{ms}\lambda_m)} \quad (3.97)$$

Los parámetros k_u y k_m son factores de conversión monetaria para la QoS, y el parámetro α representa la fracción de la capacidad de la red que se utiliza efectivamente, y es menor que la unidad para garantizar la estabilidad de la cola M/M/1. En las investigaciones numéricas y gráficos, consideramos los valores de los parámetros descritos en la sección 4.2.

3.4.2.2. Escenario NS

La QoS de los servicios URLLC y mMTC depende de sus respectivos retrasos. En el modelo propuesto, los paquetes URLLC tienen una mayor prioridad de preferencia sobre los paquetes mMTC, lo que significa que el servicio mMTC no provoca retrasos adicionales en el servicio URLLC. Así pues, $P[t \leq \epsilon_u] = 1 - e^{-\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)}$. Sin embargo, la QoS del servicio mMTC sigue viéndose afectada por la presencia del servicio URLLC. Hasta donde se conoce, no existe una expresión concreta para la distribución de la probabilidad de retraso en una cola prioritaria. Por lo cual, se propone una aproximación para $P[t \leq \epsilon_m]$ que tiene en cuenta el hecho de que un paquete de baja prioridad que llega a la cola de prioridad ya no espera $T_2 = 1/\mu$ en promedio por paquete en el sistema, sino $T_2 = \frac{1}{\mu} (1 + n_1\lambda_1 T_2)$, es decir, $T_2 = 1/(\mu - n_1\lambda_1)$, ya que $n_1\lambda_1 t_2$ paquetes de alta prioridad llegarán en promedio durante ese periodo. Por lo tanto, la aproximación propuesta sostiene que ϵ_m se multiplica por el factor $\left(1 - \frac{n_{un}\lambda_u}{\mu}\right)$. Sobre la base de lo anterior, la Ecuación (3.98) modela la QoS del servicio URLLC, mientras que la Ecuación (3.99) modela la QoS del servicio mMTC.

$$Q_{un} = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)} \quad (3.98)$$

$$Q_{mn} = k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{un}\lambda_u - n_{mn}\lambda_m) \left(1 - \frac{n_{un}\lambda_u}{\mu}\right)} \quad (3.99)$$

La utilidad que reciben los usuarios de URLLC y mMTC, denotadas como U_{uy} y U_{my} respectivamente, se define como la diferencia entre la QoS percibida en unidades monetarias y el precio cobrado por el operador [122]. Se supone que la utilidad del usuario es cero cuando los usuarios no se suscriben al servicio correspondiente. Con base en (3.96)-(3.99) y dependiendo de si se encuentra en el escenario SN o en el escenario NS, la utilidad del usuario URLLC se expresa en (3.100), mientras que la utilidad del usuario mMTC se expresa en (3.101).

$$U_{uy} = Q_{uy} - p_{uy} \quad (3.100)$$

$$U_{my} = Q_{my} - p_{my} \quad (3.101)$$

El beneficio que obtienen los operadores está relacionado con el servicio que ofrece a los usuarios y vienen determinado por la diferencia entre sus ingresos y sus costes de los operadores. Además, la cantidad de ingresos y costes de cada operador depende del modelo de negocio utilizado.

3.4.2.3. Integrado

Los ingresos generados por un operador de red que ofrece servicios URLLC y mMTC proceden ambas bases de suscriptores, y los precios cobrados a cada uno de ellos se denotan como p_{uy} y p_{my} , respectivamente. Por consiguiente, el beneficio total obtenido por el operador de red es la suma de los beneficios obtenidos de los servicios URLLC y mMTC. Suponiendo que el operador de red no incurre en ningún coste, su beneficio puede expresarse mediante la siguiente expresión matemática.

$$\Pi_y = n_{uy} p_{uy} + n_{my} p_{my} \quad (3.102)$$

3.4.2.4. Especializado

El operador URLLC cobra a los suscriptores un precio p_{uy} , mientras que el operador mMTC cobra un precio p_{my} . Ambos operadores utilizan los mismos recursos, según el escenario de red, para prestar los servicios a sus respectivos suscriptores. Por lo demás, ninguno de los dos operadores incurre en costes. Por tanto, el beneficio de cada operador viene dado por.

$$\Pi_{uy} = n_{uy} p_{uy} \quad (3.103)$$

$$\Pi_{my} = n_{my} p_{my} \quad (3.104)$$

El beneficio del operador debe disminuir por el importe de los costes de inversión y los costes de explotación. Sin embargo, los costes de explotación no se han tenido en cuenta en la expresión del beneficio, ya que no están directamente relacionados con el precio del servicio, lo que hace que la expresión sea menos explícita. Además, los costes de inversión se consideran un valor constante, lo que simplifica la expresión del beneficio.

3.4.3. Juego

En esta subsección, se describe las interacciones estratégicas entre las decisiones de suscripción de los usuarios y las decisiones de fijación de precios de los operadores en los escenarios SN y NS para los dos modelos de negocios de la siguiente manera.

Integrado.

1. Las decisiones de suscripción de los usuarios de URLLC y mMTC están influidas por las decisiones de fijación de precios del operador.
2. La decisión de suscripción de los usuarios de URLLC depende de la decisión de suscripción de los usuarios de mMTC a través de Q_{uy} . A su vez, la decisión de suscripción de los usuarios de mMTC depende de la decisión de suscripción de los usuarios de URLLC a través de Q_{my} .
3. El beneficio del único operador depende de las decisiones de suscripción de ambos tipos de usuarios al servicio correspondiente.

Especializado.

1. Las decisiones de suscripción de los usuarios de los operadores URLLC y mMTC están influidas por las respectivas decisiones de fijación de precios de cada operador.
2. Existe una interacción estratégica entre las decisiones de suscripción de los usuarios de los operadores URLLC y mMTC, ya que la decisión de suscripción de los usuarios de URLLC depende de la decisión de suscripción de los usuarios de mMTC a través de Q_{uy} , y viceversa a través de Q_{my} .
3. El beneficio del operador URLLC depende de las decisiones de suscripción de sus usuarios, mientras que el beneficio del operador mMTC depende de las decisiones de suscripción de sus usuarios.
4. El beneficio del operador mMTC se ve influido indirectamente por la decisión de fijación de precio del operador URLLC a través de la decisión de suscripción de los usuarios del operador URLLC. Este no es el caso de los beneficios del operador URLLC.

Las interacciones entre los usuarios de URLLC y mMTC y los operadores en los modelos de negocio de Integrado y Especializado se analizan utilizando la Teoría de Juegos. Los jugadores en el Integrado son los usuarios de URLLC y mMTC y el único operador, mientras que en el Especializado, los jugadores son los usuarios de URLLC y mMTC y los operadores URLLC y mMTC. Los incentivos en el juego son las utilidades para cada usuario y los beneficios para cada operador.

El modelo de juego propuesto se representa en la Figura 3.4, y en base a la explicación del juego en la Subsección 3.1.4, se tiene lo siguiente.

Integrado: La Etapa I comprende un único jugador (único operador), que fija los precios p_{uy} y p_{my} .

Especializado: La Etapa I comprende dos jugadores, el operador URLLC y el operador mMTC, cada uno de los cuales fija el precio de su servicio.

Tanto en el Integrado, así como en el Especializado, la Etapa II comprende los usuarios URLLC y mMTC, de los cuales cada usuario elige si se suscribe o no a su operador por el servicio correspondiente. Sobre la base de la explicación en la Subsección 3.1.4, se resuelve el juego.

3.4.3.1. Etapa II - Suscripción del usuario

En la Etapa II del análisis, los usuarios URLLC y mMTC pagan un precio de suscripción (p_{uy} y p_{my} , respectivamente) al operador de red a cambio de una utilidad (U_{uy} y U_{my} , correspondiente). Los usuarios tienen en cuenta los precios fijados por el operador de red para decidir si se suscriben o no al servicio. Los usuarios se suscriben siempre que la utilidad correspondiente sea estrictamente positiva debido a que el número de usuarios de cada base de usuarios es muy grande. En el análisis del servicio mMTC para los escenarios SN y NS, la utilidad de un usuario mMTC se ve afectada por la decisión de suscripción del resto de usuarios (usuarios URLLC y usuarios mMTC). Además, el retardo en la cola M/M/1 influye en la utilidad del usuario, que depende de las decisiones de los usuarios URLLC y mMTC, ya que un mayor número de suscripciones se traducirá en un mayor retardo. En el análisis del servicio URLLC en el escenario SN, la utilidad del usuario URLLC depende del retardo en la cola M/M/1 y de las

decisiones de los usuarios URLLC y mMTC. Mientras que en el escenario NS, la utilidad del usuario URLLC depende únicamente de las decisiones de los usuarios URLLC, ya que un mayor número de suscripciones URLLC se traducirá en un mayor retardo. La interacción estratégica entre los usuarios de ambos servicios se analiza con base en el equilibrio de Wardrop explicado en el análisis de los servicios URLLC y eMBB, concretamente, en la Sección 3.5.1.

Por otro lado, para garantizar la estabilidad de la red, se aplica la restricción $n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu$ y se distingue cuatro posibles casos de equilibrio basados en el principio de Wardrop. Cada caso depende de qué alternativa (suscribirse o no suscribirse) eligen los usuarios de URLLC y qué alternativa (suscribirse o no suscribirse) eligen los usuarios de mMTC, lo que da lugar a cuatro casos. En primer lugar, $U_{uy} = 0$ (algunos usuarios de URLLC se suscriben y otros no, $n_{uy} \geq 0$). En segundo lugar, $U_{uy} < 0$ (ningún usuario de URLLC se suscribe, $n_{uy} = 0$). Estos mismos casos se aplican a U_{my} . Describimos los cuatro casos (situaciones) en (3.105)-(3.108)

- Caso a:

$$n_{uy} \geq 0, \quad n_{my} \geq 0, \quad U_{my} = 0, \quad U_{uy} = 0, \quad n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.105)$$

- Caso b:

$$n_{uy} = 0, \quad n_{my} \geq 0, \quad U_{my} = 0, \quad U_{uy} < 0, \quad n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.106)$$

- Caso c:

$$n_{uy} \geq 0, \quad n_{my} = 0, \quad U_{my} < 0, \quad U_{uy} = 0, \quad n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.107)$$

- Caso d:

$$n_{uy} = 0, \quad n_{my} = 0, \quad U_{my} < 0, \quad U_{uy} < 0, \quad n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.108)$$

Donde las funciones $n_{uy}(p_{uy}, p_{my})$ y $n_{my}(p_{uy}, p_{my})$ se expresan en términos de p_{uy} y p_{my} , como se explica en la Sección 3.5 que analiza los modelos. Además, se aplica la restricción $n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu$ para garantizar la estabilidad de la red.

3.4.3.2. Etapa I - Fijación de precios por el operador

En el Integrado, el operador determina los precios de los servicios URLLC y mMTC para maximizar sus beneficios tanto en el escenario SN, así como en el escenario NS. El operador asume que las suscripciones de los usuarios alcanzarán un equilibrio tal y como se describe en (3.105)-(3.108), donde se han identificado las regiones de equilibrio de Wardrop. Por tanto, el beneficio del operador dependerá de los precios que fije para los servicios URLLC y mMTC.

$$(p_{uy}^i, p_{my}^i) = \arg \max_{p_{uy}, p_{my}} \Pi_y^i(p_{uy}, p_{my}) \quad (3.109)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.110)$$

$$p_{my} \geq 0 \quad (3.111)$$

$$n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.112)$$

En el Especializado, cada operador fija el precio de su servicio de forma independiente. Para determinar el precio óptimo de cada operador, éste tiene en cuenta no sólo su propio beneficio y las decisiones de suscripción tomadas en la Etapa II, sino también la decisión de su competidor. Asimismo, para hallar el precio óptimo de cada operador, se utiliza la función de BR, en la que influyen las decisiones del otro operador.

$$BR_u(p_{my}) = \arg \max_{p_{uy}} \Pi_{uy}^e(p_{uy}, p_{my}^e) \quad (3.113)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.114)$$

$$p_{my} \geq 0 \quad (3.115)$$

$$n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.116)$$

$$BR_m(p_{uy}) = \arg \max_{p_{my}} \Pi_{my}^e(p_{uy}, p_{my}) \quad (3.117)$$

$$s.t. \quad p_{uy} \geq 0 \quad (3.118)$$

$$p_{my} \geq 0 \quad (3.119)$$

$$n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.120)$$

Por último, en el equilibrio de Nash de la Etapa I, cada operador determina su mejor precio en respuesta al precio del otro operador [23], lo que conduce al siguiente sistema de ecuaciones.

$$p_{uy}^e \in BR_u(p_{my}^e) \quad (3.121)$$

$$p_{my}^e \in BR_m(p_{uy}^e) \quad (3.122)$$

3.4.4. Óptimo social

Con base en la Sección 3.1.5, se tiene que $SW_y = CS_y + \Pi_y$. En este contexto, se define CS como la suma de las utilidades de todos los usuarios URLLC y mMTC, que se expresa de la siguiente manera.

$$CS_y = CS_{uy} + CS_{my} \quad (3.123)$$

Con base en (3.100)-(3.101), se tiene el número de usuarios que suscriben a cada servicio y las ecuaciones:

$$CS_{uy} = n_{uy}(Q_{uy} - p_{uy}) \quad (3.124)$$

$$CS_{my} = n_{my}(Q_{my} - p_{my}) \quad (3.125)$$

Es importante señalar que en el equilibrio de usuarios, las utilidades de ambos tipos de usuarios son cero, por consiguiente: $Q_{uy} = p_{uy}$ y $Q_{my} = p_{my}$ y, por lo tanto.

$$CS_y = CS_{uy} = CS_{my} = 0 \quad (3.126)$$

Esto es debido a que las utilidades de los usuarios no dependen del modelo de negocio, sino del equilibrio de los usuarios. El desarrollo del óptimo social nos permite analizar la relación entre el número de usuarios y el bienestar social en diferentes escenarios, lo cual es muy útil para la toma de decisiones en el mercado. Con base en (3.102) y (3.126), se tiene lo siguiente.

$$SW_y = CS_y + \Pi_y \quad (3.127)$$

$$= n_{my}(Q_{my} - p_{my}) + n_{uy}(Q_{uy} - p_{uy}) + n_{uy}p_{uy} + n_{my}p_{my} \quad (3.128)$$

$$= n_{uy} Q_{uy} + n_{my} Q_{my} \quad (3.129)$$

Por lo tanto, el problema de maximización del SW_y será:

$$\max_{n_{uy}, n_{my}} n_{uy} Q_{uy} + n_{my} Q_{my} \quad (3.130)$$

$$s.t. \quad n_{uy} \geq 0 \quad (3.131)$$

$$n_{my} \geq 0 \quad (3.132)$$

$$n_{uy}\lambda_u + n_{my}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.133)$$

La obtención del SW_y^o y el par de variables (n_{uy}^o, n_{my}^o) se realiza a través del problema de maximización del bienestar social. Por lo tanto, las expresiones (3.134)-(3.137) indican cómo encontrar el par de variables (n_{us}^o, n_{ms}^o) que maximiza el SW_s para el escenario SN en el óptimo social.

$$(n_{us}^o, n_{ms}^o) \in \arg \max_{n_{us}, n_{ms}} n_{us} k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{ms}\lambda_m - n_{us}\lambda_u)} + n_{ms} k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{ms}\lambda_m - n_{us}\lambda_u)} \quad (3.134)$$

$$s.t. \quad n_{us} \geq 0 \quad (3.135)$$

$$n_{ms} \geq 0 \quad (3.136)$$

$$n_{us}\lambda_u + n_{ms}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.137)$$

Asimismo, las expresiones (3.138)-(3.141) indican cómo encontrar el par de variables (n_{un}^o, n_{mn}^o) que maximiza el SW_n para el escenario NS en el óptimo social.

$$(n_{un}^o, n_{mn}^o) \in \arg \max_{n_{un}, n_{mn}} n_{un} k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}\lambda_u)} + n_{mn} k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{mn}\lambda_m - n_{un}\lambda_u)} \left(1 - \frac{n_{un}\lambda_u}{\mu}\right) \quad (3.138)$$

$$s.t. \quad n_{un} \geq 0 \quad (3.139)$$

$$n_{mn} \geq 0 \quad (3.140)$$

$$n_{un}\lambda_u + n_{mn}\lambda_m \leq \alpha\mu \quad (3.141)$$

Por otro lado, con base en (3.134)-(3.141) se obtiene los gráficos del bienestar social para los escenarios SN y NS, que se presenta a continuación.

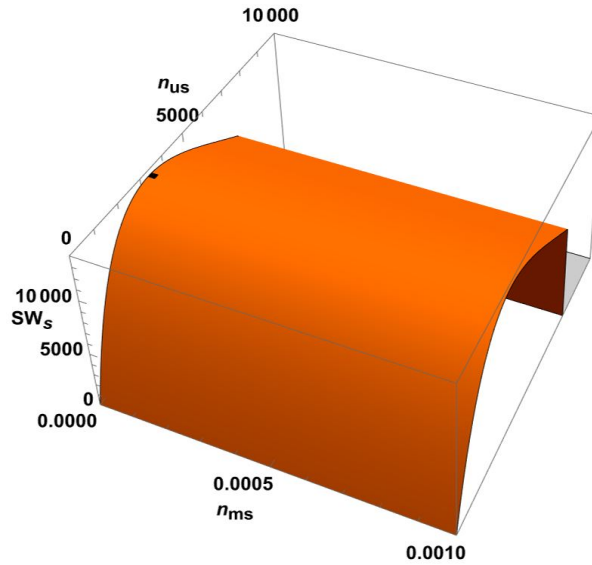


Figura 3.13: SW_s^o en el escenario SN para los servicios URLLC y mMTC.

La Figura 3.13 muestra la representación gráfica del SW_s y la localización de su valor máximo ($SW_s^o = 13517,3$ u. m.) para el número de usuarios URLLC ($n_{us}^o = 3333,33$ usuarios) y el número de usuarios mMTC ($n_{ms}^o = 0$ usuarios) que lo maximiza.

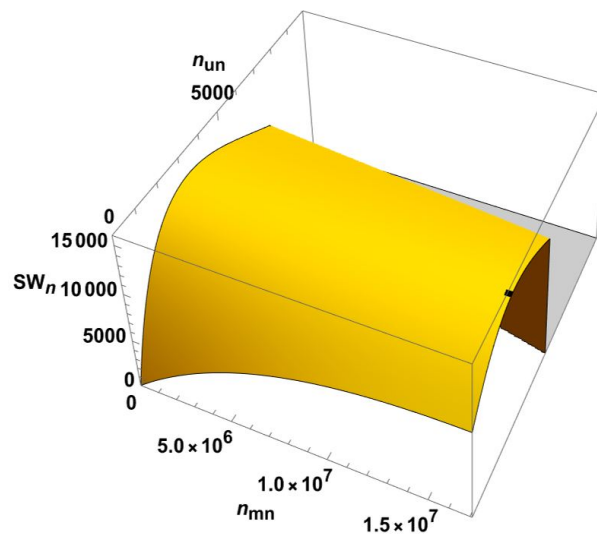


Figura 3.14: SW_n^o en el escenario NS para los servicios URLLC y mMTC.

Asimismo, la Figura 3.14 muestra la representación gráfica de SW_n y la ubicación de su valor máximo ($SW_n^o = 16006,9$ u. m.) para el número de usuarios URLLC ($n_{un}^o = 2468,24$ usuarios) y el número de usuarios mMTC ($n_{mn}^o = 1,70941 \cdot 10^7$ usuarios) que lo maximiza.

Por otro lado, como en el óptimo social, el objetivo es maximizar el bienestar social mediante la distribución de los usuarios, y esto no lo consiguen por medio de los operadores, fijando los precios para maximizar sus beneficios, sino un regulador determinando, quien realiza la distribución óptima de los usuarios. Así pues, los precios ya no son una consideración necesaria. Sin embargo, aunque la maximización del bienestar social sólo tiene sentido en términos de distribución de usuarios, las variables que conducen a la maximización del bienestar social son n_{uy}^o y n_{my}^o . Esto significa que existe

una correspondencia entre estas variables y el precio URLLC, p_{uy}^o , y el precio mMTC, p_{my}^o . En otras palabras, para cada conjunto de valores de n_{uy}^o y n_{my}^o , existe un precio correspondiente. Además, dado que la maximización del bienestar social no depende de ninguna región en particular, sino que está en función de n_{uy}^o y n_{my}^o , se puede utilizar la expresión de suscripción de equilibrio (3.105)-(3.108) para calcular los precios inducidos por n_{uy}^o y n_{my}^o .

Los precios inducidos para el escenario SN se muestran en a continuación.

$$p_{us}^o = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{us}^o \lambda_u - n_{ms}^o \lambda_m)} \quad (3.142)$$

$$p_{ms}^o = k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{us}^o \lambda_u - n_{ms}^o \lambda_m)} \quad (3.143)$$

$$0 < n_{us}^o \quad (3.144)$$

$$0 < n_{ms}^o \quad (3.145)$$

$$n_{us}^o \lambda_u + n_{ms}^o \lambda_m \leq \alpha \mu \quad (3.146)$$

De igual forma, los precios inducidos para el escenario NS se muestran en a continuación.

$$p_{un}^o = k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}^o \lambda_u)} \quad (3.147)$$

$$p_{mn}^o = k_m e^{\epsilon_m(\mu - n_{un}^o \lambda_u - n_{mn}^o \lambda_m) \left(1 - \frac{n_{un}^o \lambda_u}{\mu}\right)} \quad (3.148)$$

$$0 < n_{un}^o \quad (3.149)$$

$$0 < n_{mn}^o \quad (3.150)$$

$$n_{un}^o \lambda_u + n_{mn}^o \lambda_m \leq \alpha \mu \quad (3.151)$$

Tabla 3.4: Precios inducidos por n_{us}^o y n_{ms}^o el escenario SN.

p_{us}^o	p_{ms}^o	n_{us}^o	n_{ms}^o
(3.142)	(3.143)	$0 < n_{us}^o$,	$0 < n_{ms}^o$
$n_{un}^o \lambda_u + n_{mn}^o \lambda_m \leq \alpha \mu$			

Tabla 3.5: Precios inducidos por n_{un}^o y n_{mn}^o el escenario NS.

p_{un}^o	p_{mn}^o	n_{un}^o	n_{mn}^o
$k_u e^{\epsilon_u(\mu - n_{un}^o \lambda_u)}$	(3.148)	$0 < n_{un}^o$,	$0 < n_{mn}^o$
$n_{un}^o \lambda_u + n_{mn}^o \lambda_m \leq \alpha \mu$			

Finalmente, a partir de (3.102)-(3.104), y los precios de las Tablas (3.4) y (3.5), se determina la expresión del beneficio de cada operador y el beneficio total en el óptimo social para el escenario SN y el escenario NS, es decir, Π_{uy}^o , Π_{my}^o , y Π_y^o .

3.5. Análisis de los escenarios y modelos para la prestación de los servicios URLLC y mMTC

En esta sección, se comienza con el equilibrio analítico de Wardrop para la Etapa II en los dos escenarios. Luego, se presenta la solución para la Etapa I en los casos de Integrado y Especializado. Por lo tanto, sobre la base de la Sección 3.1.4, se analiza los modelos y escenarios para los servicios URLLC y mMTC en los escenarios SN y NS.

3.5.1. Análisis de la Etapa II

3.5.1.1. Escenario SN

El análisis del escenario SN para el Integrado y Especializado se obtiene con base en (3.105)-(3.108). El resultado que se obtiene son 4 regiones.

Región a:

$$n_{us} = \frac{1}{2\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) \quad (3.152)$$

$$n_{ms} = \frac{1}{2\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) \quad (3.153)$$

$$p_{us} = k_u \left(\frac{p_{ms}}{k_m} \right)^{\frac{\epsilon_u}{\epsilon_m}} \quad (3.154)$$

$$p_{ms} = k_m \left(\frac{p_{us}}{k_u} \right)^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u}} \quad (3.155)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{us} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.156)$$

$$k_m e^{\epsilon_m \mu (1-\alpha)} \leq p_{ms} < k_m e^{\epsilon_m \mu} \quad (3.157)$$

Región b:

$$n_{us} = 0 \quad (3.158)$$

$$n_{ms} = \frac{1}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) \quad (3.159)$$

$$k_u \left(\frac{p_{ms}}{k_m} \right)^{\frac{\epsilon_u}{\epsilon_m}} < p_{us} \quad (3.160)$$

$$k_m e^{\epsilon_m \mu (1-\alpha)} \leq p_{ms} < k_m e^{\epsilon_m \mu} \quad (3.161)$$

Región c:

$$n_{us} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) \quad (3.162)$$

$$n_{ms} = 0 \quad (3.163)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{us} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.164)$$

$$k_m \left(\frac{p_{us}}{k_u} \right)^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u}} < p_{ms} \quad (3.165)$$

Región d:

$$n_{us} = 0 \quad (3.166)$$

$$n_{ms} = 0 \quad (3.167)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{us} \quad (3.168)$$

$$k_m e^{\epsilon_m \mu} \leq p_{ms} \quad (3.169)$$

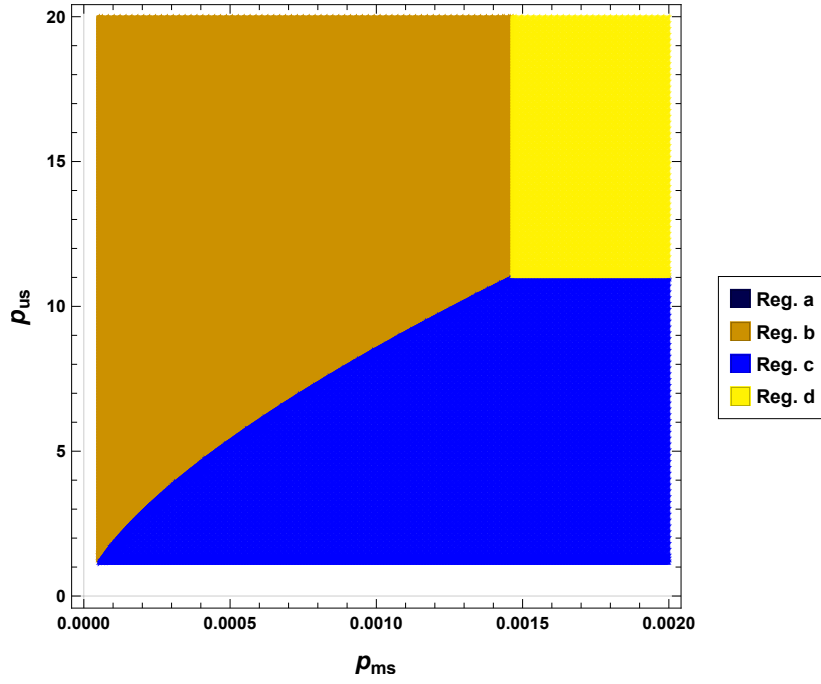


Figura 3.15: Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario SN para los servicios URLLC y mMTC.

La Figura 3.15 muestra la representación gráfica de las regiones en equilibrio en el plano $p_{us} - p_{ms}$ para una asignación específica de valores de los parámetros descritos en la Sección 4.2.

3.5.1.2. Escenario NS

De igual forma, el análisis para el escenario NS en el Integrado y Especializado se realiza con base en (3.105)-(3.108). El resultado que se obtiene son 4 regiones.

Región a:

$$n_{un} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) \quad (3.170)$$

$$n_{mn} = \frac{1}{\epsilon_u \lambda_m} \ln \frac{p_{un}}{k_u} - \frac{\epsilon_u \mu \ln \frac{p_{mn}}{k_m}}{\epsilon_m \lambda_m \ln \frac{p_{un}}{k_u}} \quad (3.171)$$

$$k_u < p_{un} \leq k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.172)$$

$$k_m \left(\frac{p_{un}}{k_u} \right)^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u} (1-\alpha)} \leq p_{mn} \leq k_m e^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u} \mu} \left(\ln \frac{p_{un}}{k_u} \right)^2 \quad (3.173)$$

Región b:

$$n_{un} = 0 \quad (3.174)$$

$$n_{mn} = \frac{1}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{mn}}{k_m} \right) \quad (3.175)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} < p_{un} \quad (3.176)$$

$$k_m e^{\epsilon_m (1-\alpha) \mu} \leq p_{mn} < k_m e^{\epsilon_m \mu} \quad (3.177)$$

Región c:

$$n_{un} = \frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) \quad (3.178)$$

$$n_{mn} = 0 \quad (3.179)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{un} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \quad (3.180)$$

$$k_m e^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u} \mu} \left(\ln \frac{p_{un}}{k_u} \right)^2 < p_{mn} \quad (3.181)$$

Región d:

$$n_{un} = 0 \quad (3.182)$$

$$n_{mn} = 0 \quad (3.183)$$

$$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{un} \quad (3.184)$$

$$k_m e^{\epsilon_m \mu} \leq p_{mn} \quad (3.185)$$

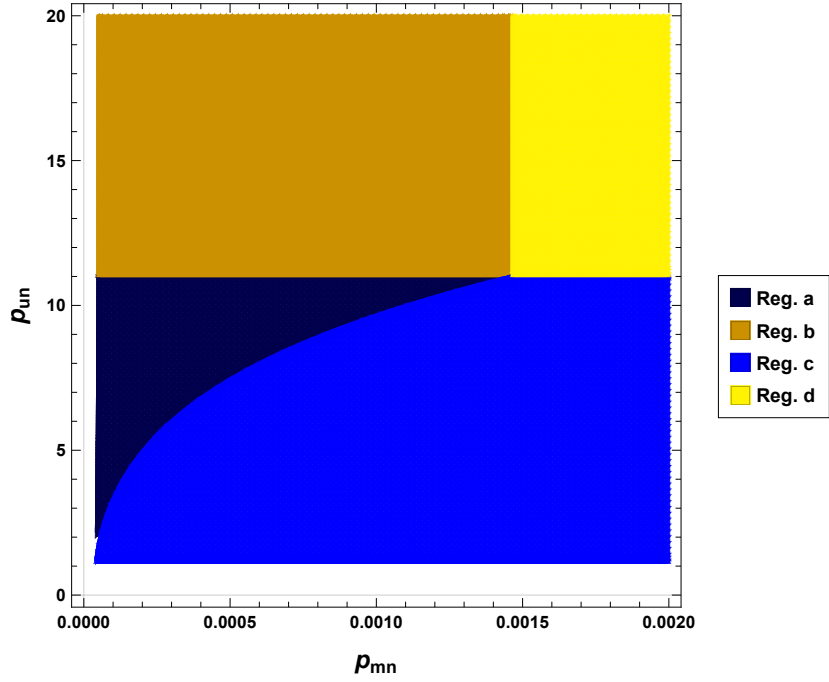


Figura 3.16: Regiones de equilibrio de Wardrop en el escenario NS para los servicios URLLC y mMTC.

La Figura 3.16 muestra la representación gráfica de las regiones en equilibrio en el plano $p_{un} - p_{mn}$ para una asignación específica de valores de los parámetros descritos en la Sección 4.2.

Por otro lado, la Tabla 3.6 y la Tabla 3.7 resumen las expresiones anteriores para el equilibrio de Wardrop en los escenarios SN y NS.

Tabla 3.6: Equilibrio de Wardrop para la suscripción de usuarios URLLC y mMTC en el escenario SN.

Reg.	n_{us}	n_{ms}	p_{us}	p_{ms}
a	$\frac{1}{2\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right)$	$\frac{1}{2\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right)$	(3.154), (3.156)	(3.155), (3.157)
b	0	$\frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right)$	$k_u \left(\frac{p_{ms}}{k_m} \right)^{\frac{\epsilon_u}{\epsilon_m}} < p_{us}$	(3.161)
c	$\frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right)$	0	(3.164)	(3.165)
d	0	0	$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{us}$	(3.169)

Tabla 3.7: Equilibrio de Wardrop para la suscripción de usuarios URLLC y mMTC en el escenario NS.

Reg.	n_{un}	n_{mn}	p_{un}	p_{mn}
a	$\frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right)$	$\frac{1}{\epsilon_u \lambda_m} \ln \frac{p_{un}}{k_u} - \frac{\epsilon_u \mu \ln \frac{p_{mn}}{k_m}}{\epsilon_m \lambda_m \ln \frac{p_{un}}{k_u}}$	(3.172)	(3.173)
b	0	$\frac{1}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{mn}}{k_m} \right)$	$k_u e^{\epsilon_u \mu} < p_{un}$	(3.177)
c	$\frac{1}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right)$	0	(3.180)	(3.181)
d	0	0	$k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{un}$	$k_m e^{\epsilon_m \mu} \leq p_{mn}$

3.5.2. Análisis de la Etapa I

En esta subsección, se presenta un análisis detallado y la solución de la Etapa I de los modelos propuestos. En particular, se analizan las expresiones de los beneficios de los operadores para los escenarios SN y NS. La comprensión detallada de estos modelos permite evaluar mejor el impacto de los distintos parámetros en los resultados.

3.5.2.1. Integrado para los escenarios SN y NS

La solución de la Etapa I para el Integrado no es analizable. Por lo tanto, la solución de la Etapa I para este modelo se realiza numéricamente en la Sección 4.2.1, con base en el problema de maximización (3.109)- (3.112) definido en la Subsección 3.4.3.2. La expresión del beneficio a maximizar por el operador es la siguiente:

$$\Pi_s^i = \begin{cases} \frac{p_{us}}{2\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) + \frac{p_{ms}}{2\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } a \\ \frac{p_{ms}}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } b \\ \frac{p_{us}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.186)$$

$$\Pi_n^i = \begin{cases} \frac{1}{\epsilon_u \lambda_m} \left(\frac{p_{un} \epsilon_u \lambda_m \mu + (p_{mn} \lambda_u - p_{un} \lambda_m) \ln \frac{p_{un}}{k_u}}{\lambda_u} - \frac{p_{mn} \epsilon_u^2 \mu \ln \frac{p_{mn}}{k_m}}{\epsilon_m \ln \frac{p_{un}}{k_u}} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } a \\ \frac{p_{mn}}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{mn}}{k_m} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } b \\ \frac{p_{un}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.187)$$

3.5.2.2. Especializado para el escenario SN

Según (3.103)-(3.104) y dado el equilibrio de Wardrop para n_{us} y n_{ms} obtenido en (3.152)-(3.169), las expresiones de beneficios a maximizar por el operador URLLC y mMTC son las siguientes:

$$\Pi_{us}^e = \begin{cases} \frac{p_{us}}{2\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } a \\ 0 & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } b \cup \text{Reg. } d \\ \frac{p_{us}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{us}}{k_u} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } c \end{cases} \quad (3.188)$$

$$\Pi_{ms}^e = \begin{cases} \frac{p_{ms}}{2\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } a \\ \frac{p_{ms}}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{ms}}{k_m} \right) & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } b \\ 0 & (p_{us}, p_{ms}) \in \text{Reg. } c \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.189)$$

La resolución de las BRs se basa en las restricciones y regiones analizadas en la Subsección 3.5.1.1 y se obtiene lo siguiente:

$$BR_u(p_{ms}) = \begin{cases} k_u \left(\frac{p_{ms}}{k_m} \right)^{\frac{\epsilon_u}{\epsilon_m}} - \phi & k_m e^{\epsilon_m \mu (1-\alpha)} \leq p_{ms} < k_m e^{\epsilon_m \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right)} \\ k_u e^{\epsilon_u \mu - 1} & k_m e^{\epsilon_m \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right)} \leq p_{ms} \end{cases} \quad (3.190)$$

$$BR_m(p_{us}) = \begin{cases} k_m \left(\frac{p_{us}}{k_u} \right)^{\frac{\epsilon_m}{\epsilon_u}} - \phi & k_u e^{\epsilon_u \mu (1-\alpha)} \leq p_{us} < k_u e^{\epsilon_u \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \right)} \\ k_m e^{\epsilon_m \mu - 1} & k_u e^{\epsilon_u \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \right)} \leq p_{us} \end{cases} \quad (3.191)$$

En el contexto del modelo que analizamos, ϕ es una cantidad suficientemente pequeña pero positiva.

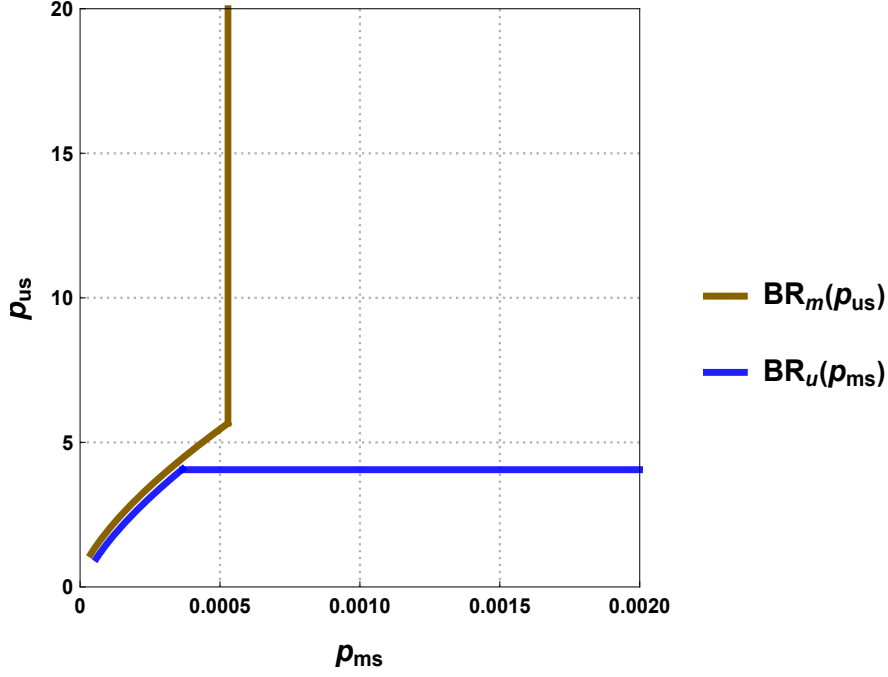


Figura 3.17: Mejores respuestas (BRs) en el escenario SN para los operadores URLLC y mMTC.

La Figura 3.17 muestra la representación gráfica de $BR_u(p_{ms})$ y $BR_m(p_{us})$. Además, se puede comprobar que las BRs no se cruzan, ya que $BR_u(p_{ms})$ está en la región c, mientras que $BR_m(p_{us})$ está en la región b. Por lo tanto, no existe un equilibrio de Nash.

3.5.2.3. Especializado para el escenario NS

Según (3.103)-(3.104) y dado el equilibrio de Wardrop para n_{un} y n_{mn} obtenido en (3.170)-(3.185), las expresiones de beneficios a maximizar por el operador URLLC y mMTC son las siguientes:

$$\Pi_{un}^e = \begin{cases} \frac{p_{un}}{\lambda_u} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \ln \frac{p_{un}}{k_u} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } a \cup \text{Reg. } c \\ 0 & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } b \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.192)$$

$$\Pi_{mn}^e = \begin{cases} p_{mn} \left(\frac{1}{\epsilon_u \lambda_m} \ln \frac{p_{un}}{k_u} - \frac{\epsilon_u \mu \ln \frac{p_{mn}}{k_m}}{\epsilon_m \lambda_m \ln \frac{p_{un}}{k_u}} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } a \\ \frac{p_{mn}}{\lambda_m} \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_m} \ln \frac{p_{mn}}{k_m} \right) & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } b \\ 0 & (p_{un}, p_{mn}) \in \text{Reg. } c \cup \text{Reg. } d \end{cases} \quad (3.193)$$

Las resoluciones de las BRs se obtienen con base en las restricciones y regiones analizadas en la Subsección 3.5.1.2 y se obtiene lo siguiente.

$$BR_u(p_{mn}) = \begin{cases} k_u e^{\epsilon_u \mu - 1} & k_m e^{\epsilon_m (1-\alpha) \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right)} \leq p_{mn} \\ k_m e^{\epsilon_m (1-\alpha) \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right)} & k_m e^{\epsilon_m (1-\alpha) \left(\mu - \frac{1}{\epsilon_u} \right)} > p_{mn} \end{cases} \quad (3.194)$$

$$BR_m(p_{un}) = \begin{cases} k_m \left(\frac{p_{un}}{k_u} \right)^{\frac{\epsilon_m(1-\alpha)}{\epsilon_u}} & k_u e^{\epsilon_u \mu(1-\alpha)} \leq p_{un} \leq k_u e^{\frac{1}{2} \left(\epsilon_u \mu(1-\alpha) + \sqrt{\frac{\epsilon_u^2 \mu(4+\epsilon_m \mu(1-\alpha)^2)}{\epsilon_m}} \right)} \\ k_m e^{\frac{\epsilon_m \left(\ln \frac{p_{un}}{k_u} \right)^2}{\epsilon_u^2 \mu} - 1} & k_u e^{\frac{1}{2} \left(\epsilon_u \mu(1-\alpha) + \sqrt{\frac{\epsilon_u^2 \mu(4+\epsilon_m \mu(1-\alpha)^2)}{\epsilon_m}} \right)} \leq p_{un} < k_u e^{\epsilon_u \mu} \\ k_m e^{\epsilon_m \mu - 1} & k_u e^{\epsilon_u \mu} \leq p_{un} \end{cases} \quad (3.195)$$

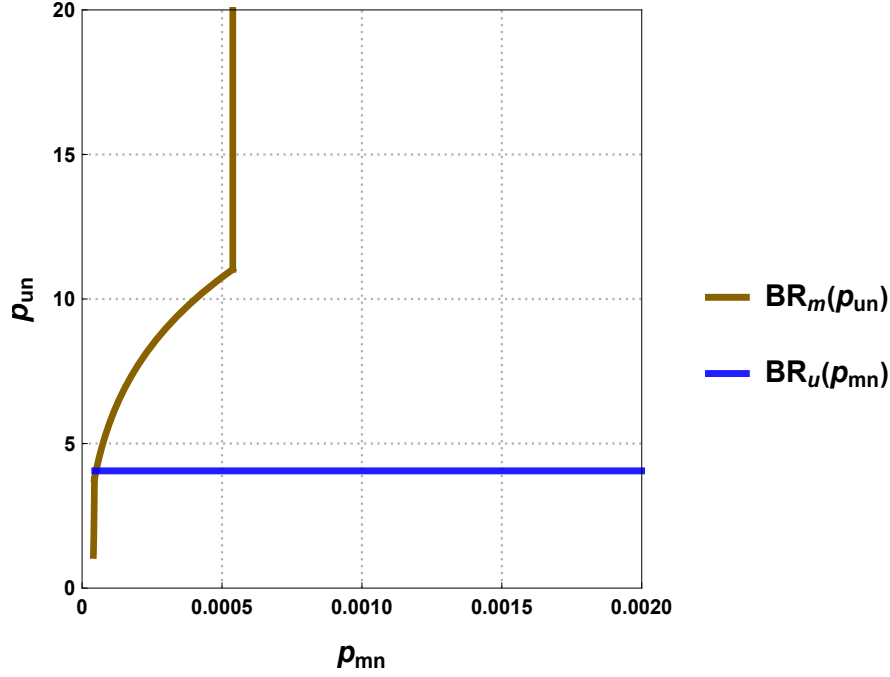


Figura 3.18: Mejores respuestas (BRs) en el escenario NS para los operadores URLLC y mMTC.

Por último, la Figura 3.18 muestra la representación gráfica de $BR_u(p_{mn})$, $BR_m(p_{un})$ basada en una asignación de valores de los parámetros descritos en la Sección 4.2. Además, la Figura 3.18 muestra que las BRs se cruzan en un punto, por lo tanto, existe un único Equilibrio de Nash y es (p_{un}^e, p_{mn}^e) , donde:

$$p_{un}^e = k_u e^{\epsilon_u \mu - 1} \quad (3.196)$$

$$p_{mn}^e = k_m e^{\frac{\epsilon_m(\epsilon_u \mu - 1)^2}{\epsilon_u^2 \mu} - 1} \quad (3.197)$$

$$n_{un}^e = \frac{1}{\epsilon_u \lambda_u} \quad (3.198)$$

$$n_{mn}^e = \frac{\epsilon_u \mu}{\epsilon_m \lambda_m (\epsilon_u \mu - 1)} \quad (3.199)$$

$$\Pi_{un}^e = \frac{k_u e^{\epsilon_u \mu - 1}}{\epsilon_u \lambda_u} \quad (3.200)$$

$$\Pi_{mn}^e = \frac{\epsilon_u \mu k_m e^{\frac{\epsilon_m(\epsilon_u \mu - 1)^2}{\epsilon_u^2 \mu} - 1}}{\epsilon_m \lambda_m (\epsilon_u \mu - 1)} \quad (3.201)$$

CAPÍTULO 4

RESULTADOS DE LOS ESCENARIOS Y MODELOS PROPUESTOS

En este capítulo, presentamos los resultados numéricos más relevantes del trabajo doctoral, que incluye los resultados sobre el precio de los servicios (URLLC, eMBB y mMTC), número de usuarios suscritos a cada servicio, beneficios del operador de red y bienestar social para cada modelo de negocio. Además, se presenta una comparación de los resultados del óptimo social con los resultados obtenidos en el Integrado y Especializado en función del bienestar social. Estos resultados se basan en las expresiones matemáticas presentadas en el Capítulo 3. Por último, se presentan los resultados de los dos escenarios analizados en cada uno de los modelos de negocio, es decir, del escenario SN y del escenario NS. Estos resultados proporcionan una visión detallada y completa de cada uno de los modelos evaluados, lo que nos permite presentar las interpretaciones correspondientes. Además, estos resultados brinda una comprensión más profunda de las implicaciones de cada modelo y cómo estos influyen en el SW, los beneficios de los operadores y el número de usuarios suscritos a cada servicio.

La estructura de este capítulo es de la siguiente manera. La Sección 4.1 presenta los resultados de la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G. La Sección 4.2 presenta los resultados de la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G.

4.1. Resultados de la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G

En esta sección, se calculan los valores numéricos de los precios, el número de suscriptores y el beneficio de los operadores en el modelo de negocio del Integrado (Sección 4.1.1) y Especializado (Sección 4.1.2), y se comparan los resultados del Integrado y del Especializado con los resultados del óptimo social (Sección 4.1.3). Se analizan los escenarios SN y NS para cada modelo de negocio. Asimismo, con base en la Sección 3.2.1 para las tasas agregadas por servicio, Λ_{ey}^z , Λ_{uy}^z , hemos definido como $\Lambda_{uy}^z \triangleq n_{uy}^z \lambda_u$

y $\Lambda_{ey}^z \triangleq N_e \lambda_{ey}^z$. Asimismo, sobre la base de la Sección 3.2.2 tenemos p_{ey}^z y p_{uy}^z donde $p_{ey} \triangleq \pi_{ey} \lambda_{ej}$. Por último, la asignación de los valores de parámetros se muestra en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1: Valores de parámetros para los servicios URLLC y eMBB.

Parámetro	Valor
k_e	1,1
k_u	1
μ	[4000,7000] paquete/s
α	0,8
ϵ_u	0,0003 segundos
N_e	7000 usuarios eMBB
λ_u	1 paquete/s

4.1.1. Integrado

Tasa agregada. La Figura 4.1 muestra el efecto de μ en las tasas agregadas. Se puede observar que en el escenario SN, Λ_{us}^i mantiene su valor y Λ_{es}^i es cero a medida que μ aumenta, mientras que en el escenario NS, Λ_{un}^i y Λ_{en}^i aumentan a medida que μ aumenta. En consecuencia, en el escenario SN, al operador no le interesa prestar el servicio eMBB porque perjudica la QoS del servicio URLLC, por lo que tiene sentido que $\Lambda_{es}^i = 0$ y sólo exista Λ_{us}^i . Mientras que en el escenario NS, no ocurre lo mismo que en el escenario SN, es decir, tal y como se muestra en la Figura 4.1, cuando μ aumenta, Λ_{en}^i y Λ_{un}^i aumentan; por tanto, hay prestación del servicio eMBB porque no perjudica la QoS del servicio URLLC; por consiguiente, hay prestación de ambos servicios. Por último, al operador le interesa prestar el servicio URLLC a un precio superior al precio del servicio eMBB debido a las características del servicio desde el punto de vista de maximización del beneficio del operador, dando como resultado un Λ_{uy}^z mayor.

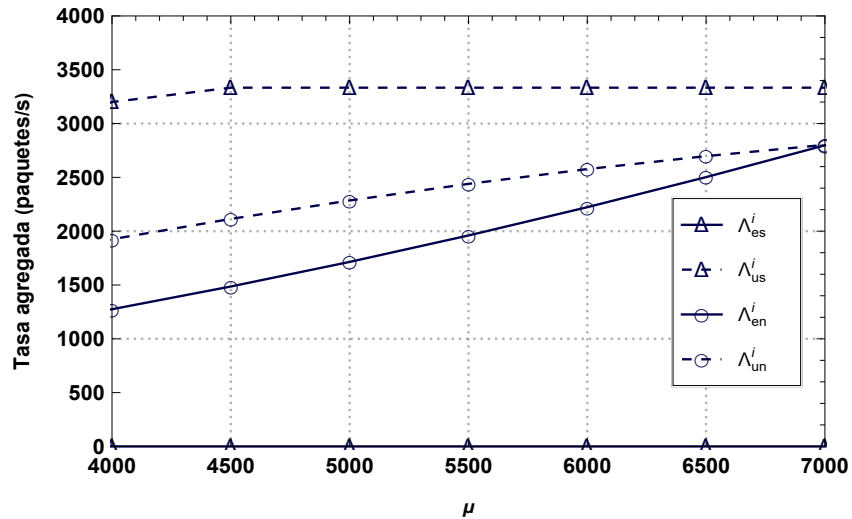


Figura 4.1: Λ_{es}^i , Λ_{us}^i , Λ_{en}^i , y Λ_{un}^i en función de μ .

Precios. La Figura 4.2 muestra el efecto de μ en los precios de los servicios. Observamos que en el escenario SN, p_{us}^i aumenta y p_{es}^i es cero a medida que μ aumenta, mientras que en el escenario NS,

p_{un}^i aumenta más que p_{en}^i a medida que μ aumenta. El comportamiento descrito es coherente con el análisis realizado en la sección previa sobre las tasas agregadas. Por otro lado, se observa que los usuarios de URLLC tienen un precio superior al de los usuarios de eMBB en los escenarios SN y NS. El comportamiento descrito nos lleva a concluir que pagar más por el servicio URLLC tiene sentido porque depende de la sensibilidad al retardo, ϵ_u , mientras que el servicio eMBB no depende de ϵ_u ; esto se justifica con el planteamiento de las Ecuaciones (3.2)-(3.4).

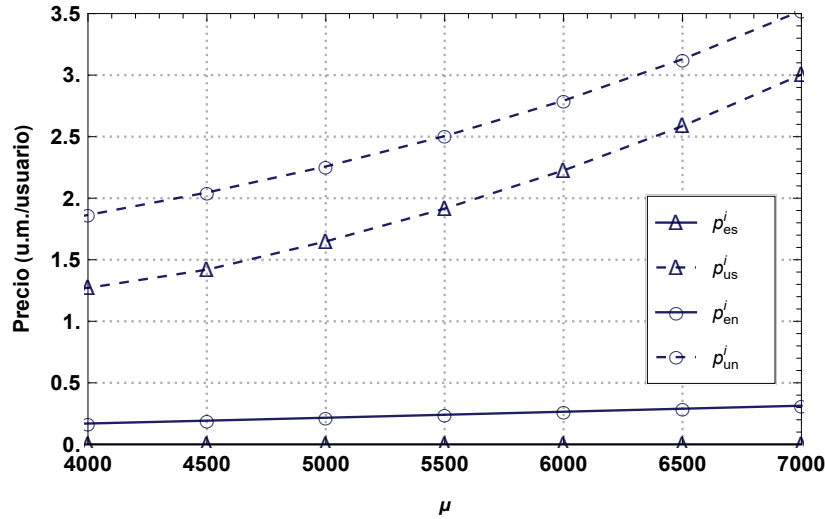


Figura 4.2: p_{es}^i , p_{us}^i , p_{en}^i , y p_{un}^i en función de μ .

Beneficios. La Figura 4.3 muestra el beneficio total en función de μ en los escenarios SN y NS. Se observa que Π_n^i y Π_s^i aumentan a medida que μ aumenta. Además, $\Pi_n^i > \Pi_s^i$, este comportamiento es coherente, ya que, en el escenario SN, el beneficio total depende únicamente del beneficio obtenido por el servicio URLLC y no por el servicio eMBB como se muestra en (3.8), ya que $\Pi_{es}^i = 0$, mientras que en el escenario NS, el beneficio total depende del beneficio obtenido por el servicio URLLC y por el servicio eMBB como se muestra en (3.8).

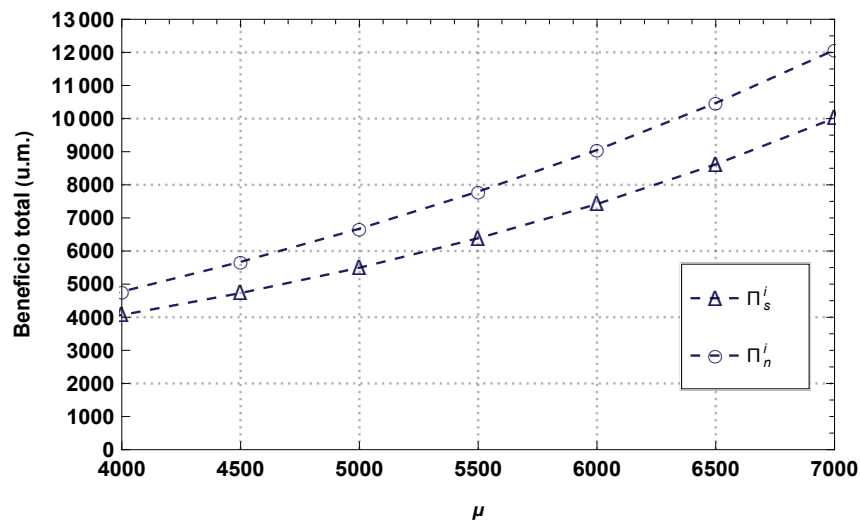


Figura 4.3: Π_s^i y Π_n^i en función de μ .

Excedente de consumidor. La Figura 4.4 muestra el excedente del consumidor en función de μ . Se

puede observar que CS_n^i aumenta, mientras que CS_s^i es cero a medida que μ aumenta. Este resultado tiene sentido con (3.35) donde el excedente total son los excedentes del servicio eMBB y como en el escenario SN no hay usuarios que suscriben al servicio eMBB (ver Figura 4.1), es consistente que CS_s^i sea cero, lo que no ocurre con CS_n^i ya que ambos usuarios (URLLC y eMBB) suscriben a sus servicios correspondientes.

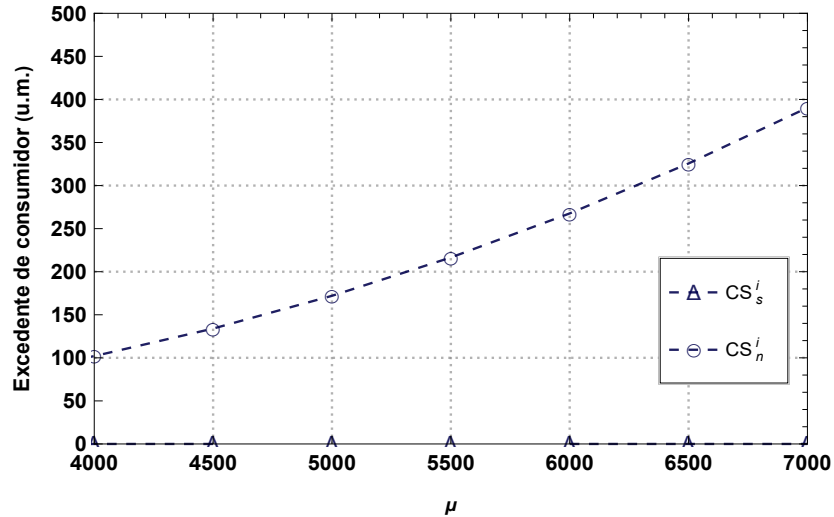


Figura 4.4: CS_s^i y CS_n^i en función de μ .

Bienestar social. La Figura 4.5 muestra el bienestar social en función de μ . Cuando μ aumenta, SW_n^i y SW_s^i aumentan, es decir, la red soporta un mayor número de usuarios (n_{uy} y N_e). El comportamiento descrito es coherente porque el aumento de usuarios influye tanto en el incremento Π_j (donde $\Pi_j = n_{uy} p_{uy} + N_e \lambda_{ey} \pi_{ey}$), así como el incremento CS_j (donde $CS_j = N_e(Q_{ey} - \lambda_{ey}\pi_{ey}) + n_{uy}(Q_{uy} - p_{uj})$). Esto se justifica con el planteamiento en (3.1). Podemos observar que SW_n^i y SW_s^i aumentan a medida que μ aumenta, lo que se interpreta que un μ mayor soporta n_{uy} y N_e mayores, esto a su vez representa un Π_j^i mayor. Asimismo, SW en el escenario NS es mayor que en el escenario SN porque $\Pi_n^i > \Pi_s^i$ y $CS_{ey}^i > CS_{uy}^i$, entonces según (3.1) se deduce que $SW_n^i > SW_s^i$.

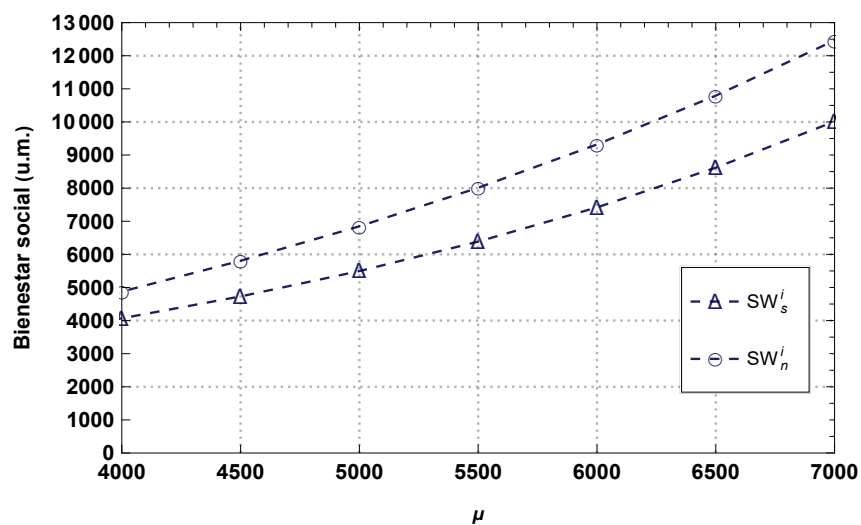


Figura 4.5: SW_s^i y SW_n^i en función de μ .

La conclusión es que el escenario NS es el más favorable para los operadores y los usuarios en el modelo de negocio Integrado porque los precios, los beneficios de los operadores, las utilidades de los usuarios y el bienestar social son mejores que en el escenario SN, es decir, el escenario NS, que es una red 5G que incorpora el NS permite dar un mejor servicio a los usuarios de los servicios URLLC y eMBB.

4.1.2. Especializado

Tasa agregada. La Figura 4.6 muestra el efecto de μ en las tasas agregadas. Se puede ver que en el escenario SN, Λ_{es}^e aumenta y Λ_{us}^e es cero a medida que μ aumenta, mientras que en el escenario NS, Λ_{en}^e aumenta y Λ_{un}^e disminuye a medida que μ aumenta. Se esperaba que en el escenario NS, Λ_{un}^e aumentara, sin embargo, encontramos lo contrario. Una de las razones es que en el escenario SN, p_{es}^e , p_{us}^e alcanzan el equilibrio en el que sólo el servicio eMBB genera tráfico, es decir, $\Lambda_{us}^e = 0$, mientras que en el escenario NS, p_{en}^e y p_{un}^e , alcanzan el equilibrio generando tráfico para ambos servicios.

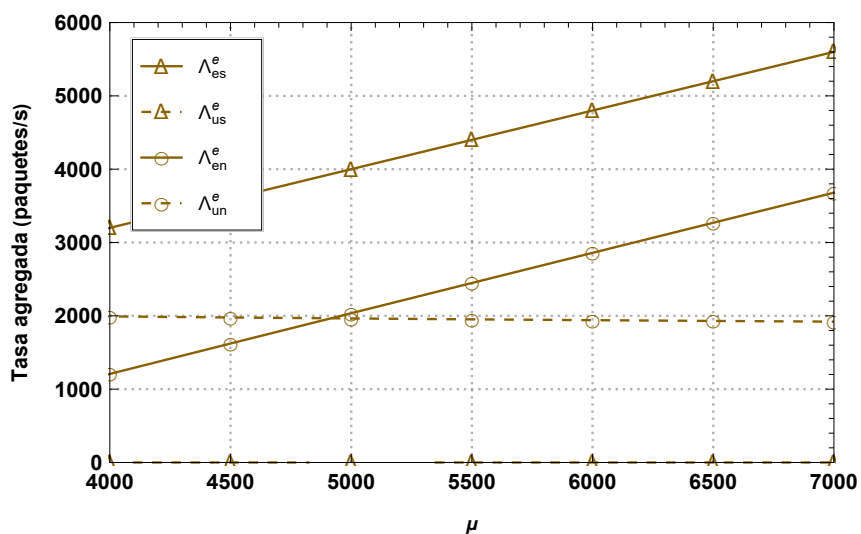


Figura 4.6: Λ_{es}^e , Λ_{us}^e , Λ_{en}^e y Λ_{un}^e en función de μ .

Precios. La Figura 4.7 muestra el efecto de μ en los precios de los servicios. Se observa que en el escenario SN, p_{us}^e y p_{es}^e aumentan ligeramente a medida que μ aumenta, mientras que en el escenario NS, p_{un}^e aumenta significativamente y p_{en}^e aumenta ligeramente a medida que μ aumenta. Asimismo, se observa que el precio del servicio URLLC es superior al precio del servicio eMBB en los escenarios SN y NS. El comportamiento descrito nos lleva a concluir que pagar más por el servicio URLLC tiene sentido porque depende de la sensibilidad al retardo, ϵ_u , mientras que el servicio eMBB no depende de ϵ_u ; esto se justifica con el planteamiento de las Ecuaciones (3.2)-(3.4).

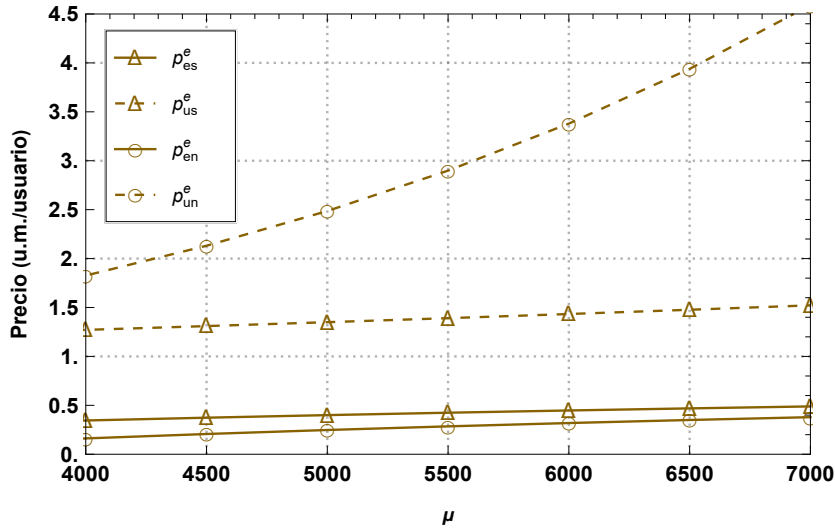


Figura 4.7: p_{es}^e , p_{us}^e , p_{en}^e y p_{un}^e en función de μ .

Beneficios. La Figura 4.8 muestra el beneficio total en función de μ para los escenarios SN y NS. Se puede observar que Π_s^e y Π_n^e aumentan a medida que aumenta μ . Además, se observa que $\Pi_n^e > \Pi_s^e$, este comportamiento es coherente, ya que el beneficio total es la suma de los beneficios obtenidos por servicio definidos en (3.8) y los beneficios están en función de los precios, por tanto, como p_{un}^e es mucho mayor que p_{us}^e , p_{en}^e y p_{es}^e , además, $\Pi_{us}^e = 0$; tiene sentido que el beneficio total en el escenario NS sea mayor que en el escenario SN.

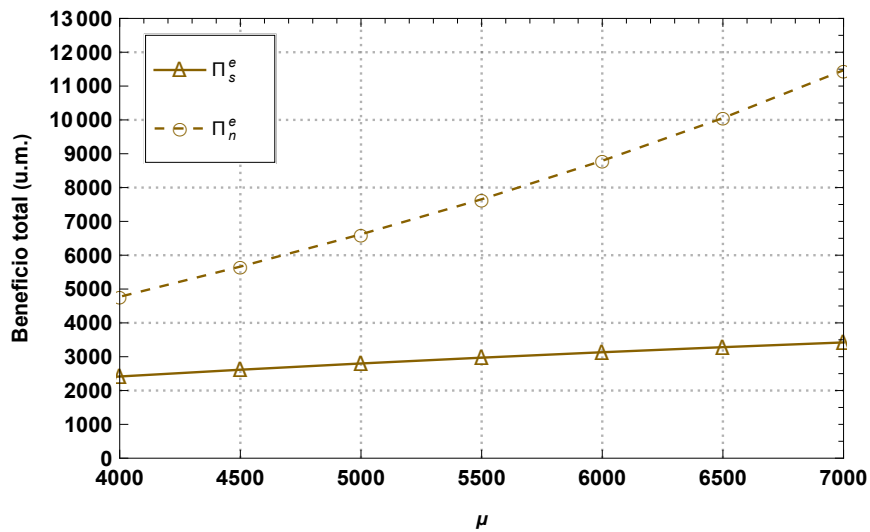


Figura 4.8: Π_s^e y Π_n^e en función de μ .

Excedente de consumidor. La Figura 4.9 muestra el excedente del consumidor en función de μ . Se puede observar que CS_n^e y CS_s^e aumenta a medida que μ aumenta. Asimismo, muestra que $CS_s^e > CS_n^e$, este resultado muestra que el escenario SN es mejor.

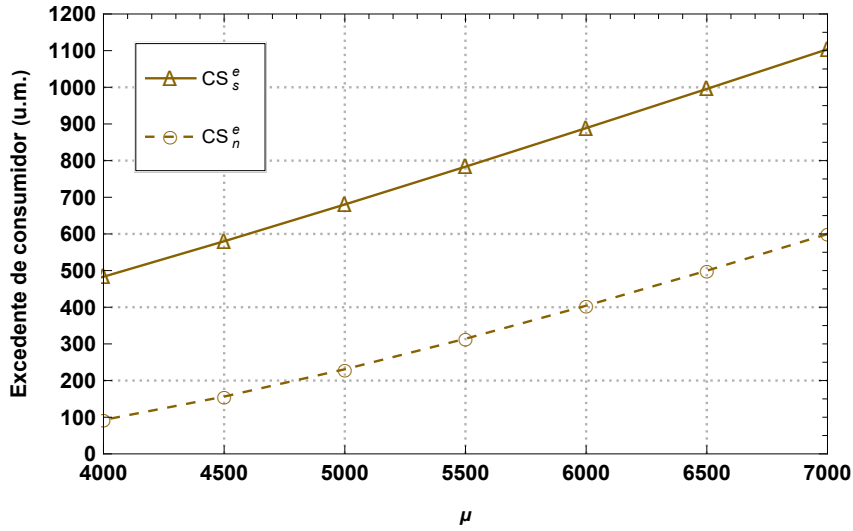


Figura 4.9: CS_s^e y CS_n^e en función de μ .

Bienestar Social. La Figura 4.10 muestra el bienestar social en función de μ . Cuando μ aumenta también SW_n^e y SW_s^e aumentan, es decir, la red soporta un mayor número de usuarios (n_{uy} y N_e). El comportamiento descrito es coherente porque el aumento de usuarios influye tanto en (3.1), el incremento Π_j (donde $\Pi_j = n_{uy} p_{uy} + N_e \lambda_{ey} \pi_{ey}$) como el incremento CS_j (donde $CS_j = N_e(Q_{ey} - \lambda_{ey} \pi_{ey}) + n_{uy}(Q_{uy} - p_{uj})$). Asimismo, SW en el escenario NS es mayor que en el escenario SN porque $\Pi_d^e > \Pi_s^e$ y $CS_{ey}^e > CS_{uy}^e$, se comprueba que $SW_n^e > SW_s^e$.

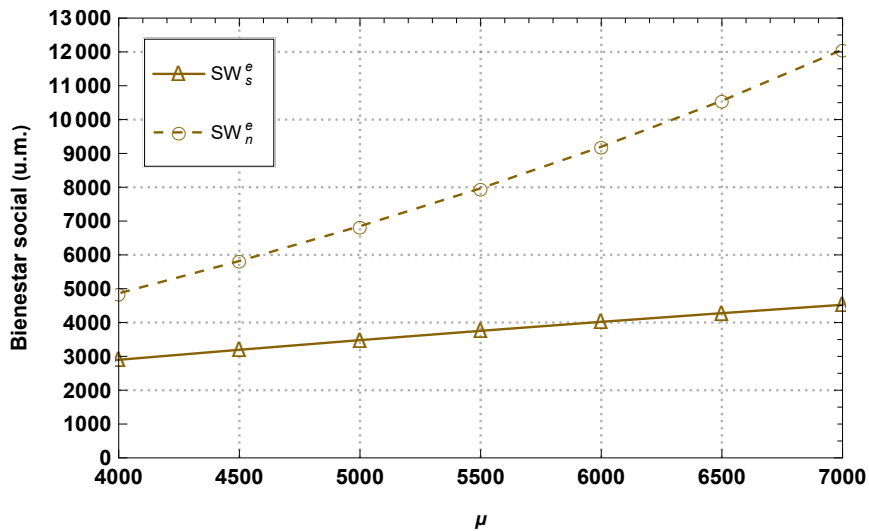


Figura 4.10: SW_s^e y SW_n^e en función de μ .

La conclusión es que el escenario NS es la configuración de red más favorable para los operadores y los usuarios en el Especializado, porque los precios, los beneficios de los operadores, las utilidades de los usuarios y el bienestar social son mejores que en el escenario SN, es decir, el escenario NS, el cual es una red 5G que incorpora NS proporcionar un mejor servicio a los usuarios de los servicios URLLC y eMBB.

4.1.3. Comparación de los modelos de negocio con el óptimo social

En esta parte se comparan los resultados de los modelos de negocio con los resultados del óptimo social.

Bienestar Social. Desde el punto de vista del bienestar social, la Figura 4.11 muestra que $SW_n^o > SW_n^e$, mientras que SW_n^i se aproxima más a SW_n^o , por tanto, se concluye que la mejor forma de ofrecer los servicios URLLC y eMBB en el escenario NS es el Integrado. El comportamiento descrito es coherente porque dado que el Integrado en el escenario NS atiende a todos los usuarios de los servicios URLLC y eMBB por separado utilizando NS, puede explotar mejor las características de QoS y la capacidad de la red, lo que permite alcanzar el bienestar social a través de los beneficios obtenidos por un único operador (ver figura 4.3 y figura 4.8).

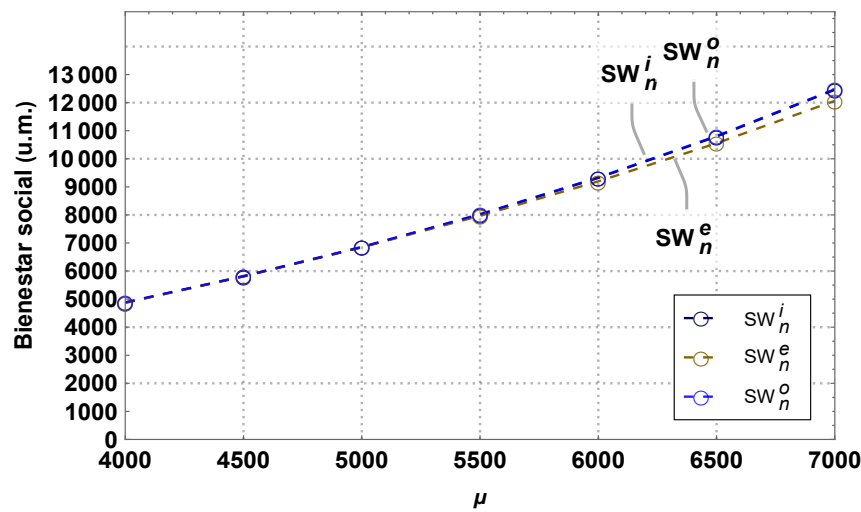


Figura 4.11: SW_n^i , SW_n^e y SW_n^o en función de μ .

Tasas Agregadas. La Figura 4.12 muestra que Λ_{en}^i y Λ_{un}^i están más próximos y cruzados entre sí, mientras que Λ_{en}^e y Λ_{un}^e están cruzados pero más alejados entre sí. Por otro lado, las tasas agregadas en el Integrado muestran un comportamiento de proximidad entre sí similar al comportamiento de las tasas agregadas en el óptimo social, mientras que el comportamiento de las tasas agregadas en el Especializado es más diferente. Por tanto, los resultados obtenidos para el escenario NS en el Integrado se consideran los más óptimos.

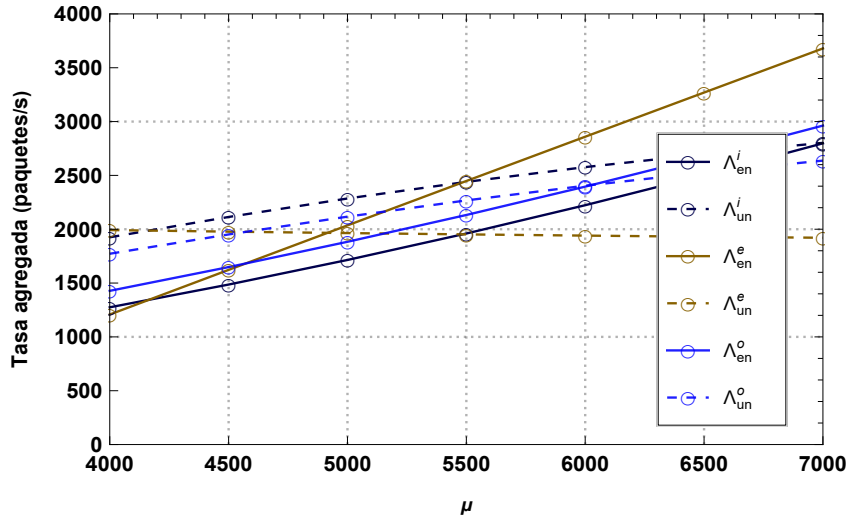


Figura 4.12: Λ_{en}^i , Λ_{un}^i , Λ_{en}^e , Λ_{un}^e , Λ_{en}^o y Λ_{un}^o en función de μ .

Precios. La Figura 4.13 muestra que p_{un}^e alcanza un valor superior al resto de los precios de ambos servicios, mientras que p_{un}^i es el precio más bajo para el servicio URLLC cuando μ alcanza un valor máximo, es decir, $p_{un}^e > p_{un}^o > p_{un}^i$. Además, se observa que p_{en}^i , p_{en}^e y p_{en}^o están próximos entre sí. Este resultado está asociado al resultado de la comparación del bienestar social, es decir, dado que los precios del Integrado son los de menor valor, son los más adecuados desde el punto de vista de los usuarios.

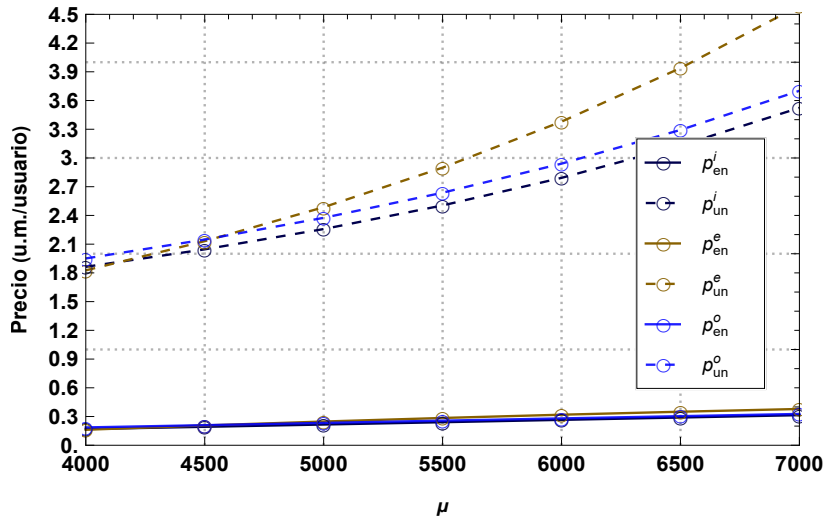


Figura 4.13: p_{en}^i , p_{un}^i , p_{en}^e , p_{un}^e , p_{en}^o y p_{un}^o en función de μ .

Excedente de consumidor. La Figura 4.14 muestra que CS_n^e alcanza un valor superior en comparación con los otros dos excedentes de consumidor, mientras que CS_n^i es el menor de ellos, es decir, $CS_n^e > CS_n^o > CS_n^i$ a medida que μ aumenta. Sin embargo, se puede observar también que aunque CS_n^e sea mayor en comparación con los otros dos, no es lo suficientemente significativo para que influya en SW_n^e , ya que en la Figura 4.11 se puede observar que SW_n^e es menor que SW_n^o y SW_n^i .

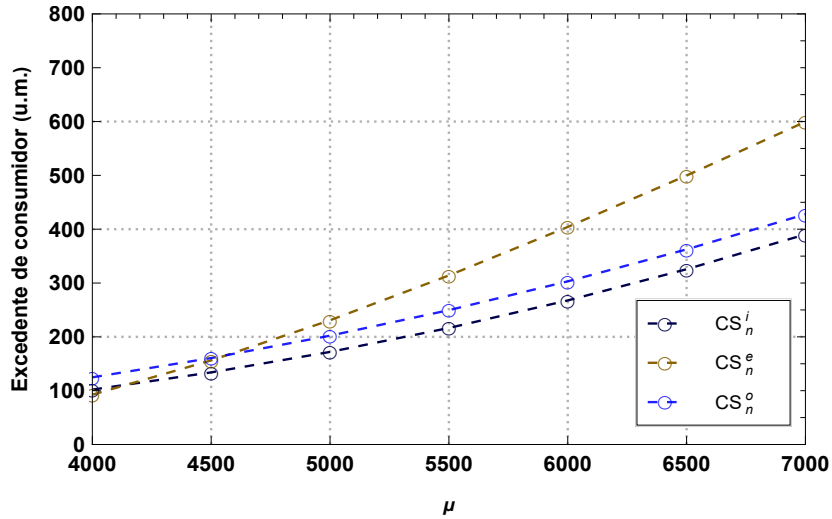


Figura 4.14: CS_n^i , CS_n^e y CS_n^o en función de μ .

Beneficio total. Por último, desde el punto de vista de los beneficios del operador, la Figura 4.15 muestra que Π_n^i alcanza un valor superior en comparación con los otros dos beneficios, mientras que Π_n^e es el menor de ellos, dicho de otra manera, $\Pi_n^i > \Pi_n^o > \Pi_n^e$ a medida que μ aumenta. Este resultado también está asociado al resultado del bienestar social, ya que el beneficio total en el Integrado es el más cercano al beneficio total alcanzado en el óptimo social y con un valor superior al beneficio total en el Especializado.

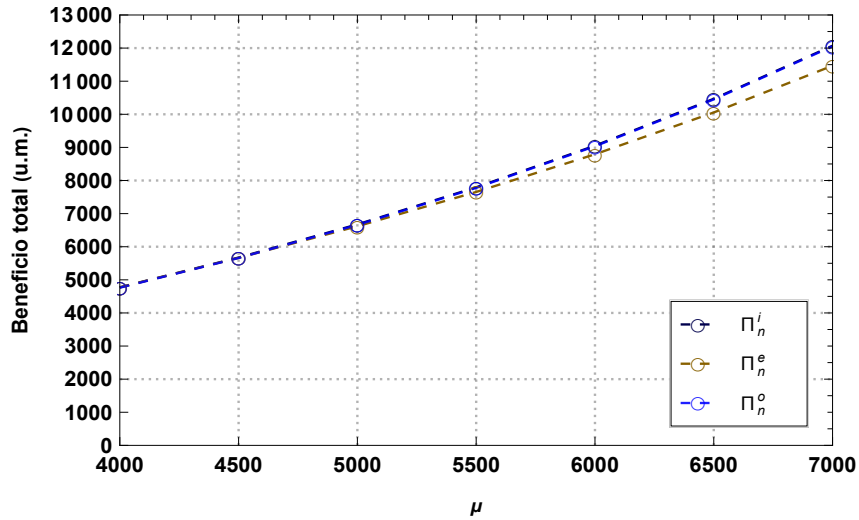


Figura 4.15: Π_n^i , Π_n^e y Π_n^o en función de μ .

Sobre la base de estos resultados, concluimos que el escenario NS es el más favorable para operadores y usuarios en el Integrado porque los resultados obtenidos para precios, beneficios de los operadores y utilidades de los usuarios son los más cercanos al óptimo social, lo que indica que la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G con NS permite obtener mejores resultados para los usuarios y operadores.

4.1.4. Conclusiones

En las Secciones 3.2 y 3.3, se ha investigado una forma adecuada para la prestación de los servicios URLLC y eMBB sobre una red 5G por los operadores hacia los usuarios finales, para lo cual, se han propuesto dos modelos de negocio para la prestación de los dos servicios a través de una red 5G con recursos compartidos. Los recursos de red compartidos se han analizado a través de los escenarios SN y NS. El escenario SN es una red 5G sin NS, donde los dos servicios son tratados de forma igual. Además, el escenario SN es modelada como una cola M/M/1 sin prioridad de servicio (FIFO), que trata a todos los paquetes de los servicios de forma igual. El escenario NS es una red 5G con NS, donde los dos servicios reciben un tratamiento diferente y el mecanismo que permite tratar los servicios diferentes es el NS. Asimismo, el escenario NS es modelada como una cola M/M/1 con dos prioridades de servicio, asignando una prioridad alta al servicio URLLC por sus características de QoS. Por otro lado, los dos modelos de negocios propuestos son: Integrado, donde un único operador de red ofrece los dos servicios (eMBB y URLLC) y Especializado, donde dos operadores diferentes ofrecen un servicio cada uno. En ambos modelos de negocio, la compartición de recursos se analiza por medio de los escenarios SN y NS. Asimismo, se estudia la viabilidad del modelo desde un punto de vista del beneficio positivo para todos los actores en los modelos de negocio del Integrado y Especializado.

Los principales resultados sugieren que, en los dos modelos de negocio, el escenario NS es más recomendable desde el punto de vista de los precios y los beneficios del operador; en consecuencia, estos resultados se acercan más a los resultados del óptimo social, es decir, es mejor la incorporación del NS en la red 5G para ofrecer los servicios que una red 5G sin incorporar NS.

Finalmente, las conclusiones tienen sentido porque el operador en el Integrado cubre toda la prestación de servicios con preferencias homogéneas de QoS asignadas para cada servicio. Asimismo, el operador en el Integrado cubre la totalidad del mercado, por lo que no existe pérdida de bienestar social debido a que los recursos se reparten entre dos servicios utilizando NS.

4.2. Resultados de la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G

En esta sección, se presenta los resultados numéricos para los precios, el número de usuarios a cada servicio y los beneficios de los operadores con respecto a la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G. En la Sección 4.2.1, se presenta los resultados para el Integrado. En la Sección 4.2.3, se presenta los resultados para el Especializado, y además se presenta la comparación de los resultados de los dos modelos de negocio con los resultados del óptimo social. Asimismo, se analiza dos escenarios para cada modelo de negocio, el escenario SN y el escenario NS. Sin embargo, el análisis para el Especializado es sólo para el escenario NS debido a que en el escenario SN, los operadores de red no alcanzan un equilibrio en sus precios para la prestación de sus respectivos servicios a sus usuarios. Por lo tanto, el equilibrio de Nash no existe en el escenario SN. Sobre la base de esto, la interpretación de los resultados del Especializado se realiza en la Sección 4.2.3

Salvo que se indique lo contrario, se han utilizado los siguientes valores de parámetros.

- $k_u = 1$, es el factor de conversión monetario para el servicio URLLC.
- $k_m = 0,00004$, es el factor de conversión monetario para el servicio mMTC.

- $\mu = 8000$ paquetes/s, es la capacidad de la red.
- $\alpha = 0,95$, es una fracción de la capacidad de la red que se aplica para garantizar la estabilidad de red.
- $\epsilon_u = 0,0003$ s, es el umbral de retardo para el servicio URLLC.
- $\epsilon_m = 0,00045$ s, es el umbral de retardo para el servicio mMTC.
- $\lambda_u = 1$ paquete/s, es la tasa de generación de paquetes individuales de los usuarios URLLC.
- $\lambda_m = 0,00013$ paquete/s, es la tasa de generación de paquetes individuales de los usuarios mMTC.

4.2.1. Modelo de negocio Integrado

Precios. La Figura 4.16 muestra el efecto de μ en los precios de los servicios URLLC y mMTC. En el escenario SN, observamos que p_{us}^i y p_{ms}^i aumentan a medida que aumenta μ . Del mismo modo, en el escenario NS, podemos observar que p_{un}^i y p_{mn}^i también aumentan a medida que μ aumenta. Sin embargo, se observa que $p_{uy}^i \gg p_{my}^i$ en ambos escenarios, lo cual tiene sentido, dado que los usuarios de URLLC estarían dispuestos a pagar un precio más alto que los usuarios de mMTC debido a sus requisitos de QoS más estrictos. Se concluye que pagar más por el servicio URLLC tiene sentido, ya que este servicio ofrece baja latencia en comparación con el servicio mMTC, que tiene alta tolerancia a la latencia. Además, este resultado es coherente con la formulación de las ecuaciones (3.96)-(3.99).

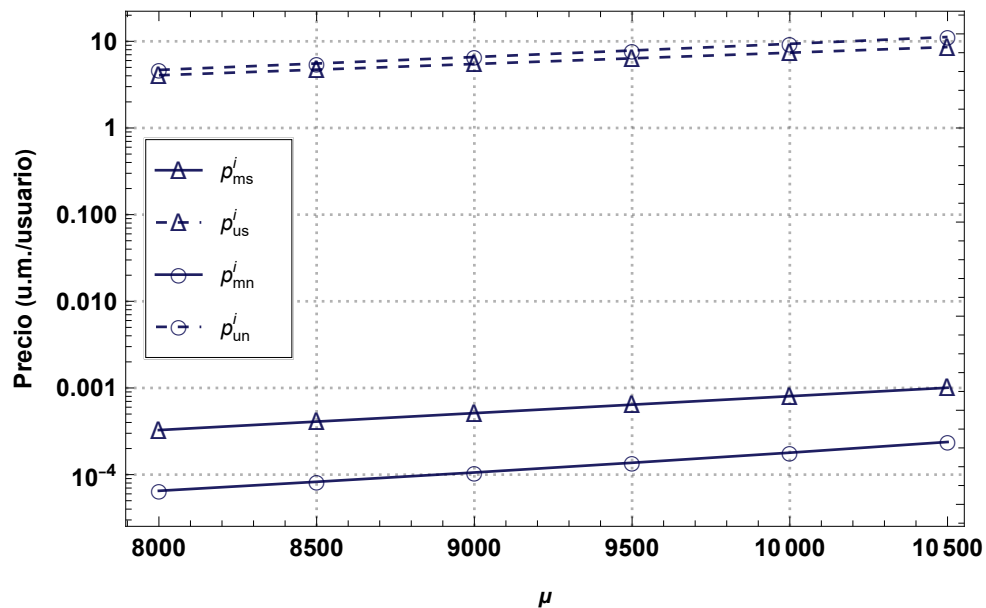


Figura 4.16: Precios de los servicios URLLC y mMTC en función de μ (Integrado).

Número de usuarios suscritos. La Figura 4.17 muestra la relación entre el número de usuarios y μ . En el escenario SN, se observa que n_{ms}^i es igual a cero. Este resultado indica que el operador no está interesado en ofrecer el servicio mMTC debido a su impacto negativo en la QoS del servicio URLLC. Por tanto, el operador sólo ofrece el servicio URLLC. En cambio, en el escenario NS, observamos que tanto n_{un}^i como n_{mn}^i son distintos de cero, lo que indica que al operador le interesa ofrecer ambos servicios. Ahora bien, el servicio mMTC no afecta a la QoS del servicio URLLC. Además, el mayor valor de n_{mn}^i en comparación con n_{un}^i es coherente con la baja tasa de generación de paquetes de los dispositivos mMTC.

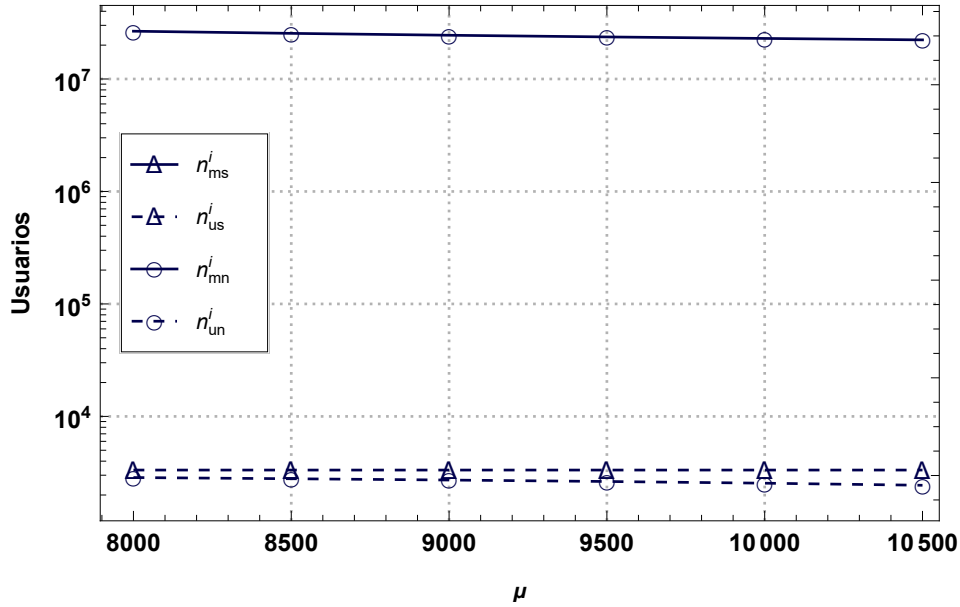


Figura 4.17: Número de usuarios URLLC y mMTC en función de μ , donde $n_{ms}^i = 0$ (Integrado).

Beneficio del operador. La Figura 4.18 muestra el beneficio total del operador en función de μ en los escenarios SN y NS. Se observa que el beneficio total en ambos escenarios aumenta a medida que aumenta μ , lo que puede atribuirse al hecho de que un aumento de μ permite un mayor tráfico de los usuarios a ambos servicios. También se observa que en el escenario SN, sólo los usuarios de URLLC se suscriben al servicio, por consiguiente, el beneficio total depende únicamente del beneficio obtenido del servicio URLLC. Mientras que, en el escenario NS, ambos usuarios (URLLC y mMTC) se suscriben al servicio que les corresponde. Ambos hechos se refleja en la fórmula para el beneficio total en (3.102). A partir de estas observaciones, es consistente que $\Pi_n^i > \Pi_s^i$. Esta diferencia en el beneficio total entre los dos escenarios puede atribuirse al hecho de que en el escenario NS, el operador puede generar ingresos de ambos servicios, mientras que en el escenario SN, el operador está limitado a generar ingresos de un sólo servicio.

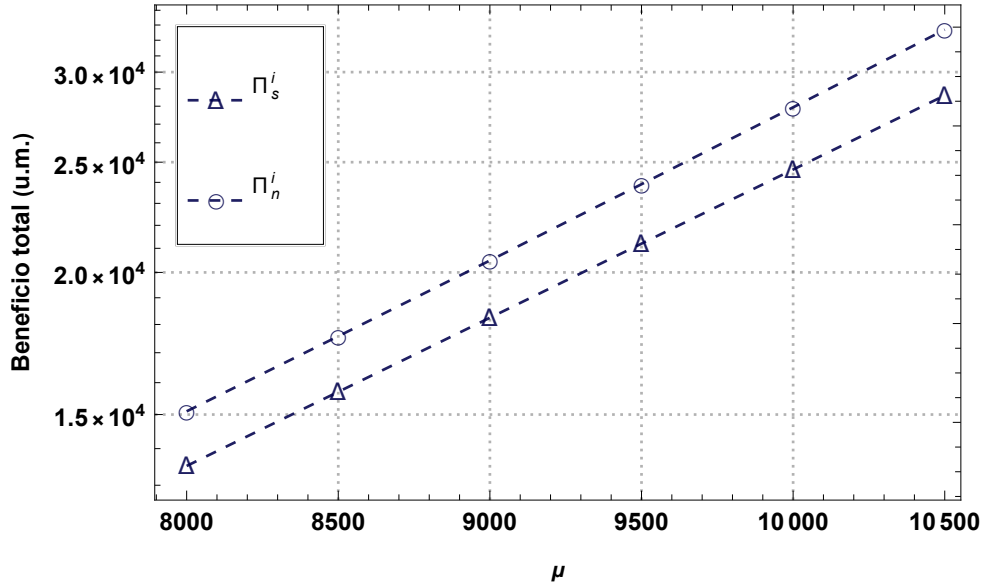


Figura 4.18: Beneficio del operador en función de μ (Integrado).

Bienestar Social. La Figura 4.19 muestra el bienestar social en función de μ . Se puede observar que a medida que μ aumenta, SW_n^i y SW_s^i aumentan, lo que indica que cuanto mayor es la capacidad de la red, mayor es la QoS experimentada por los usuarios de URLLC y mMTC. Además, como se ha descrito en la Subsección 3.4.4, el bienestar social es igual a los beneficios totales, por lo que la discusión anterior es aplicable también aquí.

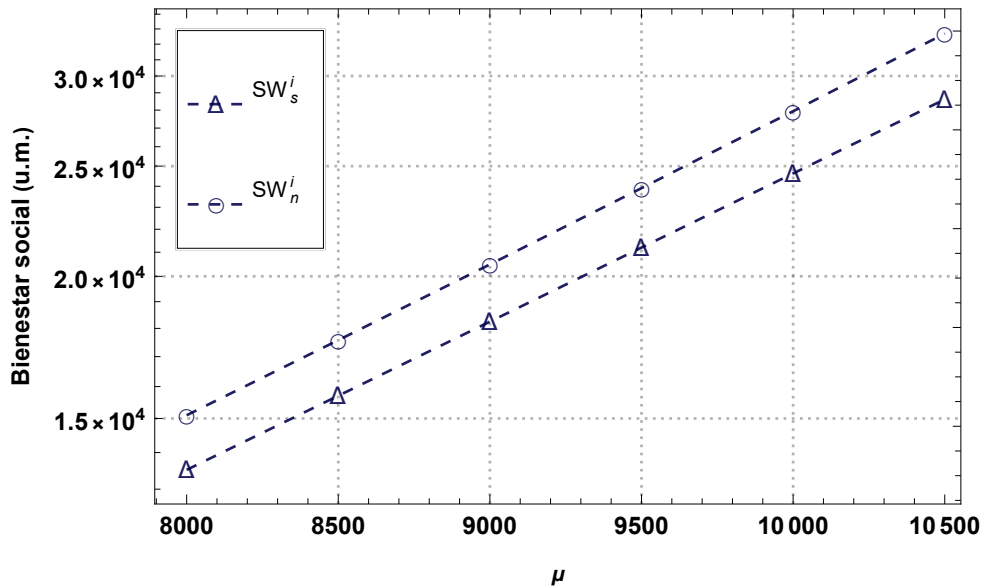


Figura 4.19: Bienestar social en función de μ (Integrado).

La conclusión general es que la mejor opción para que el operador de red en un modelo de negocio Integrado ofrezca los servicios URLLC y mMTC sea sobre una red 5G con NS, desde el punto de vista de todos los actores del mercado, es decir, operadores y usuarios. Esta conclusión se debe al hecho de que el bienestar social es mayor y que pueden prestarse ambos servicios.

4.2.2. Modelo de negocio Especializado

En esta subsección, los resultados para el modelo de negocio Especializado se discuten sólo para el escenario NS porque no hay equilibrio en el escenario SN. Las Figuras 4.20-4.22 también se utilizarán para la discusión en la siguiente subsección.

La Figura 4.20 muestra el efecto de μ en p_{un}^e y p_{mn}^e . El aumento de μ hace que incrementen los precios de ambos servicios. Además, el precio del servicio URLLC es significativamente superior al precio del servicio mMTC, lo que se justifica al requisito de baja tolerancia a la latencia de URLLC. Esto sugiere que los usuarios del operador URLLC están dispuestos a pagar más por el servicio URLLC que los usuarios del operador mMTC por el servicio correspondiente. Los resultados corroboran el modelo económico presentado en las Ecuaciones (3.98)-(3.99), destacando la importancia de NS en las estrategias de fijación de precios para diferentes servicios y usuarios.

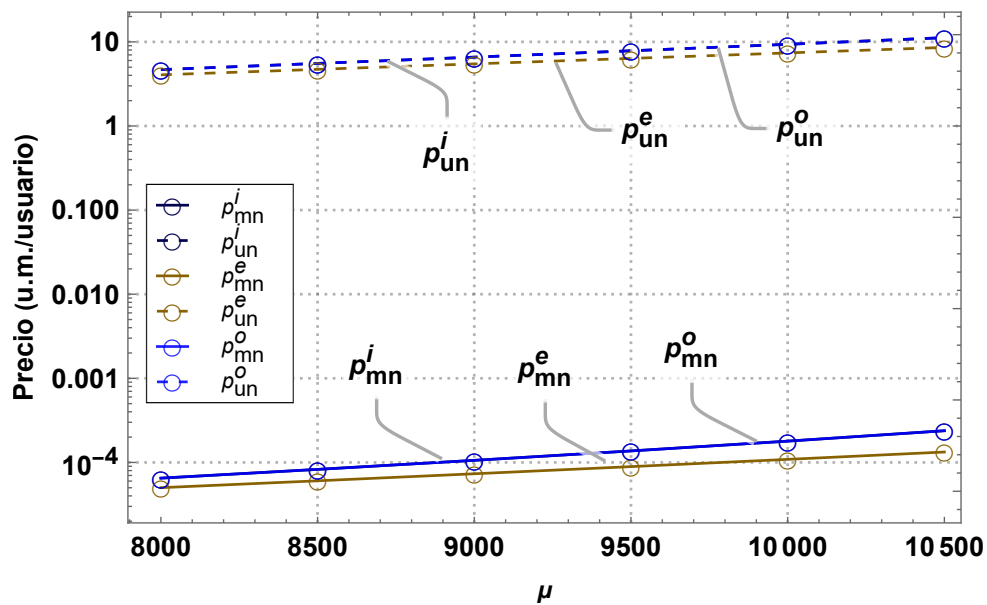


Figura 4.20: Comparación de precios en el escenario NS.

La Figura 4.21 muestra la influencia de μ en n_{un}^e y n_{mn}^e . Se observa que n_{un}^e y n_{mn}^e permanecen constantes con el aumento de μ , lo que indica que el número de usuarios suscritos a cada servicio no se ve afectado por el aumento de la capacidad de la red. Sin embargo, el elevado precio del servicio URLLC hace que se suscriban al servicio menos usuarios de URLLC, mientras que un gran número de usuarios se suscribe al servicio mMTC. Además, este resultado indican que la estrategia de fijación de precios por los operadores y los requisitos de QoS de los usuarios influyen significativamente en el número de usuarios que soporta la red. Asimismo, cabe destacar que n_{mn}^e es aproximadamente superior a 1 millón de usuarios, lo que concuerda con el objetivo del servicio mMTC de dar servicio a un número masivo de dispositivos.

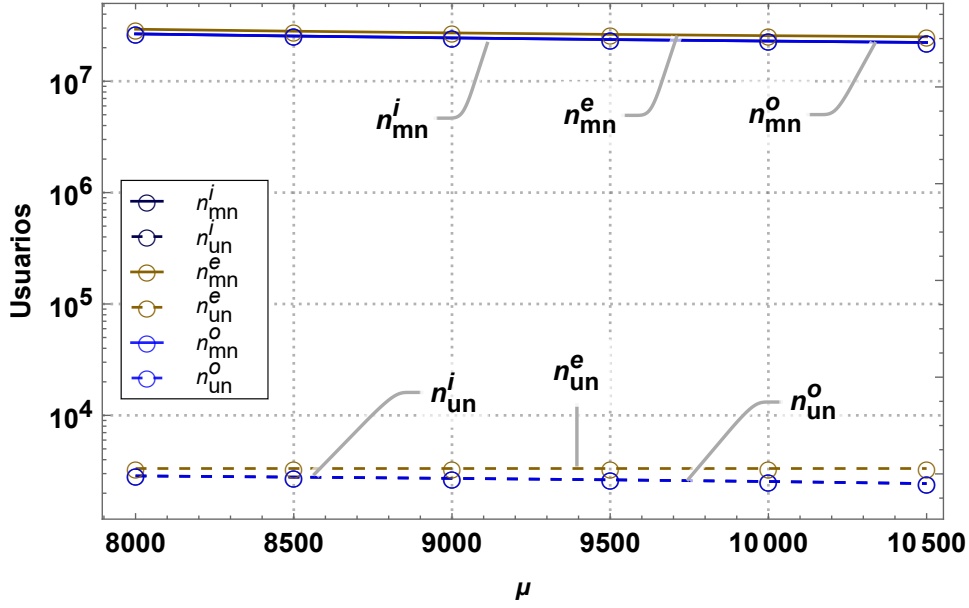


Figura 4.21: Comparación del número de usuarios en el escenario NS.

La Figura 4.22 muestra Π_n^e en función de μ . Se puede observar que Π_n^e aumenta a medida que μ aumenta. Este comportamiento de Π_n^e puede explicarse por el hecho de que el beneficio total es la suma de los beneficios de los operadores URLLC y mMTC. Como se muestra en la Figura 4.20, en el escenario NS, p_{un}^e y p_{mn}^e aumentan a medida que aumenta μ . Por tanto, el beneficio de cada operador aumenta, lo que se traduce en un aumento del beneficio total.

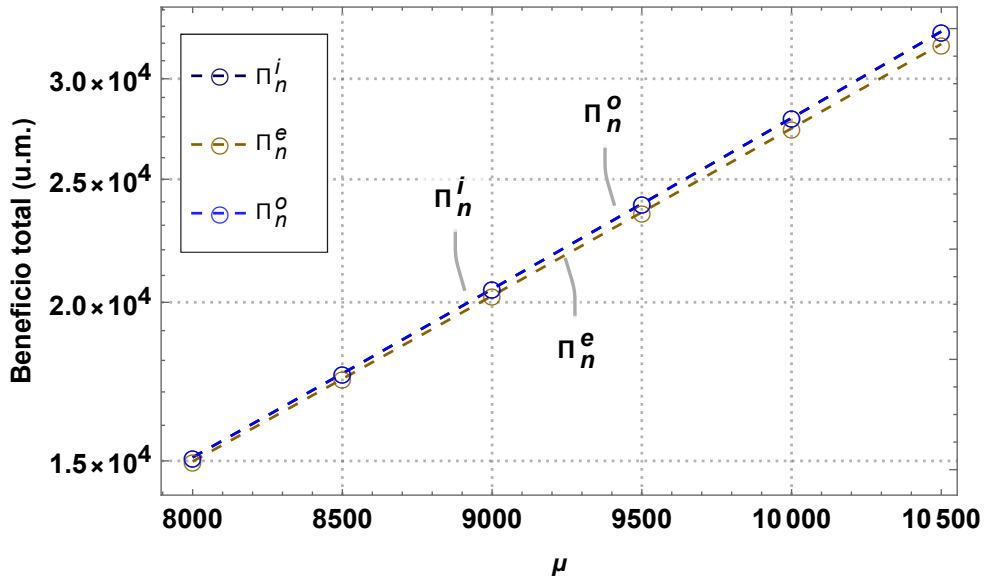


Figura 4.22: Comparación del beneficio total en el escenario NS.

La Figura 4.23 muestra la relación entre SW_n^e y μ . La observación de que un aumento de μ conduce a un aumento de SW_n^e es razonable, ya que valores más altos de μ significan una mayor capacidad de la red, lo que se traduce en una menor latencia y una mayor fiabilidad para los usuarios de URLLC y mMTC. Además, la Figura 4.20 muestra que en el escenario NS, a medida que μ aumenta, p_{un}^e y p_{mn}^e también

aumentan. Esto conduce a un aumento del beneficio de cada operador, expresado por ($\Pi_{uy} = n_{uy} p_{uy}$ y $\Pi_{my} = n_{my} p_{my}$), y por tanto, un aumento de SW_n^e . Asimismo, se observa que el aumento global del bienestar social a medida que aumenta μ tiene sentido y es coherente con el planteamiento de las Ecuaciones (3.103)-(3.104) y (3.127).

4.2.3. Comparación de los modelos en el escenario NS

En esta sección, se compara los resultados obtenidos de los dos modelos de negocio, Integrado y Especializado, con los resultados del óptimo social. En concreto, se discute en términos de precios de los servicios, número de suscriptores por servicio, beneficios de los operadores y bienestar social. La discusión se refiere al escenario NS, ya que el Especializado sólo tiene resultados en este escenario.

Se puede ver en la Figura 4.20 la *comparación de precios* en el escenario NS, la relación entre los precios de los servicios y el valor de μ . A medida que μ aumenta, p_{un}^e y p_{mn}^e disminuyen y se mantienen por debajo de p_{un}^i y p_{mn}^i , así como de p_{un}^o y p_{mn}^o . Esto indica que los precios ofrecidos en el Especializado son inferiores a los del Integrado y al óptimo social. Sin embargo, cabe señalar que los precios de los servicios en el Integrado son similares a los del óptimo social, es decir, $p_{un}^o = p_{un}^i > p_{un}^e$. Por tanto, con base en estas observaciones se puede concluir que el Integrado es el más recomendable desde la perspectiva del usuario, ya que ofrece precios similares a los del óptimo social.

La Figura 4.21 muestra la *comparación del número de usuarios suscritos* en el escenario NS. Se puede ver que el número de usuarios suscritos a los servicios URLLC y mMTC en el Especializado, n_{un}^e y n_{mn}^e , es mayor que en el óptimo social, n_{un}^o y n_{mn}^o . Sin embargo, los resultados del Integrado, n_{un}^i y n_{mn}^i , son similares a los del óptimo social. Esto indica que el Integrado y el óptimo social tienen un número similar de usuarios suscritos a los servicios, mientras que el Especializado tiene más usuarios. Por tanto, se concluye que los resultados obtenidos en el Integrado son los más óptimos, ya que son similares a los del óptimo social y tienen menos usuarios suscritos a los servicios que en el Especializado.

La Figura 4.22 muestra la *comparación del beneficio total*, y se observa que $\Pi_n^o = \Pi_n^i > \Pi_n^e$ a medida que μ aumenta. Asimismo, los resultados muestran que Π_n^i es igual a Π_n^o y mayor que Π_n^e . Esto indica que los beneficios obtenidos en el Integrado y en el óptimo social son superiores a los del Especializado. Además, este resultado está relacionado con el análisis del bienestar social, ya que el excedente del consumidor es cero en los tres modelos. Por lo tanto, el beneficio total de los operadores es igual al bienestar social. En otras palabras, como el beneficio total es mayor, el bienestar social es mayor en el Integrado y en el óptimo social que en el Especializado.

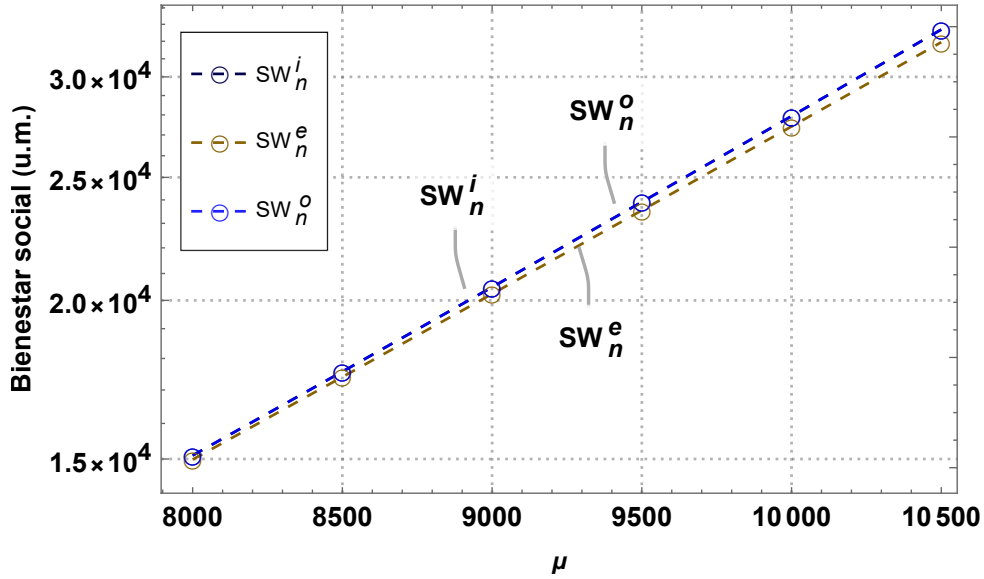


Figura 4.23: Comparación del bienestar social en el escenario NS.

La Figura 4.23 se muestra la *comparación del bienestar social* en el escenario NS. La comparación de los resultados del bienestar social se realiza desde la perspectiva de la maximización del bienestar general de la sociedad. Como se muestra en la Figura 4.23, SW_n^o es mayor que SW_n^e , mientras que SW_n^i es igual a SW_n^o . Esto indica que el Integrado es la forma más eficiente de proporcionar servicios URLLC y mMTC en el escenario NS. El comportamiento observado es consistente con el hecho de que el operador en el Integrado del escenario NS sirve a los usuarios de los servicios URLLC y mMTC utilizando NS, lo que le permite explotar mejor las características de QoS y la capacidad de la red, conduciendo a una maximización del bienestar social a través de los beneficios obtenidos por un único operador. Este resultado se ve respaldado por las conclusiones presentadas en la Figura 4.18.

El hecho de que $SW_n^o = SW_n^i$ sugiere que el operador en el Integrado no está ejerciendo su poder de mercado para aumentar sus beneficios a expensas del bienestar social general. Una posible razón para ello es que el operador en el Integrado esté practicando hasta cierto punto la discriminación de precios. Mediante la discriminación de precios, el operador en el Integrado cobra precios más altos a los usuarios de URLLC que están dispuestos a pagar más y precios más bajos a los usuarios de mMTC que están dispuestos a pagar menos. Esto permite al operador en el Integrado generar mayores beneficios sin reducir el bienestar social general.

Con base en todos los resultados, la conclusión determina que el escenario NS es el más favorable, es decir, la mejor opción para ofrecer los servicios URLLC y mMTC es sobre una red 5G con NS, y por un único operador. Porque los resultados obtenidos en el Integrado, es decir, para los precios de los servicios, las utilidades de los usuarios y los beneficios de los operadores, son similares a los obtenidos en el óptimo social, lo que indica que la prestación de los servicios URLLC y mMTC con la incorporación de NS conduce a mejores resultados para usuarios y operadores.

4.2.4. Conclusiones

En las Secciones 3.4 y 3.5, se ha investigado una forma adecuada para la prestación de los servicios URLLC y mMTC sobre una red 5G por los operadores hacia los usuarios finales, para lo cual, se han analizado dos modelos de negocio y dos modelos de red 5G para la compartición de los recursos de red entre ambos servicios. Los modelos de negocio analizados son el Integrado, donde sólo un operador de red proporciona tanto el servicio URLLC, así como mMTC, y el Especializado, donde dos operadores distintos proporcionan un servicio cada uno. Además, analizamos la viabilidad y rentabilidad de ambos modelos desde la perspectiva de todos los actores implicados.

Por otro lado, los dos escenarios analizados son el escenario SN y el escenario NS. El escenario SN es una red 5G sin NS, donde los dos servicios son tratados de forma igual. Además, el escenario SN es modelada como una cola M/M/1 sin prioridad de servicio (FIFO), que trata a todos los paquetes de los servicios de forma igual. El escenario NS es una red 5G con NS, donde los dos servicios reciben un tratamiento diferente y el mecanismo que permite tratar los servicios diferentes es el NS. Asimismo, el escenario NS es modelada como una cola M/M/1 con dos prioridades de servicio, asignando una prioridad alta al servicio URLLC por sus características de QoS.

Los resultados que se obtiene sugieren que en ambos modelos de negocio, la red 5G con NS es el más recomendable desde el punto de vista de los precios de los servicios y de los beneficios de los operadores, ya que la incorporación del NS en la red 5G para prestación de los servicios es mejor que la red 5G sin utilizar NS. En concreto, en la red 5G con NS para el Integrado, los resultados de los precios de los servicios URLLC y mMTC son similares a los resultados obtenidos en el óptimo social, lo que no ocurre para los resultados del Especializado, ya que difiere de los resultados del óptimo social. Por otro lado, se observa que el precio del servicio URLLC es muy superior al precio del servicio mMTC en la red 5G en ambos escenarios. Este resultado tiene sentido, ya que un usuario URLLC estaría dispuesto a pagar mucho más que un usuario mMTC para recibir el servicio URLLC debido a su baja tolerancia a la latencia, ya que el servicio mMTC tiene una mayor tolerancia a la latencia.

También se observa que el servicio mMTC contiene un gran número de usuarios suscritos, aproximadamente más de 1 millón de usuarios (dispositivos). Este resultado tiene sentido porque como el precio del servicio mMTC es mucho más bajo que el precio del servicio URLLC, habrá un mayor número de usuarios suscritos al servicio mMTC. Finalmente, sobre la base del análisis de los modelos y escenarios analizados, se concluye que la mejor opción para ofrecer los servicios URLLC y mMTC es sobre una red 5G con NS y por un único operador. En general, este trabajo de investigación proporciona un análisis detallado y riguroso de los modelos de negocio para la prestación de servicios de comunicaciones críticos y de alta velocidad en redes 5G, lo que supone una contribución significativa. Asimismo, estas conclusiones podrían tener importantes implicaciones para la toma de decisiones en el diseño y la gestión de servicios en entornos de redes de telecomunicaciones.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

5.1. Conclusiones

El mercado en la industria de las telecomunicaciones, es un mercado en pleno crecimiento y cambio, y se ve influenciado por la evolución de las tecnologías de comunicaciones móviles. Sin embargo, ofrece oportunidades a los operadores de red a pesar de las barreras de ingreso a este mercado. Se evidencia en los últimos años, la red 5G ha tenido un amplio despliegue a nivel global y ha alcanzado una mayor cobertura. Esta implementación ha brindado la oportunidad de diseñar nuevos modelos de negocio para los operadores de red, ya que los servicios URLLC, eMBB y mMTC en las redes 5G, presentan requisitos de QoS muy exigentes. Cada uno de estos servicios se enfoca en diferentes requerimientos, como comunicaciones ultrarápidas de baja latencia, altas tasas de transmisión de paquetes y cobertura para un gran número de dispositivos conectados a la red 5G. Este hecho plantea que los actores del mercado deben evaluar soluciones que consideren aspectos económicos, técnicos y tecnológicos. Por otra parte, la incorporación del NS a las redes 5G permite la interacción y compartición de recursos entre los servicios URLLC, eMBB y mMTC, gracias a su flexibilidad y personalización, eficiencia de recursos, gestión simplificada, capacidad de escalabilidad y adaptabilidad. Estas características resuelven los aspectos técnicos para la compartición de recursos de red entre dos servicios ofrecidos por los operadores en una red 5G. Sin embargo, la incorporación del NS en los modelos de negocio de los operadores de red 5G requiere demostrar su viabilidad económica desde el punto de vista de todos los actores del mercado.

En esta tesis, se analiza dos modelos de negocio denominados Integrado y Especializado, para la provisión de dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC). Además, se analiza dos escenarios de red 5G, una red 5G sin NS, donde todos los servicios son tratados de forma igual, y una red 5G con NS, donde todos los servicios reciben un tratamiento diferente y el mecanismo que permite tratar los servicios diferentes es el NS. Ambos escenarios son modelados por medio de una M/M/1, este modelado nos permite evaluar la compartición eficiente de los recursos de red entre los dos servicios (URLLC y

eMBB o URLLC y mMTC). También se analiza una situación de óptimo social que se utiliza para comparar los resultados con los dos modelos de negocio y evaluar los resultados de los actores del mercado en función del bienestar social.

Las contribuciones más importantes de esta investigación se describen detalladamente en las secciones siguientes.

5.1.1. Principales contribuciones

5.1.1.1. Modelos de red para la compartición de recursos de red entre dos servicios 5G

En el contexto de la tesis doctoral, se ha investigado la provisión de dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) sobre una red 5G por parte de los operadores de red hacia los usuarios finales. Para ello, se han propuesto dos modelos de negocio que permiten la prestación de ambos servicios a través de una red 5G con recursos compartidos.

Se plantean dos escenarios, el primero es el escenario SN que es una red 5G sin NS, la cual es modelada por medio de un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 sin prioridad de servicio (FIFO) y todos los paquetes de los servicios son tratados de forma igual. El segundo es el escenario NS que es una red 5G con NS, la cual es modelada por medio de un modelo de red, donde hay una cola M/M/1 con prioridad de servicio, asignando una prioridad alta al servicio URLLC por sus características de QoS, es decir, trata diferente a los paquetes de los servicios. Se utiliza el modelo de cola M/M/1 para representar la provisión de dos servicios distintos (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) a los usuarios finales y para evaluar la compartición eficiente de los recursos de red entre estos servicios dentro de una red 5G. El análisis de la compartición de recursos de red para los servicios URLLC y eMBB se hizo primero, luego para los servicios URLLC y mMTC. Durante el desarrollo de la tesis, se utilizan las denominaciones de Escenario SN y Escenario NS.

Con relación a la compartición de recursos de red entre los servicios URLLC y eMBB, los resultados más relevantes muestran que en una red 5G con NS, ambos servicios pueden ser ofrecidos a los usuarios sin problemas, ya que el tráfico del servicio eMBB no afecta la QoS del servicio URLLC. Por el contrario, en una red 5G sin NS, la QoS del servicio URLLC se ve perjudicada, lo que implica que solo el servicio URLLC puede ser ofrecido a los usuarios que corresponde. Además, en una red 5G con NS, los operadores de red pueden fijar un precio mayor para el servicio URLLC en comparación con el servicio eMBB, debido a las características de QoS, mientras que en una red 5G sin NS, esto no ocurre. Asimismo, tanto el beneficio total obtenido por el operador de red como el bienestar social alcanzado son mayores en valor de unidades monetarias en una red 5G con NS en comparación con una red 5G sin NS. Por otra parte, con relación a la compartición de recursos de red entre los servicios URLLC y mMTC, los resultados más relevantes muestran que en una red 5G con NS, ambos servicios pueden ser ofrecidos de manera normal, sin que el tráfico del servicio mMTC afecte la QoS del servicio URLLC. Sin embargo, en una red 5G sin NS, la QoS del servicio URLLC se ve afectada, lo que resulta en que solo se ofrezca el servicio URLLC. Además, en la red 5G con NS se observa que el operador de red establece un precio significativamente mayor para el servicio URLLC en comparación con el servicio mMTC, debido a las características de QoS de cada servicio. Esto demuestra que los usuarios URLLC estarían dispuestos a pagar un precio mayor que los usuarios mMTC. Además, se observa que en la red 5G con NS, el servicio mMTC cuenta con aproximadamente un millón de usuarios suscritos (dispositivos), lo cual es coherente con el enfoque del servicio mMTC. Por último, los resultados muestran que tanto el beneficio total obtenido por el operador de red como el bienestar social alcanzado son mayores en

términos de unidades monetarias en una red 5G con NS en comparación con una red 5G sin NS.

En resumen, nuestros resultados más relevantes sugieren que la incorporación de NS a una red 5G para ofrecer dos tipos de servicios es más recomendable desde la perspectiva de los precios de los servicios, la tasa de transmisiones de paquetes, el número de usuarios suscritos por servicio, el beneficio del operador y el bienestar social alcanzado en comparación con una red 5G sin NS. En otras palabras, la implementación de NS en una red 5G resulta en mejoras significativas en diversos aspectos, respaldando la viabilidad y beneficios de compartir recursos de red entre diferentes servicios.

5.1.1.2. Modelo de negocio para la provisión de dos servicios sobre una red 5G con NS

Se analiza la viabilidad económica de dos modelos de negocio para que los operadores de red ofrezcan dos servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC) a los usuarios finales sobre una red 5G sin NS y con NS, cada uno con su propia base de suscriptores, de modo que la competencia entre usuarios no se da. Estos modelos de negocio tienen las siguientes características.

El primer modelo de negocio se denomina Integrada, donde un único operador de red ofrece los dos tipos de servicios (URLLC y eMBB o URLLC y mMTC). El segundo modelo de negocio se denomina Especializado, donde hay dos operadores de red, un operador de red ofrece un servicio y el otro operador de red ofrece el otro servicio (entre URLLC y eMBB o URLLC y mMTC). Ambos modelos de negocio se analizan con base en los escenarios SN y NS, sin embargo, la contribución de la investigación se centra en el análisis del escenario NS, es decir, sobre una red 5G con NS. La explicación de la red 5G con NS se puede ver en la subsección anterior. Los dos modelos de negocio se evalúan comparando sus resultados con los resultados del óptimo social. El óptimo social es una situación cuyo objetivo es buscar maximizar el bienestar social a través de la distribución de los usuarios o distribución de los recursos de red por servicio, una forma de interpretar esta situación es el ingreso de un regulador de servicios 5G al mercado quien buscaría maximizar el SW.

Las características de los dos modelos de negocio analizados en cada modelo de red 5G, se evalúa desde la perspectiva del sistema y de lo económico. El modelo económico se modela con base en las utilidades de los usuarios y beneficios de los operadores de red. Los usuarios deciden si suscriben o no con el operador de red que le brinda el servicio. Para ello, se evalúa la utilidad del usuario sobre la base de la QoS que perciben, y el precio cobrado por el operador de red, el análisis se realiza por el equilibrio de Wardrop. Con respecto a los beneficios de los operadores de red, se considera que el beneficio obtenido está en función del número de usuarios que suscriben al servicio que ofrece. En ambos modelos de negocio no se consideran costos de inversión en lo que incurren los operadores de red. La teoría de juegos es aplicado en cada modelo de negocio para la evaluación de su viabilidad económica. La evaluación consiste en un juego de dos etapas, donde el juego se resuelve mediante la inducción hacia atrás, de manera que, se optimizan las funciones de utilidad del usuario y los beneficios de los operadores de red en cada modelo de negocio para los escenarios SN y NS con base en diferentes valores de parámetros, consiguiendo el equilibrio de Nash, sobre la base de la resolución de las funciones de BRs.

Los resultados que se obtiene en la red 5G con NS en los dos modelos de negocio, son comparados con los resultados obtenidos en el óptimo social con el objetivo de determinar cuál es el más recomendable en función del bienestar social. En los dos análisis de la provisión de los dos tipos de servicios sobre una red 5G con NS se concluye lo siguiente:

- La mejor opción para ofrecer los servicios URLLC y eMBB es sobre una red 5G con NS y por un

único operador desde el punto de vista del bienestar social.

- La mejor opción para ofrecer los servicios URLLC y mMTC es sobre una red 5G con NS y por un único operador desde el punto de vista del bienestar social.

5.1.1.3. Óptimo social y el bienestar social general

El planteamiento de la situación del óptimo social se realiza con el objetivo de examinar el impacto de la prestación de servicios 5G y el bienestar social, considerando la intervención de un regulador de servicios 5G en el mercado. El motivo principal del óptimo social es maximizar el bienestar de la sociedad en general.

El desarrollo de esta situación permitió analizar dos relaciones importantes. En primer lugar, se investigó la relación entre la tasa de datos de los servicios (URLLC y eMBB) y el bienestar social. Esta relación brindó información valiosa sobre cómo la variación en las tasas de datos de los servicios influye en el bienestar social.

En segundo lugar, se examinó la relación entre el número de usuarios y el bienestar social para los servicios URLLC y mMTC. Esta relación ayudó a comprender cómo el número de usuarios suscritos a estos servicios influye en el bienestar social.

Los resultados que se obtuvo a través de la aplicación del óptimo social fueron fundamentales para determinar cuál es el modelo de negocio más adecuado para la prestación de estos servicios en una red 5G con NS. Estos resultados proporciona información importante para que los actores del mercado tomen decisiones de forma estratégicas en relación con la prestación de servicios y la configuración de los modelos de negocio.

En conclusión, el análisis y la aplicación del óptimo social han sido una contribución fundamental en esta tesis doctoral, proporcionando una visión clara sobre la relación entre la prestación de servicios 5G, el bienestar social y la toma de decisiones en el mercado. Estos resultados contribuyen a la comprensión y mejora de la implementación de redes 5G con NS, beneficiando a los usuarios, los operadores de red y a la sociedad en general.

5.1.2. Trabajos futuros

En esta subsección, se describe las futuras líneas de trabajo que abre la investigación en la tesis. Se identifican dos áreas de interés.

En primer lugar, realizar un análisis de la viabilidad económica de la prestación simultánea de los servicios eMBB, URLLC y mMTC simultáneamente. Sería relevante realizar un estudio exhaustivo para evaluar la viabilidad económica de la provisión conjunta de estos servicios por un único operador o por dos operadores diferentes. Se podrían considerar modelos de negocio alternativos, estrategias de fijación de precios y acuerdos de compartición de recursos entre operadores para maximizar los beneficios y satisfacer las demandas de los usuarios. Además, se podría comparar los resultados obtenidos en esta investigación con aquellos resultados que se obtendrían en esta línea de investigación con base en datos actuales del mercado para proporcionar recomendaciones y perspectivas realistas.

En segundo lugar, realizar una evaluación de modelos dinámicos que reflejen cambios en la base de

usuarios. Una cuestión importante para investigaciones futuras es la evaluación de modelos en escenarios dinámicos donde la base de usuarios experimente variaciones a lo largo del tiempo. A diferencia de los modelos estáticos analizados en esta tesis, los modelos dinámicos serían capaces de capturar de manera más precisa los cambios en la demanda de servicios y las dinámicas de los usuarios. Asimismo, sería interesante investigar cómo los sistemas de colas y las estrategias de asignación de recursos se ven afectados por estos cambios.

En resumen, las futuras investigaciones podrían centrarse en el análisis de la viabilidad económica de la prestación conjunta de servicios y en la evaluación de modelos dinámicos que reflejen cambios en la base de usuarios. Estos trabajos proporcionarían una comprensión más completa de los aspectos económicos y realistas de la provisión de servicios en redes las 5G, y podrían brindar información relevante para la toma de decisiones estratégicas y el diseño de políticas en el campo de las telecomunicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Miladić-Tešić, G. Marković, D. Peraković, and I. Cvitić, “A review of optical networking technologies supporting 5G communication infrastructure,” *Wireless Networks*, vol. 28, no. 1, pp. 459–467, 2022.
- [2] W. Yang, C.-P. Li, A. Fakoorian, K. Hosseini, and W. Chen, “Dynamic URLLC and eMBB multiplexing design in 5G new radio,” in *2020 IEEE 17th annual consumer communications & networking conference (CCNC)*. IEEE, 2020, pp. 1–5.
- [3] P. Popovski, K. F. Trillingsgaard, O. Simeone, and G. Durisi, “5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view,” *Ieee Access*, vol. 6, pp. 55 765–55 779, 2018.
- [4] W. Xiang, K. Zheng, and X. S. Shen, *5G mobile communications*. Springer, 2016.
- [5] S. R. Pokhrel, J. Ding, J. Park, O.-S. Park, and J. Choi, “Towards enabling critical mMTC: A review of URLLC within mMTC,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 131 796–131 813, 2020.
- [6] W.-E. Chen, X.-Y. Fan, and L.-X. Chen, “A CNN-based Packet Classification of eMBB, mMTC and URLLC Applications for 5G,” in *2019 International Conference on Intelligent Computing and its Emerging Applications (ICEA)*. IEEE, 2019, pp. 140–145.
- [7] L. Banda, M. Mzyece, and F. Mekuria, “5G business models for mobile network operators—a survey,” *IEEE Access*, 2022.
- [8] J. Aranda, E. J. Sacoto Cabrera, D. Haro Mendoza, and F. Astudillo Salinas, “5G networks: A review from the perspectives of architecture, business models, cybersecurity, and research developments,” *Novasinerгия*, vol. 4, 2021.
- [9] X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, “Network slicing in 5G: Survey and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, 2017.
- [10] M. F. Cohen, *An introduction to logic and scientific method*. Read Books Ltd, 2011.
- [11] L. Guijarro, V. Pla, and B. Tuffin, “Entry game under opportunistic access in cognitive radio networks: a priority queue model,” in *Wireless Days (WD), 2013 IFIP*. IEEE, 2013, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://www.doi.org/10.1109/WD.2013.6686476>

- [12] A. Sanchis-Cano, J. Romero, E. J. Sacoto-Cabrera, and L. Guijarro, “Economic feasibility of wireless sensor network-based service provision in a duopoly setting with a monopolist operator,” *Sensors*, vol. 17, p. 2727, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/s17122727>
- [13] I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, “Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, 2018.
- [14] M. J. Osborne *et al.*, *An introduction to game theory*. Oxford university press New York, 2004, vol. 3.
- [15] P. M. Pardalos, T. M. Rassias, and A. A. Khan, *Nonlinear analysis and variational problems*. Springer, 2010.
- [16] E. Moreno-Cardenas and L. Guijarro, “Market and Sharing Alternatives for the Provision of Massive Machine-Type and Ultra-Reliable Low-Latency Communications Services over a 5G Network,” *Electronics*, vol. 12, no. 24, p. 4994, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics12244994>
- [17] I. F. Akyildiz, D. M. Gutierrez-Estevez, and E. C. Reyes, “The evolution to 4G cellular systems: LTE-Advanced,” *Physical communication*, vol. 3, no. 4, pp. 217–244, 2010.
- [18] J. Ibrahim, “4G Features,” *Bechtel Telecommunications Technical Journal*, vol. 1, no. 1, pp. 11–14, 2002.
- [19] ITU, “Statistics,” *ITU-D ICT Statistics*, 2020. [Online]. Available: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Statistics>
- [20] J. Hersh, B. J. Lang, and M. Lang, “Car accidents, smartphone adoption and 3G coverage,” *Journal of Economic Behavior & Organization*, vol. 196, pp. 278–293, 2022.
- [21] A. H. Khan, M. A. Qadeer, J. A. Ansari, and S. Waheed, “4G as a next generation wireless network,” in *2009 International conference on future computer and communication*. IEEE, 2009, pp. 334–338.
- [22] N. Panwar, S. Sharma, and A. K. Singh, “A survey on 5G: The next generation of mobile communication,” *Physical Communication*, vol. 18, pp. 64–84, 2016.
- [23] P. Maillé and B. Tuffin, *Telecommunication network economics: from theory to applications*. Cambridge University Press, 2014.
- [24] P. Ahokangas, M. Matinmikko-Blue, S. Yrjölä, V. Seppänen, H. Hämmäinen, R. Jurva, and M. Latva-aho, “Business models for local 5G micro operators,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 730–740, 2019.
- [25] P. Camps-Aragó, S. Delaere, and P. Ballon, “5G Business Models: Evolving Mobile Network Operator Roles in New Ecosystems,” in *2019 CTTE-FITCE: Smart Cities & Information and Communication Technology (CTTE-FITCE)*. IEEE, 2019, pp. 1–6.
- [26] G. G. Lenssen and N. C. Smith, *Managing Sustainable Business*. Springer, 2019.
- [27] C. Zott and R. Amit, “Business model design: An activity system perspective,” *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 216–226, 2010.
- [28] H. Chesbrough, “Business model innovation: opportunities and barriers,” *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 354–363, 2010.

- [29] D. J. Teece, "Business models, business strategy and innovation," *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 172–194, 2010.
- [30] P. Ahokangas *et al.*, "The practice of creating and transforming a business model," *Journal of Business Models*, vol. 2, no. 1, 2014.
- [31] B. Demil and X. Lecocq, "Business model evolution: In search of dynamic consistency," *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 227–246, 2010.
- [32] M. W. Johnson, C. M. Christensen, H. Kagermann *et al.*, "Reinventing your business model," *Harvard business review*, vol. 86, no. 12, pp. 50–59, 2008.
- [33] A. Osterwalder and Y. Pigneur, *Business model generation: a handbook for visionaries, game changers, and challengers*. John Wiley & Sons, 2010, vol. 1.
- [34] C. Zott and R. Amit, "The business model: A theoretically anchored robust construct for strategic analysis," *Strategic organization*, vol. 11, no. 4, pp. 403–411, 2013.
- [35] R. Amit and C. Zott, "Crafting business architecture: The antecedents of business model design," *Strategic Entrepreneurship Journal*, vol. 9, no. 4, pp. 331–350, 2015.
- [36] R. Biloslavo, C. Bagnoli, and D. Edgar, "An eco-critical perspective on business models: The value triangle as an approach to closing the sustainability gap," *Journal of cleaner production*, vol. 174, pp. 746–762, 2018.
- [37] S. Moqaddamerad, Y. Xu, M. Iivari, and P. Ahokangas, "Business models based on co-opetition in a hyper-connected era: the case of 5G-enabled smart grids," in *Collaboration in a Hyperconnected World: 17th IFIP WG 5.5 Working Conference on Virtual Enterprises, PRO-VE 2016, Porto, Portugal, October 3-5, 2016, Proceedings 17*. Springer, 2016, pp. 559–568.
- [38] S. Yrjölä, P. Ahokangas, and M. Matinmikko-Blue, "Novel context and platform driven business models via 5G networks," in *2018 IEEE 29th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2018, pp. 1–7.
- [39] M. M. Al-Debi, R. El-Haddadeh, and D. Avison, "Defining the business model in the new world of digital business," *AMCIS 2008 proceedings*, p. 300, 2008.
- [40] C. Baden-Fuller and S. Haefliger, "Business models and technological innovation," *Long range planning*, vol. 46, no. 6, pp. 419–426, 2013.
- [41] D. J. Teece, "Business models and dynamic capabilities," *Long range planning*, vol. 51, no. 1, pp. 40–49, 2018.
- [42] R. Casadesus-Masanell and J. E. Ricart, "From strategy to business models and onto tactics," *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 195–215, 2010.
- [43] E. Fiel, "Conceptualising business models: Definitions, frameworks and classifications," *Journal of business models*, vol. 1, no. 1, pp. 85–105, 2013.
- [44] M. Yunus, B. Moingeon, and L. Lehmann-Ortega, "Building social business models: Lessons from the grameen experience," *Long range planning*, vol. 43, no. 2-3, pp. 308–325, 2010.
- [45] B. W. Wirtz, A. Pistoia, S. Ullrich, and V. Göttel, "Business models: Origin, development and future research perspectives," *Long range planning*, vol. 49, no. 1, pp. 36–54, 2016.

- [46] R. Amit and C. Zott, "Creating value through business model innovation," *MIT Sloan management review*, 2012.
- [47] C. M. DaSilva and P. Trkman, "Business model: What it is and what it is not," *Long range planning*, vol. 47, no. 6, pp. 379–389, 2014.
- [48] H. Chesbrough, "Business model innovation: it's not just about technology anymore," *Strategy & leadership*, 2007.
- [49] S. K. Rao and R. Prasad, "Telecom Operators Business Model Innovation in a 5G World," *Journal of Multi Business Model Innovation and Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 149–178, 2016.
- [50] S. K. Rao, "Socio-economic impact of 5G technologies," Ph.D. dissertation, Department of Business Development and Technology (BTECH), 2018.
- [51] P. Ballon, "Scenarios and business models for 4G in europe," *info*, vol. 6, no. 6, pp. 363–382, 2004.
- [52] U. Habiba and E. Hossain, "Auction mechanisms for virtualization in 5G cellular networks: Basics, trends, and open challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2264–2293, 2018.
- [53] Y. Zaki, L. Zhao, C. Goerg, and A. Timm-Giel, "Lte mobile network virtualization: Exploiting multiplexing and multi-user diversity gain," *Mobile Networks and Applications*, vol. 16, pp. 424–432, 2011.
- [54] R. Kokku, R. Mahindra, H. Zhang, and S. Rangarajan, "NVS: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks," *IEEE/ACM transactions on networking*, vol. 20, no. 5, pp. 1333–1346, 2011.
- [55] R. Copeland and N. Crespi, "Modelling multi-MNO business for MVNOs in their evolution to LTE, VoLTE & advanced policy," in *2011 15th international conference on intelligence in next generation networks*. IEEE, 2011, pp. 295–300.
- [56] A. E. Al-Fagih, F. M. Al-Turjman, W. M. Alsalih, and H. S. Hassanein, "A priced public sensing framework for heterogeneous IoT architectures," *IEEE Transactions on Emerging Topics in Computing*, vol. 1, no. 1, pp. 133–147, 2013.
- [57] L. A. Sevastianov and S. Vasilyev, "Telecommunication market model and optimal pricing scheme of 5G services," in *2018 10th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [58] A. A. Barakabitze, A. Ahmad, R. Mijumbi, and A. Hines, "5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges," *Computer Networks*, vol. 167, p. 106984, 2020.
- [59] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617–1655, 2016.
- [60] M. Series, "Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface (s)," *Report*, pp. 2410–0, 2017.
- [61] D. 3GPP, "Study on new radio access technology physical layer aspects," *Technical Report (TR) 38.802, V14. 2.0*, 2017.

- [62] A. Anand, G. De Veciana, and S. Shakkottai, “Joint scheduling of URLLC and eMBB traffic in 5G wireless networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 2, pp. 477–490, 2020.
- [63] 3GPP. (2020) 3GPP Release 16. Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/release-16>
- [64] 3GPP. (2021) 3GPP Release 17. Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/release-17>
- [65] C. Bockelmann, N. K. Pratas, G. Wunder, S. Saur, M. Navarro, D. Gregoratti, G. Vivier, E. De Carvalho, Y. Ji, Č. Stefanović *et al.*, “Towards massive connectivity support for scalable mMTC communications in 5G networks,” *IEEE access*, vol. 6, pp. 28 969–28 992, 2018.
- [66] M. Series, “IMT Vision-Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond,” *Recommendation ITU*, vol. 2083, no. 0, 2015.
- [67] E. Selem, M. Fatehy, and S. M. Abd El-Kader, “E-health applications over 5G networks: Challenges and state of the art,” in *2019 6th International Conference on Advanced Control Circuits and Systems (ACCS) & 2019 5th International Conference on New Paradigms in Electronics & information Technology (PEIT)*. IEEE, 2019, pp. 111–118.
- [68] M. Bennis, M. Debbah, and H. V. Poor, “Ultrareliable and low-latency wireless communication: Tail, risk, and scale,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 106, no. 10, pp. 1834–1853, 2018.
- [69] Z. Li, M. A. Uusitalo, H. Shariatmadari, and B. Singh, “5G URLLC: Design challenges and system concepts,” in *2018 15th international symposium on wireless communication systems (ISWCS)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [70] W.-P. Nwadiugwu, C. I. Nwakanma, J.-M. Lee, and D.-S. Kim, “Achieving reliable URLLC-based network in industrial and military embedded systems,” in *2019 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. IEEE, 2019, pp. 642–645.
- [71] G. C. Ferrante, J. Ostman, G. Durisi, and K. Kittichokechai, “Pilot-assisted short-packet transmission over multiantenna fading channels: A 5G case study,” in *2018 52nd Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*. IEEE, 2018, pp. 1–6.
- [72] M. Alsenwi, N. H. Tran, M. Bennis, A. K. Bairagi, and C. S. Hong, “eMBB-URLLC resource slicing: A risk-sensitive approach,” *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 740–743, 2019.
- [73] H. Zhang, N. Liu, X. Chu, K. Long, A.-H. Aghvami, and V. C. Leung, “Network slicing based 5G and future mobile networks: mobility, resource management, and challenges,” *IEEE communications magazine*, vol. 55, no. 8, pp. 138–145, 2017.
- [74] J. Ordonez-Lucena, P. Ameigeiras, D. Lopez, J. J. Ramos-Munoz, J. Lorca, and J. Folgueira, “Network slicing for 5G with SDN/NFV: Concepts, architectures, and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 80–87, 2017.
- [75] NGMN Alliance, “5G White Paper,” *Next generation mobile networks, white paper*, 2015.
- [76] 5G PPP Architecture Working Group, “View on 5G Architecture: Version 2.0,” 2017.
- [77] M. Iwamura, “NGMN view on 5G architecture,” in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*. IEEE, 2015, pp. 1–5.

- [78] L. U. Khan, I. Yaqoob, N. H. Tran, Z. Han, and C. S. Hong, "Network slicing: Recent advances, taxonomy, requirements, and open research challenges," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 36 009–36 028, 2020.
- [79] J. Zheng and G. de Veciana, "Elastic multi-resource network slicing: Can protection lead to improved performance?" in *2019 International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOPT)*. IEEE, 2019, pp. 1–8.
- [80] A. Kaloxylos, "A survey and an analysis of network slicing in 5G networks," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 60–65, 2018.
- [81] S. A. Kazmi, L. U. Khan, N. H. Tran, and C. S. Hong, *Network Slicing for 5G and Beyond Networks*. Springer, 2019.
- [82] D. S. Michalopoulos, M. Doll, V. Sciancalepore, D. Bega, P. Schneider, and P. Rost, "Network slicing via function decomposition and flexible network design," in *2017 IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [83] R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba, "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Communications surveys & tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, 2015.
- [84] D. Kreutz, F. M. Ramos, P. E. Verissimo, C. E. Rothenberg, S. Azodolmolky, and S. Uhlig, "Software-defined networking: A comprehensive survey," *Proceedings of the IEEE*, vol. 103, no. 1, pp. 14–76, 2014.
- [85] A. A. Barakabitze, L. Sun, I.-H. Mkwawa, and E. Ifeakor, "A novel QoE-aware SDN-enabled, NFV-based management architecture for future multimedia applications on 5G systems," *arXiv preprint arXiv:1904.09917*, 2019.
- [86] C. S. Hong, S. Ahsan Kazmi, S. Moon, and N. Van Mui, "SDN based wireless heterogeneous network management," in *AETA 2015: Recent Advances in Electrical Engineering and Related Sciences*. Springer, 2016, pp. 3–12.
- [87] Z. Sanaei, S. Abolfazli, A. Gani, and R. Buyya, "Heterogeneity in mobile cloud computing: taxonomy and open challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 369–392, 2013.
- [88] Y. Mao, C. You, J. Zhang, K. Huang, and K. B. Letaief, "A survey on mobile edge computing: The communication perspective," *IEEE communications surveys & tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2322–2358, 2017.
- [89] G. A. Carella, M. Pauls, T. Magedanz, M. Cilloni, P. Bellavista, and L. Foschini, "Prototyping NFV-based multi-access Edge Computing in 5G ready networks with open baton," in *2017 IEEE Conference on Network Softwarization (NetSoft)*. IEEE, 2017, pp. 1–4.
- [90] S. Huang, J. Griffioen, and K. L. Calvert, "Network hypervisors: enhancing SDN infrastructure," *Computer Communications*, vol. 46, pp. 87–96, 2014.
- [91] J. Smith and R. Nair, "The architecture of virtual machines, computer," *Computer Network*, vol. 5, no. 3, pp. 32–38, 2005.

- [92] Q. Zhang, L. Gui, F. Tian, and F. Sun, "A caching-based incentive mechanism for cooperative data offloading," in *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*. IEEE, 2017, pp. 1376–1381.
- [93] S. A. Kazmi, N. H. Tran, T. M. Ho, and C. S. Hong, "Hierarchical matching game for service selection and resource purchasing in wireless network virtualization," *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 1, pp. 121–124, 2017.
- [94] T. M. Ho, N. H. Tran, S. A. Kazmi, Z. Han, and C. S. Hong, "Wireless network virtualization with non-orthogonal multiple access," in *NOMS 2018-2018 IEEE/IFIP Network Operations and Management Symposium*. IEEE, 2018, pp. 1–9.
- [95] J. Peppard and A. Rylander, "From value chain to value network: Insights for mobile operators," *European management journal*, vol. 24, no. 2-3, pp. 128–141, 2006.
- [96] A. Kaloxylos, A. Gavras, and R. De Peppe, "Empowering vertical industries through 5G networks-current status and future trends," *5G PPP White Paper*, 2020, accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2020/09/5GPPP-VerticalsWhitePaper-2020-Final.pdf>
- [97] M. A. Lema, A. Laya, T. Mahmoodi, M. Cuevas, J. Sachs, J. Markendahl, and M. Dohler, "Business case and technology analysis for 5G low latency applications," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 5917–5935, 2017.
- [98] K. Timeus, J. Vinaixa, and F. Pardo-Bosch, "Creating business models for smart cities: A practical framework," *Public Management Review*, vol. 22, no. 5, pp. 726–745, 2020.
- [99] I. Malolli, "Pricing Policies And New Business Models For Data Communication Over 5G Networks," *Journal of International Scientific Publications: Economy & Business*, vol. 11, no. 1, pp. 398–407, 2017.
- [100] E. Obiodu, "The 5G Guide: A reference for operators," in *GSM Association*, 2019, accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: https://www.gsma.com/wp-content/uploads/2019/04/The-5G-Guide_GSMA_2019_04_29_compressed.pdf
- [101] M. Jiang, M. Condoluci, and T. Mahmoodi, "Network slicing in 5G: An auction-based model," in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [102] S. Kukliński, L. Tomaszewski, K. Kozłowski, and S. Pietrzyk, "Business models of network slicing," in *2018 9th International Conference on the Network of the Future (NOF)*. IEEE, 2018, pp. 39–43.
- [103] P. Ahokangas, S. Moqaddamerad, M. Matinmikko, A. Abouzeid, I. Atkova, J. F. Gomes, and M. Iivari, "Future micro operators business models in 5G," *The Business & Management Review*, vol. 7, no. 5, p. 143, 2016.
- [104] M. Matinmikko, M. Latva-aho, P. Ahokangas, and V. Seppänen, "On regulations for 5G: Micro licensing for locally operated networks," *Telecommunications Policy*, vol. 42, no. 8, pp. 622–635, 2018.
- [105] S. Moqaddamerad, P. Ahokangas, M. Matinmikko, and V. Seppänen, "Toward the value-based business ecosystem model for 5G mobile communications networks," *The Business and Management Review*, vol. 9, no. 1, pp. 416–427, 2017.

- [106] J. Lee and D. Kim, "A study on innovation in university education: focusing on 5G mobile communication," in *2020 IEEE 17th Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*. IEEE, 2020, pp. 1–4.
- [107] N. Gupta, P. K. Juneja, S. Sharma, and U. Garg, "Future aspect of 5G-IoT architecture in smart healthcare system," in *2021 5th International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS)*. IEEE, 2021, pp. 406–411.
- [108] W. Tao, L. Zhao, G. Wang, and R. Liang, "Review of the internet of things communication technologies in smart agriculture and challenges," *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 189, p. 106352, 2021.
- [109] W. Zheng, D. Chen, J. Duan, H. Xu, W. Qian, L. Gu, and J. Yao, "5G Network Slice Configuration Based on Smart Grid," in *2021 IEEE 4th Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC)*, vol. 4. IEEE, 2021, pp. 560–564.
- [110] D. Johnston. (2020) 5G: The Next Disrupter for Gaming and Mobile Network Operators. Accessed: Jun. 09, 2023. [Online]. Available: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/blog/5g-the-next-disrupter-for-gaming-and-mobile-network-operators/>
- [111] A. Gupta and R. K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies," *IEEE access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [112] C. Najjuuko, G. K. Ayebare, R. Lukanga, E. Mugume, and D. Okello, "A Survey of 5G for Rural Broadband Connectivity," in *2021 IST-Africa Conference (IST-Africa)*. IEEE, 2021, pp. 1–10.
- [113] G. Allon and A. Federgruen, "Service competition with general queueing facilities," *Operations Research*, vol. 56, no. 4, pp. 827–849, 2008.
- [114] G. Smail and J. Weijia, "Techno-economic analysis and prediction for the deployment of 5G mobile network," in *2017 20th Conference on innovations in clouds, internet and networks (ICIN)*. IEEE, 2017, pp. 9–16.
- [115] M. Stojanović, "Monetization and pricing of the 5G-enabled smart residential services," in *E-business technologies conference proceedings*, vol. 2, no. 1, 2022, pp. 70–73.
- [116] X. Li, M. Samaka, H. A. Chan, D. Bhamare, L. Gupta, C. Guo, and R. Jain, "Network slicing for 5G: Challenges and opportunities," *IEEE Internet Computing*, vol. 21, no. 5, pp. 20–27, 2017.
- [117] H. Mendelson, "Pricing computer services: queueing effects," *Communications of the ACM*, vol. 28, no. 3, pp. 312–321, 1985.
- [118] Y. Hayel, D. Ros, and B. Tuffin, "Less-than-best-effort services: Pricing and scheduling," in *IEEE INFOCOM 2004*, vol. 1. IEEE, 2004.
- [119] E. J. Sacoto Cabrera, L. Guijarro, and P. Maillé, "Game theoretical analysis of a multi-MNO MVNO business model in 5G networks," *Electronics*, vol. 9, no. 6, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics9060933>
- [120] B. Han, S. Tayade, and H. D. Schotten, "Modeling profit of sliced 5G networks for advanced network resource management and slice implementation," in *2017 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*. IEEE, 2017, pp. 576–581.
- [121] B. Han, D. Feng, L. Ji, and H. D. Schotten, "A profit-maximizing strategy of network resource management for 5G tenant slices," *arXiv preprint arXiv:1709.09229*, 2017.

- [122] E. J. Sacoto-Cabrera, A. Sanchis-Cano, L. Guijarro, J. R. Vidal, and V. Pla, "Strategic Interaction between Operators in the Context of Spectrum Sharing for 5G Networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 2018, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1155/2018/4308913>
- [123] E. J. Sacoto-Cabrera, L. Guijarro, J. R. Vidal, and V. Pla, "Economic feasibility of virtual operators in 5G via network slicing," *Future Generation Computer Systems*, 2020. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.044>
- [124] M. Maschler, S. Zamir, and E. Solan, *Game theory*. Cambridge: Cambridge University Press, 2020.
- [125] L. Guijarro, V. Pla, B. Tuffin, P. Maillé, and J. R. Vidal, "Competition and bargaining in wireless networks with spectrum leasing," in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference-GLOBECOM 2011*. IEEE, 2011, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2011.6133605>
- [126] L. Guijarro, J. R. Vidal, and V. Pla, "Competition in Service Provision between Slice Operators in 5G Networks," *Electronics*, vol. 7, no. 11, p. 315, 2018. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/electronics7110315>
- [127] R. Hassin and M. Haviv, *To queue or not to queue: Equilibrium behavior in queueing systems*. Springer Science & Business Media, 2003, vol. 59.
- [128] H. Varian, *Intermediate microeconomics: a modern approach: ninth international student edition*. New York: WW Norton & Company, 2014.

TÉRMINOS Y ABREVIATURAS

URLLC	Comunicaciones ultra confiables de baja latencia - <i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i> . i–iii , v–viii , 1–5 , 7 , 12–14 , 20 , 22–30 , 32–38 , 40 , 41 , 45 , 46 , 48–54 , 56–58 , 63 , 64 , 67–71 , 73–85 , 87–90
eMBB	Banda ancha móvil mejorada - <i>Enhance Mobile Broadband</i> . i–iii , v–viii , 1–5 , 7 , 12–14 , 20 , 22–30 , 32–38 , 40 , 41 , 45 , 48 , 53 , 67–71 , 73 , 74 , 76 , 77 , 87–90
mMTC	Comunicaciones masivas de tipo máquina - <i>Massive Machine Type Communications</i> . i–iii , v–viii , 1–5 , 7 , 12–14 , 20 , 22–30 , 46 , 48–54 , 56–58 , 63 , 64 , 67 , 77–85 , 87–90
1G	Redes de Primera generación - <i>First-Generation Networks</i> . 8
2G	Redes de Segunda generación - <i>Second-Generation Networks</i> . 8 , 10 , 12
3G	Redes de Tercera generación - <i>Third-Generation Networks</i> . 8 , 10 , 11
4G	Redes de Cuarta generación - <i>Fourth-Generation Networks</i> . 7 , 8 , 10–13
5G	Redes de Quinta generación - <i>Fifth-Generation Networks</i> . i–iii , v–viii , 1–3 , 5 , 7 , 8 , 10–16 , 18–28 , 32 , 33 , 48 , 67 , 71 , 73 , 76 , 77 , 80 , 84 , 85 , 87–91
QoS	Calidad de servicio - <i>Quality of Service</i> . i , ii , v–viii , 2 , 3 , 5 , 10–12 , 14 , 16 , 19 , 20 , 23–25 , 27 , 28 , 33–35 , 49 , 50 , 68 , 74 , 77 , 78 , 80 , 81 , 84 , 85 , 87–89
NS	Segmentación de Red - <i>Network Slicing</i> . i–iii , v–viii , 2 , 3 , 5 , 7 , 14–18 , 20 , 23–30 , 33–35 , 37–39 , 41 , 43 , 45 , 47 , 49–53 , 55 , 57–59 , 61 , 62 , 67–74 , 76–85 , 87–90

SN	Red Compartida - <i>Shared Network</i> . i , v , vii , 27–30 , 33–35 , 37–39 , 41 , 45 , 49–53 , 55 , 57 , 58 , 61 , 62 , 67–73 , 77–79 , 81 , 85 , 88 , 89
KKT	Karush-Kuhn-Tucker. 36
BR	Mejor respuesta - <i>Best Response</i> . ii , vi , viii , 38 , 46 , 54 , 63–65 , 89
IoT	Internet de las Cosas - <i>Internet of Things</i> . 3 , 11 , 13 , 14 , 17 , 22
ITU	Unión Internacional de Telecomunicaciones - <i>International Telecommunication Union</i> . 1 , 9 , 12
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo - <i>Time-Division Multiple Access</i> . 8
FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia - <i>Frequency-Division Multiple Access</i> . 8
GPS	Sistema de Posicionamiento Global - <i>Global Positioning System</i> . 8
QoE	Calidad de Experiencia - <i>Quality of Experience</i> . 8 , 11
MVNO	Operador de Red Virtual Móvil - <i>Mobile Virtual Network Operator</i> . 10 , 11 , 24
WLAN	Red de Área Local Inalámbrica - <i>Wireless Local Area Network</i> . 11
BS	Estación Base - <i>Base Station</i> . 11 , 13
LTE	Evolución a Largo Plazo - <i>Long Term Evolution</i> . 11
RAN	Red de Acceso de Radio - <i>Radio Access Network</i> . 12 , 15 , 17
MIMO	Entradas Múltiples, Salidas Múltiples - <i>Multiple-Input, Multiple-Output</i> . 12
AR	Realidad Aumentada - <i>Augmented Reality</i> . 13 , 17 , 22
VR	Realidad Virtual - <i>Virtual Reality</i> . 13 , 17 , 22
UAV	Vehículos Aéreos no Tripulados - <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> . 13
3GPP	Proyecto Asociación de Tercera Generación - <i>3rd Generation Partnership Project</i> . 14
SDN	Red Definida por Software - <i>Software Defined Networking</i> . 14 , 16 , 19
NFV	Virtualización de Funciones de Red - <i>Network Function Virtualization</i> . 14 , 16 , 19 , 21
NGMN	Redes Móviles de Próxima Generación - <i>Next Generation Mobile Networks</i> . 14 , 15
5G-PPP	Asociación público-privada de la Infraestructura 5G - <i>5G Infrastructure Public Private Partnership</i> . 14
CN	Red Principal - <i>Core Network</i> . 15
E2E	Extremo a Extremo - <i>End-to-End</i> . 15 , 16 , 20
SLA	Acuerdo de Nivel de Servicio - <i>Service Level Agreement</i> . 16

Cloud Computing	Computación en la Nube. 16 , 17 , 19
Edge Computing	Computación en el Borde. 16 , 17
SP	Proveedor de Servicio - <i>Service Provider</i> . 16
InP	Proveedor de Infraestructura - <i>Infrastructure Provider</i> . 16 , 19
SaaS	Software como Servicio - <i>Software as a Service</i> . 17
PaaS	Plataforma como Servicio - <i>Platform as a Service</i> . 17
IaaS	Infraestructura como Servicio - <i>Infrastructure as a Service</i> . 17
XaaS	Todo como servicio - <i>Anything as a Service</i> . 19
VM	Máquina Virtual - <i>Virtual Machine</i> . 17
OS	Sistema Operativo - <i>Operating System</i> . 17
D2D	Dispositivo a Dispositivo - <i>Device to Device</i> . 17
OFDMA	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencias - <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> . 17
NOMA	Acceso Múltiple no Ortogonal - <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> . 17
AI	Inteligencia Artificial - <i>Artificial Intelligence</i> . 19
ML	Aprendizaje Automático - <i>Machine Learning</i> . 19
IP	Protocolo de Internet - <i>Internet Protocol</i> . 19
OTT	Libre Transmisión - <i>Over the Top</i> . 19 , 22
CMC	Cuadro del Modelo de la Ciudad. 19
CAPEX	Gasto de Capital - <i>Capital Expenditure</i> . 20
OPEX	Gasto Operativo - <i>Operational Expenditure</i> . 20
DPS	Reparto Discriminatorio del Procesador - <i>Discriminatory Processor Sharing</i> . 24
MTC	Comunicaciones de Tipo Máquina - <i>Machine Type Communications</i> . 25
HTC	Comunicaciones de Tipo Humano - <i>Human Type Communications</i> . 25
FIFO	Primero en entrar, Primero en salir - <i>First In, First Out</i> . i , v , vii , 28 , 77 , 85 , 88
SW	Bienestar Social - <i>Social Welfare</i> . 32 , 39 , 67 , 89
CS	Excedente de Consumidor - <i>Costumer Surplus</i> . 32 , 38 , 39 , 54
WiFi	Fidelidad Inalámbrica - <i>Wireless Fidelity</i> . 9
Big Data	Datos Masivos. 11
M2M	Máquina a Máquina - <i>Machine to Machine</i> . 12
WAN	Red de Área Amplia - <i>Wide Area Network</i> . 14

NOMENCLATURA

Términos Comunes

z	Todas las variables con el superíndice “ z ” representan el valor de dichas variables en el caso óptimo en el modelo de negocio z
U_{uy}	Utilidad del usuario URLLC en el escenario y
Q_{uy}	Calidad de servicio percibida por el usuario URLLC en el escenario y
ϵ_u	Umbral de retardo del servicio URLLC
λ_u	Tasa de llegada individual de paquetes URLLC al sistema
n_{uy}^z	Número de usuarios URLLC en el escenario y para el modelo de negocio z
k_u	Factor de conversión monetaria para el servicio URLLC
μ	Tasa media de servicio
α	Factor de utilización de la capacidad de la red
p_{uy}^z	Precio del servicio URLLC en el escenario y para el modelo de negocio z
BR_u	Mejor respuesta del operador URLLC
Π_{uy}^z	Beneficio obtenido por el servicio URLLC en el escenario y para el modelo de negocio z
Π_y^z	Beneficio total del modelo de negocio z en el escenario y
SW_y^z	Bienestar social en el escenario y para el modelo de negocio z

Caso: URLLC y eMBB

U_{ey}	Utilidad del usuario eMBB en el escenario y
Q_{ey}	Calidad de servicio percibida por el usuarios eMBB en el escenario y
N_e	Número de usuarios eMBB suscritos al servicio eMBB

k_e	Factor de conversión monetaria para el servicio eMBB
λ_{ey}^z	Tasa de llegada individual de paquetes eMBB al sistema en el escenario y para el modelo de negocio z
Λ_{uy}^z	Tasa URLLC agregada en el escenario y para el modelo de negocio z
Λ_{ey}^z	Tasa agregada de eMBB en el escenario y para el modelo de negocio z
p_{ey}^z	Precio del servicio eMBB en el escenario y para el modelo de negocio z
π_{ey}^z	Precio por paquete eMBB en el escenario y para el modelo de negocio z
BR_e	Mejor respuesta del operador de eMBB
Π_{ey}^z	Beneficio obtenido por el servicio eMBB en el escenario y para el modelo de negocio z
CS_{uy}^z	Excendente de los usuarios URLLC en el escenario y para el modelo de negocio z
CS_{ey}^z	Excendente de los usuarios eMBB en el escenario y para el modelo de negocio z
CS_y^z	Excendente total de los usuarios en el escenario y para el modelo de negocio z

Caso: URLLC y mMTC

U_{my}	Utilidad del usuario mMTC en un escenario y
Q_{my}	Calidad de servicio percibida por el usuarios mMTC en el escenario y
ϵ_m	Umbral de retardo para el servicio mMTC
n_{my}^z	Número de usuarios mMTC en el escenario y para el modelo de negocio z
k_m	Factor de conversión monetaria para el servicio mMTC
λ_m	Tasa de llegada individual de los paquetes mMTC al sistema
p_{my}^z	Precio del servicio mMTC en el escenario y para el modelo de negocio z
BR_m	Mejor respuesta del operador mMTC
Π_{my}^z	Beneficio obtenido por el servicio mMTC en el escenario y para el modelo de negocio z