

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale

In Ingegneria Gestionale

Tesi di laurea Magistrale

Il principio di neutralità della rete: valutazione delle implicazioni socioeconomiche attuali e possibili sviluppi futuri alla luce delle caratteristiche della tecnologia 5G



Relatore

Prof. Carlo Cambini

Candidato

Francesco Claudio Gallo

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Introduzione	1
1 La rete Internet: introduzione generale alla sua architettura.....	3
1.1 Le diverse architetture di rete: packet switching e circuit switching networks	4
1.1.1 Circuit switching network	4
1.1.2 Packet switching network.....	5
1.1.3 Punti di forza e di debolezza delle due tipologie di network.....	6
1.2 I parametri fondamentali per la misurazione delle performance della rete.....	7
1.3 Le diverse tipologie di trasmissione dei dati	9
1.3.1 Architettura client-server.....	9
1.3.2 Architettura Peer-to-Peer.....	10
1.3.3 Content delivery network.....	11
1.4 L'architettura della rete e i suoi attori principali.....	12
1.4.1 Flussi economico-finanziari tra i diversi attori di Internet.....	14
1.5 Principali tipologie di applicazioni e requisiti di rete richiesti.....	16
1.5.1 Logica di trasmissione dei dati attraverso Internet	18
1.5.2 L'algoritmo di Jacobson	19
1.5.3 I fenomeni di jitter e la capacità della rete	20
1.6 I concetti di Quality of Service e di Quality of Experience nell'ecosistema di Internet.....	22
1.7 Il management della trasmissione dei dati in rete	24
1.7.1 Sistemi di gestione della rete Protocol Specific	25
1.7.1.1 Integrated Services	27
1.7.1.2 Differentiated service.....	29
1.7.2 Sistemi di gestione della rete Protocol Agnostic	30
1.7.3 Le principali differenze tra i modelli di management della rete.....	31
1.7.3.1 La critica principale al modello QoS.....	32
1.7.3.2 La QoS nelle reti wireless	35
2 Il principio di neutralità della rete	38
2.1 La neutralità dell'intero ecosistema Internet.....	38
2.1.1 La neutralità dei content provider	39
2.1.2 La neutralità dei dispositivi.....	41
2.2 La questione della neutralità della rete	43
2.2.1 Strict net neutrality.....	44
2.2.1.1 Principali episodi di violazione della strict net neutrality	48
2.2.2 Net neutrality estesa	49
2.3 Modelli analitici della net neutrality.....	52
2.3.1 Principale modello economico per l'analisi della struttura di rete.....	53
2.3.2 Modelli analitici di infrazione della neutralità ristretta della rete.....	54
2.3.2.1 L'integrazione verticale degli ISP e la neutralità ristretta della rete	56
2.3.3 Modelli analitici di infrazione della neutralità della rete allargata.....	59
2.3.3.1 Termination fee e la neutralità della rete	59
2.3.3.2 Offerta di differenti tipologie di qualità del servizio	70
2.4 La questione degli investimenti e della neutralità della rete.....	90
2.4.1 Ipotesi del modello	91

2.4.2	Applicazione del principio di neutralità della rete.....	94
2.4.2.1	Definizione delle funzioni di utilità e profitto nel mercato	95
2.4.2.2	Derivazione delle funzioni di domanda in condizione di NN.....	96
2.4.2.3	Condizioni di equilibrio del mercato in regime di neutralità della rete	97
2.4.3	Abolizione del principio di neutralità della rete	100
2.4.3.1	Determinazione delle funzioni di utilità e di profitto in assenza di neutralità	100
2.4.3.2	Derivazione delle funzioni di domanda in condizione di NNN	100
2.4.3.3	Condizioni di equilibrio nel mercato con presenza di termination fee	101
2.4.4	Confronto dei livelli di investimento nell'infrastruttura di rete	104
2.4.5	Dimostrazione delle condizioni del secondo ordine per i punti di equilibrio individuati	106
3	<i>La normativa europea relativa alla neutralità della rete</i>	110
3.1	Articolo 3: Salvaguardia dell'accesso ad un'Internet aperta.....	110
3.2	Articolo 4: Misure di trasparenza per assicurare l'accesso a un'Internet aperta	118
3.3	Articolo 5: Vigilanza e applicazione	120
4	<i>La rete 5G</i>	121
4.1	Requisiti di <i>performance</i> e principali applicazioni della rete 5G	121
4.1.1	Requisiti complementari della rete	123
4.1.2	Performance tecniche della rete 5G.....	125
4.2	Nuovi principi di progettazione	126
4.3	Elementi principali hardware e software della rete 5G	127
4.3.1	Panoramica dell'architettura e dei principali <i>layer</i> della rete 5G.....	128
4.3.2	Interazione dei diversi <i>layer</i> e funzionamento base della rete	132
4.4	Tecnologie abilitanti e frequenze della rete 5G.....	135
4.4.1	Le nuove frequenze utilizzate nella rete 5G	135
4.4.1.1	Le frequenze in Italia.....	138
4.4.2	Network slicing nella rete 5G	139
4.4.3	L'infrastruttura radio della rete 5G	141
4.4.4	Massive MIMO e beamforming.....	145
4.4.5	Full duplex e polarizzazione.....	147
4.4.6	Comunicazione device to device (D2D)	148
5	<i>Fattori di incompatibilità tra la normativa della neutralità della rete e la tecnologia 5G</i>	152
5.1	Il problema relativo alle condizioni di fornitura dei servizi ottimizzati	152
5.2	I fattori di incompatibilità tecnologica.....	154
	<i>Conclusioni</i>	157
	<i>Appendice</i>	160
	Tabella riassuntiva delle pubblicazioni esaminate sul tema della neutralità della rete ...	160
	<i>Bibliografia.....</i>	163

Lista acronimi e abbreviazioni

AN	<i>Access Network</i>
CP	<i>Control Plane</i>
MEC	<i>Multy Access Edge Computing</i>
mMTC	<i>Massive Machine-type communications</i>
NFV	<i>Network Function Virtualization</i>
SBA	<i>Service Based Architecture</i>
SDN	<i>Software-Defined Networking</i>
uMTC	<i>Critical Machine-type communications</i>
UP	<i>User Plane</i>
XMBB	<i>Massive Broadband</i>
D2D	<i>Device to device communication</i>
MN	<i>Moving Network</i>
QoE	<i>Quality of experience</i>
M2M	<i>Communication machine to machine</i>
QoS	<i>Quality of service</i>
ProSe	<i>Proximity service</i>
VoV	<i>Communication vehicle to vehicle</i>
OTT	<i>Over the Top</i>
CDN	<i>Content delivery network</i>
RAT	<i>Radio access technology</i>

Tabella 1: lista di acronimi e abbreviazioni più utilizzati

Introduzione

Nel corso degli ultimi anni Internet ha assunto un ruolo centrale nell'economia globale trasformandosi, da semplice rete di interscambio di dati tra Università, a piattaforma universale di intrattenimento, business e informazione. Di riflesso, l'evoluzione della rete ha determinato un cambio radicale nel ruolo degli *Internet provider*, convertendoli, da semplici fornitori del servizio di connessione, a *gatekeeper* fondamentali della società digitale. Il pericolo generato dal crescente potere detenuto dagli *Internet provider* ha acceso un serrato dibattito rispetto al principio di neutralità della rete, sfociato, in molti paesi, nell'emanazione di leggi e regolamenti volti alla tutela del principio di neutralità. La crescita continua del traffico trasmesso, congiuntamente all'imposizione di offrire un servizio di connessione *best effort*, ha causato una diminuzione dell'efficienza generale della trasmissione, richiedendo un continuo investimento nell'infrastruttura da parte degli *Internet provider*. A causa del principio di neutralità inoltre, i costi di investimento sostenuti da parte dei fornitori del servizio di connessione non sono stati condivisi con i *content provider*, i quali sono stati accusati dagli ISP di utilizzare gratuitamente l'infrastruttura di rete senza contribuirne in alcun modo al suo sviluppo.

Questo lavoro si pone come obiettivo l'analisi della necessità di applicazione di una normativa volta a tutelare il principio di neutralità della rete alla luce della tecnologia esistente e dei suoi sviluppi futuri, con particolare riferimento all'implementazione dei sistemi di comunicazione basati sulla tecnologia 5G. Nello specifico, la prima parte del lavoro è dedicata alla discussione e alla presentazione delle principali caratteristiche della rete Internet e delle interazioni sviluppate tra i suoi principali attori. In seguito, lo studio si focalizza sul principio di neutralità della rete, esaminando le pubblicazioni e i modelli economico-matematici più rilevanti sul tema. Segue un'analisi approfondita della tematica delle performance della rete, dove viene presentato un modello economico sviluppato per dimostrare la crescita degli incentivi all'investimento nell'infrastruttura da parte degli Internet provider in caso di abolizione del principio di neutralità. Il quarto capitolo è interamente dedicato alla presentazione della normativa europea volta a tutelare il principio di neutralità della rete. Infine, i capitoli conclusivi sono dedicati all'introduzione delle principali innovazioni introdotte dalla tecnologia 5G

e alla discussione del potenziale conflitto tra la normativa europea in materia di neutralità della rete e lo sviluppo dei sistemi di comunicazione di ultima generazione.

1 La rete Internet: introduzione generale alla sua architettura

Per comprendere approfonditamente la problematica della *net neutrality*, tema centrale del prossimo capitolo, è necessario discutere anteriormente le principali caratteristiche di funzionamento della rete. Da un punto di vista generale, l'obiettivo di questo capitolo è dunque quello di fornire le nozioni necessarie a sviluppare una visione completa sia degli attori che dei meccanismi principali che governano l'articolato ecosistema di Internet. A questo proposito, nei prossimi paragrafi sono approfondite le principali tipologie di *network* maggiormente utilizzate, approfondendo i punti di forza e di debolezza delle reti caratterizzate da un'architettura a *packet switching* e a *circuit switching*. Successivamente, sono presentate le principali grandezze per la misurazione e il controllo delle performance della rete, introducendo i criteri di larghezza di banda, *volume*, *latency* e *jitter*.

Nella parte centrale del capitolo sono introdotti i principali attori che formano l'ecosistema della rete, argomento essenziale per una corretta comprensione della struttura di mercato e dei flussi di pagamento esistenti tra le parti interessate. In seguito, sono analizzate le diverse architetture di trasmissione dei dati e sono introdotte le principali applicazioni utilizzate nel Web, proponendone una classificazione basata sui requisiti di rete richiesti e sui differenti gradi di sensibilità ai fenomeni di congestione della rete.

Infine, l'ultima parte del capitolo tratta dei concetti di QoS e di QoE nella rete, effettuando una rapida analisi delle diverse tecniche di *network management* esistenti, discutendo in particolare gli approcci *Integrated service* e *Differentiated service*. Gli ultimi due paragrafi sono dedicati rispettivamente all'analisi delle principali critiche ai sistemi di *network management* e alla discussione delle criticità tecnologiche di trasmissione dei *file* introdotte dalle reti *wireless*.

1.1 Le diverse architetture di rete: *packet switching e circuit switching networks*

Da un punto di vista generale è possibile dividere in due macro-categorie le tipologie di *network* che permettono la comunicazione e lo scambio di informazioni tra gruppi molto numerosi di dispositivi: quelli sviluppati attraverso un'architettura a *packet switching* e quelli caratterizzati da una struttura a *circuit switching*.

Da un punto di vista storico i *circuit switching network* sono stati sviluppati per l'implementazione della rete telefonica classica, con il conseguente obiettivo di permettere la comunicazione vocale e in tempo reale tra coppie di apparecchi posti a grande distanza tra loro. Lo sviluppo di questa tipologia di rete è stato quindi guidato dalla necessità di effettuare connessioni caratterizzate da un elevato grado di affidabilità e con una durata media delle conversazioni dell'ordine di qualche minuto¹.

Al contrario, l'esempio più rilevante di un *packet switching network* è la rete internet, sviluppata dalle ceneri di ARPANET alla fine degli anni 60² con l'obiettivo di permettere il rapido e continuo interscambio di pacchetti di informazioni tra diverse università della costa occidentale degli Stati Uniti (Corinto, 2016).

Chiaramente le due architetture si basano su tecnologie molto differenti tra loro e presentano, di conseguenza, differenti punti di forza e di debolezza.

1.1.1 *Circuit switching network*

Per quanto riguarda il funzionamento delle reti *circuit switching* per consentire lo scambio di informazioni tra due nodi finali è necessario, antecedentemente l'inizio dello scambio dei pacchetti di informazione, identificare un canale (o circuito) libero nella rete³. Da un punto di vista tecnico, una parte fissa delle risorse dell'infrastruttura della

¹ L'architettura *circuit switching* è ideale per essere implementata in connessioni dalla considerevole durata, come ad esempio quelle telefoniche, risulta chiaro come lo stesso approccio non sia utilizzabile nella connessione di una rete che richiede la connessione frequente di un numero elevato di consumatori per un lasso di tempo ristretto. Paradossalmente se si utilizzasse una struttura a *circuit switching* per la rete Internet il tempo di attesa per la creazione del circuito tra i differenti nodi della rete risulterebbe in molti casi maggiore del tempo stesso di scambio di informazioni.

² L'idea di scambiare pacchetti di informazioni tra diversi nodi di un *network* è stata sviluppata in maniera indipendente negli Stati Uniti da Paul Baran e la RAND Corporation all'inizio degli anni 60' e in Inghilterra da Donald Davis nel *National Physical Laboratory*.

³ Utilizzando una rete telefonica infatti l'inizio della conversazione tra due consumatori richiede necessariamente un tempo di attesa. Gli *switch* della rete infatti, prima di poter avviare la connessione devono verificare la disponibilità di un circuito libero nella rete.

rete deve essere quindi allocata per ogni nuova comunicazione, risultando non disponibile per tutto il tempo in cui la connessione rimane aperta. Questo è il motivo principale per il quale la rete telefonica fissa garantisce solamente un numero limitato di connessioni contemporanee e, generalmente, non permette la connessione di più di due dispositivi alla volta. Nel momento in cui si verifica un picco di chiamate, infatti, e tutte le risorse della rete risultano temporaneamente occupate, il consumatore riceve un messaggio di “rete occupata” e non gli è consentito accedere al servizio.

Al contrario, quando il numero di chiamate è inferiore alla massima capacità della rete, i circuiti rimasti inutilizzati rimangono in attesa della richiesta di una nuova connessione e non possono essere dinamicamente riallocati sulle chiamate attive, rimanendo, di fatto, inutilizzati⁴.

1.1.2 *Packet switching network*

L’architettura e la filosofia alla base delle reti *packet switching* risulta essere radicalmente differente rispetto alla precedente. Semplificando il più possibile la trattazione, si può affermare che utilizzando questa tipologia di architettura i dati che si desiderano inviare sono suddivisi in pacchetti di informazioni più piccoli a cui è associato un indirizzo IP prima di essere inviati nella rete. Una volta inviati, grazie al protocollo TCP/IP⁵, sono smistati dai diversi nodi, definiti *router*⁶, della rete fino a giungere alla destinazione desiderata dove l’informazione originaria viene ricostruita. Grazie a questa architettura è quindi possibile allocare le risorse della rete in maniera dinamica nel tempo, non essendo necessario stabilire una connessione dedicata per ogni trasmissione. Questo significa che se solo pochi utilizzatori sono connessi alla rete questi

⁴ Un fax trasmesso utilizzando la rete telefonica fissa infatti richiede lo stesso tempo di invio e ricezione indipendentemente dall’ora e dal numero di connessioni attive nel momento in cui è spedito.

⁵ Volendo solo fornire un’idea generale del funzionamento del protocollo TCP/IP e rimandando il lettore alla lettura di testi specifici per uno studio più approfondito sull’argomento, è possibile affermare che il protocollo TCP gira sui dispositivi posti ai nodi finali della rete (come i computer, le stampanti e i web server), mentre il protocollo IP gira sui dispositivi interni all’infrastruttura di rete (come i router). I dispositivi finali hanno generalmente il compito di gestire la velocità e la frequenza di trasmissione dei dati e di correggere eventuali errori di trasmissione, mentre i *router* stabiliscono il percorso ottimale dei pacchetti di informazione attraverso la rete.

⁶ Con il termine *router* ci si riferisce ad una componente *hardware* dell’infrastruttura di rete progettata per ricevere analizzare e smistare i pacchetti di informazioni inviati tra le diverse parti del *network*.

possono sfruttare un elevato numero di risorse, mentre, nel caso siano richieste un numero molto elevato di connessioni contemporanee, le risorse disponibili sono automaticamente divise tra i vari utilizzatori in maniera equa, rallentando la velocità di trasmissione delle singole connessioni⁷, ma permettendo a tutti i dispositivi di rimanere collegati alla rete. Inoltre, questa tipologia di network, a differenza del *circuit switching* permette connessioni multiple tra i dispositivi e di rimanere costantemente collegati alla rete.

1.1.3 Punti di forza e di debolezza delle due tipologie di *network*

Chiaramente le due differenti architetture di *network*, sfruttando tecnologie profondamente diverse tra loro, presentano punti di forza e di debolezza distinti. Se da una parte le reti *circuit switching* presentano un elevato grado di affidabilità e di omogeneità delle *performance* offerte, rendendole ideali per la comunicazione telefonica e per i servizi di teleconferenza, dall'altro sono caratterizzate da un elevato grado di sottoutilizzo delle risorse disponibili⁸ (Ou, 2008). Questa caratteristica implica un generale sovradimensionamento dell'infrastruttura di base, in particolar modo nel caso di una richiesta di servizio molto altalenante nel tempo, come si verifica generalmente per i servizi di comunicazione.

Le reti *packet switching*, invece, hanno la caratteristica di essere estremamente versatili presentando, allo stesso tempo, un fattore di utilizzo molto elevato delle risorse, dato che è possibile allocarle dinamicamente a seconda del numero di utenti attivi in un determinato istante. Questa peculiarità le rende ottime per l'impiego in un contesto caratterizzato dalla richiesta di un numero molto elevato di connessioni dalla durata

⁷ Come sarà analizzato in seguito da un punto di vista teorico le risorse di rete dovrebbero essere dinamicamente allocate in maniera equa tra i vari utilizzatori, tuttavia, sebbene ogni flusso di informazioni riceva una parte equa di banda, è possibile che singoli utenti nella complessità del traffico generato consumino più banda di altri.

⁸ Il sottoutilizzo medio delle risorse può essere imputato in larga misura al sovradimensionamento dell'infrastruttura effettuato per soddisfare le esigenze dei consumatori negli orari di punta di richiesta del servizio di telefonia. Dato l'elevato costo infrastrutturale della rete, inoltre, e gli ingenti investimenti sostenuti dai fornitori del servizio, le compagnie telefoniche fisse erano solite richiedere il pagamento di una *fee* fissa per ogni chiamata effettuata. In Italia questa pratica è conosciuta come "scatto alla risposta" e rappresenta un costo di connessione fisso addebitato al consumatore al momento dell'interconnessione con il proprio interlocutore. Risulta chiaro come un tale approccio, data la differente natura di servizio, non possa essere replicato nella rete Internet.

ridotta, in cui si assiste ad un elevato volume di informazioni scambiate. Gli aspetti negativi di questa tipologia di network sono legati alla bassa affidabilità e costanza delle *performance* offerte, che risultano estremamente legata al volume del traffico presente nella rete.

1.2 I parametri fondamentali per la misurazione delle performance della rete

Per comprendere in profondità le problematiche legate al management delle reti e analizzare criticamente la questione della neutralità della rete è necessario introdurre alcune grandezze fondamentali introdotte per misurare le performance di un network (DeCarlo, 2018).

Definizione 1: si definisce *larghezza di banda*, in inglese *bandwidth*, la quantità di dati che possono essere trasmessi attraverso un determinata infrastruttura di rete. Facendo un paragone idraulico è possibile immaginare la larghezza di banda come la portata di una tubatura, maggiore è il diametro maggiore è la quantità di acqua (e quindi di informazioni) che può essere trasportata tra due punti differenti della linea. Risulta immediato comprendere come in uno stesso lasso di tempo una rete caratterizzata da una maggior larghezza di banda riesce a trasmettere un numero maggiore di informazioni rispetto ad una seconda rete con una banda inferiore. La larghezza di banda si misura generalmente in *bps (bits per second)*.

Definizione 2: si definisce *volume* la larghezza media di banda disponibile moltiplicata per un periodo di tempo t . Si faccia attenzione a non confondere i concetti di larghezza di banda con volume. Ad esempio, una applicazione può richiedere molta banda per il suo funzionamento ma consumare un basso volume in quanto la trasmissione dei dati necessita di un tempo molto limitato. Al contrario, trasmissioni molto prolungate, anche se richiedono una larghezza di banda limitata, possono impiegare volumi rilevanti.

Definizione 3: si definisce ritardo o *delay* il tempo necessario a trasmettere un pacchetto di informazioni tra due nodi distinti della rete. Da un punto di vista generale è possibile suddividere il ritardo in due componenti principali: la latenza, o *latency*, e il *jitter* (Agusto, García, & Díaz, 2017). In particolare, con il termine latenza si intende il tempo che impiega un pacchetto di informazioni a percorrere la distanza fisica tra il nodo iniziale e finale della rete in una situazione di completa assenza di traffico nell'infrastruttura. In altre parole, questo tempo può essere considerato come il limite massimo di velocità a cui un pacchetto può viaggiare tra due punti prestabiliti, data l'infrastruttura e la tecnologia a disposizione.

Con *jitter*, invece, si misura la componente di ritardo direttamente imputabile a fenomeni di congestione della rete, e dunque variabili in relazione al volume di traffico trasmesso in un determinato istante di tempo. In particolare, fenomeni di elevato *jitter* normalmente si verificano quando una parte della rete con una maggiore larghezza di banda confluisce in una seconda parte che presenta una larghezza di banda inferiore⁹, ed è quindi caratterizzata da una minore capacità di trasmissione dei dati. Chiaramente lo stesso fenomeno può verificarsi nel caso in cui diversi *link* del medesimo *network* confluiscono in un unico *link* finale. Quando si verificano queste situazioni è molto probabile che nelle ore di punta di utilizzo della rete i *router* e gli *switch*¹⁰ dell'infrastruttura risultino sovraccaricati e non riescono a smaltire la mole di informazioni che ricevono in entrata. Dato che i pacchetti non riescono ad essere immediatamente trasmessi al loro arrivo nei vari nodi della rete, vengono immagazzinati in appositi *buffer* in attesa di essere smistati nella rete. Questo tempo di attesa dei

⁹ Un classico esempio di questa problematica è rappresentato dalla cosiddetta fibra FTTC (*fiber to the cabinet*) molto diffusa in Italia, in cui la fibra ottica viene portata fino alla cabina dell'operatore presente in strada. Da qui si dipartono le singole connessioni in rame che collegano le case e gli uffici serviti da una singola cabina. Chiaramente la banda a disposizione per la trasmissione del segnale nella fibra ottica è nettamente superiore a quella disponibile nel doppino in rame, causando, di fatto, un imbuto nella capacità di trasmissione del segnale dell'infrastruttura.

¹⁰ Uno *switch* è un elemento hardware di un *network* che consente il collegamento di più dispositivi (computer, stampanti, server, etc.) su una stessa rete, rendendo possibile quindi lo scambio e la condivisione di informazioni tra i diversi dispositivi collegati. Da un punto di vista generale è possibile affermare che i *router* consentono la comunicazione tra reti differenti mentre gli *switch* permettono la comunicazione tra i vari dispositivi collegati ad una singola rete.

pacchetti, misurabile nell'ordine dei ms, causa delle micro-congestioni della rete sufficienti ad abbassare la qualità del servizio di applicazioni *real-time*¹¹.

Si faccia attenzione che i tre parametri descritti in precedenza sono indipendenti tra loro e possono agire in maniera autonoma¹².

1.3 Le diverse tipologie di trasmissione dei dati

Un altro tassello di fondamentale importanza per la comprensione dei fenomeni di congestione della rete è quello delle diverse architetture disponibili per la trasmissione dei dati nel *network*. Questo argomento è rilevante soprattutto per quanto riguarda il flusso di informazioni e le scelte di *network management* per la gestione della capacità di trasmissione della rete. Risulta immediato comprendere come differenti tipologie di trasmissione dei dati implicano infatti differenti volumi di traffico e richiedono investimenti e tecnologie molto diverse tra loro.

1.3.1 Architettura *client-server*

L'architettura *client-server* storicamente è stata la prima ad essere utilizzata per la trasmissione dei file attraverso Internet. Questa tecnologia si basa fondamentalmente su due protocolli: il *Transfer Protocol* (FTP) e il *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP). Da un punto di vista generale, l'architettura è formata da un server principale, che ha il compito di effettuare lo *storage* e l'*upload* dei dati e una serie di *client*, che richiedono di scaricare ed usufruire dei dati messi a disposizione dal server collegato in rete¹³. È

¹¹ Come sarà analizzato più dettagliatamente in seguito, con applicazioni *real-time* si intendono tutte quelle applicazioni la cui qualità del servizio offerto si deteriora in maniera molto rapida al presentarsi di fenomeni di congestione della rete e di *jitter*, come ad esempio: VoIP, applicazioni di videoconferenza e videochiamata, giochi online, etc.

¹² A titolo esemplificativo, una rete caratterizzata da un'elevata larghezza di banda può presentare un elevato ritardo causato da fenomeni di *jitter* rilevanti. Viceversa, una rete con una larghezza di banda limitata può presentare bassi fenomeni di ritardo grazie a una richiesta di trasmissione di un numero limitato e continuo di pacchetti nel tempo, nonostante il volume trasmesso sia complessivamente rilevante.

¹³ Alcuni esempi classici di questa architettura sono i server web e i servizi di posta elettronica. Attraverso un browser un client effettua una richiesta di dati ad un determinato server web il quale elabora la richiesta ricevuta ed invia i dati richiesti al client.

immediato comprendere come l'architettura *client-server* sia estremamente accentrata verso il *server* che risulta essere essenziale per la continuità delle trasmissioni. Nel caso in cui il *server* risultasse offline o smettesse di funzionare, infatti, tutta la rete rimarrebbe bloccata. Chiaramente le performance di questa particolare architettura dipendono in larga misura dalla capacità di *upstream upload* del *server*, in quanto deve rispondere alle richieste di un numero elevato di client¹⁴. Anche dal punto di vista della scalabilità questa soluzione risulta particolarmente onerosa in quanto i costi della componente *hardware* del *server* e le *fee* da pagare per usufruire della banda in *upload* risultano onerose.

1.3.2 Architettura Peer-to-Peer

L'architettura *peer-to-peer*, a differenza di quella *client-server*, risulta essere molto più decentralizzata e risolve gran parte delle problematiche di scalabilità e di costo che caratterizzano l'architettura precedente. In questo caso il *server* è chiamato in gergo tecnico *seed*, mentre i client sono detti *peer*. La peculiarità di questa architettura è che i *peer*, una volta ricevuti i dati richiesti, possono agire loro stessi da *server* inviando i dati ricevuti a nuovi *peer*, moltiplicando di fatto il numero di fonti da cui è possibile ricevere una determinata informazione. Questa caratteristica permette di avere un'elevata resilienza del sistema, non esistendo, di fatto, elementi essenziali per l'operatività della rete. Gli aspetti negativi di questa architettura, invece, come sarà analizzato più in dettaglio in seguito, dipendono in larga misura dal moltiplicarsi del traffico nell'infrastruttura. Per ogni *peers* aggiuntivo, infatti, si aggiunge un nuovo flusso in *upload* nella linea. Si può quindi affermare che questa particolare architettura, sebbene sia molto efficiente dal punto di vista della velocità e della distribuzione dell'informazione, non lo è dal punto di vista generale della rete. Se da un lato è possibile

¹⁴ Il *server* può essere fondamentalmente di due tipologie: *unicast* o *multicast*. Nel caso di un *server multicast* questo può rispondere contemporaneamente a più client. Tuttavia, è bene precisare come la capacità di *upstream upload* rimane costante. All'aumentare del numero di risposte allora si verifica che il volume totale di dati trasmesso rimane invariato.

abbattere notevolmente sia i costi¹⁵ di investimento che quelli operativi dei *content provider*¹⁶, dall'altro si verifica un aumento dei costi degli ISP, soprattutto quelli di dimensioni più ridotte causato dall'aumento del traffico e dai problemi di congestione della rete che ne derivano. Un ulteriore aspetto negativo di questa architettura è riconducibile alla mancanza di ordine nell'invio dei pacchetti di informazioni che dunque non sono utilizzabili fino a quando l'intera trasmissione dei dati non è terminata¹⁷.

1.3.3 Content delivery network

Nel corso dei precedenti paragrafi si è visto come l'architettura *client-server* presenti alti costi di sviluppo e una scalabilità molto onerosa per i *content provider*. Basti pensare che un server *multicast* con 100Mbps di capacità di upload riesce, in condizioni di infrastruttura di rete non congestionata, a distribuire le richieste di 100 *client* a 1 Mbps. Se i client aumentano a 320 la capacità si riduce a 0,31Mbps, sufficiente a mala pena alla visione di un video in bassa risoluzione di *You Tube* (Ou, 2008). Risulta chiaro come, dato il continuo aumento di contenuti video *streaming* richiesti nella rete, che ci si aspetta raggiungano 1,3 milioni di utilizzatori nel 2025 (Outlooks: Video streaming (SVoD), 2020), l'architettura *client-server* risulti inadeguata a servire una crescita del mercato così rapida e richiederebbe ad aziende di *video sharing* come *Netflix* consistenti investimenti infrastrutturali per offrire un'esperienza del servizio accettabile per il consumatore finale. Inoltre, data la caratteristica di forte accentrimento dell'architettura, l'aumento del traffico di informazioni causerebbe inevitabilmente un elevato tasso di congestione della rete, richiedendo anche agli *internet provider* un investimento continuo per aumentare la capacità di trasmissione dati dell'infrastruttura. Dal punto di vista operativo, infatti, ogni richiesta da parte di un *client*, e la conseguente risposta del *server*, devono percorrere l'intera distanza che separa i due nodi,

¹⁵ In questo caso i *content provider* non devono più effettuare gli investimenti nella parte hardware per strutturare un network server-client, inoltre riescono a trasferire sul consumatore finale gran parte dei costi di banda derivanti dall'upload dei dati in rete.

¹⁶ Il termine *content provider* è utilizzato in maniera generica per indicare un produttore di servizi, contenuti, informazioni etc. che utilizza internet come canale di distribuzione. Ad esempio: *You Tube*.

¹⁷ Questo è il motivo per cui un film condiviso attraverso una piattaforma *peer-to-peer* non può essere visualizzato se non a download ultimato.

provocando delle inefficienze del *network* e fenomeni di *jitter* causati dall'affluenza dalla periferia della rete di un numero elevato di richieste ad un unico nodo centrale. Per risolvere queste problematiche alla fine degli anni 90 sono stati sviluppati i *content delivery network* o (CDN). Il principio alla base di questa nuova architettura è quello di distribuire nella rete dei *cache server* in grado di effettuare lo *storage* di copie dei file più richiesti del server principale in modo tale da permettere una distribuzione locale ai *client* che richiedono un determinato contenuto¹⁸. Chiaramente l'architettura CDN consente non solo di velocizzare il trasferimento dei dati al *client*, ma anche di alleviare la congestione del *backbone* di Internet filtrando le richieste provenienti dai *client* ed evitando che un medesimo pacchetto di informazioni attraversi l'intera rete ogni volta che un nodo finale ne faccia richiesta¹⁹.

Si faccia attenzione che da un punto di vista economico l'utilizzo dei CDN ha un costo significativo²⁰ per i *content provider*, mentre rappresenta un'esternalità positiva per gli *internet provider* che beneficiano di una razionalizzazione del flusso di informazioni nell'infrastruttura.

1.4 L'architettura della rete e i suoi attori principali

Da un punto di vista di interesse strettamente economico e di *policy*, tralasciando gli aspetti tecnici che in questo caso risultano essere di scarso interesse ai fini della trattazione, è possibile individuare quattro attori principali che popolano l'ecosistema

¹⁸ Attualmente tutti i maggiori player di Internet, che offrono un servizio di *sharing* di contenuti online, utilizzano la CDN per aumentare l'esperienza di utilizzo dei loro consumatori finali. Ad esempio, Microsoft impiega questa tecnologia per distribuire i propri aggiornamenti del sistema operativo Windows richiesti da centinaia di milioni di utilizzatori a livello mondiale.

¹⁹ Ci si potrebbe domandare perché per risolvere la congestione della rete i *content provider* non sfruttino una tecnologia *peer to peer* che porterebbe senza dubbio ad un risparmio di costo notevole per le società. La risposta più attendibile è che gli utilizzatori finali non sono disposti a utilizzare la propria capacità di *storage* e di *upload* per un contenuto che hanno pagato (non necessariamente in termini monetari). Inoltre, per alcuni servizi streaming come i video e la musica la gratificazione istantanea dell'utente svolge un ruolo di fondamentale importanza e come è stato analizzato in precedenza, non è possibile soddisfarla attraverso un'architettura *peer-to-peer*.

²⁰ Per avere un'idea generale dei costi del servizio si visiti la pagina web: <https://azure.microsoft.com/it-it/pricing/details/cdn/>

della rete Internet: i *Content & Service Provider* (CSP o CP), gli *Internet Service Provider* (ISP), gli Utilizzatori della rete Internet (IU) e gli *Advertiser* (Ad).

Generalmente è possibile catalogare come *content & service provider* tutte quelle società che utilizzano il canale Internet per offrire sul mercato beni e servizi di loro produzione. Chiaramente, i contenuti distribuiti da queste società sono estremamente eterogenei e numerosi, possono infatti essere classificate in questa categoria tutte le società specializzate sull'intrattenimento, sui servizi digitali, i *marketplace* e tutti i social network. Tra gli esempi più celebri è quindi possibile ricordare: Facebook, Netflix, Amazon e Google.

I servizi e i prodotti immessi da questi attori nella rete sono acquistati, o semplicemente consumati, dagli utilizzatori finali della rete (IU), i quali, per poter accedere ai contenuti disponibili, necessitano di una connessione ad Internet.

La connessione alla rete è fornita dagli *internet service provider*, i quali si dividono in due macro-categorie: gli ISP che offrono la connessione definita "*last mile*", che garantisce la diffusione capillare di Internet nelle case e negli uffici dei singoli consumatori, e gli ISP che formano la parte *core*²¹ del *network*, che permettono lo scambio del flusso di informazioni a livello globale tra differenti parti della rete. Come evidenziato da Economides in uno studio del 2005 (Economides, 2005) la struttura del mercato del *backbone* di Internet è composta da un oligopolio di grandi aziende che gestiscono lo scambio di grandi flussi di informazioni raccolti dagli ISP locali. La struttura del mercato della connessione *last mile*, invece, varia in maniera considerevole di paese in paese. Se negli Stati Uniti molti studi hanno evidenziato una carenza di competizione cronica di questa tipologia di servizio, in particolar modo rispetto alla fornitura di banda larga²², in Italia il mercato sembra essere più competitivo²³, almeno dal punto di vista della

²¹ In gergo tecnico questa parte è chiamata anche *backbone* della rete.

²² Una ricerca del 2015 della Federal Communications Commission ha evidenziato come una percentuale molto limitata di case negli Stati Uniti ha accesso ad Internet a banda larga con una velocità pari o superiore ai 25 Mbp. Il 20 % delle totali, invece, non presenta la possibilità di accesso alla rete (Singleton & Micah, 2015). Risulta chiaro come in una situazione competitiva di questo genere l'ISP locale può raggiungere una posizione contrattuale molto forte nei confronti del consumatore finale.

²³ La considerazione sull'effettiva competitività del mercato in Italia è frutto meramente della comparazione dal lato dell'offerta tra il numero di attori attivi sul mercato statunitense e quello italiano

numerosità degli operatori, con la presenza di più di 10 aziende distribuite in maniera più o meno equivalente sul territorio.

Infine, gli *advertiser* sono aziende terze, interne od esterne al mondo Internet, che desiderano promuovere i propri prodotti o servizi attraverso i siti web dei *content provider*.

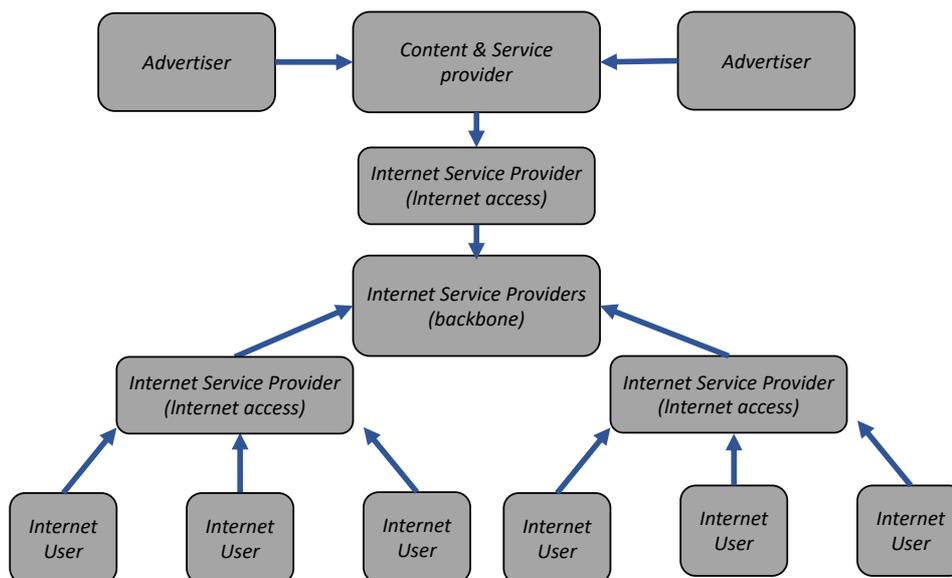


Figura 1: schema riassuntivo dei principali attori di Internet

1.4.1 Flussi economico-finanziari tra i diversi attori di Internet

Dopo aver introdotto i soggetti economici di maggior rilievo della Rete è opportuno specificare i principali flussi economici che regolano i loro rapporti commerciali, che per chiarezza sono stati schematizzati utilizzando delle frecce blu nella *Figura 1*. Partendo dall'apice del diagramma è possibile osservare come, in generale²⁴, gli *advertiser* pagano un contributo ai *content provider* per promuovere e favorire la visibilità dei loro prodotti sui siti web e le applicazioni maggiormente visitati. A loro volta, come analizzato in precedenza nell'analisi dell'architettura *client-server*, i fornitori di contenuti pagano una

²⁴ Chiaramente lo schema rappresentato in *Figura 1* rappresenta l'architettura più diffusa dei rapporti commerciali sviluppati nel modo Internet ma non è assolutamente esaustiva delle molteplici forme di business sviluppate nel mondo digitale.

fee agli *internet provider* per poter effettuare l'*upload* dei propri contenuti in rete²⁵. Generalmente, tutti gli ISP che offrono i servizi di accesso alla rete sono interconnessi con differenti²⁶ *backbone* ISP, a cui pagano una tariffa affinché i propri iscritti possano connettersi con i restanti attori della rete, in questa situazione si parla in gergo tecnico di *multi-homing*. Per quanto riguarda i rapporti tra i differenti *backbone* ISP, questi sono generalmente regolati da accordi di *peering*²⁷ o, più raramente, di *transit* per la gestione e la fatturazione del traffico interscambiato. Infine, gli utilizzatori finali della rete pagano i fornitori del servizio internet *last mile* per ottenere il servizio di accesso alla rete. Generalmente quando i consumatori sono legati da contratti di lungo periodo con i propri ISP, hanno alti costi di *switch* e sono presenti pochi fornitori del servizio sul mercato si parla di *single-homing*, intendendo che i consumatori non sono liberi di cambiare il proprio fornitore di servizio internet nel breve periodo²⁸. Uno degli aspetti chiave di questa struttura di pagamenti, che assumerà grande rilievo nella successiva trattazione della *net neutrality*, è che sia i *content provider* che gli *internet user* pagano solamente la connessione all'ISP che permette l'accesso a Internet.

Più specificatamente, per quando riguarda il lato utilizzatori del mercato, in molti paesi è ormai prassi effettuare dei contratti *flat* in cui in cambio di un ammontare fisso è permessa la navigazione illimitata in Internet. Questo modello di *pricing* ha portato molti ISP nella cosiddetta "*flat rate trap*"²⁹ (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013) nella quale i consumatori sono perfettamente indifferenti alla quantità di traffico generato nella rete.

²⁵ Si veda in tal senso il paragrafo: Architettura *client-server*. Architettura *client-server*

²⁶ In casi particolari alcuni *content provider* dalle elevate dimensioni hanno creato il proprio network per aggregare l'intero traffico generato dai loro servizi. Google ad esempio mantiene una propria infrastruttura di *backbone* per la gestione del proprio traffico dati.

²⁷ Con accordi di *peering* ci si riferisce a degli accordi conclusi tra differenti *backbone ISP provider* secondo i quali si garantisce il passaggio delle informazioni attraverso le infrastrutture reciproche non richiedendo alcun pagamento in cambio. Questa tipologia di accordi si contrappongono a quelli di *transit* in cui la tariffa è stabilita in base al bilanciamento del volume di traffico inviato e ricevuto.

²⁸ Chiaramente la condizione di *single-homing* garantisce una posizione dominante ai singoli ISP che di fatto si trovano ad essere monopolisti di determinate fette di mercato.

²⁹ Per esempio, nel 2010 in Canada si sono verificate una serie di proteste scatenate dalla decisione dei maggiori ISP del Paese di tentare di ritornare ad una fatturazione ad utilizzo dei dati Internet. In questo modo gli ISP più piccoli, che si occupavano prevalentemente di rivendere la connessione agli utilizzatori finali, non sono più riusciti a fornire un servizio *flat* ai cittadini. Questo cambio di *pricing model* ha scatenato la reazione dei consumatori che, grazie ad una petizione online e all'invio massivo di e-mail, sono riusciti ad attirare l'attenzione del governo e a fermare l'iniziativa (Church, 2011).

1.5 Principali tipologie di applicazioni e requisiti di rete richiesti

Tra le principali cause dell'aumento esponenziale del traffico internet verificato negli ultimi anni (Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper, 2020) è possibile individuare lo sviluppo e il diffondersi di una ricca varietà di applicazioni caratterizzate da specifiche e requisiti differenti. Seguendo uno schema sviluppato da Ou (Ou, 2008), è possibile dividere le diverse applicazioni web in quattro differenti macro-categorie:

- Applicazioni “*Platinum*”: fanno parte di questa famiglia le applicazioni basate su servizi *real time* come quelle di videoconferenza, di servizi VoIP e della IPTV³⁰. Chiaramente, data la natura del servizio offerto, queste applicazioni risultano essere molto sensibili a fenomeni di *jitter* che determinano il degrado istantaneo dell'esperienza di utilizzo per l'utente finale³¹. La banda richiesta dipende in larga parte dalla tipologia di servizio utilizzato, limitandosi a 30-90 Kbps per servizi VoIP fino a raggiungere gli 8000 Kps per servizi di video conferenza in alta definizione.
- Applicazioni “*Gold*”: fanno parte di questa tipologia di applicazioni i servizi di *video streaming* che non si basano sulla tecnologia *real time*, come quelli offerti dalle piattaforme *You Tube* e *Vimeo*. In questo caso la tolleranza a fenomeni di *jitter* è maggiore rispetto al caso precedente, tuttavia fenomeni di congestione della rete influiscono ancora in maniera rilevante sull'esperienza d'uso dell'utente finale. La banda richiesta da queste tipologie di applicazione è medio-alta richiedendo tra i 320 e i 6800 Kps in relazione alla qualità del video trasmesso.
- Applicazioni “*Silver*”: fanno parte di questo gruppo tutte le applicazioni interattive come, tra le altre, i *web browser*³², i siti di news e le applicazioni che

³⁰ Con IPTV si intende generalmente un sistema di trasmissione di segnali televisivi attraverso reti informatiche basate sul protocollo TCP/IP come Internet.

³¹ Si pensi ad esempio ai servizi di videoconferenza in cui ritardi dell'ordine di poche decine di ms già rappresentano una diminuzione significativa della qualità percepita.

³² Con *web browser* si intendono tutte quelle applicazioni che permettono ad un client di effettuare il download delle varie risorse dai web server così da permettere la generale navigazione in internet di un

offrono servizi e-mail. Queste tipologie di applicazioni richiedono molta banda, tuttavia, generalmente, sono caratterizzate da un basso volume di dati scambiati. In questo caso i fenomeni di *jitter* non sono così rilevanti per l'utente finale³³.

- Applicazioni “Bronze”: fanno parte di questa famiglia tutte le applicazioni che sono fatte girare in background sui dispositivi *client*, come le piattaforme *BitTorrent* e *Vuze*³⁴. In questo caso sia la banda richiesta che il volume di dati scambiati sono estremamente elevati. Risulta chiaro, inoltre, come fenomeni di congestione della rete siano quasi ininfluenti sulla qualità del servizio percepito dall'utente finale³⁵.

Nel corso degli anni l'utilizzo della rete Internet e le caratteristiche dei flussi di informazioni generati sono variati in maniera rilevante. Negli anni 90 ad esempio, il servizio e-mail generava la maggior parte del volume scambiato tra gli utilizzatori della rete, originando un flusso di dati pressoché simmetrico in tutte le direzioni del *network*. All'inizio degli anni 2000 invece, nonostante il servizio e-mail fosse cresciuto notevolmente, il volume di dati generato dal servizio di posta elettronica era nettamente inferiore rispetto alla navigazione *web* e alla trasmissione dei dati *peer-to-peer*, che vedeva in questo periodo la sua massima diffusione. Nel 2015 un *report* effettuato da Cisco ha riportato che il traffico generato dalla navigazione *web* e dal servizio e-mail aveva generato, nel corso dell'anno precedente, solamente 1/16 del volume totale di dati trasmessi in rete, mentre i servizi di video streaming contavano per i 2/3 del totale (Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020, 2015).

utente. Tra i web browser più utilizzati si possono ricordare: *Google Chrome*, *Mozilla Firefox* e *Internet Explorer*.

³³ Si pensi ad esempio al servizio di posta elettronica. Per un utente medio il ritardo causato da un fenomeno di *jitter* dell'ordine delle decine di ms non influisce sulla qualità del servizio percepito in quanto il servizio di posta elettronica è decisamente meno “*time sensitive*” di un servizio VoIP.

³⁴ In particolare, rientrano in questa categoria tutte le applicazioni che permettono lo scambio *peer-to-peer*.

³⁵ Si ricorda, infatti, che lo scambio di informazioni *peer-to-peer* avviene in modo disordinato. Non è quindi possibile utilizzare i file ricevuti fino a quando lo scambio non risulta terminato. Fenomeni di congestione temporanei dell'ordine dei ms risultano di conseguenza del tutto trascurabili.

Seguendo questo andamento, negli ultimi anni è stata osservata una crescita esponenziale delle applicazioni *Gold* determinata principalmente dall'aumento del traffico legato ai servizi di *video streaming*. Nel report annuale di Cisco (VNI Complete Forecast Highlights, 2016) la Società ha previsto che per la fine del 2020 il traffico internet in *download* legato a servizi di video streaming peserà per l'80% del traffico totale. Risulta chiaro come una crescita così rapida della domanda nel lato *client*, debba essere bilanciata dall'incremento continuo delle prestazioni della rete. Questo implica un continuo investimento da parte sia degli ISP locali che dei *network provider* del *backbone* della rete. Tuttavia, come sarà analizzato più in dettaglio nei capitoli successivi, il regolare investimento nell'infrastruttura di rete non è sufficiente a garantire un trattamento equo delle diverse applicazioni. Data la difformità dei requisiti e la diversa sensibilità ai fenomeni di congestione infatti, si rende necessario migliorare non solo le performance generali della rete ma anche la gestione del flusso dei dati in essa trasmessi.

1.5.1 Logica di trasmissione dei dati attraverso Internet

Per comprendere a fondo la questione della neutralità della rete e la necessità di introdurre sistemi di QoS, è opportuno discutere l'attuale meccanismo che regola la trasmissione dei dati in Internet. Dalla sua nascita, l'architettura della rete è stata sviluppata seguendo due principi fondamentali (Jan, Lukas, & Christof, 2012). Il primo principio, conosciuto come *end-to-end principle*, stabilisce che ogni messaggio, dopo essere stato scomposto in pacchetti di dati di dimensioni ridotte, deve essere inviato attraverso il *network* in maniera autonoma e indipendente. Questo significa che ogni *router* della rete agisce indipendentemente dagli altri quando deve scegliere il percorso attraverso il quale inviare un pacchetto di informazioni. Nessun nodo della rete quindi, ha il controllo *end-to-end* sul percorso globale seguito da un pacchetto di informazioni attraverso il *network*. È infatti probabile che due pacchetti di informazioni facenti parte di uno stesso messaggio siano inviati attraverso percorsi diversi, nonostante il nodo emittente e quello ricevente siano i medesimi.

Il secondo principio è definito come *best effort principle* o *BE* e stabilisce che ogni pacchetto di dati debba essere smistato dai *router* nel modo più rapido possibile, seguendo l'ordine cronologico di arrivo nella memoria³⁶. Questo significa che i *router* non possono discriminare i pacchetti in entrata in base al loro contenuto,³⁷ alla loro origine e alla loro destinazione.

Chiaramente questi due principi, da sempre fondamento del funzionamento di Internet, sono stati sviluppati con l'intenzione di incentivare una trasmissione dei dati equa. Tuttavia, come è stato analizzato in precedenza, le conseguenze derivanti dalla congestione della rete impattano in maniera differente le diverse tipologie di applicazioni e servizi offerti, causando, *de facto*, l'impossibilità di offrire una sufficiente qualità del servizio per le applicazioni più sensibili ai fenomeni di *jitter*.

1.5.2 L'algoritmo di Jacobson

Nel 1987 con l'evoluzione di Internet e dei protocolli TCP/IP è stato introdotto un algoritmo specifico con il compito di allocare in maniera efficiente e dinamica le risorse di rete disponibili, cercando di prevenire il sovra utilizzo di banda da parte di singoli *user*. Questo algoritmo, che prende il nome dal suo sviluppatore, il professor *Van Jacobson*, regola la velocità di trasmissione dei dati inviati da un computer ad un *router*. Semplificando la trattazione, è possibile affermare che l'algoritmo aumenta il tasso di trasmissione dei dati di un *computer* fino a quando la *queue* del *router* risulta piena e il dispositivo inizia quindi a eliminare sistematicamente i dati ricevuti. La cancellazione dei dati è interpretata dall'algoritmo come un segnale di ostruzione della rete e quindi impone al nodo emittente di dimezzare istantaneamente il tasso di trasmissione, permettendo così il progressivo scarico della memoria del router. L'algoritmo³⁸ viene

³⁶ Con memoria si intende la "*router queue*" nella quale vengono temporaneamente salvati i dati prima del loro invio nella rete. Se l'arrivo dei dati è maggiore della capacità di processamento del router e la memoria risulta piena i pacchetti in arrivo vengono eliminati dalla coda (*dropped*) e i dati devono essere inviati nuovamente dal nodo iniziale.

³⁷ Secondo questo principio nessuna informazione può quindi essere inviata attraverso una linea prioritaria della rete, indipendentemente dal grado di importanza o dalla tipologia dei dati trasportati.

³⁸ Il nome tecnico del ciclo è additive increase/multiplicative decrease o AIMD.

quindi ripetuto ciclicamente, per adattare il flusso di dati trasmesso alle condizioni temporanee di utilizzo della rete.

Come analizzato da Ou (Ou, 2008) l'algoritmo di *Jacobson* ha garantito un'equa divisione della banda tra gli utenti per tutti gli anni 90. In questo periodo, infatti, la trasmissione della maggior parte dei *file* attraverso i web browser dell'epoca avveniva tramite protocollo HTTP basato su singoli flussi TCP³⁹. Inoltre, gli utenti, data la capacità limitata dei dispositivi, raramente utilizzavano più di un'applicazione contemporaneamente. La situazione cambiò radicalmente nel 1999 quando OpenCola sviluppò la prima applicazione basata sull'architettura *peer-to-peer* che permette di aggirare i meccanismi di controllo dell'algoritmo di Jacobson⁴⁰. L'applicazione, chiamata Swarmcast, consente infatti di instaurare più flussi TCP per la trasmissione di un unico file tra due utenti della rete. Sfruttando questa tecnologia, nel caso di congestione del *network* e di intervento dell'algoritmo di Jacobson, il file trasmesso può essere inviato ad una velocità superiore rispetto a quella dei file trasmessi tramite architettura *client-server*, in quanto può utilizzare un maggior numero di flussi TCP, assicurandosi, in maniera iniqua, una quantità di banda superiore⁴¹ rispetto ai file trasmessi tramite le architetture alternative.

1.5.3 I fenomeni di *jitter* e la capacità della rete

Approfondendo la tematica della congestione del *network* è possibile porre l'attenzione sul fatto che i fenomeni di *jitter* non siano esclusivamente collegati alla capacità della rete. Per comprendere a fondo questo concetto è necessario premettere che la

³⁹ Con flusso TCP o TCP flow si intende lo scambio di informazioni tra due nodi finali (*endpoint*) della rete che hanno instaurato una connessione. In altre parole, in questo periodo ad ogni trasmissione di un file era associato un solo flusso TCP.

⁴⁰ L'architettura ideata da OpenCola è stata copiata dalla maggior parte delle altre applicazioni basate sulla tecnologia *peer-to-peer* come le celebri U-torrent e Vuze.

⁴¹ Si ricorda che un *network packet switching* basato sul protocollo TCP/IP riesce ad allocare in maniera dinamica le risorse della rete in base al numero di utilizzatori attivi in un determinato momento. Questo significa che, essendo la banda una risorsa limitata, tutti gli utenti attivi sono in competizione per assicurarsi una parte delle risorse di rete. Tuttavia, le applicazioni *peer-to-peer*, aggirando l'algoritmo di Jacobson, fanno apparire il trasferimento di un singolo file come fosse una trasmissione effettuata da più utenti di più file differenti. Aumentando virtualmente il numero di utenti attivi nella rete si verifica necessariamente una generale diminuzione del tasso di trasmissione dei singoli flussi TCP andando ad avvantaggiare la trasmissione *peer to peer* rispetto a quella basata sull'architettura *client server* e sui *content delivery network*.

trasmissione dei dati attraverso due punti di un *network* può essere effettuata principalmente attraverso tre modalità: sfruttando le proprietà di un segnale elettrico grazie ad un semplice cablaggio in rame⁴², utilizzando le caratteristiche dei segnali luminosi grazie all'utilizzo di una fibra ottica, e infine, propagando un'onda elettromagnetica nell'atmosfera servendosi delle proprietà di un campo elettrico e di uno magnetico variabili nel tempo⁴³. Se con l'aumento della capacità di banda è possibile inviare un maggior volume di dati tra due nodi della rete è altresì vero che la frequenza di trasmissione di ogni pacchetto deve essere scelta attentamente con l'obiettivo di evitare la collisione tra pacchetti differenti⁴⁴ inviati o ricevuti da uno stesso nodo. Per evitare questo fenomeno di collisione i *router* e gli *switch* sono muniti di apposite memorie temporanee ideate per immagazzinare i pacchetti di informazione in entrata e poterli quindi smistare in uscita con la giusta frequenza. È chiaro dunque come i fenomeni di *jitter* siano collegati sia alla capacità di processamento dei dati dei nodi della rete sia alla frequenza di arrivo dei pacchetti di informazioni nei nodi stessi. Applicazioni dagli alti volumi di dati scambiati ma caratterizzate da una buona frequenza⁴⁵ di trasmissione tenderanno ad intasare in maniera inferiore la rete rispetto ad applicazioni dal volume ridotto ma concentrato in un lasso di tempo molto ristretto. A tale proposito le applicazioni P2P possono essere considerate come fortemente intasanti della rete in quanto possono sfruttare differenti *peer* per moltiplicare i flussi di trasmissione di un unico *file*. Non è raro, infatti, che ad un singolo *download* contribuiscano più di 30 *peer*, inviando ognuno una media di 20 pacchetti di informazioni contemporaneamente. Risulta chiaro come, non essendo i pacchetti distanziati uniformemente nel tempo, essendo la trasmissione non coordinata, si possa verificare l'intasamento dei nodi

⁴² È il caso, ad esempio, della connessione tramite Adsl, basata sull'infrastruttura ideata per fornire il servizio di telefonia fissa. In questo caso si sfrutta il doppino in rame che permette il passaggio di informazioni tra il domicilio di un consumatore e una centrale telefonica. Il traffico telefonico non necessita infatti dell'intera banda messa a disposizione dal doppino e consente di utilizzare la parte rimanente (normalmente le frequenze più elevate) per il passaggio di altri pacchetti di informazioni.

⁴³ Si tratta in questi casi della tecnologia di trasmissione tramite una rete *wireless*.

⁴⁴ Come sarà analizzato più dettagliatamente in seguito la collisione di differenti pacchetti di informazione è un problema di particolare rilevanza soprattutto nelle reti *wireless* dove è più semplice, dal punto di vista tecnico, che si verifichi lo scontro e quindi la distruzione, di pacchetti trasmessi e ricevuti da un singolo router.

⁴⁵ La parola frequenza è utilizzata nella sua accezione di *timing* di partenza e arrivo dei pacchetti.

downstream dell'infrastruttura dove converge naturalmente la maggior parte dei dati. Questo fenomeno è inoltre indipendente alla capacità di banda dell'infrastruttura, in quanto applicazioni che richiedono un consumo di banda nettamente superiore rispetto alle P2P, come ad esempio il VoIP, la IPTV e i videogiochi *online*, ma che inviano i pacchetti di informazioni in maniera regolare e ben suddivisa nel tempo, possono arrivare ad avere un tasso di utilizzazione dell'infrastruttura fino al 90%⁴⁶ senza causare fenomeni di *jitter* percepibili per il consumatore. D'altra parte, a causa del raggruppamento delle informazioni tipico delle applicazioni P2P, i fenomeni di *jitter* possono risultare rilevanti anche con tassi di utilizzazione dell'infrastruttura inferiori al 50%.

1.6 I concetti di *Quality of Service* e di *Quality of Experience* nell'ecosistema di Internet

Quando si introduce il concetto di qualità, riferendosi a un servizio offerto tramite un'applicazione *web*, si deve fare riferimento a due concetti distinti: la *quality of service* (QoS) garantita dal *network* e la *quality of experience* (QoE) percepita dal consumatore. In linea generale è indubbio come la capacità di generare profitto per un *content provider* sia proporzionale al numero di utilizzatori e/o visitatori⁴⁷ della propria applicazione⁴⁸. Negli ultimi anni differenti studi si sono concentrati nella definizione di

⁴⁶ Si faccia attenzione che, come sottolineato da Ou (Ou, 2008), i *network* caratterizzati da un'architettura *packet switching* non possono essere utilizzati istantaneamente ad un tasso intermedio tra lo 0 e il 100%. I nodi della rete, infatti, o sono utilizzati da un'applicazione e quindi lavorano al 100% della loro capacità, smistando i pacchetti di informazione attraverso la rete, o non sono utilizzati. Quando si parla di un tasso di utilizzazione del 70% allora, si intende che la media di utilizzazione del nodo, in un determinato lasso temporale, tra i due stati ammessi di 0% e 100%, restituisce un tasso di utilizzazione medio del 70%.

⁴⁷ Si pensi ad esempio ai ricavi per pubblicità di un *content provider* come You Tube, è immediato comprendere come la disponibilità a pagare per gli inserzionisti sia proporzionale al numero di visitatori della piattaforma.

⁴⁸ Con il termine generico "applicazione" si fa riferimento a tutte le applicazioni accessibili via web attraverso la rete Internet.

Quality of Service, introducendo la definizione proposta dal IETF⁴⁹ (Crawley, Sandick, Nair, & Rajagopalan, 1998) è possibile definire la QoS come:

“Una serie di requisiti di servizio che la rete deve soddisfare durante il trasporto di un flusso di informazioni⁵⁰”.

È chiaro come il focus in questo caso sia posto sulle caratteristiche tecniche della rete e in particolar modo sulle performance garantite durante la trasmissione di un file. Per avere una definizione valida della *Quality of Experience*, invece, è possibile analizzare il *white paper* del network *Qualinet*⁵¹ (Callet, Möller, & Perkis, 2013) dove la QoE è descritta come:

“Una misura del piacere o del fastidio dell’esperienza di un cliente con un servizio (ad es. Navigazione web, telefonata, trasmissione TV⁵²”.

In questo caso al centro dell’attenzione è posto il consumatore e la sua esperienza derivata dal “consumo” e dall’utilizzo di un determinato servizio⁵³.

Come sottolineato da Kilkki (Kilkki, 2008) e ribadito dal lavoro di Varela (Varela, Kapov, & Ebrahimi, 2014) i concetti di QoS e QoE, pur rimanendo distinti, sono fortemente intrecciati tra loro. La QoE di un utente infatti, può essere fortemente influenzata dalla QoS del servizio e, di riflesso, la QoE nella maggior parte dei casi può essere utilizzata come *proxy* generale delle performance offerte da un *network*.

⁴⁹ L’associazione IETF è un organismo internazionale composto da tecnici e ricercatori che si interessano alla storia e all’evoluzione tecnica e tecnologica di Internet. Per ulteriori informazioni è possibile visitare: <https://www.ietf.org/>

⁵⁰ “A set of service requirements to be met by the network while transporting a flow”. Traduzione propria.

⁵¹ Il network Qualinet è un’associazione europea che mira ad estendere la nozione di qualità del servizio (QoS) network-centrica nei sistemi multimediali, basandosi sul concetto di qualità dell’esperienza (QoE). Per ulteriori informazioni è possibile visitare: <http://www.qualinet.eu>

⁵² Quality of Experience (QoE) is a measure of the delight or annoyance of a customer's experiences with a service (e.g., web browsing, phone call, TV broadcast).

⁵³ Il concetto di QoE può essere assimilato a quello di *user experience* ristretto al mondo delle telecomunicazioni.

Chiaramente dal punto di vista dei *content provider* uno dei problemi più comuni è rappresentato dal fatto che i consumatori attribuiscono l'esperienza di una bassa QoE direttamente all'applicazione utilizzata. È possibile affermare infatti, che il consumatore medio non sia in grado di stabilire correttamente la causa originaria di una bassa qualità di un servizio, attribuendola in larga misura a problemi di sviluppo dell'applicazione piuttosto che a una bassa *performance* della rete⁵⁴.

Chiarita la relazione esistente tra QoS e QoE di un'applicazione risulta chiaro come il numero di utilizzatori di un servizio, e di conseguenza la capacità di generare profitto dei *content provider*, dipenda in maniera rilevante dalla QoE media percepita durante l'utilizzo, che è funzione, a sua volta, della QoS della rete. Se ne ricava quindi che nel caso in cui non sia garantita una QoS minima del *network* alcuni utilizzatori potrebbero percepire una bassa QoE per problemi legati a fenomeni di congestione della rete. Questo è vero in particolar modo per le applicazioni *platinum* discusse nel paragrafo precedente, dove la sensibilità ai fenomeni di *jitter* è la più elevata.

1.7 Il management della trasmissione dei dati in rete

Nel mondo dei *network* caratterizzati da un'architettura *packet switching* al principio del *Best Effort* (Be) può essere contrapposto il concetto di Quality of Service (QoS) o, più in generale, il concetto di network management, inteso come gestione ingegneristica del traffico della rete volta a soddisfare requisiti di performance specifici durante la trasmissione di un *file*. Chiaramente l'implementazione di tali tecniche conduce ad una serie di vantaggi rispetto al più semplice approccio *best effort* tra i quali si possono ricordare:

⁵⁴ Si pensi ad esempio a servizi di VoIP o di videoconferenza offerti da applicazioni come Whatsapp, Skype o Teams, la congestione della rete, e i problemi di *jitter* che ne derivano, degrada l'esperienza dell'utente che effettua una videochiamata in maniera significativa portando ad attribuire la bassa qualità del servizio direttamente all'applicazione utilizzata, nonostante il produttore non possa fare nulla per migliorare l'esperienza d'uso dell'utilizzatore finale. Per ovviare a questa problematica i fornitori di servizi di video streaming hanno investito in maniera rilevante sui *content delivery network* in modo tale da *bypassare* i problemi di congestione della rete. Tuttavia, per moltissime altre applicazioni *time sensitive* questa soluzione non è tecnicamente percorribile.

- garantire la predicibilità dei tempi di trasmissione di un determinato pacchetto di informazioni tra due nodi della rete;
- permettere di dimensionare la rete in modo tale da stabilire anticipatamente il livello di servizio che potrà essere garantito dagli utilizzatori dell'infrastruttura;
- permettere una maggiore utilizzazione media delle risorse della rete;
- consentire un'equa allocazione delle risorse di rete;
- permettere di ridurre i fenomeni di congestione della rete;
- consente di offrire QoS differenti in relazione alle diverse tipologie di applicazioni.

In generale è possibile dividere le tecniche di *network management* in due macro-categorie differenti, quella dei sistemi definiti *Protocol Specific* di cui fanno parte le tecniche di QoS note come *Integrated Services (IntServ)* e *Differentiated Services (DiffServ)* e quella dei sistemi detti di Protocol Agnostic,

1.7.1 Sistemi di gestione della rete *Protocol Specific*

Per sistemi di gestione *protocol specific* si intendono tutte quelle pratiche di *network management* basate sul blocco o il rallentamento sistematico di alcune tipologie di dati. Queste tecniche sono ampiamente utilizzate per la gestione delle reti internet delle università e degli enti pubblici nelle quali, per tenere la congestione della rete ad un livello minimo, si limita l'utilizzo di applicazioni che richiedono un alto consumo di banda⁵⁵. L'idea di fondo che guida l'implementazione di queste tecniche è di evitare che pochi utilizzatori della rete, a causa dell'impiego di applicazioni basate prevalentemente sull'architettura P2P, degradino pesantemente l'esperienza di connessione di tutti gli altri utenti connessi⁵⁶. Chiaramente, a differenza delle organizzazioni private, gli ISP pubblici non possono arbitrariamente limitare l'utilizzo di alcune applicazioni ai propri clienti sia per motivazioni contrattualistiche che legislative⁵⁷.

⁵⁵ Un esempio classico di *protocol specific management* è il blocco delle applicazioni P2P nelle reti delle università per evitare la congestione della rete e il download di file pirati.

⁵⁶ In Giappone, ad esempio, gli utilizzatori di applicazioni P2P

⁵⁷ Si confronti il capitolo *Strict net neutrality*

Nel corso dei primi anni 2000, all'apice della diffusione delle applicazioni basate sull'architettura P2P, alcuni internet provider hanno sviluppato dei rudimentali sistemi di gestione della rete capaci di rallentare⁵⁸ i flussi di informazioni generati da queste applicazioni. Servendosi di questa pratica è quindi possibile annullare il vantaggio acquisito dalle applicazioni P2P grazie all'aggiramento dell'algoritmo di Jacobson e all'utilizzo di *multiflow* per la trasmissione dei *file*.

Storicamente, l'esempio più iconico di questa tipologia di management della rete è stato implementato dalla società Comcast che, prima di utilizzare un approccio *protocol agnostic*, la cui implementazione è iniziata nel 2008, si è servita di un algoritmo *protocol specific* per rallentare il traffico generato dalle applicazioni P2P (Stevenson, 2007). Da un punto di vista generale, il protocollo, sviluppato in collaborazione con la società Sandvine, riesce a regolare il numero di flussi di informazioni inviati in *upstream* da un *seed* della rete, limitandone il numero⁵⁹ in caso di fenomeni di congestione della rete. In generale quindi, nessun utilizzatore o tipologia di informazione è rallentata in *download* mentre è rallentato l'invio in *upload* di chi è connesso alla rete. Un utilizzatore subisce quindi gli effetti di rallentamento del protocollo in maniera indiretta, nel caso in cui, in una situazione di *network* congestionato, tutti i *seed* di un file siano interni alla stessa rete di Comcast. Tuttavia, il caso suscitò molto clamore negli Stati Uniti⁶⁰, in particolar modo a causa della rilevanza della società per quanto riguarda il mercato dei servizi di telecomunicazione. In quegli anni, infatti, Comcast era il primo fornitore per dimensioni del servizio di TV via cavo degli Stati Uniti e il secondo per quanto riguarda la connessione Internet.

In conclusione, si può affermare che l'implementazione dei sistemi di gestione della rete derivante da protocolli *specific* sono stati un primo rudimentale tentativo di assicurare una più equa distribuzione della banda tra i consumatori e le applicazioni utilizzate a scapito del rallentamento e dell'effettiva discriminazione di alcune tipologie di

⁵⁸ Il termine tecnico utilizzato in inglese nel mondo della ricerca è *throttle*.

⁵⁹ La limitazione avviene tramite il reset dei protocolli TCP dei *flow* in *upstream* dei *seed* che utilizzano una connessione Comcast.

⁶⁰ Senza dubbio la formidabile attenzione che i media riservarono al caso e la pressione esercitata dalla FCC sulla Società giocarono un ruolo fondamentale nella scelta dell'ISP di passare dall'utilizzo di un sistema di management della rete *protocol specific* a uno *protocol agnostic*.

applicazioni. Sebbene questa tecnica fosse relativamente grossolana e abbia comportato alcuni problemi tecnici durante la sua prima implementazione⁶¹, essa presentava il grande vantaggio di essere sia estremamente semplice⁶² nella sua architettura che economica nella sua applicazione. Queste caratteristiche non devono essere sottovalutate, in particolar modo alla luce del fatto che in molti paesi, soprattutto nelle aree rurali, il servizio di accesso a internet è offerto da società medio-piccole indipendenti⁶³.

Nel corso degli ultimi anni le tecniche di gestione dell'informazione *protocol specific* sono state caratterizzate da un'evoluzione costante e significativa. In questo filone di innovazione è infatti possibile annotare tutti quei protocolli sviluppati con l'obiettivo di garantire una determinata QoS di invio e ricezione delle informazioni attraverso Internet. In linea generale è possibile dividere i sistemi di QoS in due macro-categorie distinte: gli *Integrated services* e i *Differentiated service*. I prossimi due paragrafi sono dedicati alla trattazione di questi due differenti protocolli, introducendo brevemente le principali caratteristiche di funzionamento e discutendone le qualità e i difetti di maggior rilievo.

1.7.1.1 *Integrated Services*

La filosofia generale degli *Integrated Services* o *IntServ* è quella di riprodurre l'architettura di un *circuit switching network* all'interno di una rete *packet switching* al fine di replicarne le caratteristiche di affidabilità e prevedibilità che la contraddistinguono. In particolare, questo approccio risulta essere nettamente differente da quello *best effort* basandosi largamente su un protocollo di prenotazione⁶⁴

⁶¹ Il protocollo introdotto da Comcast nelle sue prime versioni ha causato il blocco indesiderato di alcune applicazioni come Lotus Notes il *client* di posta elettronica di Domino.

⁶² Tecnicamente il vantaggio più considerevole dell'utilizzo di questo approccio deriva dalla caratteristica di non invasività dei dispositivi utilizzati. Comcast ad esempio, è riuscito ad implementare questa tecnica esternamente all'infrastruttura di rete, evitando di apportare modifiche alla sua architettura ed e salvaguardandosi dalla possibilità che, in caso di malfunzionamento dei dispositivi, si verificassero delle ripercussioni sulla continuità del servizio offerto.

⁶³ Brett Glass CEO di Lariat, un ISP indipendente del Wyoming, durante un dibattito sulla *net neutrality* con Dane Jasper, riferendosi alle più evolute tecniche di network management basate sul *protocol agnostic* ha dichiarato: "One of those boxes costs as much as what we'd pay to deploy new service to 180 square miles of previously unserved countryside".

⁶⁴ Il protocollo è chiamato in gergo tecnico *Resource Reservation Protocol* (RSVP)

delle risorse di rete per ogni flusso di informazione (Braden, Zhang, Berson, & Herzog, 1997). A questo proposito, nella prima parte del protocollo, sulla falsa riga di quanto avviene nei *circuit switching network*, viene individuato e memorizzato il percorso e i nodi necessari a collegare la sorgente del flusso di informazioni con il destinatario. Questa operazione è effettuata dalla sorgente del flusso di informazioni che, dopo aver stabilito il TSpec del pacchetto, invia un messaggio di PATH al nodo destinatario. Quando un qualsiasi *router* riceve un messaggio di PATH memorizza nel pacchetto ricevuto l'indirizzo del *router* precedente e lo invia verso il nodo successivo della rete. Il ciclo si conclude quando il messaggio di PATH viene ricevuto dal destinatario del messaggio. Il nodo finale, grazie ai dati salvati nel messaggio PATH, riesce quindi a stabilire il percorso che seguiranno i vari pacchetti attraverso la rete e invia, lungo lo stesso cammino, un pacchetto RESV. Quando un *router* riceve un messaggio di RESV valuta⁶⁵ la possibilità di fornire le risorse di banda e di memoria necessarie a processare il flusso di informazioni. Una volta terminata la valutazione, in caso di disponibilità delle risorse, il router inoltra il messaggio di RESV al nodo successivo della rete, in caso di mancanza di disponibilità invece invia un messaggio di rifiuto al nodo destinatario. Quando il nodo sorgente riceve il pacchetto RESV si stabilisce un circuito virtuale dedicato alla comunicazione e il nodo sorgente può cominciare a inviare i pacchetti di informazione lungo il percorso prestabilito. Quando il flusso di informazioni risulta completamente inviato il nodo iniziale invia lungo il percorso un messaggio di chiusura del circuito e le risorse vengono quindi liberate e risultano nuovamente disponibili per la creazione di nuovi circuiti.

Analizzando i punti di forza e di debolezza dell'*integrated service* è possibile affermare che questa tipologia di *network management* offre un'ottima capacità di controllo e gestione delle risorse di rete. Tuttavia, l'aumento di complessità⁶⁶ generato dal protocollo di riservazione delle risorse conduce ad una evidente difficoltà in termini di scalabilità del sistema, in particolar modo in un ecosistema articolato come quello di Internet.

⁶⁵ La valutazione è generalmente effettuata attraverso un processo di *admission control*.

⁶⁶ Si pensi ad esempio alla quantità di informazioni che devono essere gestite da un singolo *router* e alla necessità di definire uno stato per ogni nodo della rete.

1.7.1.2 Differentiated service

In linea generale, la filosofia alla base del *differentiated service* o *DiffServ* si distingue totalmente da quella dell'*IntServ*, essendo basata sulla classificazione delle differenti tipologie di traffico che attraversano la rete. Come sarà analizzato più dettagliatamente in seguito questo approccio, non richiedendo l'interazione diretta di un numero elevato di risorse della rete, risulta di più facile applicazione rispetto a quello precedente. Tuttavia, il grado di controllo delle risorse e di gestione del traffico della rete risulta qualitativamente inferiore e più grossolano.

Per fornire un'idea generale del funzionamento di questa tipologia di gestione della rete è possibile affermare che i meccanismi di QoS basati su *DiffServ* creano differenti code di attesa all'interno dei buffer dei router⁶⁷. Per associare ad ogni pacchetto in entrata una corretta collocazione all'interno della memoria, i nodi della rete devono essere abilitati a distinguere e dividere i singoli pacchetti ricevuti in classi differenti di attesa. Da un punto di vista operativo questa divisione dei flussi di informazioni in diverse categorie è effettuata attraverso un campo apposito presente nell'*header* dell'IPv4⁶⁸ denominato TOS⁶⁹ che viene definito come *DiffServ Code Point* o DSCP. In questo campo, grazie alla definizione sia delle caratteristiche di cancellazione⁷⁰ del pacchetto che delle differenti priorità di smistamento, sono specificate le modalità con cui il *router* deve gestire un determinato pacchetto. Generalmente il DSCP di un pacchetto di informazioni è definito dal nodo emittente⁷¹ e, all'arrivo ad ogni nuovo *link* della rete, è tratto in modo

⁶⁷ Si ricorda che in una rete funzionante tramite il principio di *best effort* la coda nelle memorie *buffer* dei *router* è unica. Lo smistamento dei pacchetti dei dati avviene dunque in maniera indipendente rispetto alla tipologia di informazione trasportata in quanto ogni nodo è "cieco" rispetto alla natura e alla tipologia di applicazione che utilizzerà i dati trasmessi.

⁶⁸ L'IPv4 è la quarta revisione dell'*internet protocol* componente essenziale della suite di protocolli TCP/IP di Internet in quanto responsabile dell'instradamento dei pacchetti di informazioni nella rete.

⁶⁹ Il TOS acronimo di Type of Service è un campo dell'*header* dell'IPv4 che è composto da 13 diversi campi di cui uno opzionale. Nato come strumento per definire la precedenza tra pacchetti differenti di informazioni (RFC 791, 1981) nel 2001 è stato convertito per l'implementazione della QoS *DiffServ* (IETF, 2001).

⁷⁰ Politiche di "*drop*" del pacchetto dalla memoria buffer del *router*.

⁷¹ Chiaramente l'applicazione designata alla definizione del campo DSCP non effettua una richiesta esplicita a tutti i *link* della rete, non essendo noto a priori il percorso che sarà seguito dal pacchetto di informazioni. Questo comporta che non c'è alcuna garanzia che le richieste di QoS siano rispettate durante la trasmissione dell'informazione.

equivalente a tutti gli altri pacchetti di dati ricevuti che presentano il medesimo campo DSCP, in modo tale da ottenere un numero ristretto e definito di differenti classi di pacchetti di informazioni. Attraverso l'utilizzo di questo campo i nodi della rete possono quindi smistare i dati ricevuti in maniera equa, evitando che singole applicazioni monopolizzino⁷² i vari link della rete migliorando la QoE dell'utilizzatore finale⁷³.

Risulta chiaro come l'applicazione di una politica di QoS, come ogni pratica discriminatoria, possa ricadere in pratiche più o meno scorrette⁷⁴ sia in base alla tipologia di attributi che si utilizzano per individuare le categorie di informazione sia in base all'obiettivo finale con cui è implementato il sistema. La discriminazione dei pacchetti, infatti, può essere effettuata sulla base di differenti parametri tra i quali si possono ricordare: la provenienza del pacchetto, tramite il quale si attribuiscono differenti priorità in base al *content provider*, la tipologia di informazione trasportata, dividendo il traffico in base alle differenti tipologie di applicazioni utilizzate e infine in base alla destinazione dei pacchetti, dividendo quindi in consumatori in classi differenti.

1.7.2 Sistemi di gestione della rete *Protocol Agnostic*

I sistemi di gestione della rete *protocol agnostic* possono essere definiti come la naturale evoluzione dell'algoritmo di Jacobson in quanto sono stati sviluppati con l'intenzione di fornire una divisione di banda equa tra tutti gli utilizzatori della rete. Il principio su cui si basano questi sistemi è quello di calcolare il consumo di banda totale richiesto da ogni utente della rete, indipendentemente dalla tipologia di protocollo utilizzata. Questo approccio permette quindi di individuare gli utilizzatori più gravosi per la rete senza discriminare le differenti tipologie di applicazioni utilizzate.

⁷² Si ponga l'attenzione sul fatto che le tecniche QoS basate su *DiffServ* non discriminano necessariamente le diverse tipologie di informazioni favorendo alcune tipologie di dati rispetto ad altri. Nella sua forma più semplice, infatti, questa tecnica di *network management* evita che uno stesso nodo si limiti allo smistamento di una sola tipologia di informazione, evitando quindi che alcune classi di dati non vengano trasmesse per un periodo prolungato di tempo.

⁷³ Ad esempio, è possibile categorizzare in maniera differente i dati relativi ad applicazioni VoIP rispetto a quelli di applicazioni P2P. In questo modo è possibile garantire una trasmissione modulata e continua del traffico voce (altamente *time sensitive*) in mezzo ai pesanti pacchetti di dati scambiati dalle applicazioni P2P.

⁷⁴ La trattazione dettagliata delle pratiche discriminatorie introdotte dai sistemi di QoS sarà affrontata nel capitolo successivo dopo aver introdotto il concetto di *net neutrality*.

Ancora una volta l'esempio più celebre di un sistema di gestione *protocol agnostic* è quello implementato da Comcast alla fine del 2008, chiamato *Fare Share*⁷⁵. Analizzando brevemente il funzionamento dal punto di vista tecnico, il *software* installato all'interno della rete Comcast analizza in maniera continua il traffico aggregato nei diversi settori della rete dell'ISP statunitense. Se un determinato settore supera un valore critico predeterminato, il *software* entra in funzione, ricercando i consumatori del segmento che stanno utilizzando una quantità spropositata di banda rispetto ad un valore medio prestabilito. Una volta individuati i responsabili della congestione del segmento, il *software* assegna al traffico generato da questi consumatori uno *status* di bassa priorità classificandolo come "*Best Effort*" e differenziandolo dai rimanenti dati trasmessi, che mantengono la qualifica originaria di "*Priority Best Effort*". Chiaramente il traffico etichettato come *Best Effort* è smistato dai *router* della rete con una priorità inferiore rispetto al *Priority Best Effort*, creando di fatto una discriminazione dei flussi di dati indipendente dal protocollo utilizzato. Tuttavia, nessun pacchetto è eliminato o escluso dalle memorie *buffer (dropped)*, a meno che non si verifichino dei veri e propri fenomeni di congestione della rete i quali causano inevitabilmente la perdita intermittente di parte dei pacchetti di dati. Il *software* esamina il traffico generato nei segmenti congestionati in maniera ciclica, analizzando il comportamento dei consumatori ogni 15 minuti. Se un utente cessa di essere un consumatore gravoso per la rete per i 15 minuti precedenti al nuovo controllo e il consumo di banda risulta allineato a quello degli altri utilizzatori, i suoi dati riacquistano la qualifica di *Priority Best Effort*.

1.7.3 Le principali differenze tra i modelli di management della rete

Si faccia attenzione che le tecniche di gestione *protocol agnostic* e *protocol specific*, per quanto possano apparire simili tra loro, in realtà sono state sviluppate con due obiettivi totalmente differenti. Le prime infatti sono un'ottima tecnica per garantire un'equa distribuzione di banda tra tutti gli utilizzatori della rete, le seconde invece, garantiscono una performance bilanciata per tutte le applicazioni utilizzate, considerandone sia la

⁷⁵ Per una trattazione tecnica completa è possibile analizzare il documento intitolato "Comcast's Protocol-Agnostic Congestion Management System" pubblicato dalla IETF nel 2010 (Bastian, Kliebe, Livingood, Mills, & Woundy, 2010).

sensibilità ai fenomeni di congestione della rete che ai fenomeni di *drop* di informazione. Le tecniche di *protocol agnostic* infatti, non possono assicurare una diminuzione dei fenomeni di jitter, né riescono a garantire una performance minima di invio e ricezione delle informazioni. Per queste ragioni, nel caso in cui si voglia garantire un'equa possibilità di successo a tutte le applicazioni dell'ecosistema Internet e si voglia rendere possibile la divisione in differenti classi prioritarie le applicazioni utilizzate al fine di garantire una determinata QoE per l'utilizzatore finale, l'implementazione delle tecniche di QoS risulta l'unica strada agevolmente percorribile da parte degli ISP.

1.7.3.1 *La critica principale al modello QoS*

Nel corso degli ultimi anni è stata alimentata una ricca e articolata discussione riguardante i vantaggi e gli svantaggi dell'implementazione dei sistemi di QoS per la gestione dei dati trasmessi in Rete. In generale infatti, gli studiosi hanno sempre avuto opinioni contrastanti sulle conseguenze economiche e sociali derivanti dall'utilizzo di tali pratiche. Non volendo entrare nel merito del dibattito, che sarà approfondito nel corso del prossimo capitolo dedicato alla tematica della *net neutrality*, in questo paragrafo si desidera confutare, dal punto di vista prettamente tecnico e infrastrutturale, il principale argomento a supporto dei detrattori dell'utilizzo e dell'implementazione dei sistemi di QoS.

Molti ricercatori e tecnici sono dell'opinione che l'utilizzo delle pratiche di *network management* sia necessaria solamente nel caso in cui la banda disponibile non sia sufficiente a soddisfare la richiesta degli utenti (Bhagat, 2018), (Reardon & Krazit, 2010), (Genachowski, 2009) e (Lee & Wu, 2009). Secondo questa opinione, il miglior modo per evitare i fenomeni di congestione della rete è dunque quello di costruire delle linee sovradimensionate, sufficientemente "*fat*" da poter garantire l'invio continuo e regolare dei dati attraverso il *network*. Chiaramente questa convinzione è inesatta e semplicistica, si può infatti affermare che i problemi di congestione della rete siano direttamente collegati a:

- *Timing* di invio dei dati. La congestione della rete non dipende in maniera esclusiva dalla capacità di banda della connessione ma, come è stato analizzato

precedentemente approfondendo i fenomeni di jitter⁷⁶, sono fortemente influenzati dal timing di invio dei pacchetti di informazione;

- Imbuti naturali nella rete. L'architettura del *network* sviluppata nel corso degli anni è tale da presentare naturalmente numerosi punti di raccordo tra settori con differenti velocità di trasmissione⁷⁷ e punti in cui confluiscono più linee in un unico segmento di rete. Come per il caso dei restringimenti di corsie nelle autostrade, tutte queste situazioni favoriscono il verificarsi di fenomeni di congestione della rete;
- Non esiste un limite superiore alla richiesta di maggiore banda da parte degli utilizzatori della rete e dei *content provider*. Per descrivere questo fenomeno si è soliti utilizzare il termine *exaflood*⁷⁸, facendo riferimento al circolo vizioso che periodicamente si verifica tra la necessità di effettuare nuovi investimenti nell'infrastruttura Internet e la richiesta di banda aggiuntiva da parte dei consumatori. Ciclicamente infatti, gli ISP sono costretti ad investire in maniera cospicua nell'infrastruttura di rete, sviluppando connessioni abbondantemente sovradimensionate (in particolare in termini di capacità di banda), al fine di garantire una buona *performance* della rete rispetto sia ai picchi di domanda temporali che alla previsione di crescita della domanda sul medio periodo. Tuttavia, si è soliti osservare come la capacità in eccesso venga saturata rapidamente dalla crescita del volume e soprattutto della qualità (e dunque quantità) dei dati trasportati, richiedendo nuovamente un miglioramento infrastrutturale da parte degli *internet provider*. Nonostante la componente *hardware* dell'infrastruttura, fornita da aziende leader del mondo *hi-tech* come Cisco, Huawei e Alcatel, sia caratterizzata da una continua evoluzione che garantisce il miglioramento regolare delle *performance* della rete e l'abbassamento continuo dei costi fissi per unità di banda aggiuntiva, anche il

⁷⁶ I fenomeni di *jitter* e la capacità della rete

⁷⁷ Si pensi ad esempio ai nodi di giunzione di *backhaul* o a al mismatch di velocità tra la connessione domestica, che trasporta i dati di un singolo utente e le reti che aggregano l'intero traffico locale di un ISP che deve servire i dati di migliaia di connessioni contemporanee.

⁷⁸ Il termine *exaflood* è apparso per la prima volta nel lavoro di *Bret Swanson* del Discovery Institute nel 2001 e ripreso dai lavori di Swanson e Gilder (Swanson & Gilder).

consumo di dati da parte degli utenti risulta in costante crescita. Questo fenomeno è imputabile in larga misura alla regolare evoluzione dei prodotti e dei servizi offerti dai *content provider* della rete. Prendendo come esempio il *video streaming*, risulta immediato verificare come la qualità video trasmessa è migliorata in maniera stabile nel tempo, in maniera nettamente maggiore rispetto alla crescita della banda per la trasmissione del segnale. Streaming video ad alta definizione, con una classica risoluzione 1080p di video non compresso⁷⁹, infatti, comunemente visualizzato su You Tube e Netflix, occupa in media 3 gigabit di banda per secondo. Una delle sue evoluzioni, chiamata Quad-1080p⁸⁰, può facilmente arrivare ad occupare 48 gigabit di banda per secondo di trasmissione. In conclusione, è possibile affermare che gli utenti finali tenderanno a consumare i servizi e i prodotti che garantiscono la maggior QoE possibile in relazione alla quantità di banda disponibile. Questo significa che non è possibile effettuare un *overprovisioning* efficace della rete, in quanto ogni unità aggiuntiva di banda è destinata ad essere utilizzata dai consumatori nel medio periodo.

- *Timing* di investimento. La complessità dell'architettura di rete comporta, dal punto di vista infrastrutturale, il frazionamento del *network* sotto il controllo di differenti soggetti giuridici. Data la naturale tendenza a verificarsi di fenomeni di congestione nei punti di convergenza dei diversi segmenti di rete, risulta chiaro come, non solo sia generalmente richiesto il continuo investimento volto all'incremento delle performance della rete, ma che sia essenziale implementare un sistema di coordinamento temporale e tecnico tra i diversi soggetti coinvolti.
- *Sovradimensionamento dell'infrastruttura*. Senza dubbio il sovradimensionamento dell'infrastruttura, dovuto alla necessità di dimensionare la rete in relazione ai picchi di trasmissione del segnale e utilizzando una trasmissione *best effort*, rappresenta di per sé una forma di

⁷⁹ Risoluzione di 1920 x 1080 pixel e 60 *frame* al secondo.

⁸⁰ Quad-1080p, maggiormente conosciuta come 8k è l'evoluzione della più conosciuta risoluzione 4k ad oggi comunemente utilizzata dalle televisioni in commercio. La quantità di pixel utilizzata è di 7680x4320 a 60 frame al secondo.

fallimento di mercato in cui non si raggiunge un'ottima allocazione delle risorse né la piena efficienza dell'infrastruttura.

1.7.3.2 La QoS nelle reti wireless

È indubbio come le reti senza fili stiano acquisendo un ruolo di fondamentale importanza nella società odierna, sia per quanto riguarda la trasmissione del segnale nel cosiddetto “*last meter*” all'interno delle case e degli uffici, sia per quanto riguarda la diffusione delle reti ad alta velocità come quelle sviluppate attraverso gli standard WiMax⁸¹ ed LTE⁸². Da un punto di vista tecnico è immediato comprendere come le reti *wireless*, in maniera ancora più evidente di quanto avviene per la trasmissione delle informazioni via cavo, necessitano dell'implementazione di un sistema di QoS a causa della particolare tecnologia di trasmissione utilizzata. Questa affermazione è supportata due considerazioni principali: la prima, prettamente tecnologica, è che lo spettro assegnato alla trasmissione del segnale, per quanto possa essere ampliato e reso più efficiente, è comunque una risorsa scarsa, soprattutto se paragonata a quella disponibile utilizzando una trasmissione cablata⁸³, in particolar modo se di ultima generazione⁸⁴. Tuttavia, è errato circoscrivere il problema ad una semplice questione di disponibilità di banda, le connessioni cablate infatti presentano l'ulteriore vantaggio di

⁸¹ WiMax è la sigla di riferimento per lo standard di connessione definito come *Worldwide Interoperability for Microwave Access*. Questo standard permette la connessione ad internet a banda larga in modalità *wireless* e su vasta scala.

⁸² LTE è l'acronimo di *long term evolution* ed è uno *standard* di connessione che permette di connettersi a un servizio di internet a banda larga utilizzando dispositivi mobili. La rete 5G che sarà introdotta nel corso del terzo capitolo, è l'ultima evoluzione di questo *standard* che è stato sviluppato grazie alla collaborazione di un gruppo di imprese e istituzioni facenti parte del 3rd Generation Partnership Project o 3GPP.

⁸³ Un esempio banale di questo concetto è la differente velocità di trasmissione dei file utilizzando una connessione locale. Se si utilizza una NAS o un backup server privato, utilizzando quindi un circuito chiuso e non influenzabile da variabili di rete esterne, è immediato verificare come il trasferimento dei dati è molto più rapido utilizzando una connessione cablata (come un cavo ethernet) rispetto all'utilizzo di una connessione Wi-Fi tradizionale. Lo stesso fenomeno può essere esaminato trasferendo file molto pesanti tra due computer (via cavo e non) a livello locale. Tuttavia, non si può nascondere che le tecnologie di ultima generazione, in particolare l'evoluzione dello *standard* LTE sta avvicinando, almeno dal punto di vista teorico, la banda disponibile delle reti *wireless* a quelle cablate.

⁸⁴ Si considerano, ad esempio cavi ethernet Cat-6 o successivi.

diminuire la latenza media della trasmissione⁸⁵ e di essere naturalmente meno soggette a fenomeni di interferenza di segnale⁸⁶.

Il secondo fattore invece, è collegato al numero di utenti tra cui è condivisa la connessione. Pensando ad esempio agli standard LTE è immediato verificare come il numero di utilizzatori collegati contemporaneamente ad una medesima cella di un'antenna sia di gran lunga superiore a quello normalmente collegato ad una connessione cablata di un normale edificio cittadino⁸⁷.

Come sarà analizzato nel dettaglio nei prossimi capitoli, grazie all'evoluzione degli standard di connessione, ed in particolare allo sviluppo della tecnologia 5G, lo spettro di trasmissione è diventato notevolmente più ampio ed efficiente. Tuttavia, la richiesta dei servizi di connessione *wireless* aumenta seguendo un andamento esponenziale. Consultando il *White Paper* di Cisco pubblicato nel 2020 (Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper, 2020) si può verificare come la Società statunitense ipotizza che per la fine del 2023 più del 70% della popolazione globale richiederà l'accesso ad Internet tramite una connessione mobile.

Risulta chiaro che una massa di dispositivi connessi così estesa, che utilizza per la trasmissione dei dati il medesimo spettro, richiede l'implementazione di un sistema di *network management* più raffinato rispetto a quello richiesto dalle connessioni via cavo. Da un punto di vista fisico infatti, quando un numero elevato di dispositivi cerca di inviare contemporaneamente pacchetti di informazione sulla medesima frequenza è molto probabile che si verifichino dei fenomeni di collisione dei segnali elettromagnetici, con la conseguente perdita delle informazioni inviate. Questi fenomeni di distruzione portano conseguentemente a delle forme di inefficienza della rete, richiedendo ai nodi

⁸⁵ Prendendo sempre come esempio il modem Wi-Fi è possibile effettuare una misurazione del delay o ritardo introdotto da una connessione senza fili calcolando il PING (*Packet Internet Grouper*) della connessione utilizzando un computer connesso attraverso un cavo di rete e uno in modalità wireless.

⁸⁶ Per quanto riguarda in particolare le connessioni Wi-Fi queste sono soggette a rapide perdite di segnale, il problema è trascurabile per la maggior parte delle applicazioni, tuttavia quelle basate su esperienze real-time come *online gaming* e *VoIP* possono risentire in maniera estremamente negativa di questo fenomeno. Inoltre, per quanto riguarda tutte le trasmissioni senza fili, l'aumento delle interferenze porta ad una diminuzione della qualità del segnale, con un conseguente aumento di latenza e diminuzione della velocità di trasmissione complessiva.

⁸⁷ Normalmente una cella standard di una torre 3G può servire dai 100 ai 1000 utenti contemporaneamente.

emittenti di trasmettere nuovamente il segnale. Nel caso delle reti cablate questa problematica è del tutto inesistente in quanto i *router* e gli *switch* sono stati sviluppati con l'obiettivo di distanziare adeguatamente i pacchetti di informazioni inviati, servendosi delle memorie buffer per registrare temporaneamente i pacchetti giunti troppo ravvicinati e poterli quindi inviare con la giusta frequenza.

2 Il principio di neutralità della rete

Dopo aver introdotto le principali caratteristiche di funzionamento della rete Internet, nel presente capitolo si desidera trattare la tematica della *net neutrality*.

In particolare, l'analisi è condotta sia dal punto di vista teorico, discutendo il concetto generale e le definizioni proposte del principio di neutralità della rete, sia da quello analitico, esaminando i risultati dei modelli economico-matematici di maggior interesse. Nello specifico, il capitolo si apre con una breve introduzione sull'ampia tematica della neutralità dell'ecosistema Internet. In seguito, dopo aver inquadrato il problema nel suo contesto generale, sono presentate le principali definizioni del principio di neutralità della rete, differenziando il concetto classico di *strict net neutrality* da quello di neutralità più allargata. Il capitolo prosegue quindi con la discussione delle principali forme di violazione del principio di neutralità, presentando i casi storici di violazione più rilevanti.

Conclusa la trattazione teorica, il lavoro prosegue con la presentazione e la discussione dei risultati analitici dei modelli economici di maggior rilievo⁸⁸, analizzando in particolare le conseguenze derivanti dall'introduzione di tariffe di *termination fee* e di differenti QoS nel mercato.

Infine, nell'ultima parte del capitolo è presentata un'analisi sul tema della propensione agli investimenti da parte degli *Internet provider* in condizione di imposizione o meno del principio di neutralità. A tale proposito, è stato sviluppato un modello economico con l'obiettivo di verificare il livello di performance della rete determinato dall'Internet provider quando sono ammesse delle tariffe di *termination fee* nel mercato. Il capitolo si conclude con la discussione dei risultati ottenuti e con la comparazione dei livelli di performance dell'infrastruttura nei diversi regimi di rete.

2.1 La neutralità dell'intero ecosistema Internet

In linea generale il dibattito riguardante la neutralità della rete può essere inquadrato in un contesto più ampio di neutralità dell'intero ecosistema Internet. Senza dubbio

⁸⁸ Per avere una panoramica degli studi esaminati si confronti: Tabella riassuntiva delle pubblicazioni esaminate sul tema della neutralità della rete.

infatti, nell'articolato mondo digitale, sono perlomeno tre i filoni principali di ricerca riguardanti il principio generale di neutralità (Krämer, Guo, & Easley, 2018). Per quanto riguarda l'*upstream* della rete infatti, si può parlare del concetto di neutralità dei contenuti e dei servizi offerti dai *content provider*, centralmente invece, per quanto riguarda la tematica della trasmissione dei dati, si discute attorno al principio di *net neutrality* e infine, in riferimento al *downstream*, si affronta la tematica della neutralità dei dispositivi utilizzati dai consumatori.

Per fornire una breve cornice teorica alla questione della neutralità della rete, argomento centrale di questo capitolo, nei due paragrafi successivi sono presentate brevemente le tematiche che riguardano i concetti di neutralità nella parte superiore e inferiore della catena di valore della rete, facendo particolare riferimento al concetto di *search neutrality* dei motori di ricerca web e alla neutralità dei dispositivi *mobile*.

2.1.1 La neutralità dei *content provider*

Per quanto riguarda la parte superiore della catena del valore della rete, la ricerca si è concentrata attorno al concetto di neutralità dei contenuti e dei servizi offerti dai *content provider* di Internet. Nei mercati digitali infatti, caratterizzati da un'elevata concentrazione, il pericolo che si verifichino fenomeni di abuso di posizione dominante è senza dubbio molto elevato. Prendendo in considerazione solamente una delle numerose sfaccettature che interessano questa tematica, è possibile analizzare la questione della neutralità della ricerca offerta dai *search engine* del web.

Molti studi infatti, hanno dimostrato come in Europa, per una parte molto rilevante degli utenti della rete Internet, Google rappresenti lo strumento di ricerca maggiormente utilizzato per la navigazione in Internet⁸⁹. Di conseguenza, è possibile affermare che la Società dispone di un potere estremamente elevato, sia rispetto alla capacità di influenzare le ricerche degli utenti della rete, sia rispetto alla possibilità di sviluppo e affermazione sul mercato di un nuovo *content provider*. Di fatto, il servizio di ricerca

⁸⁹ Per avere un'idea della posizione dominante di Google in qualità di motore di ricerca è possibile confrontare le statistiche pubblicate su Statista alla pagina: <https://www.statista.com/statistics/220534/googles-share-of-search-market-in-selected-countries/> . Si può notare come in paesi come l'Italia e la Spagna la società statunitense detenga più del 92% della market share.

sviluppato da Google può infatti stabilire, attraverso il ranking proposto dall'algoritmo di PageRank, la probabilità che un consumatore generico visiti la pagina di un determinato *content provider*.

Tuttavia, nonostante l'immensa popolarità e diffusione di Google, la Società non ha mai reso pubbliche le caratteristiche tecniche e di funzionamento del *software* utilizzato per stabilire l'ordine dei risultati delle ricerche, limitandosi a divulgare una serie di indicatori che fanno parte del complicato processo di analisi. La reticenza di Google nel diffondere questa tipologia di informazioni ha generato un'elevata diffidenza tra la maggior parte degli studiosi rispetto alla violazione del principio di neutralità del *page rank*. A tale proposito, in uno studio effettuato da Odlyzko e pubblicato nel 2009 (Odlyzko, 2009), si sostiene che Larry Page, ideatore dell'algoritmo PageRank e fondatore insieme a Sergey Brin della stessa Google, fosse dell'opinione che i *search engine*, il cui modello di *business* si fonda sul finanziamento derivante dalle inserzioni pubblicitarie, fossero naturalmente incentivati a direzionare artificialmente i risultati delle ricerche in favore dei propri clienti⁹⁰.

Non deve stupire, dunque, che in un intervento del 27 giugno del 2017 l'Antitrust europea abbia sanzionato Google con una multa di 2,42 miliardi di euro per abuso di posizione dominante. Secondo l'*Autority* infatti, il motore di ricerca aveva violato le norme della concorrenza avvantaggiando illegalmente un prodotto sviluppato internamente⁹¹ e ideato per fornire un servizio di comparazione degli acquisti *online*⁹².

⁹⁰ Durante la VII conferenza internazionale del *word-wide web* Page ha dichiarato: "*The goals of the advertising business model do not always correspond to providing quality search to users... we expect that advertising funded search engines will be inherently biased towards the advertisers and away from the needs of the consumers... we believe the issue of advertising causes enough mixed incentives that it is crucial to have a competitive search engine that is transparent and in an academic realm*" (Page & Brin, 1998).

⁹¹ Si fa riferimento al prodotto conosciuto inizialmente come "Froogle" e rinominato "Google Product Search" nel 2008 e "Google Shopping" nel 2013.

⁹² Margrethe Vestager, commissaria responsabile per la concorrenza dell'Unione Europea, ha descritto l'attività sleale di Google nella seguente maniera: "Google ha lanciato tanti prodotti e servizi innovativi che ci hanno cambiato la vita. Gli effetti sono indubbiamente positivi. Ma nella strategia attuata per il suo servizio di acquisti comparativi, non si è limitata a rendere il suo prodotto migliore di quelli concorrenti per attrarre più clienti. Google ha abusato della sua posizione dominante come motore di ricerca per promuovere il suo servizio tra i risultati della ricerca e per retrocedere quello dei concorrenti. Google ha tenuto un comportamento illegale ai sensi delle norme antitrust dell'UE perché ha impedito ad altre imprese di competere in base ai propri meriti e di innovare. Ma soprattutto, ha negato ai

È importante sottolineare come la problematica della neutralità della ricerca non è limitata solamente al *rank* proposto dai *search engine* ma abbraccia un vasto gruppo di differenti *content provider*, interessando, in un'ottica più generale, il sistema complessivo di gestione delle informazioni raccolte in rete. I social network, ad esempio, grazie alle informazioni che naturalmente possono raccogliere riguardo ai propri iscritti (in gergo chiamate *social graph*) hanno la possibilità di effettuare una profilazione estremamente dettagliata dei propri iscritti sulla base delle loro preferenze personali, dello *status* sociale, politico ed economico. Grazie a questa raccolta massiccia di dati e alla loro successiva vendita a società terze, prime tra tutti i motori di ricerca, il consumatore può essere quindi guidato nella sua esperienza di navigazione in internet e influenzato in maniera determinante rispetto alle proprie scelte di consumi e alle proprie preferenze personali.

Senza alcun dubbio il caso più eclatante di scambio e di utilizzo illecito di dati raccolti da un social network per influenzare le scelte dei consumatori è rappresentato dallo scandalo Cambridge Analytica del 2018 in cui furono raccolti i dati di milioni di utilizzatori di Facebook senza il loro esplicito consenso per essere utilizzati da applicazioni e società esterne a fini di propaganda e promozione politica (Confessore & Rosenberg, 2018) (Cadwalladr & Graham-Harrison, 2018).

2.1.2 La neutralità dei dispositivi

Per quanto riguarda il downstream della rete, la tematica centrale e maggiormente dibattuta riguarda la neutralità dei dispositivi che permettono l'accesso e la navigazione nella rete. In linea generale è possibile osservare come i produttori di *smartphone*, e dei relativi sistemi operativi, stiano acquisendo un livello di controllo sempre più elevato rispetto alle applicazioni e ai contenuti utilizzati al loro interno. Storicamente l'esempio più rilevante è senza dubbio lo *smartphone* sviluppato da Apple. Con la commercializzazione del primo *Iphone* infatti, la Società californiana si è assicurata il controllo pressoché totale dell'esperienza d'uso degli utenti. Tale controllo è esercitato

consumatori europei la possibilità di scegliere liberamente i servizi e di sfruttare appieno i vantaggi dell'innovazione."

sia in maniera diretta, grazie allo sviluppo di uno *store* chiuso per la verifica e l'approvazione delle applicazioni installabili sul dispositivo, sia in modo indiretto, determinando la tipologia dei *software* compatibili con il dispositivo della Mela. Le regole istituite da Apple, in particolar modo quelle che governano i differenti rapporti tra lo *store* ufficiale della società e i vari sviluppatori di applicazioni, sono sempre state particolarmente opache dal punto di vista della concorrenza e della neutralità dei dispositivi. A questo proposito, per chiarire definitivamente la natura di tali norme l'Antitrust europea ha formalmente aperto un'attività investigativa per chiarire la legittimità delle regole utilizzate nell'App Store⁹³ (Podesta, 2020).

Anche nel caso della neutralità dei dispositivi l'Antitrust europea è intervenuta più volte per sanzionare i comportamenti discriminatori da parte dei produttori delle componenti *software* dei dispositivi. Il caso più eclatante è senza dubbio la multa da 4,3 miliardi inflitta a Google nel 2018 per abuso di posizione dominante sul mercato della telefonia mobile. Il colosso digitale americano è stato infatti condannato per avere obbligato i produttori dei dispositivi a pre-installare l'applicazione *Google Play Store*⁹⁴ sui loro prodotti, la quale può essere ottenuta solamente utilizzando il browser *Google Chrome* sviluppato internamente dalla società. Come verificato dall'autorità per la concorrenza della Commissione europea, attraverso questa pratica Google si è dunque servita del sistema operativo Android per rafforzare la posizione dominante raggiunta nel mercato europeo nella ricerca generica in rete⁹⁵ (Cardoso, 2018).

⁹³ La vicepresidente esecutiva della commissione europea, Margarethe Vestager, intervenendo sul tema ha dichiarato: "Mobile applications have fundamentally changed the way we access content. Apple sets the rules for the distribution of apps to users of iPhones and iPads. It appears that Apple obtained a "gatekeeper" role when it comes to the distribution of apps and content to users of Apple's popular devices. We need to ensure that Apple's rules do not distort competition in markets where Apple is competing with other app developers, for example with its music streaming service Apple Music or with Apple Books. I have therefore decided to take a close look at Apple's App Store rules and their compliance with EU competition rules."

⁹⁴ L'applicazione *Play Store* è lo store ufficiale che offre un servizio di distribuzione digitale per le applicazioni e i contenuti compatibili con il sistema operativo Android (sistema operativo basato su Kernel Linux e sviluppato a sua volta da Google).

⁹⁵ Margarethe Vestager commissaria responsabile per la concorrenza in Europa ha dichiarato: "L'Internet mobile, che costituisce oggi più della metà del traffico Internet globale, ha cambiato la vita di milioni di europei. Il caso in oggetto riguarda tre tipi di restrizioni che Google ha imposto ai produttori di dispositivi mobili che utilizzano Android e agli operatori di rete per fare in modo che il traffico che transita su tali dispositivi venga indirizzato verso il motore di ricerca di Google. Agendo in tal modo, Google ha utilizzato Android come strumento per consolidare la posizione dominante del proprio motore di ricerca. Tali

2.2 La questione della neutralità della rete

La questione della neutralità della rete si inserisce centralmente rispetto alla tematica della neutralità dei dispositivi e di quella dei *content provider*, andando ad analizzare la legittimità delle regole che disciplinano la trasmissione dei dati nella rete Internet. Storicamente il termine *net neutrality* è stato utilizzato per la prima volta in un noto articolo pubblicato dal professor Wu nel 2003 (Wu & Tim, *Network Neutrality, Broadband Discrimination*, 2003). In questo studio, di taglio spiccatamente legale, si discute sul ruolo dei possessori dell'infrastruttura di rete e sulle possibili conseguenze derivanti dal controllo che i fornitori del servizio Internet potrebbero esercitare sul flusso di dati trasmesso attraverso i loro *network*. È indubbio infatti, come lo sviluppo di Internet e la sua evoluzione a piattaforma universale di informazione, intrattenimento, comunicazione e *business* ha comportato un cambiamento radicale del ruolo degli ISP, trasformandoli, da semplici fornitori di servizi, a *gatekeeper* insostituibili della società digitale. Nel lavoro di Wu il termine *controllo* è utilizzato in un'accezione estesa e in linea generale può essere interpretato in un'ottica di: discriminazione da parte degli ISP di differenti tipologie di dati, istituzione di *termination fees*, utilizzo di pratiche di network management ed offerta di QoS differenziate ai consumatori.

Da un punto di vista concettuale, per capire approfonditamente i modelli economici sviluppati, è importante chiarire come il concetto di neutralità della rete, in tutte le sue diverse accezioni, si applica alle relazioni stabilite tra tre attori principali della rete: i *content provider*, i consumatori connessi alla rete e gli *Internet provider*. In particolare, il dibattito si focalizza intorno al *download* dei contenuti da parte degli utilizzatori, interessando quindi l'invio di informazioni nella parte inferiore della catena del valore di Internet, dove gli ISP occupano quindi un ruolo di *gatekeeper* nell'accesso ai contenuti della rete. La *figura 2*, riprendendo lo schema dei principali attori della rete analizzato nel corso del precedente capitolo, chiarisce dettagliatamente il segmento della catena intorno al quale si concentra il dibattito.

pratiche hanno negato ai concorrenti la possibilità di innovare e di competere in base ai propri meriti ed hanno negato ai consumatori europei i vantaggi di una concorrenza effettiva nell'importante comparto dei dispositivi mobili. Ai sensi delle norme antitrust dell'UE, si tratta di una condotta illegale."

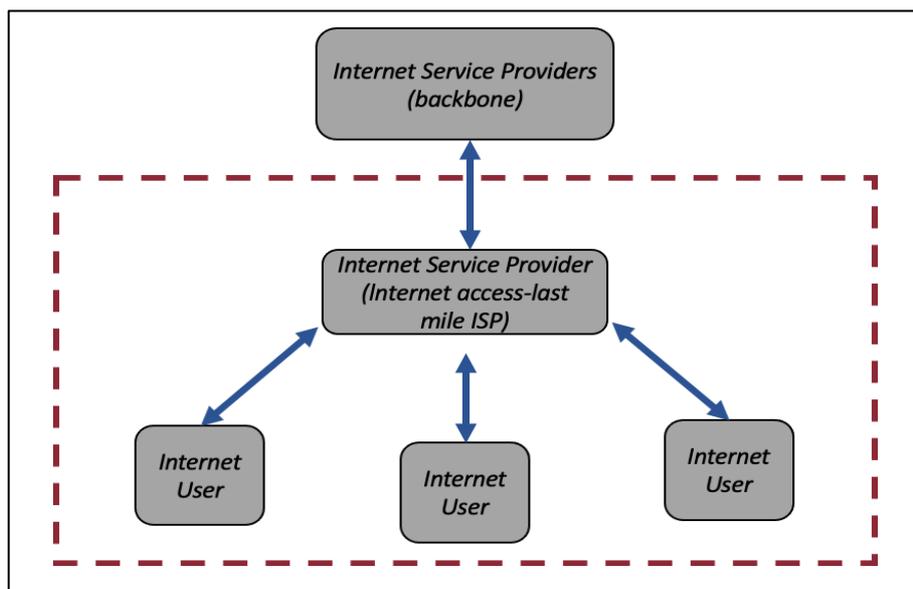


Figura 2: Focus del dibattito sulla neutralità della rete

Data la complessità e le numerose sfaccettature che caratterizzano il tema, non è mai stata fornita una definizione univoca e comunemente accettata del concetto di neutralità della rete. Da un punto di vista accademico ed espositivo tuttavia, è preferibile dividere la questione in almeno due macro-categorie distinte: un concetto di neutralità ristretta⁹⁶ e uno più generale di neutralità allargata.

2.2.1 Strict net neutrality

In un lavoro pubblicato da Krämer *et al.* nel 2013 (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013), riprendendo la definizione fornita da un'associazione di consumatori americana⁹⁷, è stata formalizzata per la prima volta la nozione di neutralità ristretta della rete che può essere definita come:

Definizione 1: "La neutralità (ristretta) della rete proibisce agli Internet provider di velocizzare, rallentare o bloccare il traffico internet in base alla sorgente dei dati, alla tipologia o alla destinazione".⁹⁸

⁹⁶ Nei *paper* accademici si parla in questo caso di *strict net neutrality* (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013).

⁹⁷ Si fa riferimento all'associazione "Save the Internet" <https://www.freepress.net/issues/free-open-internet/net-neutrality>.

⁹⁸ Alternativamente a questa definizione è possibile esaminare quella proposta da Wu (Wu & Tim, Network Neutrality, Broadband Discrimination, 2003) secondo cui la questione della neutralità della rete

Da un punto di vista tecnico è chiaro come qualsiasi forma di violazione del principio di neutralità ristretta della rete richiede l'ispezione preventiva dei pacchetti in entrata nei *router*. Tali tecniche, note come *Deep Packet Inspection (DPI)* permettono di dividere il traffico Internet in base all'origine, destinazione e contenuto dei pacchetti. Prima di applicare qualsiasi tecnica di *network management*⁹⁹ infatti, è necessario suddividere in differenti classi i pacchetti di dati trasmessi e ricevuti. Quando vige il principio di neutralità ristretta, le informazioni ricavate da queste analisi non possono essere utilizzate e i *router* devono continuare ad operare secondo una logica *best effort*, processando i differenti pacchetti di informazione in relazione al loro ordine di arrivo. Per classificare questo concetto nel linguaggio accademico gli studiosi utilizzano il termine *no-discrimination rule*, intendendo il principio che proibisce agli ISP ogni forma di *network management* nel *last mile* della rete.

Al contrario invece, quando gli ISP infrangono il principio di neutralità ristretta della rete, si assiste all'implementazione di alcune tecniche di gestione dei dati senza che sia richiesto alcun pagamento né agli utenti della rete né ai *content provider*. Si può quindi affermare che la violazione della neutralità ristretta della rete non modifica in alcun modo i flussi di pagamento stabiliti tra i diversi attori del mercato, andando a modificare solamente l'ordine e la frequenza di invio dei differenti protocolli dei pacchetti di informazione.

Senza dubbio, da un punto di vista giuridico e sociale, il blocco selettivo di alcuni contenuti in rete è la forma di interferenza più rilevante che può essere effettuata da parte di un ISP. A questo proposito, nel dibattito pubblico sviluppato negli Stati Uniti nei primi anni 2000, tra gli argomenti principali su cui si basavano le tesi dei maggiori sostenitori del principio di *NN* spiccava la convinzione che solamente il rispetto della *no-discrimination rule* avrebbe potuto garantire la completa libertà d'espressione dei cittadini attraverso la rete. Da un punto di vista tecnico infatti, è innegabile come gli ISP

può essere definita come: "*a network design principle stating that all data packets should be treated equally regardless of their content, sites, and platforms*".

⁹⁹ Si veda a tal proposito il paragrafo: Il management della trasmissione dei dati in rete

hanno il potere di censurare e bloccare, qualsiasi contenuto trasmesso attraverso la loro infrastruttura di rete. Tuttavia, bisogna sottolineare come, a parte alcuni limitati episodi, questa forma di discriminazione dell'informazione è rimasta storicamente circoscritta. Senza dubbio infatti, come è già stato evidenziato da Holznagel e Nüßing (Holznagel & Nüßing, 2011), le leggi costituzionali europee e nordamericane offrono già una sufficiente protezione alla libertà di espressione dei cittadini, limitando efficacemente la possibile implementazione di pratiche di blocco arbitrario da parte degli *Internet provider*. Inoltre, da un punto di vista economico e sociale, è indubbio come l'utilizzo di questa tipologia di pratiche discriminatorie causerebbe inevitabilmente un'immediata perdita di reputazione dell'ISP nei confronti sia dei consumatori che dei *content provider*.

Al contrario, l'analisi delle pratiche di rallentamento e di velocizzazione¹⁰⁰ di specifici protocolli di dati risulta essere molto più complessa ed articolata rispetto al più semplice blocco dei contenuti. In questo caso infatti, l'applicazione di tecniche di *management* della rete possono avere sia dei risvolti positivi che negativi sia per quanto riguarda la qualità di trasmissione della rete che, in generale, sul livello di benessere aggregato della società. Da un punto di vista storico infatti, è possibile verificare come il rallentamento di protocolli specifici di informazione sia stato implementato sia per favorire il consumo e l'utilizzo di particolari servizi a discapito di altri, in maniera chiaramente discriminatoria per i consumatori, sia per una effettiva esigenza di miglioramento della QoE dell'utente finale.

Per avere una panoramica generale su questo tema è possibile analizzare il lavoro pubblicato da Wu (Wu, 2003). In questo articolo il Professore della *Columbia University* ha effettuato un'analisi dettagliata di tutte le possibili forme di discriminazione dei dati trasmessi in rete. Le pratiche di *network management* analizzate sono state quindi suddivise in due macro-classi differenti, separando quelle che apportano un beneficio

¹⁰⁰ Da un punto di vista tecnico la velocizzazione e il rallentamento dell'informazione sono due aspetti speculari della stessa forma di discriminazione. Nel caso in cui un *Internet provider* decida di velocizzare un determinato protocollo di dati infatti, causerebbe inevitabilmente il rallentamento di tutte le altre tipologie di informazione trasmesse nella rete.

reale agli utilizzatori finali da quelle che comportano una discriminazione superflua dei dati trasmessi in rete.

Volendo fornire un esempio delle forme di discriminazione delle informazioni che potrebbero supportare contemporaneamente la QoE degli utenti finali e la trasmissione delle informazioni dei content provider è possibile esaminare le tecniche comunemente adottate per incrementare la QoE dei servizi particolarmente sensibili ai fenomeni di congestione della rete. Gli utilizzatori di applicazioni VoIP, ad esempio, generalmente desiderano dare priorità ai dati *time sensitive* dell'applicazione di telefonia digitale rispetto a quelli di un'applicazione generica in esecuzione sul medesimo dispositivo¹⁰¹, con l'obiettivo di garantire un'affidabilità e una stabilità maggiore del servizio. Per questo motivo i consumatori, durante i picchi di congestione della rete, tendono a disattivare le applicazioni che richiedono un particolare consumo di banda. Grazie allo scollegamento infatti, è possibile abbattere istantaneamente il grande volume di traffico generato dalla trasmissione P2P e allo stesso tempo limitare considerevolmente la componente di *jitter* creata nella connessione¹⁰². Chiaramente questa abitudine porta inevitabilmente allo spegnimento di un numero elevato di *seed* nei periodi di maggior richiesta di contenuti, comportando un rallentamento complessivo dei dati trasmessi dall'applicazione e una riduzione generalizzata della QoE di tutti gli altri *peer*. Sia dal punto di vista degli sviluppatori delle applicazioni P2P, che da quello dei consumatori, potrebbe risultare dunque preferibile implementare un sistema di *network management* in grado di modulare le priorità di invio dei pacchetti di informazioni nel tempo. In questo modo infatti, si potrebbe garantire la QoE degli utilizzatori di applicazioni *time sensitive* negli orari di massima congestione della rete, evitando allo stesso tempo lo spegnimento intermittente delle applicazioni P2P.

¹⁰¹ Ad esempio, è prassi comune tra gli appassionati di videogiochi *online* e tra i visitatori di piattaforme di *streaming video* di disattivare le applicazioni che causano maggior congestione della rete per aumentare la propria esperienza di gioco o di visione

¹⁰² Si confronti il paragrafo: I fenomeni di *jitter* e la capacità della rete

2.2.1.1 *Principali episodi di violazione della strict net neutrality*

Storicamente i casi di violazione del concetto ristretto di neutralità della rete sono stati particolarmente rilevanti, accendendo l'interesse di numerosi gruppi di attivisti e alimentando un articolato dibattito politico e accademico a livello globale.

Da un punto di vista generale è possibile osservare come l'epicentro dei casi di violazione della rete si sia verificato nei mercati dell'America Settentrionale, concentrandosi nel primo decennio degli anni 2000. Inoltre, per quanto riguarda specificatamente la struttura di mercato, è possibile verificare come le pratiche di rallentamento e velocizzazione dei dati sono state implementate con maggiore frequenza nei casi in cui gli *internet provider* utilizzassero la medesima infrastruttura per trasmettere servizi differenti, oppure nel caso in cui si fosse in presenza di fenomeni di integrazione verticale tra *internet provider* e *content provider*. A sostegno di queste considerazioni nel corso del prossimo paragrafo verranno approfonditi gli episodi storicamente di maggior rilievo di implementazione di tecniche discriminatorie di *network management* nella rete.

Tra i casi più rilevanti è possibile ricordare il noto caso Madison River del 2005, in cui uno dei maggiori ISP della Carolina del Nord ha bloccato le comunicazioni effettuate attraverso il protocollo voice-over-Internet (VoIP) di alcuni gruppi di consumatori per tutelare il proprio servizio di telefonia mobile classica (Krim, 2005).

Nello stesso anno, in Canada si è verificato uno degli episodi più rilevanti di blocco di informazioni da parte di un *internet provider* di una democrazia occidentale. Telus, la terza impresa di telecomunicazioni canadese per numero di utenti, ha infatti bloccato l'accesso a un server che ospitava il sito web degli organizzatori di uno sciopero della *Telecommunications Workers Union* (Austen, 2005) contro la stessa società.

Nel 2007 Comcast, il maggior ISP degli Stati Uniti, ha implementato una tecnica di rallentamento dei flussi dei dati scambiati tra applicazioni P2P. L'obiettivo dichiarato dalla società era quello di limitare l'invio di pacchetti di informazioni internamente alla propria rete al fine di ridurre i fenomeni di congestione del *network* e permettere una migliore QoE all'utente finale durante la navigazione in Internet. Tuttavia, il fatto suscitò

molto clamore a livello pubblico poiché la società non aveva effettuato alcuna comunicazione riguardo all'implementazione di tali tecniche. Solamente un'inchiesta dell'*Associated Press* (Svensson, 2007) e dell'*Electronic Frontier Foundation* (Schoen, 2007) hanno appurato come la tecnologia adottata limitasse la capacità di *upload* degli utenti che utilizzavano applicazioni di *file sharing* P2P come *Utorrent* e *Gnutella*.

Sempre negli Stati Uniti, la società AT&T, multinazionale texana delle telecomunicazioni, ha imposto ad Apple tra il 2007 e il 2009¹⁰³ il blocco dell'applicazione Skype e di altre applicazioni che offrivano servizi simili sul suo dispositivo mobile, per evitare che gli utilizzatori potessero effettuare chiamate telefoniche servendosi della rete Internet¹⁰⁴ e non richiedendo di conseguenza il servizio di telefonia classico offerto dalla società¹⁰⁵ (Hansell, 2009).

Infine, dal 2011 al 2013 tre colossi delle telecomunicazioni degli Stati Uniti, AT&T, Sprint e Verizon hanno bloccato un'applicazione di pagamenti digitali sviluppata da Google e denominata Google Wallet. Il blocco dell'applicazione è stato effettuato per incentivare l'utilizzo di un'applicazione concorrente frutto di una partnership tra le tre società che, nel 2010 avevano fondato Isis, società specializzata nei pagamenti digitali tramite *smartphone* (Goldman, 2011).

2.2.2 *Net neutrality estesa*

Per introdurre il concetto esteso di neutralità della rete è possibile esaminare un particolare episodio accaduto negli Stati Uniti nel 2012. La società AT&T, leader americana delle telecomunicazioni, cercando di limitare l'utilizzo di applicazioni che

¹⁰³ Si ricorda che la prima versione dello *smartphone* della mela era acquistabile negli Stati Uniti solamente sottoscrivendo un contratto di fornitura di servizio telefonico con AT&T che ha portato le due società a difendersi davanti alla corte federale per violazione della normativa *antitrust*.

¹⁰⁴ In gergo tecnico si è soliti utilizzare l'espressione *over the top* per definire la trasmissione dei contenuti tramite una connessione Internet, su cui i relativi fornitori non hanno alcuna influenza o controllo.

¹⁰⁵ Il blocco di applicazioni o contenuti non affiliati a un provider integrato verticalmente è un fenomeno già ampiamente riscontrato nei mercati a piattaforma. In un lavoro pubblicato da Chipty (Chipty & Tasneem, 2001) ad esempio, è stato evidenziato come nel mercato della televisione via cavo, che per struttura può essere considerato estremamente simile a quello della rete Internet, i detentori dell'infrastruttura integrati verticalmente tendono ad offrire una varietà di programmi inferiori rispetto agli operatori non integrati.

offrivano servizi di telefonia via web, ha dichiarato di voler disabilitare l'applicazione *FaceTime* da tutti gli *iphone* dei propri utenti. L'applicazione, preinstallata nei dispositivi della Mela, sarebbe tornata disponibile solamente per quegli utenti disposti a sottoscrivere un contratto telefonico *premium* (Group M. B., 2013).

Questo esempio di infrazione del principio di neutralità della rete introduce un aspetto di fondamentale importanza nel dibattito della *net neutrality*. Molti ricercatori e politici infatti, si domandano in che modo gli ISP cercheranno di ricavare profitto sfruttando la loro posizione di *gatekeeper* dell'infrastruttura di rete. A tale proposito, risulta utile introdurre una nuova definizione di neutralità della rete, che tenga in considerazione gli aspetti economici della questione. Per introdurre il concetto è possibile analizzare la definizione introdotta da Hahn e Wallsten (Hahn & Wallsten, 2006).

Definizione 2: "Il concetto di neutralità (estesa) della rete implica che i fornitori del servizio internet richiedono il pagamento per l'accesso alla rete una sola volta ai consumatori, non favoriscono alcuni content provider rispetto ad altri e non chiedono il pagamento di alcuna commissione ai content provider per l'invio di informazioni ai consumatori finali attraverso le loro linee¹⁰⁶".

Nella letteratura accademica relativa alla neutralità della rete, quando un ISP richiede un pagamento extra ai *content provider* in cambio della semplice trasmissione dei contenuti ai consumatori finali si è soliti parlare del concetto di *termination fee*. Questa tipologia di commissioni, generalmente utilizzata nel mercato relativo al servizio di comunicazione telefonica fissa, è stata portata per la prima volta all'attenzione dell'opinione pubblica dalle parole utilizzate nel 2005 dall'amministratore delegato di SBC, una delle maggiori società di telecomunicazioni americane specializzata nel servizio di telefonia locale. Whitacre, all'epoca CEO della società (successivamente assorbita per fusione in AT&T) riferendosi ai grandi *content provider* come Google e Yahoo! durante un'intervista ha infatti dichiarato:

¹⁰⁶ Traduzione propria di: "Net neutrality usually means that broadband service providers charge consumers only once for Internet access, do not favor one content provider over another, and do not charge content providers for sending information over broadband lines to end users".

“How do you think they’re going to get to customers? Through a broadband pipe. Cable companies have them. We have them. Now what they would like to do is use my pipes free, but I ain’t going to let them to do that because we have spent this capital and we have to have a return on it. So, there’s going to have to be some mechanism for these people who use these pipes to pay for the portion they’re using. Why should they be allowed to use my pipes? The Internet can’t be free in that sense, because we and the cables companies have made an investment and for Google or Yahoo! Or Vonage or anybody to expect to use these pipes for free is nuts” (Whitacre, 2005).

Lo stesso concetto è stato più volte ribadito dagli amministratori delegati dei maggiori ISP a livello globale, scatenando ogni volta un acceso dibattito riguardo la legittimità dell’implementazione di un tale modello di *business*.

Nel 2010, ad esempio, Cesar Alierta, amministratore delegato di Telefonica, intervenendo al *Mobile World Congress* di Barcelona ha dichiarato:

“It is unfair that search engines were using mobile bandwidth for free while Telefonica’s operations provided the network, product sales, customer care, installation and maintenance for them”.

Sempre nel corso dello stesso congresso Vittorio Colao, al tempo amministratore delegato di Vodafone, ha dichiarato che i *content provider* come Google e Yahoo! dovrebbero pagare una commissione per ottenere un accesso privilegiato alla rete. Questa dichiarazione permette di introdurre un ulteriore modello di business molto dibattuto nel campo della neutralità della rete, consistente nell’offrire un accesso differenziato alla rete Internet. Da un punto di vista generale, questa tecnica può essere implementata dagli ISP sia sul lato dei Content Provider che su quello degli utilizzatori della rete. In gergo tecnico si parlerà dunque di *content and service provider tiering* nel primo caso e di *user tiering* nel secondo¹⁰⁷. Utilizzando una terminologia tecnica, diffusa

¹⁰⁷ Analizzando queste tipologie di di *pricing* è immediato verificare come questi modelli di business siano supportati, dal punto di vista tecnico, da una forma di discriminazione dei pacchetti di informazioni. Come analizzato nel corso del precedente paragrafo infatti, è possibile affermare che in generale gli ISP possono discriminare i pacchetti di informazioni sia in base alla provenienza che alla loro destinazione. Facendo leva su questa classificazione dei dati gli internet provider possono dunque richiedere pagamenti aggiuntivi, infrangendo la *zero price-rule*, sui due lati della piattaforma del mercato. Utilizzando un’espressione cara a Krämer (Krämer, Guo, & Easley, 2018) dunque in alternativa ai concetti di *user* e

in particolare tra i ricercatori sul tema, quando agli ISP è fatto divieto di richiedere pagamenti extra sia dal lato dei *content provider* che da quello dei consumatori si parla in genere di *zero-price rule* (Schuett, 2010). Si noti come il rispetto della *non-discrimination rule* è una condizione sufficiente a verificare automaticamente l'applicazione della *zero-price rule*. Gli ISP, infatti, non potendo discriminare in alcun modo il traffico smistato attraverso le loro reti, non possiedono alcuna leva economica per aumentare la propria funzione di profitto.

2.3 Modelli analitici della *net neutrality*

Come già accennato in precedenza, il tema della neutralità della rete è ancora largamente dibattuto tra gli accademici e i *policy maker* a livello mondiale. In generale infatti, gli esperti del tema si dividono più o meno equamente in sostenitori e detrattori sia della *zero-price rule* che della *discrimination rule*.

La complessità della struttura economica della rete infatti, causata sia dall'intricato intreccio dei rapporti tra i principali attori del *network* che dalla numerosità delle variabili da esaminare, ha portato allo sviluppo di modelli incerti e parzialmente contrastanti. Non deve stupire quindi che, alla data odierna, nessun modello con fondamento economico-matematico sia riuscito a dimostrare, in maniera inequivocabile, la superiorità di una fazione rispetto all'altra. In generale quindi, è possibile anticipare che l'applicazione di una normativa imposta *ex-ante* da un regolatore, elaborata con il fine di preservare la forma più ristretta di neutralità della rete, non risulta supportata da alcun risultato con fondamento scientifico. Da un punto di vista generale, allo stato attuale della ricerca, un approccio basato sul controllo *ex-post* affidato all'autorità della concorrenza risulta senza dubbio più equilibrato.

A sostegno di queste affermazioni nel corso dei successivi paragrafi sono analizzati i risultati dei principali modelli analitici sviluppati dai ricercatori per studiare la tematica della *net neutrality*. In particolare, l'analisi verrà sviluppata seguendo l'ordine già

content tiering è possibile parlare in maniera equivalente di *consumer-driven* e *content provider-driven packet discrimination*.

utilizzato nel corso dei precedenti paragrafi, si approfondiranno quindi prima i modelli economici rappresentanti le tipologie di infrazione del concetto di neutralità ristretta e, successivamente, si amplierà l'analisi al concetto di neutralità allargata.

2.3.1 Principale modello economico per l'analisi della struttura di rete

In generale, la maggior parte degli studiosi e dei ricercatori interessati al tema della neutralità della rete per poter effettuare delle simulazioni sul mercato Internet e verificare gli effetti dell'imposizione della *no-discrimination* e della *zero price rule*, si sono serviti di un classico modello *two-sided market*.

In questa tipologia di mercato, l'ISP occupa infatti il ruolo di una piattaforma, in quanto promuove l'interazione tra i rimanenti soggetti economici, rappresentati dai *content provider* e dagli utilizzatori finali della rete.

È interessante notare come, data la particolare struttura dei rapporti economici instaurati nella rete, riconducibile ai mercati a piattaforma, si creino naturalmente delle considerevoli esternalità di rete incrociate¹⁰⁸. Questo concetto in termini economici può essere espresso affermando che ogni utente aggiuntivo che si collega alla rete genera un aumento dell'utilità di connessione percepita sull'altro lato della piattaforma dai *content provider*. Dal punto di vista pratico, l'aumento di utilità è facilmente spiegabile considerando l'aumento di profitto potenziale dei CP all'aumentare degli utenti attivi nella rete. Risulta chiaro infatti, come la funzione di profitto di qualsiasi operatore attivo nella rete sia crescente in funzione del numero di visitatori e consumatori essendo questi una potenziale fonte di aumento dei ricavi diretti, attraverso il pagamento di specifici abbonamenti, o indiretti, in relazione all'aumento dei ricavi percepiti da società terze per la loro promozione attraverso il Web. Viceversa, sull'altro lato della piattaforma, ogni contenuto o servizio aggiuntivo messo a disposizione nella rete aumenta l'utilità dei consumatori, grazie all'incremento complessivo della varietà dei prodotti presenti in rete.

¹⁰⁸ Il termine inglese utilizzato nella maggior parte dei *paper* accademici sul tema è *cross-side network effect*. Chiaramente nel mondo Internet è indubbio come siano presenti anche delle economie di rete semplici (*same side network effect*), tuttavia ai fini dell'analisi degli effetti del principio di neutralità della rete questo fenomeno risulta di minor importanza.

In generale, gli accademici sono soliti dividere i mercati a due lati in due differenti macro-categorie (Rocket & Tirole, 2003) e (Armstrong & Mark, 2005). A questo proposito si parla infatti di *membership fees two sided market* quando il pagamento per l'accesso alla piattaforma è fisso e non dipendente dalle performance della piattaforma sull'altro versante del mercato, mentre si definisce *usage fees two sided market* una struttura di mercato in cui la quota di partecipazione alla piattaforma è una funzione diretta delle performance raggiunte dalla piattaforma sull'altro versante del mercato¹⁰⁹.

2.3.2 Modelli analitici di infrazione della neutralità ristretta della rete

Da un punto di vista generale, come già evidenziato ripetutamente da Kramer nei suoi articoli (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013), risulta chiaro come la rigida implementazione di una normativa a supporto del principio ristretto di neutralità della rete porta, in generale, ad una numerosa serie di controindicazioni. A causa dell'applicazione della *no-discrimination rule* infatti, gli ISP non potrebbero servirsi di alcuna forma di *network management* per la gestione dei dati all'interno delle loro infrastrutture, nemmeno per risolvere i momentanei fenomeni di congestione della rete. Inoltre, come analizzato nel corso del precedente capitolo, lo smistamento dell'intero volume di informazione secondo un rigido principio *best effort* richiede un continuo sovradimensionamento dell'infrastruttura di rete nel lungo periodo mentre, nel breve periodo, implica un inevitabile aumento della congestione della rete durante i picchi di richiesta del servizio, ed una conseguente diminuzione della QoE generale dei consumatori.

In un lavoro pubblicato dal professor Yoo (Yoo, 2005) sono formalmente presentati alcuni temi a supporto dell'eliminazione del principio di neutralità ristretta della rete. In particolare, uno dei temi centrali attorno al quale si sviluppa la discussione è la tematica della varietà dei contenuti trasmessi attraverso Internet. Secondo l'Autore infatti, l'imposizione del principio di neutralità porta inevitabilmente alla discriminazione di alcune tipologie di applicazioni rispetto ad altre, convogliando l'innovazione in

¹⁰⁹ Un esempio tipico di *usage fees charge* è la richiesta di pagamento per pubblicità effettuata sui canali tv o sui quotidiani, funzione diretta dell'audience ricevuta e delle copie vendute al pubblico.

determinati filoni di ricerca, tecnologicamente più avvantaggiati. Sul lato dell'offerta del mercato si assisterebbe quindi alla riduzione delle applicazioni fortemente basate sulla QoS della trasmissione, come per esempio la IPTV o il VoIP. Tale perdita di varietà rappresenta una forma di fallimento del mercato, che conduce a una riduzione generale del benessere sociale. A sostegno di questa ipotesi Yoo, distaccandosi da un modello definito dallo stesso autore *price-theoretic*, in cui il *welfare* generale è calcolato staticamente in relazione alla somma del surplus del consumatore e del produttore, introduce una visione più dinamica del mercato, ponendo l'attenzione sulla varietà dei contenuti disponibili. Secondo l'opinione dell'autore infatti, l'utilità dei consumatori può aumentare considerevolmente grazie allo sviluppo di servizi e prodotti che soddisfano maggiormente i loro bisogni. Tuttavia, il beneficio derivante dalla differenziazione dei produttori è difficilmente osservabile nel classico spazio di analisi prezzo-quantità. Nondimeno incentivare lo sviluppo di applicazioni e contenuti differenti rimane una buona fonte di aumento del *welfare* generale nella società.

Un'ulteriore questione analizzata dal lavoro approfondisce il tema degli investimenti nell'infrastruttura di rete. Secondo l'autore infatti, la disponibilità di banda offerta dall'infrastruttura non sarà mai sufficiente a soddisfare la richiesta di connessione dei consumatori. Il *mismatch* inoltre, tende naturalmente ad aumentare nel tempo, dato che la crescita delle nuove connessioni alla rete segue un andamento esponenziale nel tempo (Daniel & Christopher, 2005). La condizione di neutralità richiede quindi da parte degli internet provider il continuo investimento nell'infrastruttura di rete. Tuttavia, l'Autore evidenzia come le decisioni di investimento effettuate per aumentare la capacità del Network risultano particolarmente difficili quando non è possibile stabilire a priori la distribuzione della domanda all'interno della rete. Questa ambiguità porta in molti casi gli internet provider a dover effettuare un sovradimensionamento della struttura, pratica che comporta un'evidente riduzione del benessere sociale rispetto all'utilizzo di pratiche di *network management*. Infine, come già discusso in precedenza, l'applicazione della *no-discrimination rule* implica automaticamente l'imposizione della *zero-price rule* che, come sarà analizzato dettagliatamente in seguito, oltre a

comportare l'abbassamento dei profitti percepiti degli ISP, causa l'inevitabile aumento del costo di connessione per gli utilizzatori finali.

2.3.2.1 *L'integrazione verticale degli ISP e la neutralità ristretta della rete*

Nell'ambito della discussione riguardo l'applicazione della neutralità ristretta della rete uno dei temi di maggior interesse dal punto di vista politico ed economico riguarda i differenti incentivi degli *internet provider* integrati verticalmente alla discriminazione dei pacchetti di informazione inviati da *content provider* concorrenti. In particolare, il tema centrale della discussione si focalizza attorno alla considerazione che gli internet provider integrati a monte nella filiera, potrebbero avere degli incentivi a degradare artificialmente la trasmissione dei contenuti sviluppati da aziende concorrenti. In questo modo infatti, gli ISP potrebbero aumentare la richiesta dei prodotti affiliati interferendo attivamente sul livello della qualità della trasmissione dei servizi sostituiti. È importante notare come questo fenomeno si possa verificare anche quando non è richiesto da parte degli ISP alcun contributo ai *content provider* e dunque sia rispettata la *zero-price rule*.

Il caso Madison River esaminato in precedenza, in cui la società ha bloccato il servizio VoIP trasmesso attraverso le sue linee, è un chiaro esempio di questa problematica che, in gergo accademico, viene definita utilizzando il termine di *downstream foreclosure*¹¹⁰ (Ray & Tirole, 2003).

Da un punto di vista generale tuttavia, l'esistenza e l'entità dell'incentivo in questione sono tutt'ora poco chiare ed accademicamente dibattute. Senza alcun dubbio infatti, l'ISP integrato può facilmente internalizzare il valore creato dai contenuti affiliati mentre, nel rispetto della *zero-price rule*, non può appropriarsi del valore generato dagli altri *content provider*. Tuttavia, bisogna considerare che, a causa della particolare struttura del mercato, sia il *content provider* affiliato che quello indipendente offrono un servizio complementare al servizio di connessione Internet offerto dall'ISP.

¹¹⁰ Con il termine *downstream foreclosure* Ray e Tirole intendono: "is the exclusion that results when a downstream buyer is denied access to an upstream supplier (Upstream Foreclosure), or when an upstream supplier is denied access to a downstream buyer (Downstream Foreclosure).

Risulta chiaro infatti come una connessione Internet senza alcun *content provider* sul lato dell'offerta dei prodotti sia tanto inutile quanto un *content provider* senza un canale attraverso il quale trasmettere i servizi e i contenuti prodotti ai consumatori. Si può affermare quindi che la semplice presenza di un *content provider* aggiuntivo, per quanto non affiliato all'ISP, generi un aumento di valore del servizio di connessione agli occhi del consumatore. L'analisi di questo particolare *trade-off* è stata effettuata in numerosi articoli accademici che hanno dimostrato come gli ISP integrati verticalmente non siano inevitabilmente portati a degradare o bloccare i contenuti e i servizi prodotti da *content provider* non affiliati. In generale infatti, le conclusioni di maggior rilievo sviluppate dalle ricerche accademiche hanno avvalorato la tesi secondo cui gli ISP integrati verticalmente sono incentivati ad effettuare pratiche discriminatorie in maniera indirettamente proporzionale al valore attribuito dagli utenti finali al servizio trasmesso (Dwenter & Rösch, 2016) (Broos & Gautier, 2017). Risulta chiaro dunque come gli Internet provider siano naturalmente portati a favorire la trasmissione dei contenuti a più alto valore per il consumatore, indipendentemente dai rapporti societari esistenti. I contenuti ad alto valore infatti, agendo da bene complementare rispetto al servizio di connessione Internet, aumentano il valore totale percepito dai consumatori, che sono così disposti a pagare un prezzo superiori agli ISP per l'accesso alla Rete.

In un lavoro pubblicato da Guo nel 2010 è stato dimostrato come nel caso estremo in cui i consumatori valutano in maniera considerevole un determinato contenuto caratterizzato da un'alta sensibilità ai fenomeni di jitter, gli ISP possono giungere a velocizzare i pacchetti di informazioni provenienti dai *content provider* non affiliati se non possono offrire il medesimo prodotto/servizio (Guo, Cheng, & Bandyopadhyay, 2010). Al contrario quando un Content provider offre un prodotto di scarso valore per il consumatore finale o il servizio risulta molto simile a quello offerto dal *content provider*, gli effetti delle esternalità di rete diminuiscono e dunque l'ISP è maggiormente incentivato a discriminare i pacchetti di informazioni non affiliati (Dwenter & Rösch, 2016).

In un lavoro pubblicato dalla *Yale School of management* (Chen, Nalebuf, & Keith, 2006) è stato esaminato il fenomeno del *downstream foreclosure*, valutando i risvolti di questo fenomeno nel mercato della connessione Internet a banda larga. Risulta utile notare come i risultati raggiunti dallo studio sono considerevolmente differenti rispetto ai casi esaminati precedentemente. In particolare, il modello analizzato ha esaminato gli incentivi alla discriminazione di un ISP in un mercato in cui si assiste alla competizione di due *content provider*, di cui uno integrato verticalmente, che offrono due prodotti complementari. Il CP integrato a monte della filiera offre inoltre un prodotto essenziale ai consumatori, che può essere considerato, semplificando, come il servizio di connessione Internet. Nel lavoro si dimostra che quando i due *content provider* competono per il prodotto non essenziale quello integrato verticalmente offre sul mercato il prodotto ad un prezzo pari al costo marginale. In questo modo, infatti, il CP integrato aumenta il valore catturato dai consumatori nel mercato del bene non essenziale, estraendo a sua volta un *surplus* maggiore grazie all'aumento del prezzo del bene essenziale nel segmento di mercato in cui è monopolista.

Ampliando il modello e considerando la possibilità che l'ISP integrato verticalmente possa degradare la qualità di trasmissione del CP non affiliato, si giunge all'interessante conclusione che in questo modello non esiste alcun incentivo per la discriminazione dei contenuti non affiliati da parte dell'ISP. Chiaramente questo risultato, come già evidenziato da Schuett (Schuett, 2010), è una conseguenza diretta dell'ipotesi di basso valore del bene non essenziale. Nel mercato in cui competono i due *content provider* infatti, essendo il prezzo di vendita del prodotto pari al costo marginale non c'è alcun profitto aggiuntivo di cui appropriarsi da parte dell'ISP.

Chiaramente i risultati ricavati dal modello di Chen e Nalebuf contrastano con l'evidenza empirica riscontrata, in quanto, come analizzato precedentemente, si sono verificati numerosi episodi di degradazione volontaria dei contenuti non affiliati da parte degli ISP¹¹¹. È indubbio, infatti, come l'ipotesi di basso valore attribuito dai consumatori ai servizi offerti sul mercato tra i due *content provider* in competizione non sia sempre verificata.

¹¹¹ Si veda a tal proposito il paragrafo: Principali episodi di violazione della strict net neutrality.

2.3.3 Modelli analitici di infrazione della neutralità della rete allargata

Una volta chiarite le principali relazioni e i principi fondamentali che influenzano i vari *trade-off* relativi al rispetto della *no-discrimination rule* della rete, risulta interessante ampliare il modello di analisi, ammettendo quindi la possibilità che gli ISP possano infrangere la *zero-price rule* richiedendo il pagamento aggiuntivo di un emolumento sia sul lato dei consumatori che su quello dei *content provider*.

Nel corso dei prossimi paragrafi saranno quindi analizzati i modelli matematico-economici rappresentanti le forme di violazione più rilevanti del principio allargato di neutralità della rete.

2.3.3.1 *Termination fee e la neutralità della rete*

Nei paragrafi precedenti è stata introdotta la *zero price rule* che, come è già stato discusso, stabilisce che gli ISP non possono richiedere alcun pagamento ai *content provider* per trasmettere i loro contenuti ai consumatori finali. Pertanto, quando questa condizione è verificata, sia i *content provider* che gli utilizzatori pagano al proprio ISP solamente il servizio di accesso alla rete Internet.

In caso contrario, è possibile che ai *content provider* sia richiesto un pagamento aggiuntivo per trasmettere i contenuti ai consumatori finali. In questo caso si è in presenza di uno dei principali casi di violazione del principio di neutralità della rete, denominato dagli studiosi *termination fee* (Lee, Wu, & Tim, 2009).

In uno studio effettuato da Economides e Tåg (Economides & Tåg, 2007) sono state analizzate le conseguenze derivanti dall'imposizione della neutralità della rete considerando due strutture principali di mercato caratterizzate, nel primo caso, dalla presenza di un ISP monopolista, mentre nel secondo di un duopolio di *Internet provider*. In generale, il risultato di maggior rilievo raggiunto dallo studio dimostra come le esternalità incrociate esistenti tra i consumatori e i *content provider* possono, nel caso siano verificate alcune condizioni specifiche, supportare l'applicazione del principio di neutralità della rete. In particolare, una delle condizioni fondamentali necessarie a supportare la validità del modello è che l'aumento marginale di utilità percepito dai

consumatori per ogni *content provider* addizionale operante nel mercato sia inferiore all'aumento marginale percepito dai *content provider* per ogni nuovo consumatore connesso alla rete. Questa condizione infatti, deve essere necessariamente verificata affinché, in condizione di assenza di NN, gli ISP siano incentivati a richiedere il pagamento di una *termination fee* ai *content provider*. Come già evidenziato dal modello economico di Armstrong (Armstrong & Mark, 2005) i soggetti economici che occupano la posizione di *gatekeeper* nei mercati a piattaforma sono infatti naturalmente incentivati a richiedere il pagamento di un compenso superiore a quello che garantirebbe il raggiungimento del massimo benessere del mercato. Non deve stupire allora che, una volta verificate le condizioni generali appena discusse, Economides e Tåg giungano alla conclusione che l'imposizione della *net neutrality*, con il conseguente azzeramento delle *termination fees* sul lato dei *content provider*, può portare a un miglioramento generale del *wealfare*. Tuttavia, si deve sottolineare come l'imposizione della condizione di neutralità della rete sia sfavorevole ai consumatori, anche nel caso in cui ci sia un generale aumento del *wealfare* nel mercato. La possibilità di istituire delle *termination fee* infatti, porta gli internet provider ad abbassare il prezzo di entrata dei consumatori al fine di ricoprire la fetta più ampia possibile del mercato. L'inclusione di un più ampio bacino di consumatori conduce infatti, sull'altro lato del mercato, ad una crescita della *willingness to pay dei content provider*, che può essere successivamente catturata dalla piattaforma. Tuttavia, è facilmente dimostrabile come in un mercato in cui si assiste alla presenza di un ISP monopolista, quando la condizione di maggior aumento marginale di utilità sul lato dei *content provider* non è verificata, i risultati dell'analisi risultano diametralmente opposti. Come analizzato in precedenza nel corso della presentazione dei modelli di violazione del concetto di neutralità ristretta, infatti, gli internet e service provider non sono necessariamente portati a richiedere il pagamento di una *termination fee* ai *content provider*. A causa delle esternalità incrociate di rete, infatti, gli ISP potrebbero decidere di sussidiare una parte della piattaforma per accrescere il valore percepito sull'altro lato del mercato, catturandone successivamente una parte con delle apposite politiche di *pricing*. In termini tecnici si dice che la piattaforma può parzialmente internalizzare parte delle economie di rete

incrociate presenti nel mercato. Come evidenziato da Lee e Wu (Lee, Wu, & Tim, 2009) fino ad oggi non ci sono evidenze di internet provider che hanno richiesto il pagamento di *termination fee* ai *content provider*, segnale che potrebbe indicare la non profittabilità di tale *business model* per i fornitori del servizio di connessione Internet.

Ampliando il modello ad una struttura composta da un duopolio di ISP, con contratti di *multi-homing* sul lato dei *content provider* e di *single homing* sul lato dei consumatori, Economides e Tåg hanno verificato come l'imposizione del principio di neutralità della rete ancora una volta possa portare, sotto le rigide condizioni già discusse in precedenza, ad un leggero aumento del *wealfare generale*. Da un punto di vista qualitativo è possibile spiegare l'aumento del benessere con la crescita del numero di *content provider* attivi nel mercato dopo l'eliminazione delle *termination fee*¹¹².

In conclusione, dal modello di Economides e Tåg si ricava che in presenza di pratiche di *termination fee*, l'applicazione della neutralità della rete può avere esiti contrastanti, fortemente dipendenti dai parametri che modellano le esternalità di rete presenti nel mercato e che possono portare o meno ad un miglioramento generale del benessere della società.

In uno studio successivo Musacchio *et al.* (Musacchio, Schwartz, & Walrand, 2009) hanno sviluppato un modello caratterizzato da un gioco a più stadi per analizzare gli equilibri derivanti dall'imposizione o meno del principio di neutralità della rete. In particolare, nel modello si confrontano i prezzi e il livello di investimento raggiunti nelle condizioni di equilibrio del sistema. Grazie a questa analisi è stato possibile dunque verificare per quali parametri e sotto quali ipotesi la società raggiunge un livello di *wealfare* superiore agli altri.

In generale, il modello è basato su una serie di assunzioni fondamentali riguardanti sia il timing di gioco che la struttura economica del mercato. In particolare, per quanto riguarda quest'ultima, è stato considerato un numero fisso di ISP, non dipendente dai

¹¹² Tuttavia è importante sottolineare, come già ampiamente evidenziato da Schuett nel corso della sua analisi (Schuett, 2010), che da un punto di vista formale potrebbe essere ritenuto maggiormente corretto analizzare la pratica delle *termination fees* attraverso un modello *two-sided market usage fee* (Rocket & Tirole, 2003) piuttosto che utilizzando un modello *membership-fee*.

differenti regimi di neutralità della rete. Ogni *internet provider*, inoltre, risulta monopolista nel segmento locale in cui offre il servizio di connessione e tutti sono caratterizzati da funzioni identiche di *payoff*¹¹³. Il modello assume inoltre che sia sul lato dei consumatori che su quello dei *content provider* ci sia perfetta omogeneità di gusti e di contenuti.

Per quanto riguarda il *timing* di gioco, invece, il modello considera che gli ISP scelgono prima la loro strategia (livello di investimento e prezzi) e che i *content provider* effettuino la loro scelta di gioco di conseguenza, inoltre si assume un perfetto impegno nel rispetto alle tariffe di prezzo fissate nei primi stadi del gioco, che non possono essere dinamicamente ricalcolate da parte degli ISP.

I risultati dello studio hanno indicato come i parametri fondamentali che influenzano il modello economico sono principalmente tre: il numero di ISP attivi nel mercato, l'elasticità della domanda di connessione dei consumatori al variare del prezzo offerto dagli internet provider e il tasso di ricavi per pubblicità. In particolare, è stato dimostrato che quando il rapporto tra i ricavi pubblicitari e la costante caratterizzante la sensibilità al prezzo dei consumatori raggiunge valori molto elevati o molto contenuti è preferibile abolire il principio di neutralità della rete, permettendo il *two-sided pricing* da parte degli ISP. Se invece, il rapporto non raggiunge valori estremi, si ricava che gli ISP, in assenza del principio di neutralità della rete, potrebbero richiedere delle *termination fee* ai *content provider* più elevate di quanto richiederebbe l'ottimo sociale.

Questo fenomeno può essere spiegato, da un punto di vista qualitativo, utilizzando il modello sviluppato per descrivere il fenomeno della tragedia dei beni comuni¹¹⁴. Ciascun ISP infatti, monopolista nella sua nicchia di mercato, presenta un evidente incentivo a richiedere il pagamento di una *termination fee* ai *content provider* attivi nella

¹¹³ Nella pratica si sta modellando una struttura di mercato in cui ogni ISP serve una medesima area geografica con la stessa densità demografica.

¹¹⁴ “*The tragedy of commons*” o “tragedia dei beni comuni” in italiano, è un modello economico sviluppato nel 1968 dal noto ecologo statunitense Garrett Hardin (Hardin, 1968). Nello studio si evidenzia come in alcuni casi particolari, in cui singoli individui utilizzano un bene comune per interessi propri, in economia si può verificare una singolare distorsione del mercato. Si può dimostrare infatti come ogni individuo presenta un incentivo personale a consumare una parte di risorsa pubblica maggiore di quanto ammetterebbe l'ottimo collettivo. A causa di questo meccanismo si verifica un sovra-consumo delle risorse che conduce al completo deperimento del bene comune.

rete. Tuttavia, si può facilmente dimostrare come questo meccanismo porti inevitabilmente ad un fenomeno di distorsione del mercato a livello macroscopico. Se a livello singolo infatti, gli ISP si trovano nella posizione di catturare facilmente parte del valore generato dai *content provider*, aumentando momentaneamente il proprio payoff, il costo sociale di tale compenso viene distribuito tra tutti i restanti soggetti economici. Questo meccanismo distorsivo, simile a quello che si verifica nella tragedia dei beni comuni, porta inevitabilmente ad un livello di benessere collettivo inferiore rispetto a quello che si verificherebbe grazie all'imposizione del principio di neutralità. A livello aggregato, infatti, l'imposizione delle varie *termination fee* porta all'uscita dal mercato di una parte di *content provider* con la conseguente diminuzione dei contenuti attivi in rete. Data la struttura a piattaforma del mercato, sul lato dei consumatori si verifica quindi una contrazione generale della *willingness to pay*, che si traduce in minori ricavi da parte di tutti gli Internet *provider*. Risulta particolarmente interessante osservare come questo effetto distorsivo cresca all'aumentare del numero di ISP attivi nel mercato.

Prendendo in considerazione i casi estremi del rapporto precedentemente analizzato, invece, si ricava che è preferibile abolire il principio di neutralità della rete nei casi in cui la funzione di domanda per ottenere la connessione a Internet dei consumatori è particolarmente elastica oppure quando i ricavi provenienti dalla pubblicità per i *content provider* sono particolarmente contenuti. È evidente infatti che esiste un rapporto che lega in maniera diretta la qualità dei contenuti trasmessi nella rete con i ricavi derivanti dalla pubblicità e la capacità tecnica di trasmissione del *network* con l'elasticità della domanda dei consumatori. Bassi ricavi per pubblicità si traducono infatti sul lato dei *content provider* in un basso incentivo nello sviluppo di nuovi contenuti. Al contrario, una funzione di domanda molto elastica diminuisce la propensione nell'investimento della rete da parte degli Internet *provider*. Da un punto di vista generale quindi si può affermare che in questi scenari particolari la possibilità di ribilanciare il mercato abilitando flussi di pagamento attraverso la piattaforma può condurre ad un aumento generale del benessere. L'applicazione di *termination fee* sul lato dei *content provider* può portare ad incentivare gli ISP ad effettuare gli investimenti nell'infrastruttura di rete

mentre, al contrario, la sussidiazione dei *content provider* (che può essere intesa come l'istituzione di una *termination fee* negativa) può incentivare lo sviluppo di nuovi contenuti, nel caso in cui il mercato pubblicitario non si riveli sufficientemente profittevole.

Anche Lee e Wu (Lee & Wu, 2009) in una loro pubblicazione hanno affrontato la tematica del *two-sided pricing*, proponendo alcuni spunti di riflessione a favore dell'imposizione delle *zero-price rule*. In particolare, l'analisi, di natura essenzialmente qualitativa, si focalizza attorno ai temi dell'innovazione dell'ecosistema Internet e alla problematica della frammentazione della rete.

Analizzando la prima questione gli autori sostengono che il rispetto della *net neutrality*, con la conseguente abolizione delle *termination fee* da parte degli internet provider, permette di mantenere bassi i costi di entrata nel mercato. In un ambiente caratterizzato da un'elevata dinamicità come quello del mondo Internet, in cui potenzialmente ogni consumatore finale può facilmente trasformarsi in fornitore di contenuti, questa condizione risulta particolarmente importante per incentivare l'innovazione sul lato dei *content provider*. Nello studio si evidenzia infatti, come l'eliminazione della *zero-price rule* conduca inevitabilmente all'introduzione di una serie di costi di transazione aggiuntivi per le imprese. In assenza di *net neutrality* infatti, i *content provider* non possono più raggiungere liberamente la base degli utenti degli ISP ma devono negoziare individualmente o pagare dei contributi specifici¹¹⁵ ad ogni ISP attivo nella rete¹¹⁶.

¹¹⁵ Gli accademici sono concordi nel considerare che le forme di discriminazione di prezzo non ammesse sul lato dei consumatori dovrebbero essere proibite anche sul lato dei *content provider*. A questo proposito dunque il mondo accademico è concorde nel vietare la pratica di discriminazione di prezzo di primo grado su ambedue i lati della piattaforma. Al contrario, l'applicazione di altre politiche di prezzo non discriminatorie, come sarà analizzato in seguito sono tutt'ora dibattute tra gli studiosi.

¹¹⁶ Come evidenziato dallo stesso studio di Lee e Wu è immediato comprendere come i maggiori beneficiari dell'eliminazione delle *termination fee*, con il conseguente azzeramento dei costi di transazione che ne derivano, sono i *content provider* di piccole dimensioni e quelli entrati da poco tempo nel mercato. Come evidenziato da Heller infatti (Heller, 2008), l'istituzione di *termination fee* potrebbe portare nei casi estremi a minacciare l'esistenza stessa dei *media provider* dalle dimensioni ridotte, in particolar modo nel caso in cui si dovessero discutere separatamente le condizioni di accesso ai consumatori dei singoli ISP. A tale proposito è possibile immaginare che anche colossi affermati del web come Facebook all'inizio del loro sviluppo digitale e anteriormente il raggiungimento della massa critica di utenti, avrebbero sicuramente dovuto effettuare degli investimenti più cospicui nello sviluppo delle

Un'ulteriore punto introdotto dagli autori a favore dell'applicazione della neutralità della rete prende in considerazione il fatto che nel mercato della connessione Internet sono già presenti dei flussi di pagamento relazionati sia al servizio di accesso alla rete, formalizzati tra ISP e consumatori, sia agli accordi di *transit* e di *peering*,¹¹⁷ stabiliti tra i differenti Internet provider. Secondo l'opinione di Lee e Wu allora, dato che questa tipologia di accordi è negoziabile e volontariamente sottoscritta tra le parti, non c'è alcuna ragione per cui un aumento del costo infrastrutturale della rete non possa essere compensato da un nuovo bilanciamento di tali contratti¹¹⁸. Secondo l'opinione degli autori inoltre, l'istituzione di *termination fee* non aumenta la propensione marginale agli investimenti nell'infrastruttura da parte degli internet provider, limitandosi ad aumentarne il profitto¹¹⁹.

Infine, da un punto di vista accademico, la tematica di maggior interesse trattata nello studio analizza il pericolo di un possibile effetto di frammentazione dell'ecosistema di Internet, causato dall'introduzione delle *termination fee* nel mercato. Secondo gli autori infatti, l'istituzione di tali compensi potrebbe incentivare l'attivazione di alcuni meccanismi di competizione tra i differenti ISP che potrebbero portare all'applicazione di differenti tariffe di consegna dei contenuti e alla negoziazione di accordi di distribuzione di esclusiva tra ISP e *content provider*. Alla luce di queste considerazioni risulta immediato comprendere come lo sviluppo di questa tipologia di accordi bilaterali possa portare alla frammentazione della rete, in cui alcuni contenuti potrebbero essere disponibili solamente attraverso la connessione con specifici Internet provider. Chiaramente, data la particolare struttura economica dell'ecosistema Internet, è

loro piattaforme. Tuttavia, come segnalato da (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013) le *startup* devono raccogliere denaro per ogni aspetto del loro *business* e risulta difficile immaginare come un prodotto o un servizio ben sviluppati non riescano a vedere la luce solamente per la presenza di *termination fee* nel mercato. Ad ogni modo, gli studiosi evidenziano come potrebbero essere adottate delle misure *ad hoc* al fine di escludere le start-up dal pagamento di queste tariffe nei primi anni di attività.

¹¹⁷ Si veda il paragrafo: Flussi economico-finanziari tra i diversi attori di Internet

¹¹⁸ Risulta immediato comprendere che questa tipologia di ribilanciamento dei contratti porta più facilmente all'aumento dei costi di connessione per l'utente finale (dove il potere contrattuale tra le parti risulta sbilanciato in favore degli *Internet provider*) piuttosto che a una nuova negoziazione degli accordi di *peering* e *transit* tra i differenti ISP.

¹¹⁹ A tale proposito, come già discusso da (Schuett, 2010) nella sua pubblicazione, è possibile osservare che l'incentivo all'investimento nella struttura è presente solamente nel caso in cui ci siano delle parti di mercato ancora non servite da alcun Internet provider.

indubbio come un fenomeno di frammentazione di questo genere possa portare a delle forme di inefficienza del mercato che causerebbero inevitabilmente una diminuzione generale del benessere della società. Ad alcuni utenti della rete infatti, potrebbe essere preclusa la possibilità di consumare una parte dei contenuti disponibili in rete poiché trasmessi da Internet provider di cui non sono affiliati. Al contrario, alcuni *content provider*, in particolare quelli dalle dimensioni più contenute, potrebbero avere difficoltà a raggiungere alcuni segmenti di consumatori iscritti ad ISP con i quali non è stato possibile raggiungere degli accordi di trasmissione¹²⁰. La frammentazione derivante dal verificarsi di questo scenario causerebbe senza dubbio una diminuzione delle esternalità di rete del mercato, con un conseguente peggioramento del benessere dell'intera società¹²¹.

In un lavoro pubblicato da Njorge *et al.* (Njoroge, Ozdaglar, Moses, & Weintraub, 2010) è stato sviluppato un modello economico, basato sulla teoria dei giochi, con l'obiettivo di verificare la propensione all'investimento nell'infrastruttura di rete da parte degli Internet provider sotto le condizioni di applicazione e di assenza del principio di neutralità della rete.

In particolare, lo studio ha esaminato un mercato in cui sono presenti *content provider* e consumatori eterogeni tra loro, connessi grazie a due diverse tipologie di ISP che

¹²⁰ In mercati differenti rispetto ad Internet la frammentazione della rete è un fatto assodato, che non ha generato grandi dibattiti nell'opinione pubblica né ha richiesto l'intervento di alcun regolatore. Nel caso della televisione via cavo, ad esempio, è usuale assistere a pratiche di *pricing* differenti in cui i clienti scelgono di abbonarsi a differenti livelli di servizio (inteso in questo caso come numero di canali disponibili). Inoltre, non è raro che molti canali risultino disponibili solamente in determinate aree geografiche.

¹²¹ Chiaramente il fenomeno della frammentazione della rete Internet potrebbe alimentare un dibattito più ampio riguardo sia la libertà di espressione che quella di informazione nel web, già brevemente esaminato nel corso dell'analisi del principio di neutralità ristretto della rete (*Strict net neutrality*). Non volendo entrare nell'analisi specifica del tema, per cui ancora una volta si rimanda il lettore allo studio della lettura specifica (Holznagel & Nüßing, 2011), in questa sede si desidera solamente sottolineare come la frammentazione della rete è comunque contraria ai principi fondanti di Internet. A tale proposito è possibile valutare le parole di Berners Lee, uno dei padri fondatori della Rete, che riferendosi al principio di libera connessione degli utenti ha dichiarato: " It is of the utmost importance that, if I connect to the Internet, and you connect to the Internet, that we can then run any Internet application we want, without discrimination as to who we are or what we are doing. We pay for connection to the Net as though it were a cloud which magically delivers our packets. We may pay for a higher or a lower quality of service. We may pay for a service which has the characteristics of being good for video, or quality audio. But we each pay to connect to the Net, but no one can pay for exclusive access to me."

competono su due variabili distinte: il prezzo di affiliazione dei consumatori e la qualità di connessione offerta. In particolare, lo studio esamina due differenti casistiche di infrazione del principio di neutralità: nel primo caso l'ISP richiede un canone di ingresso nel mercato a tutti i CP non ancora connessi alla rete, nel secondo caso invece, l'*Internet provider* offre servizi di connessione differenziati ai diversi *content provider*¹²². Nel caso in cui nel mercato sia rispettato il principio di neutralità della rete un CP che è connesso ad un singolo ISP riesce a trasmettere i suoi contenuti a tutti i consumatori presenti nel mercato, i quali ricevono le informazioni con il medesimo livello di servizio.

Dal modello si ricava che quando è applicato il principio di neutralità della rete le piattaforme sono considerate come sostituite sia dai *content provider* che dai consumatori finali. Per questa ragione, quando si rientra in questa casistica, i due *internet provider* tendono a differenziarsi il più possibile, al fine di attirare il maggior numero di consumatori e di *content provider* nel mercato. Per quanto riguarda l'infrastruttura di rete quindi, si ricava che un ISP tenderà ad investire il meno possibile, rispettando un limite inferiore di qualità minima di servizio, mentre il secondo ISP sarà incentivato a investire il più possibile, al fine di offrire un servizio qualitativamente differente dal primo.

Da un punto di vista generale, la decisione della piattaforma di bassa qualità di non investire è dettata dalla considerazione che un aumento della qualità del servizio offerto aumenta la competizione (di prezzo) tra le piattaforme sul lato dei consumatori. Tale aumento di competizione, dettato da una diminuzione della diversificazione del servizio, non sarebbe inoltre bilanciato da una crescita proporzionale dei ricavi sul lato dei *content provider*, dato che ogni consumatore risulta comunque raggiungibile attraverso la connessione ad un singolo ISP¹²³. L'*internet provider* che offre un'elevata qualità di servizio effettua invece una considerazione diametralmente opposta. Grazie agli investimenti effettuati e all'elevata qualità offerta, questo ISP riesce infatti a differenziarsi dalla piattaforma di basso livello, servendo la parte di mercato più esigente

¹²² La tematica relativa all'offerta di differenti qualità di servizio sarà affrontata nel dettaglio nel corso dei successivi paragrafi.

¹²³ Si ricorda che in questo caso si sta modellando un sistema economico dove vige il principio di neutralità della rete.

in termini di *performance* di rete sia sul lato dei *content provider* che su quello dei consumatori.

Lo scenario cambia radicalmente nel caso in cui si analizza il modello in cui è abolito il principio di neutralità della rete. In questa circostanza infatti, i due *internet provider* sono visti come sostituiti solamente sul lato dei consumatori, mentre dal lato dei *content provider* le piattaforme possono essere considerate come due aziende monopoliste che possono garantire, oppure negare, l'accesso ai consumatori affiliati. In questo scenario dunque, i *content provider* decidono indipendentemente se collegarsi o meno a un determinato *internet provider*, causando una differenziazione meno marcata degli ISP rispetto al caso precedente. In particolare, tutti e due gli *internet provider* sono incentivati ad investire nella propria piattaforma, dato che in condizione di eliminazione del principio di neutralità della rete possono recuperare l'investimento effettuato in maniera più rapida, richiedendo un compenso maggiore sul lato dei *content provider*. A differenza del caso precedente, infatti, l'aumento di competizione sul lato dei consumatori, dovuto all'incremento della qualità offerta dalla piattaforma di più bassa qualità, è più che controbilanciato dalla possibilità di estrarre valore sul lato dei *content provider*.

In definitiva, dal modello si ricava che il regime di non neutralità della rete garantisce sempre il raggiungimento di un livello di benessere generale superiore della società. Questo risultato è dovuto in larga misura al superiore livello di investimenti effettuati, garantito dalla possibilità degli Internet provider di istituire delle *termination fee* nei confronti dei *content provider*. I maggiori investimenti infatti, garantiscono una crescita sia del surplus netto dei consumatori che del surplus lordo dei *content provider*¹²⁴.

Nello specifico, per quanto riguarda il lato dei consumatori, come già dimostrato dallo studio di Economides e Tåg (2012), l'aumento della competizione degli ISP, creato dall'abolizione del principio di neutralità della rete, porta ad una generale diminuzione dei prezzi di connessione degli utenti. Inoltre, grazie ai maggiori investimenti nell'infrastruttura, è possibile raggiungere una migliore qualità di trasmissione media

¹²⁴ Per surplus lordo dei *content provider* si intende l'utilità guadagnata anteriormente al pagamento del canone dovuto alla piattaforma.

attraverso la rete. È chiaro dunque come l'unione di questi due fattori concorre all'aumento di utilità percepita dai consumatori finali.

Sul lato dei *content provider*, infine, è possibile affermare che lo sviluppo di contenuti e servizi più innovativi, abilitati dai maggiori investimenti degli Internet provider nell'infrastruttura di rete, possono garantire dei maggiori introiti per pubblicità.

In una pubblicazione successiva Economides e Tåg (Economides & Tåg, 2012) hanno ampliato il modello a piattaforma sviluppato nel 2007. Dall'analisi del lavoro si può notare come le conclusioni tratte da questa versione dello studio siano coerenti con quelle del modello precedente. In particolare, in questo caso gli Studiosi riescono a dimostrare come sia gli ISP che gli utenti della rete sono avvantaggiati dalla sospensione del principio di neutralità della rete. Anche in questo caso, a fondamento di tutto il modello analitico è posta la condizione che l'utilità marginale dei *content provider* per ogni consumatore aggiuntivo che si collega alla rete sia superiore dell'utilità marginale dei consumatori per ogni *content provider* che entra nel mercato.

Il raggiungimento di questa conclusione è principalmente dovuto alla considerazione che in condizioni di assenza del principio di neutralità della rete gli internet provider sono portati a sussidiare il lato dei consumatori della piattaforma per estrarre maggior profitto dall'imposizione delle *termination fee* sul lato dei *content provider*. Questo comportamento porta naturalmente ad un aumento della copertura del mercato sul lato dei consumatori, grazie all'abbassamento del valore dell'abbonamento per l'accesso alla rete e al contemporaneo aumento dei profitti degli *internet provider* che possono così estrarre maggior valore dai *content provider*. Concentrando l'attenzione sulla parte bassa della catena di valore della rete allora, dove i policy maker pongono generalmente maggior attenzione per la tutela dei consumatori, è possibile osservare come in condizione di assenza del principio di neutralità della rete si assista ad un aumento generale del *wealfare*. Grazie alla possibilità di imporre le *termination fee* infatti, nel mercato si assiste sia all'aumento del profitto dei fornitori del servizio Internet sia all'abbassamento delle tariffe di connessione che comportano rispettivamente la crescita del profitto del fornitore e l'incremento del *surplus* dei consumatori. Tuttavia, a

livello aggregato è immediato osservare come la determinazione delle *termination fee* aumenta il profitto dei fornitori del servizio di connessione Internet a discapito dei *content provider*¹²⁵. Si può quindi affermare che in condizione di assenza di neutralità della rete si assiste ad un riequilibrio del valore catturato dai singoli soggetti economici verso la parte inferiore della catena del valore del mercato. Per indicare questo particolare fenomeno, utilizzando un termine coniato per il servizio di telefonia mobile si può parlare di “*waterbed effect*” (Christos & Tommaso, 2011).

2.3.3.2 *Offerta di differenti tipologie di qualità del servizio*

Una delle possibili forme di violazione del principio di neutralità allargata della rete consiste nella possibilità, da parte degli Internet provider, di fornire differenti livelli di qualità di servizio sia ai *content provider* che ai consumatori finali. A differenza del caso analizzato precedentemente, riguardante la neutralità ristretta della rete, in questa circostanza il rallentamento o la velocizzazione di determinati pacchetti di informazione è effettuato sulla base di specifici accordi commerciali sottoscritti tra le parti. Grazie all’abolizione della *zero-price rule* infatti, gli *Internet provider* possono offrire sul mercato differenti livelli di qualità di servizio a prezzi distinti, permettendo ai propri clienti di scegliere autonomamente la classe di servizio a cui preferiscono abbonarsi.

In generale, indipendentemente dal campo di applicazione, la tematica della differenziazione di prezzo¹²⁶ è sempre stata accompagnata da un aspro dibattito politico ed economico, in cui si è cercato di stabilire quali sono gli effetti economici e sociali causati dall’implementazione di tali pratiche (Varian, 1987) (Armstrong & Vickers, *Welfare Effects of Price Discrimination by a Regulated Monopolist*, 1991).

¹²⁵ Tale ribilanciamento nel mercato non è neutrale dal punto di vista del benessere aggregato. Come dimostrato dagli studiosi infatti, esistono dei parametri delle utilità marginali che comportano un miglioramento del benessere in caso di istituzione del principio di neutralità della rete.

¹²⁶ In questo paragrafo con i termini “differenziazione di prezzo” e “discriminazione di prezzo” sono utilizzati in maniera equivalente.

Per discriminazione di prezzo ci si riferisce ad alcune tecniche economiche grazie alle quali i fornitori di un prodotto o un servizio possono estrarre maggior profitto da un determinato mercato. In estrema sintesi queste tecniche si concretizzano nella determinazione di differenti categorie di prezzo offerte ai consumatori. Da un punto di vista generale, le pratiche di differenziazione possono essere raggruppate nelle seguenti macro-strategie: richiesta di prezzi differenti a diversi gruppi di consumatori per la fornitura del medesimo prodotto, richiesta di prezzi differenti per la fornitura di versioni differenti dello stesso prodotto e infine, tutte le possibili combinazioni dei due casi precedenti. (Phillips, 2005).

Per quanto riguarda specificatamente il campo di applicazione della rete Internet, come analizzato da Krämer *et al.* (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013), gli studiosi sono concordi nel ritenere che le pratiche discriminatorie comunemente ritenute penalizzanti sul lato dei consumatori non dovrebbero essere ammesse nemmeno nei confronti dei *content provider*. Alla luce di questa considerazione risulta immediato comprendere come la letteratura sia concorde nel vietare tecniche di discriminazione di primo grado sia nei confronti dei consumatori finali che nei confronti dei fornitori del servizio Internet. In generale, è possibile quindi affermare che il dibattito riguardante le differenti tecniche di *pricing* nell'ambito della *net neutrality*, si è concentrato sull'esame delle conseguenze economiche e sociali derivanti dall'utilizzo di pratiche di discriminazione di prezzo di secondo e di terzo grado¹²⁷. Riguardo questa tematica, la maggior parte degli studiosi, compresi molti detrattori del principio di neutralità della rete, sono concordi nell'affermare che le pratiche di differenziazione di prezzo non devono comunque presentare caratteristiche discriminatorie tra classi omogenee sia di servizio che di clienti. Secondo l'opinione di Wyatt ad esempio (Wyatt, 2010) una forma non discriminatoria di differenziazione di prezzo, potenzialmente utilizzabile da un ISP, è quella di stabilire un medesimo costo di invio per tutte le applicazioni che utilizzano uno stesso protocollo, differenziando il prezzo solamente per servizi differenti tra loro. Seguendo lo stesso principio, è quindi possibile differenziare il prezzo per la trasmissione di informazioni provenienti da applicazioni appartenenti a differenti classi di servizio o in base alle diverse classi di provenienza o destinazione. Secondo Wyatt infatti, dato che i servizi appartenenti a classi differenti non sono in diretta competizione tra loro e la QoE attesa dall'utente può variare in maniera significativa da classe a classe, queste forme di differenziazione di prezzo devono essere considerate come non discriminatorie.

¹²⁷ In particolare, per quanto riguarda la discriminazione di prezzo di secondo grado il lato dell'offerta del mercato non è in grado di discriminare le differenti tipologie di consumatori, per questo motivo i venditori sviluppano degli appositi incentivi affinché i consumatori si differenzino da soli in base alle proprie preferenze personali. Un classico esempio di discriminazione di secondo grado sono gli sconti effettuati per l'acquisto di un'ingente quantità di un prodotto.

Per quanto riguarda la discriminazione di terzo grado invece, il produttore applica dei prezzi differenti per ogni segmento o mercato servito. All'interno di un singolo mercato tuttavia il prezzo rimane costante.

Come è stato discusso anteriormente è possibile affermare che gli internet provider, in mancanza dell'applicazione del principio di neutralità della rete, possono introdurre delle politiche di differenziazione di prezzo sia a monte che a valle della catena del valore della rete. Nei seguenti paragrafi sono presentati i principali modelli economici che esaminano queste due forme di violazione di principio di neutralità.

2.3.3.2.1 CSP tiering model

Nel caso in cui gli *Internet provider* offrano ai *content provider* livelli di servizio differenziati, gli studiosi sono soliti parlare di un modello di *tiering* dei fornitori di contenuti e servizi.

In generale, dal punto di vista economico il concetto di *quality of service* garantita dagli Internet provider può essere analizzato da due punti di vista differenti. Secondo alcuni studiosi infatti, la qualità della trasmissione dei dati deve essere modellata come un bene complementare alla qualità dei contenuti trasmessi, mentre per altri, la qualità della trasmissione deve essere considerata come un bene sostituto.

In un lavoro pubblicato da Hermalin e Katz (Hermalin & Katz, 2007) è stato presentato un modello nel quale un ISP, monopolista del mercato, offre un servizio di connessione tra i consumatori e i *content provider*. In particolare, l'analisi si concentra su due scenari differenti: nel primo, in cui si simula l'applicazione del principio di neutralità della rete, l'Internet provider offre una sola qualità di connessione sui due lati della piattaforma. Nel secondo invece, l'ISP, grazie all'abolizione del principio di NN, offre due differenti qualità di connessione ai *content provider*, vendendo dei servizi caratterizzati da differenti valori di larghezza di banda, latenza e perdita di pacchetti di informazione. Risulta interessante notare come la qualità di connessione offerta dall'Internet provider in condizione di applicazione del principio di neutralità della rete sia intermedia alle qualità proposte successivamente all'abolizione dello stesso principio.

In generale, nel modello analizzato l'ISP non conosce la singola utilità percepita dagli affiliati per il servizio di connessione e dunque, nel caso di assenza di applicazione del principio di neutralità della rete, offre nel mercato un menù di due differenti qualità, lasciando ai *content provider* la scelta di quale servizio acquistare. Chiaramente da un

punto di vista finanziario la tariffa di connessione risulta proporzionale alla qualità di trasmissione richiesta.

Analizzando i risultati del modello in termini di effetti sul benessere generale della società i ricercatori hanno dimostrato come l'imposizione del principio di neutralità della rete porta a tre conseguenze fondamentali: in primo luogo una parte dei *content provider*, che avrebbero acquistato la connessione di basso livello in condizione di assenza del principio di neutralità della rete, escono dal mercato, non trovando profittevole offrire i propri servizi dopo l'imposizione di un singolo livello intermedio di connessione. Chiaramente questo fenomeno porta ad una diminuzione della varietà dei contenuti disponibili per i consumatori e alla contemporanea perdita di una parte dei profitti generati sul lato dei *content provider*. Per quanto riguarda invece la classe intermedia di applicazioni, queste sono avvantaggiate dall'utilizzo di una connessione di più alto livello determinata dalla condizione di NN. Infine, considerando i *content provider* di più alto livello, questi sono costretti ad utilizzare una connessione meno efficiente e di qualità più scadente.

Da un punto di vista di benessere generale risulta immediato verificare come il primo e il terzo effetto diminuiscono il *welfare* della società mentre il secondo lo accresce. Il risultato netto derivante da questi effetti è tuttavia difficilmente determinabile. Gli stessi autori infatti, al termine della loro ricerca, non prendono alcuna posizione riguardo il potenziale beneficio derivante dall'istituzione o meno del principio di neutralità della rete.

In un'estensione del modello Hermalin e Katz giungono a due ulteriori risultati di notevole importanza. Il primo dimostra come l'imposizione di una normativa che imponga agli Internet provider di offrire solamente una tipologia di connessione caratterizzata da un elevato standard di qualità porta ad una notevole perdita di benessere. Come nel caso analizzato in precedenza infatti, all'aumentare della qualità fornita gli ISP richiedono un contributo di connessione maggiore ai *content provider*, determinando l'uscita di tutti i produttori di contenuti di basso livello dal mercato. Inoltre, gli Autori attraverso il loro studio riescono a dimostrare come l'istituzione della *zero-price rule* incentiva l'*internet provider* a fornire una sola tipologia di connessione.

La qualità di tale connessione risulta essere più bassa del livello di qualità che l'ISP sceglierebbe nel caso potesse richiedere delle *termination fee* ai *content provider* e fosse costretto ad offrire nel mercato una sola qualità di connessione.

In un lavoro pubblicato da Jamison e Huye (Jamison & Huye, 2008) è stato presentato un modello caratterizzato dalla presenza di un ISP monopolista che connette una serie di *content provider* con il lato dei consumatori. Nel modello, i *content provider* sono caratterizzati da una differente capacità di generare contenuti di valore per gli utenti finali, decidono autonomamente quanto investire nello sviluppo di nuovi prodotti e presentano come unica fonte di entrata i ricavi derivanti dalla pubblicità. Sul lato dei consumatori invece, i contenuti trasmessi sono valutati sia in termini di qualità che di velocità di trasmissione. Tuttavia, i due valori possono essere separati e, in generale, l'analisi pone l'attenzione su alcune specifiche tipologie di *content provider* caratterizzati dalla produzione di contenuti scarsamente sensibili a fenomeni di congestione della rete e di jitter.

Dai risultati del modello si può osservare come, in condizione di neutralità della rete, e dunque con una sola velocità di trasmissione disponibile, i *content provider* produttori di contenuti a basso valore decidono di non entrare nel mercato. In questo caso infatti, i ricavi generati dalla pubblicità non sarebbero sufficienti a ricoprire i costi totali che la società dovrebbe sostenere¹²⁸. Al contrario, quando nel mercato è offerta una connessione dalle *performance* più elevate, alcuni dei *content provider* che sarebbero usciti dal mercato in condizione di neutralità della rete decidono di acquistare la connessione di più alto livello e di offrire i loro contenuti ai consumatori. Grazie a questa maggiore partecipazione a monte della piattaforma, nel mercato si verifica un aumento generale del *benessere* della società. L'aumento della varietà di contenuti disponibili infatti, porta ad almeno tre aspetti positivi per la società: sul lato dei *content provider* si assiste ad un aumento dei profitti aggregati grazie all'incremento del volume di pubblicità prodotto, sul versante dei consumatori si registra un aumento dell'utilità

¹²⁸ Nel modello i costi sono divisi in una componente fissa di investimento e di una variabile in relazione alla produzione effettuata.

derivante alla maggiore disponibilità di contenuti consumabili e infine, per quanto riguarda il *content provider*, si assiste ad un incremento del profitto legato alle maggiori connessioni effettuate.

2.3.3.2.1.1 Modelli di CSP *tiering* con analisi dei fenomeni di congestione della rete

Una delle critiche di maggior rilievo che può essere mossa agli autori dei precedenti modelli economici è quella di non aver tenuto debitamente in considerazione gli effetti sulla congestione della rete derivanti dalla razionalizzazione del traffico Internet. È chiaro infatti, come la possibilità di poter attuare delle tecniche di *network management* sul lato dei *content provider*, velocizzando alcuni pacchetti di informazione rispetto ad altri, porta ad un miglioramento generale delle *performance* della rete.

A questo proposito, in uno studio presentato da Choi e Kim (Choi & Kim, 2010) si è tentato per la prima volta di costruire un modello economico capace di analizzare i risvolti economici e sociali di questo determinato fenomeno. In particolare, gli studiosi hanno esaminato il caso in cui un internet provider, monopolista del mercato locale, fornisce un servizio di connessione a due differenti *content provider* in competizione tra loro per un gruppo omogeneo di consumatori. Chiaramente, in condizione di neutralità della rete l'internet provider deve processare i pacchetti secondo una logica *best effort*, non potendo velocizzare alcuna tipologia di informazione né richiedere alcuna *termination fee* ai fornitori di contenuti. Inoltre, si assume che ogni consumatore sceglie di collegarsi solamente ad uno dei due *content provider*¹²⁹ presenti in rete.

Al fine di modellizzare il traffico generato dagli utenti è stato ipotizzato che la richiesta di pacchetti di informazione segua una distribuzione di *Poisson* con un tasso di arrivo delle informazioni definito pari a λ . Servendosi della notazione di *Kendall* è possibile quindi definire il modello di coda utilizzato attraverso la dicitura M/M/1, dove sia la distribuzione di arrivo dei pacchetti di informazione che la distribuzione della trasmissione dei pacchetti seguono una distribuzione esponenziale *Markoviana*, mentre

¹²⁹ Questa ipotesi, sebbene possa sembrare abbastanza stringente, modella in maniera sufficientemente precisa alcune dinamiche economiche presenti nel web come, per esempio, l'utilizzo dei motori di ricerca.

il numero di unità serventi è limitato a 1. Questo particolare modello di coda è stato ampiamente utilizzato in numerosi lavori sviluppati per indagare problemi di congestione caratterizzati da politiche di *priority pricing* per una parte degli utenti (Mendelson & Whang, 1990) (Balachandran, 1972) (Naor, 1969). In generale infatti, questo *framework* riesce a simulare in maniera accurata i processi di arrivo nei sistemi caratterizzati da un numero di consumatori molto elevato, dove le decisioni prese dai singoli utenti sono indipendenti tra loro e non hanno un effetto rilevante sulle performance generali del sistema. In pratica, il modello ipotizza che ci sia un solo grande *router* che serve l'intera rete Internet caratterizzato da una coda infinita di dati in entrata¹³⁰. Le informazioni salvate nella memoria del router arrivano ad un tasso λ e seguono una distribuzione di *Poisson* in cui ogni coppia di pacchetti in entrata nel router ha una distribuzione esponenziale e il tempo trascorso tra due differenti arrivi è assunto indipendente rispetto a tutti gli altri intervalli di arrivo. Il router può processare i pacchetti in entrata ad un tasso μ ¹³¹ che può essere inteso, in prima analisi, come la capacità di trasmissione dell'intera rete. Chiaramente il tempo impiegato per trasmettere i dati dai *content provider* agli utenti finali è mediamente pari a $\frac{1}{\mu}$ dove è chiaro come al crescere della capacità del network diminuisce proporzionalmente il tempo di servizio della trasmissione.

Risulta immediato dimostrare come in condizione di neutralità della rete, dove l'*Internet provider* processa i pacchetti di dati utilizzando un approccio *best effort*, il tempo di attesa medio sperimentato da ogni utente è pari a $w_{nn} = \frac{1}{\mu - \lambda}$. Al contrario, quando viene meno il principio di neutralità, e all'*Internet provider* è permessa la vendita di due servizi di connessione differenziati è possibile calcolare due tempi medi di servizio: uno relativo al servizio di *priority class* e uno relativo al servizio *standard*. In particolare, definendo con x la percentuale di content provider che acquistano il servizio di trasmissione prioritario per i loro contenuti, è possibile definire come $W_p = \frac{1}{\mu - x\lambda}$ il tempo di attesa medio per la trasmissione di questa tipologia di servizi, e con l'espressione $W_{BE} =$

¹³⁰ Si ipotizza dunque che nella rete non ci sia alcuna perdita di pacchetti di informazione.

¹³¹ La capacità μ del network è considerata fissa nell'analisi sul breve periodo e opportunamente derivata per quanto riguarda l'analisi sugli incentivi agli investimenti sul lungo periodo.

$\frac{\mu}{(\mu-\lambda)W_P}$ Il tempo medio di trasmissione del servizio non prioritario. Chiaramente risulta immediato dimostrare come, sotto le ipotesi di capacità di trasmissione della rete costante nei due regimi, e ipotizzando che non tutti i *content provider* desiderino acquistare il servizio di trasmissione prioritario per i loro contenuti, valga la relazione $W_P < W_{NN} < W_{BE}$. Nel caso in cui tutti i *content provider* decidano di acquisire il servizio prioritario infatti, il modello matematicamente collasserebbe nell'equazione $W_P = W_{NN}$ mentre, da un punto di vista economico, si giungerebbe ai risultati già evidenziati nel caso dei modelli economici di *termination fee*.

Dai risultati del lavoro si evidenzia come, in condizione di mancata applicazione del principio di neutralità della rete, l'espansione della capacità di trasmissione del network causa una diminuzione del prezzo di vendita del servizio di *priority class*. Secondo gli autori questo fattore potrebbe portare ad una diminuzione dell'incentivo all'investimento nell'infrastruttura di rete da parte degli *Internet provider*, i quali, per non perdere i ricavi derivanti dalla vendita del servizio di fascia più elevata, sarebbero naturalmente portati a mantenere l'infrastruttura di rete ad un livello di *performance* inferiore rispetto all'ottimale. Inoltre, sempre seguendo i risultati dello studio, il *tiering* dei *content provider* porta ad una contrazione degli incentivi all'innovazione anche sul lato dei fornitori di contenuti. La minaccia della possibile applicazione di *termination fee* ai *content provider* da parte dei fornitori di servizio Internet infatti, con il conseguente slittamento dei profitti tra i due soggetti economici tramite il cosiddetto "*waterbed effect*", potrebbe causare la diminuzione degli incentivi alla creazione di nuovi contenuti sul mercato. Tuttavia, nel lavoro si evidenzia come i risultati ottenuti sono fortemente condizionati dalle ipotesi iniziali del modello. Gli stessi Autori infatti, nutrono alcuni dubbi riguardo a due condizioni principali: la ristretta tipologia di flussi finanziari modellati¹³² e l'uniformità degli investimenti considerati. A tale proposito, Choi e Kim affermano che per avere una visione più chiara di quest'ultima problematica sarebbe necessario effettuare almeno una distinzione principale tra le differenti tipologie di investimenti che possono essere effettuati dai *content provider*. In linea di massima

¹³² Nel modello l'unica fonte di ricavo dei CP è determinata dagli ingressi per pubblicità, non potendo richiedere i CP alcuna *subscription fee* ai consumatori.

infatti, è possibile parlare di investimenti *firm-specific*, per quegli investimenti mirati ad aumentare il valore dei contenuti prodotti o a diminuire i costi di trasmissione, mentre si parla di effetto *spill-over* per tutti gli investimenti che hanno delle esternalità positive sui restanti attori del mercato. In particolare, quest'ultima categoria comprende tutte quelle migliorie che possono garantire, oltre ad un miglioramento dei contenuti di un determinato *content provider* anche la generale diminuzione degli effetti di congestione della rete, determinando un miglioramento diffuso delle performance di trasmissione dei contenuti. Da un punto di vista generale dunque risulta chiaro come l'abolizione del principio di neutralità della rete influenza in maniera differente gli incentivi per queste due diverse categorie di investimenti.

In un lavoro molto simile a quello sviluppato da Choi e Kim, Cheng *et al.* (Cheng, Bandyopadhyay, & Guo, 2011) hanno analizzato gli effetti causati dalle pratiche di *tiering* dei *content provider* sul benessere della società. Anche in questo caso il modello analizza uno scenario in cui un ISP monopolista offre un servizio di connessione a due differenti *content provider*. I fornitori di contenuti hanno la possibilità di migliorare la propria posizione competitiva acquistando un servizio di trasmissione prioritaria da parte dell'*internet provider*. Una delle differenze principali rispetto al modello sviluppato da Choi e Kim deriva dal fatto che in questo caso l'ISP può vendere il suo servizio *premium* a tutti e due i *content provider*. Per quanto riguarda il bacino di utenti connessi all'*internet provider* invece, questi sono caratterizzati da una funzione di utilità decrescente in relazione all'aumentare degli effetti di congestione nella rete e visitano esclusivamente uno dei due fornitori del servizio.

Dai risultati dello studio si evidenzia come l'abolizione del principio di neutralità della rete porta senza alcun dubbio ad un miglioramento del profitto dell'*internet provider*. Grazie alla possibilità di poter immettere nel mercato due differenti qualità di connessione infatti, i fornitori del servizio Internet possono estrarre maggior valore dai fornitori di contenuti che desiderano acquistare il servizio *premium*. Di conseguenza, sul lato dei *content provider* si assiste ad una simmetrica diminuzione del profitto generato causato dal già discusso *waterbed effect*. Per quanto riguarda i consumatori invece,

dipendentemente da alcuni parametri del modello, si verifica che il surplus netto sia maggiore o al limite uguale al caso di applicazione del principio di neutralità della rete. Nel particolare caso in cui a livello aggregato il surplus dei consumatori cresca, si può dimostrare come, a livello microscopico, una parte limitata degli utilizzatori percepisca un'utilità inferiore, a causa principalmente dal rallentamento della trasmissione dei dati da parte del proprio *content provider*. Tuttavia, allo stesso tempo si verifica che la maggior parte degli utenti accresce la propria utilità grazie alla possibilità di poter sfruttare la connessione premium utilizzata dal proprio *content provider*. Il parametro fondamentale che determina il punto di equilibrio del modello è legato alla capacità da parte dei produttori di contenuti di generare profitto attraverso la pubblicità. Se infatti, nel modello si assiste ad una marcata differenza di questo parametro, i consumatori del fornitore di contenuti meno efficiente, che sono la minoranza del mercato, hanno una contrazione della loro utilità. Chiaramente dal modello si ricava come, in condizione di non applicazione del principio di neutralità della rete, la crescita del benessere sia necessariamente collegata all'acquisizione del servizio di connessione premium da parte solamente di uno dei due *content provider*. In caso contrario infatti, il *wealfare* risulterebbe inalterato.

Infine, per quanto riguarda gli incentivi agli investimenti, dal modello si evidenzia come in condizione di non applicazione del principio di neutralità della rete gli internet provider siano nettamente meno incentivati ad investire sull'aumento delle performance della rete, volendo mantenere la domanda per il servizio premium più alta possibile. Chiaramente questo risultato deriva direttamente dalla particolare struttura del modello, la quale, non ammettendo particolari fattori di crescita né della domanda di connessione né tantomeno di quella di invio dei contenuti determina un chiaro disincentivo per l'Internet provider ad investire per aumentare le performance della rete.

In uno studio più approfondito, Kräemer e Wiewiorra hanno modellato la rete Internet come un mercato a due lati che connette una serie di *content provider*, sensibili ai fenomeni di congestione, con un gruppo eterogeneo di consumatori. La connessione è

garantita attraverso l'utilizzo dell'infrastruttura di una piattaforma monopolista (Krämer & Wiewiorra, 2012). Nel caso nel mercato sia applicato il principio di neutralità della rete i dati inviati da tutti i *content provider* sono processati attraverso un approccio *best effort*, mentre, in caso sia consentita l'introduzione di tecniche di QoS e di *tiering* dei consumatori, ogni *content provider* può scegliere di acquistare una connessione prioritaria, in modo tale che i propri pacchetti di informazioni siano trasmessi antecedentemente a quelli inviati dai *content provider* abbonati alla connessione *standard*. In ogni caso i *content provider* facenti parte di uno stesso livello di servizio acquisiscono il medesimo livello di priorità di accesso agli utenti alle stesse condizioni degli altri, applicando quindi delle condizioni non discriminatorie. Si può affermare quindi che, nel modello, nel caso di non applicazione del principio di neutralità della rete, la discriminazione tra i diversi *content provider* avviene solamente tra differenti classi di servizio. Nel modello sono inoltre esaminati i fenomeni di esternalità della rete presenti nella piattaforma, combinati agli effetti di rallentamento del traffico standard causati dalla vendita di connessioni prioritarie. A differenza degli studi esaminati in precedenza, in questo caso sul lato dei *content provider* è modellata la possibilità di entrata di nuovi fornitori di contenuti legata alla diminuzione dei fenomeni di congestione della rete. Per quanto riguarda i pagamenti infine, i *content provider*, indipendentemente dalla tipologia di servizio offerto sul mercato, offrono i loro servizi gratis. Il loro ricavo proviene quindi indirettamente dalla pubblicità *online* generata, funzione diretta del volume medio di visitatori e dunque della sensibilità intrinseca dei contenuti generati rispetto ai fenomeni di congestione della rete.

Dai risultati del modello si ricava che la varietà dei contenuti sviluppati dai *content provider* rimane pressoché inalterata nei due diversi regimi di rete. L'equilibrio del mercato è raggiunto in particolare quando la sensibilità ai fenomeni di congestione della rete dei *content provider* è distribuita in maniera uniforme tra i diversi attori attivi nella rete. Tuttavia, essendo i *content provider* naturalmente portati ad acquisire il servizio prioritario di connessione, il modello dimostra come l'applicazione di un sistema di *quality of service* porta, in generale, ad una migliore allocazione delle risorse di rete ai contenuti maggiormente sensibili ai fenomeni di congestione. Per questo motivo gli

autori giungono a concludere che la mancata applicazione del principio di neutralità della rete garantisce un aumento del benessere della società nel breve periodo. Tuttavia, come esaminato precedentemente in numerose altre pubblicazioni, l'applicazione di pratiche di *tiering* dei fornitori di servizi e di QoS portano inevitabilmente ad uno spostamento delle rendite dal lato dei *content provider* a quello dei fornitori del servizio di connessione Internet. Risulta necessario evidenziare comunque come questo ribilanciamento dei profitti sui due lati della piattaforma è neutrale dal punto di vista del benessere sociale generale.

Per quanto riguarda l'analisi di lungo periodo, invece anche in questo caso gli autori hanno dimostrato come il *tiering* dei *content provider* porta ad un livello di investimento generalmente superiore rispetto al caso di applicazione del principio di neutralità della rete. Questo risultato deriva in maniera diretta dall'effetto di attrazione di nuovi *content provider* all'interno del mercato causato dall'aumento delle performance generali della rete. L'entrata dei nuovi fornitori di contenuti attiva infatti, un circolo virtuoso di aumento delle performance della rete e di nuove entrate di *content provider* che mantengono la richiesta di connessione *premium* elevata.

Infine, lo studio ha esaminato la problematica legata alla possibilità che l'*internet provider* degradi artificialmente la qualità del servizio Internet della connessione *best effort* al fine di spingere i *content provider* ad acquistare la connessione *premium*. Questo fenomeno, noto tra gli studiosi con il nome di "*fast lane versus dirt road*" è già stato affrontato nei modelli economici che analizzano le dinamiche di scelta del livello di qualità di servizio da parte di un fornitore monopolista (Mussa & Rosen, 1978). Ritornando allo studio sviluppato da Krämer e Wiewiorra, dai risultati ricavati si evidenzia come la degradazione strategica della connessione Internet di basso livello è economicamente vantaggiosa per l'*Internet provider* solamente se l'aumento di utilità marginale dei consumatori, legato alla maggior varietà dei contenuti, è sufficientemente ridotta. Tuttavia, nel caso si verificassero queste condizioni, nello studio si dimostra come l'applicazione di una normativa sviluppata al fine di garantire una *qualità minima standard (MQS)* può salvaguardare il livello di benessere generale raggiunto nella società. Infine, dal modello si ricava come nel caso possa essere effettivamente evitata

la questione della *dirt road*, in mancanza di applicazione del principio di neutralità della rete, l'imposizione da parte di un regolatore agli Internet provider di fornire nella classe di connessione *best effort* una qualità del servizio almeno pari a quella che sarebbe garantita nella rete in caso di applicazione del principio di neutralità, non è sufficiente a garantire un livello di investimento sufficiente nell'infrastruttura.

In uno studio pubblicato nel corso dello stesso anno Valletti *et al.* (Bourreau, Kourandi, & Valletti, 2012) hanno analizzato un caso particolare in cui il mercato è formato da due Internet provider differenziati tra loro che collegano, in un modello di mercato a piattaforma, il lato dei *content provider* con quello dei consumatori. I *content provider*, eterogenei tra loro, inviano gratuitamente i propri contenuti agli utenti finali e generano i propri ricavi esclusivamente attraverso la vendita di pubblicità nei loro siti *web*. Essendo dei fornitori di servizio globale inoltre, essi, a differenza dei consumatori finali, non pagano per il servizio di connessione alcun canone ai due ISP locali interni al modello.

Nella prima parte dello studio si analizza la condizione di neutralità della rete, nella quale gli *internet provider* non richiedono alcun pagamento ai *content provider* per la trasmissione dei contenuti ai propri affiliati. Tuttavia, a causa dei fenomeni di intasamento e dell'impossibilità da parte degli *internet provider* di applicare alcuna tecnica di *network management*, in questa particolare condizione si possono verificare dei fenomeni di congestione della rete. Come nei casi precedenti inoltre, sia i fornitori di contenuti che gli utenti finali hanno una funzione di utilità decrescente rispetto all'aumento della congestione della rete.

Al contrario, in condizione di abolizione del principio di neutralità della rete, ciascuno dei due Internet provider può offrire due servizi di connessione distinti, caratterizzati da differenti velocità di trasmissione dei contenuti. In questo caso gli Internet provider richiedono una commissione di consegna dei pacchetti dei dati ai *content provider*.

Dai risultati del modello si ricava che, quando nel mercato è consentito offrire un servizio caratterizzato da una specifica QoS, il traffico Internet è gestito in maniera più efficiente rispetto al caso di imposizione del principio di neutralità della rete. Conseguentemente,

è possibile verificare come il livello medio di congestione della rete decresca sensibilmente grazie alla possibilità di offrire differenti classi di servizio da parte degli Internet provider. Si ricava quindi che la QoE media sperimentata dagli utenti è superiore in regime di non neutralità della rete, fattore che porta ad un aumento dell'utilità percepita a causa dei minori tempi di attesa per il consumo dei contenuti inviati dai *content provider*.

Analizzando il livello medio degli investimenti, nello studio si evidenzia come l'abolizione del principio di neutralità della rete porti ad un aumento degli incentivi da parte degli *Internet provider* a migliorare le capacità di trasmissione generale della rete. Questo risultato si ricava direttamente dalla considerazione che, grazie all'applicazione delle *termination fee* ai *content provider*, e in particolar modo all'estrazione di maggior valore garantito dal servizio *premium* offerto, i fornitori del servizio internet possono beneficiare di un ribilanciamento dei ricavi estratti nel mercato, fattore che garantisce un miglior tasso di ritorno sugli investimenti effettuati. L'incentivo all'innovazione inoltre, risulta maggiore in condizione di sospensione del principio di neutralità della rete anche nella parte superiore della catena del valore della rete. Il miglioramento della gestione delle informazioni infatti, con la conseguente diminuzione dei fenomeni di congestione, incentiva l'entrata di nuovi fornitori di contenuti di servizi nel mercato. È possibile affermare infatti, che tutte le tipologie di applicazioni caratterizzate da un'elevata sensibilità al ritardo di invio dei pacchetti di informazioni decidano di rimanere fuori dal mercato nel caso in cui gli *Internet provider* non possano garantire una determinata QoS nella rete.

Esaminando in particolare le ricadute economiche sugli internet provider presenti nel modello si può dimostrare come gli ISP, in caso nel mercato ci sia concorrenza per l'acquisizione degli utenti e dei *content provider*, non sono sempre incentivati a richiedere l'eliminazione dell'applicazione del principio di neutralità della rete. La possibilità di offrire differenti classi di QoS infatti, può portare ad un generale aumento della competizione tra le piattaforme Internet causando una diminuzione dei prezzi di sottoscrizione sia sul lato dei *content provider* che su quello dei fornitori di contenuti. Tuttavia, è facilmente dimostrabile come, nel caso sia abolito il principio di neutralità

della rete, ogni ISP presenti un incentivo unilaterale ad offrire sul mercato due differenti qualità di servizio di trasmissione dei contenuti dei fornitori di servizi.

Da un punto di vista generale è fondamentale sottolineare come le conseguenze dell'abolizione del principio di neutralità della rete possono avere dei risvolti ambigui e ancora non del tutto chiariti sia per quanto riguarda i *content provider* che per quanto riguarda i consumatori finali. Tuttavia, nello studio si dimostra chiaramente come, a livello aggregato, il benessere generale cresca sempre attraverso il passaggio dal principio di neutralità della rete ad un regime di differenziazione dei prezzi.

È importante sottolineare come l'aumento del *welfare* della società introduca la possibilità da parte degli internet provider di attuare una strategia di degradazione volontaria del traffico internet, attraverso la cosiddetta "*dirty road*". A questo proposito nel lavoro si pone l'attenzione sul fatto che questa tipologia di rischio è completamente assente nel caso di applicazione del principio di neutralità della rete, dove gli ISP non presentano alcun incentivo ad abbassare la capacità di trasmissione del *network*. Nel caso in cui nel mercato i ricavi dei *content provider* per pubblicità siano sufficientemente elevati infatti, gli Internet provider presentano un chiaro incentivo a degradare la qualità della trasmissione di basso livello in modo tale da mantenere elevata la richiesta per il servizio di connessione premium ed estrarre dunque maggior valore dai consumatori.

Seguendo questo ragionamento gli autori giungono alla conclusione che il principio di neutralità della rete deve essere implementato solamente nel caso in cui nel mercato ci sia la concreta possibilità che gli *Internet provider* siano incentivati a degradare artificialmente la qualità della trasmissione dei contenuti e che il controllo da parte delle autorità dell'attivazione di tali pratiche sia esageratamente costosa o poco efficiente. In tutti gli altri casi infatti, l'abbandono del principio di neutralità in favore di un regime di differenziazione dei prezzi porta, secondo i risultati dello studio, ad un miglioramento generale del benessere della società.

In conclusione, dalla serie di lavori esaminati si può ricavare come la possibilità da parte degli Internet provider di immettere differenti classi di servizio nel mercato, proponendo una diversificazione di prezzo non discriminatoria, porta ad un

generalmente aumento del benessere della società. L'incremento del *wealfare* tuttavia, è strettamente legato all'eliminazione del pericolo della degradazione volontaria della trasmissione da parte degli Internet provider e dall'efficacia delle azioni intraprese per evitare il fenomeno della *dirty road*. A questo proposito, l'istituzione di un livello minimo di servizio, garantito dagli Internet provider per la tipologia di connessione *best effort*, può avere dei risvolti sia positivi che negativi. Come dimostrato da Krämer e Wiewiorra infatti (Krämer & Wiewiorra, 2012) l'istituzione di un MQS nella rete può portare ad un fenomeno di generale sovradimensionamento dell'infrastruttura di rete, che comporta una diminuzione generale del benessere della società. Un'opinione più favorevole è invece quella offerta dallo studio di Brennan (Brennan, 2010), il quale sostiene che, in generale, l'applicazione di questi particolari strumenti da parte dei regolatori sono comunque socialmente più convenienti rispetto all'imposizione del principio di neutralità della rete. Una normativa creata per garantire un livello minimo di servizio potrebbe servire infatti, non solo per eliminare le problematiche relative al fenomeno della *dirty road*, ma anche per eliminare le preoccupazioni legate agli incentivi di degradazione o, nei casi estremi, di blocco dei contenuti non affiliati. Tuttavia, lo stesso autore dimostra come, analizzando la questione da un'altra prospettiva, il MQS può rivelarsi un'arma a doppio taglio. Le società attive nel mercato potrebbero essere infatti incentivate ad utilizzare il livello minimo di qualità di trasmissione come deterrente per bloccare l'entrata di nuovi player nel mercato. Nel caso in cui i fornitori del servizio Internet fossero costretti a garantire le connessioni *best effort* fossero con un livello di QoS molto elevato infatti, gli Internet provider caratterizzati da una bassa qualità di trasmissione dei dati sarebbero costretti ad uscire dal mercato.

2.3.3.2.1.2 Content delivery networks

Come è stato analizzato nel capitolo precedente, l'utilizzo dei *content delivery networks* permette di incrementare le *performance* medie di trasmissione dei contenuti in rete che, grazie all'utilizzo di *cache server*, sono memorizzati in memorie fisicamente più vicine ai consumatori finali. La possibilità di poter distribuire in maniera capillare copie identiche di uno stesso *file* determina chiaramente un vantaggio in termini di velocità e

regolarità di trasmissione delle informazioni per tutte le applicazioni e i servizi Web che sfruttano questa tecnologia. Alcune società, indipendenti rispetto agli *Internet provider*, come Akamai, Limelight e Level 3 offrono questo particolare servizio, richiedendo il pagamento di una tariffa di *storage* delle informazioni ai produttori di contenuti e servizi. Si verifica quindi un caso singolare di violazione del principio di neutralità della rete dove il *content provider* può scegliere attivamente di pagare un servizio aggiuntivo per ottenere, *de facto*, una consegna più rapida dei propri contenuti. Tuttavia, a causa della maggior complessità del mercato che richiede la modellazione di ulteriori soggetti economici, l'impatto sul benessere generale determinato dall'utilizzo dei *content provider* non è stato ancora del tutto chiarito e, come discusso da Kramer nel suo lavoro (Krämer, Guo, & Easley, 2018) le implicazioni derivanti dall'uso di questa tecnologia meritano ulteriori studi di approfondimento.

Tra i lavori più interessanti sviluppati attorno al tema dei *content delivery networks* è possibile ricordare quello pubblicato da Baake e Sudaric nel 2018 (Baake & Sudaric, 2018). Nel modello sviluppato dagli studiosi è analizzata la competizione tra differenti *Internet provider* nel caso in cui sia implementato il regime di neutralità della rete e nel caso in cui sia permesso offrire un servizio con QoS attraverso il pagamento di un servizio prioritario o all'utilizzo della tecnologia dei *content delivery network*.

Dai risultati dello studio si evidenzia come i regimi discriminatori siano superiori in termini di efficienza nell'allocazione delle risorse di rete. Inoltre, la possibilità di garantire differenti QoS di connessione intensifica la concorrenza tra differenti ISP per l'offerta del servizio di connessione. Questi fattori conducono naturalmente ad una diminuzione dei prezzi per gli utenti finali e una più elevata efficienza della rete. Per quanto riguarda specificamente i consumatori finali, l'aumento di utilità percepita grazie alla riduzione del prezzo di connessione dipende in larga misura dalla tecnologia utilizzata per l'implementazione della QoS. Nel caso di sottoscrizione di un servizio di trasmissione premium infatti, le tariffe offerte agli utenti finali risultano essere notevolmente più basse rispetto al caso di utilizzo dei *content delivery network*. In questo caso infatti, l'ISP desidera attirare il maggior numero di consumatori possibile nel mercato, al fine di aumentare il valore del servizio prioritario offerto ai *content*

provider. Chiaramente l'incentivo è assente nel caso in cui i fornitori di contenuti utilizzino delle società terze, attraverso i *content delivery network*, per la trasmissione "prioritaria" dei loro contenuti. Tuttavia, è importante sottolineare come l'utilizzo dei CDN sia neutrale dal punto di vista del benessere generale, determinando solamente un ribilanciamento del surplus e del profitto all'interno del mercato.

2.3.3.2.2 *User tiering model*

Nel caso in cui gli *Internet provider* offrano ai consumatori finali livelli di servizio differenziati gli studiosi sono soliti parlare di tecniche di *user-tiering*.

In un lavoro pubblicato da Schwartz *et al.* (Schwartz, Shetty, & Walrand, 2008) è stato sviluppato un modello economico per verificare gli incentivi relativi alla scelta della capacità di rete da parte di alcuni ISP in competizione nel mercato. In particolare, attraverso un modello di gioco multistadio, gli studiosi hanno dimostrato come, in generale, la possibilità di offrire due differenti classi di servizio ai consumatori finali è vantaggiosa dal punto di vista del benessere generale. Chiaramente, come visto in precedenza durante l'analisi delle politiche di *tiering* dei *content provider*, anche in questo caso l'istituzione di due diverse QoS nel mercato causa la riduzione del grado di utilità percepito da alcuni consumatori derivante dall'uscita dal mercato o dalla sottoscrizione di un servizio non ottimale rispetto alle proprie esigenze. Tuttavia, la percentuale di consumatori svantaggiata utilizzando il modello di *tiering* è sufficientemente ristretta e decresce all'aumentare del numero di Internet provider attivi nel mercato. Questo risultato è una conseguenza diretta della scarsa efficienza nell'allocazione delle risorse di rete che si verifica quando la struttura di mercato è caratterizzata dalla presenza di pochi attori con grande potere di mercato. In questo caso infatti, gli ISP sono naturalmente portati a riservare una parte rilevante delle risorse di rete al servizio di connessione *premium* generando, di riflesso, una scarsa performance del servizio standard. Questo fenomeno conduce una frazione dei consumatori a richiedere forzatamente l'iscrizione al servizio premium o, in caso di disponibilità a pagare limitata, ad uscire dal mercato, causando una perdita generale di

benessere. Per ovviare a questo problema gli autori propongono di istituire delle regole per la determinazione di una componente fissa di risorse di rete da allocare al servizio *standard*. Risulta evidente in questo caso l'analogia discussa nei paragrafi precedenti con l'istituzione di una qualità minima di servizio o MQS¹³³.

In un lavoro pubblicato da Bandyopadhyay *et al.* (Bandyopadhyay & Cheng, 2006) si sono studiati gli effetti della politica di *tiering* dei consumatori introducendo i modelli di congestione della rete già analizzati in precedenza per la trattazione dei modelli economici di *tiering* dei *content provider*. In particolare, nel modello un Internet provider, fornitore di un servizio internet ad alta velocità, può decidere di introdurre nel mercato diverse classi di servizio caratterizzate da differenti livelli di banda disponibili¹³⁴. Sul lato dei consumatori invece, il mercato è diviso in due gruppi differenti: il primo, e più numeroso, è caratterizzato da utenti che richiedono principalmente una connessione a bassa velocità e solo sporadicamente una connessione premium, mentre il secondo, di dimensioni più ridotte, richiede in via ordinaria una connessione ad alte prestazioni. La peculiarità del modello si basa sulla possibilità che i diversi utenti della rete possono scegliere di usufruire momentaneamente della rete premium per visualizzare particolari contenuti in rete, effettuando un upgrade momentaneo della propria connessione in cambio del pagamento di una maggiorazione di prezzo rispetto alla tariffa di sottoscrizione ordinaria. A questo proposito, per identificare una politica di *pricing* estremamente variabile nel tempo gli autori hanno utilizzato il termine di *liquid pricing*.

Dai risultati del modello si ricava come l'introduzione di questa tipologia di politica di prezzi conduce essenzialmente ad un aumento dei profitti per l'internet provider. Questo risultato deriva dalla particolare condizione dell'infrastruttura a disposizione dell'internet provider, caratterizzata da un'elevata velocità e disponibilità di banda. L'ISP infatti, può immettere nel mercato un nuovo servizio standard non dovendo sostenere

¹³³ Si confronti il paragrafo relativo a: 2.3.3.2.1.1 Modelli di CSP tiering con analisi dei fenomeni di congestione della rete.

¹³⁴ In pratica nel modello si attribuisce ad una connessione una frequenza di invio dei pacchetti più elevata rispetto all'altra.

alcun costo aggiuntivo. Da un punto di vista generale infatti, è possibile considerare l'offerta del servizio standard come una degradazione volontaria del servizio premium, creata artificiosamente per introdurre una differenziazione di prezzo nel mercato. Chiaramente per quanto riguarda il livello di benessere generale la rimodulazione dei profitti nel mercato non porta necessariamente ad un aumento o ad una diminuzione del benessere sociale. Il risultato complessivo dell'introduzione di questa politica di *pricing* è dunque ambiguo e dipende in maniera rilevante dal grado di partecipazione nei due lati del mercato nelle due diverse configurazioni di prezzo. In particolare, gli studiosi hanno verificato come, in assenza di qualsiasi norma restrittiva, gli ISP potrebbero essere incentivati ad offrire solamente un servizio premium nel mercato, stabilendo un prezzo di connessione più elevato rispetto al prezzo ottimo dal punto di vista del benessere generale. Per questo motivo gli studiosi ipotizzano che potrebbe essere necessario un intervento regolatore al fine di garantire al maggior numero di utenti possibile la connessione alla rete Internet.

2.3.3.2.2.1 Data caps

Nei capitoli precedenti è stato analizzato come gli *internet provider* sono soliti richiedere un compenso ai consumatori finali in cambio dell'offerta di un servizio di connessione alla rete. Generalmente, a causa della già discussa "*flat rate trap*"¹³⁵, i fornitori via cavo del servizio Internet permettono una navigazione illimitata degli utenti, sia per quanto riguarda il tempo di connessione che per il volume di dati scambiati. Questa tipologia di servizio non è altrettanto diffusa per quanto riguarda le reti mobili, dove, a causa delle marcate differenze infrastrutturali, il volume di dati scambiati è generalmente limitato e viene offerto ai consumatori attraverso la definizione di differenti classi di consumo, utilizzando, in definitiva, una politica di differenziazione di prezzo di secondo grado.

In generale, quando ai consumatori non è consentita una navigazione illimitata in rete in gergo tecnico si parla di "*data caps*". Da un punto di vista operativo, si verifica che al raggiungimento di una particolare soglia di traffico, al consumatore viene sospesa la

¹³⁵ Si confronti il paragrafo relativo a: Flussi economico-finanziari tra i diversi attori di Internet

connessione alla rete o viene richiesto il pagamento di una tariffa aggiuntiva per poter continuare a navigare.

In linea generale risulta immediato comprendere come questa tipologia di *business model* può avere sia una natura discriminatoria che neutrale nei confronti dei consumatori finali. La tipologia più comune di *cap* non neutrale riguarda l'applicazione del limite al consumo solamente per alcune tipologie specifiche di traffico, discriminando di fatto i pacchetti in base alla loro origine o alla loro tipologia. In generale, per analizzare questo particolare *business model* è possibile ricondursi ai modelli economici già discussi in precedenza, introdotti per analizzare la discriminazione dei pacchetti di informazioni in rete¹³⁶. Un caso particolare di *cap* non neutrale è rappresentato dalla pratica definita “*zero rating*”. In questo caso l'internet provider esclude alcune tipologie di dati o di applicazioni dal computo totale del traffico generato, permettendone l'uso anche quando il consumatore ha raggiunto il proprio *data cap* e gli viene sospesa la possibilità di navigare. Questa pratica infatti, sebbene non richieda al consumatore il pagamento di alcun canone aggiuntivo discrimina in maniera evidente le differenti tipologie di dati trasmessi, influenzando le decisioni di utilizzo di alcune applicazioni rispetto ad altre.

Al contrario, in linea generale è possibile considerare come non discriminatori¹³⁷ i *data cap* applicati all'intero traffico Internet degli utenti finali, senza introdurre alcuna distinzione in relazione alla fonte o alla tipologia dei dati trasmessi.

2.4 La questione degli investimenti e della neutralità della rete

Dopo aver fornito una panoramica dei principali studi relativi alla questione della neutralità della rete, nei paragrafi seguenti si desidera analizzare nel dettaglio il tema relativo alla propensione agli investimenti da parte degli *Internet provider*. In

¹³⁶Si confronti il paragrafo relativo a: *Strict net neutrality*.

¹³⁷ Per trattare in maniera più approfondita la questione della neutralità dei *data cap* è possibile esaminare le linee guida tracciate dal BEREC, associazione dei principali regolatori europei per le telecomunicazioni e consultabile alla pagina [https://berec.europa.eu/eng/netneutrality/zero_rating/\(What is zero-rating?\)](https://berec.europa.eu/eng/netneutrality/zero_rating/(What%20is%20zero-rating?)).

particolare, in precedenza è stato verificato come l'abolizione del principio di neutralità porti, per la maggior parte degli studi, ad un aumento delle performance della rete legato in maniera diretta ai maggiori investimenti effettuati nell'infrastruttura da parte degli Internet Provider¹³⁸. Tuttavia, la questione risulta ancora largamente dibattuta. Alcuni ricercatori sono giunti infatti, a conclusioni diametralmente opposte dimostrando che, sotto alcune ipotesi, l'abolizione del principio di neutralità della rete possa portare una depressione degli investimenti ¹³⁹.

Per fornire un contributo a questa discussione nei prossimi paragrafi è presentato un modello economico sviluppato con l'obiettivo di verificare i differenti livelli di investimento ottenuti in condizione di neutralità e di introduzione di tariffe di *termination fee* nel mercato.

2.4.1 Ipotesi del modello

Da un punto di vista generale il modello sviluppato si pone in continuità con la letteratura relativa ai mercati a piattaforma, i cui rapporti economici sono stati accuratamente esaminati prima da Rochet e Tirole (Rochet & Tirole, 2003) e successivamente da Armstrong (Armstrong M. , 2005). Più nello specifico il *framework* utilizzato è ispirato al lavoro pubblicato da Economides e Tag (Economides & Tåg, 2007), da cui si riprende l'impostazione di base per la derivazione delle funzioni di domanda sui due lati della piattaforma, apertamente basata sul modello di analisi sviluppato da Hotelling (Hotelling, 1929).

In particolare, nel modello si prevede l'esistenza di un solo *Internet provider* che, agendo da piattaforma, mette in collegamento due differenti lati del mercato, costituiti dai *content provider* e dai consumatori dei contenuti.

Esaminando nello specifico il versante dei consumatori, risulta evidente come questi siano costretti, data la posizione di monopolio dell'ISP, a sottoscrivere degli accordi di

¹³⁸ Si confronti a questo proposito: Tabella riassuntiva delle pubblicazioni esaminate sul tema della neutralità della rete

¹³⁹ Tra gli studi più interessanti è possibile ricordare: (Bourreau, Kourandi, & Valletti, 2012) (Krämer & Wiewiorra, 2012) (Hermalin E. , 2012)

single-homing per l'accesso ad Internet, attraverso il pagamento di una tariffa fissa¹⁴⁰ definita dal parametro p . Per quanto riguarda l'utilità percepita invece, questa dipende da due valori distinti. Nello specifico, il primo valore cerca di modellizzare l'utilità percepita dalla semplice esistenza dell'infrastruttura di rete, grazie ai servizi alternativi che possono essere offerti ai consumatori, ed è posta pari alla costante v . Il secondo valore invece, pari alla costante b , è considerato linearmente crescente con il numero di *content provider* attivi nella rete e vuole modellizzare l'aumento di utilità percepito dai consumatori al crescere dei contenuti e dei servizi disponibili. Infine, per semplicità, si considera che, una volta ottenuto l'accesso alla rete, i consumatori visitino in maniera omogenea tutti i *content provider* attivi.

Di conseguenza, sul lato dei *content provider* si considera un insieme di i operatori sufficientemente differenziati da offrire contenuti che non sono in diretta concorrenza tra loro. Ogni società inoltre, ha una struttura di costo¹⁴¹ che, semplificando, può essere approssimata con i costi fissi sostenuti, che nel modello sono definiti pari a f e considerati omogenei nel mercato. Per quanto riguarda la componente dei ricavi invece, le entrate sono garantite in via esclusiva dalla vendita a società terze di servizi pubblicitari. A questo proposito, per semplicità, la capacità dei *content provider* di generare profitto dalla pubblicità trasmessa è considerata omogenea e pari al parametro a .

Seguendo l'esempio di Economides e Tåg (Economides & Tåg, 2007) e adottando il *framework* di lavoro introdotto da Hotelling (Hotelling, 1929) le sommatorie del numero dei *content provider* presenti nel mercato e dei consumatori di contenuti restituiscono dei risultati unitari. Inoltre, sui due lati della piattaforma, sia i *content provider* che i

¹⁴⁰ Seguendo la distinzione introdotta da Armstrong nel suo studio il sistema di pagamento è stato modellizzato secondo una politica "*fixed fees*", dove i pagamenti degli agenti alla piattaforma non dipendono in maniera diretta dal livello di performance ottenuto dall'intermediario sull'altro lato del mercato.

¹⁴¹ Chiaramente anche i *content provider* devono sostenere un costo di connessione alla rete per effettuare l'upload dei propri contenuti, tuttavia questo costo può essere inglobato nei costi "fissi" f dato che è un costo pagato all'ISP di accesso alla rete e non all'internet provider responsabile della trasmissione "*last mile*" dei contenuti.

consumatori sono distribuiti in maniera omogenea in un segmento di lunghezza unitaria, mentre l'internet provider è posizionato sul punto $\frac{1}{2}$ del segmento¹⁴².

Per quanto riguarda il lato dei consumatori è possibile allora definire la posizione del consumatore generico j con il parametro x_j con $0 \leq x_j \leq 1$ e un costo associato di trasporto pari a $\left|x_j - \frac{1}{2}\right| * c$, con c costante. Con questo prodotto si vuole rappresentare il grado di utilità di ogni consumatore derivante dalla connessione con i *content provider* attivi nella rete. Più il consumatore risulta "distante" dall'ISP infatti, più l'utilità percepita, considerando i gusti personali e le esigenze del singolo utente, risulta inferiore.

In maniera equivalente sul lato dei *content provider* è possibile definire la posizione della società generica i come y_i con $0 \leq y_i \leq 1$ e un costo associato di trasporto pari a $\left|y_i - \frac{1}{2}\right| * f$, anche in questo caso più la società risulta "distante" dall'internet provider più l'utilità percepita attraverso il servizio di connessione è limitata.

Infine, sia definita la capacità della rete pari al parametro φ , approssimazione delle performance generali del *network*. Risulta immediato comprendere come il parametro φ influenzi in maniera positiva l'utilità percepita dai consumatori che, grazie alle maggiori *performance* della rete ottengono una migliore QoE durante la navigazione in Internet. Dal punto di vista dell'internet provider invece, lo stesso parametro influenza in maniera negativa il profitto generato. Ipotizzando infatti, che il costo dell'investimento nell'infrastruttura per aumentare di un'unità la capacità della rete sia quadratico rispetto all'aumento di utilità percepito dai consumatori, è immediato verificare come l'internet provider deve sostenere un costo pari a φ^2 nell'infrastruttura per poter offrire il servizio di connessione.

In definitiva, le ipotesi iniziali del modello possono essere riassunte nei seguenti punti:

¹⁴² Si prende in considerazione il risultato ottimale di localizzazione per un monopolista operante in un mercato caratterizzato dalle ipotesi definite nel modello originario di Hotelling (Hotelling, 1929).

- I. Presenza di un mercato caratterizzato da una struttura a due versanti dove è presente un solo fornitore del servizio di connessione operante in condizioni di monopolio;
- II. Il mercato è modellato attraverso l'uso del concetto di città lineare, definita con la lettera A e caratterizzata da lunghezza unitaria;
- III. Sia i *content provider* che i consumatori sono distribuiti in maniera omogenea lungo il segmento;
- IV. L'internet provider, essendo in condizioni di monopolio, è posizionato al centro della città lineare;
- V. Sia p il prezzo richiesto dal fornitore del servizio di connessione (*ISP*) per la connessione alla rete dei consumatori;
- VI. Sia v il valore percepito dai consumatori, indipendente dal numero dei *content provider*, per l'esistenza dell'infrastruttura di rete;
- VII. Siano f i costi sostenuti della generica società di contenuti presente nel mercato;
- VIII. Sia b il valore marginale percepito dai consumatori per ogni *content provider* aggiuntivo connesso alla rete;
- IX. Sia a la capacità dei *content provider* di generare profitto attraverso la pubblicità;
- X. Sia n_c il numero di consumatori attivi collegati alla rete;
- XI. Sia n_{cp} il numero di *content provider* attivi nel mercato e collegati alla rete;
- XII. Sia φ la capacità della rete scelta dall'internet provider;
- XIII. Sia φ^2 il costo dell'investimento nella rete effettuato dall'internet provider nel mercato.

2.4.2 Applicazione del principio di neutralità della rete

Nella prima parte del modello si andranno a verificare le condizioni di equilibrio del mercato nel caso in cui sia applicato il principio di neutralità della rete. In questo caso dunque, l'unico flusso di pagamento consentito è quello relativo alla tariffa pagata dai consumatori all'*Internet provider* in cambio del servizio di connessione alla rete.

2.4.2.1 Definizione delle funzioni di utilità e profitto nel mercato

Date le ipotesi iniziali del modello è possibile quindi definire la funzione di utilità dei consumatori come:

$$U_{c_j} = v + b * n_{cp} + \varphi - p - c * \left| x_j - \frac{1}{2} \right| \quad (i)$$

Dalla funzione (i) si può notare come l'utilità percepita dai consumatori cresce all'aumentare del numero dei *content provider* attivi sul versante opposto del mercato, determinato dal valore n_{cp} . Questo andamento riflette la presenza delle esternalità di rete, elemento caratterizzante dei mercati a piattaforma. Ponendo infatti per assurdo che dal mercato escano istantaneamente tutti i produttori dei contenuti, è chiaro come un consumatore generico ricaverebbe un'utilità minima pari solamente al valore v , dato dalla semplice presenza dell'infrastruttura di rete. Infine, si può osservare come l'utilità dei consumatori presenta un andamento indirettamente proporzionale rispetto ai "costi" sostenuti e direttamente proporzionale alla capacità φ della rete.

La funzione di utilità dei *content provider* invece, è definita dalla seguente funzione:

$$U_{CP_i} = a * n_c - f * \left| y_i - \frac{1}{2} \right| \quad (ii)$$

Dove, il prodotto $a * n_c$, specularmente a quanto avviene per i consumatori, modella le economie di rete presenti nel mercato. L'utilità dei fornitori di contenuti inoltre, è chiaramente decrescente con i costi sostenuti per la trasmissione delle informazioni.

Infine, è possibile definire la funzione di profitto dell'*Internet provider*, in condizione di applicazione del principio di neutralità, attraverso la funzione:

$$\Pi_{ISP}(p, \varphi) = p(\varphi) * n_c(p, \varphi) - \varphi^2 \quad (iii)$$

2.4.2.2 Derivazione delle funzioni di domanda in condizione di NN

Date le ipotesi iniziali del modello è possibile affermare che nei due lati della piattaforma si sia creato un mercato simmetrico in un intorno circolare dell'ISP tale per cui tutti i consumatori e i *content provider* attivi si troveranno all'interno di un cerchio di raggio $R_{i,j}$, con $0 \leq R_{i,j} \leq 1$ e centro in $x, y = \frac{1}{2}$. Se ne ricava quindi che sia i consumatori che i *content provider* "indifferenti" si trovano ad una distanza di $\mp R_{i,j}$ dall'*internet provider*. Data la simmetria del problema quindi, al fine di semplificare la trattazione è possibile definire delle nuove coordinate per la posizione dell'ISP in modo tale da derivare la funzione di domanda dei *content provider* e dei consumatori solamente per uno dei due lati della città, raddoppiando quindi il risultato per ricondursi al caso generale.

Sia definita quindi una nuova città lineare B con una lunghezza pari a metà della città unitaria A e dove l'Internet provider è posizionato nel punto 0. Siano i *content provider* e i consumatori distribuiti in modo uniforme e il mercato caratterizzato dalle stesse ipotesi della città A .

La funzione di utilità dei consumatori può essere allora scritta come

$$\frac{U_{cj}}{2} = b * \frac{n_{cp}}{2} + \varphi - p - c * \bar{x}_j \quad (iv)$$

Allo stesso modo, l'utilità dei *content provider* può essere scritta come:

$$\frac{U_{CPi}}{2} = a * \frac{n_c}{2} - f * \bar{y}_i \quad (v)$$

Risulta evidente come la funzione di domanda sui due lati della piattaforma è funzione della quantità di *content provider* e consumatori che il versante opposto della piattaforma si aspetta sarà attivo nella rete al momento della connessione, che può essere definita come n_{cp}^e e n_c^e .

Si può quindi derivare il numero dei consumatori come:

$$\bar{x}_i = \frac{1}{2} n_c = \frac{v + b * (n_{cp}^e/2) - p + \varphi}{c} \quad (vi)$$

Di conseguenza il numero di *content provider* è esprimibile tramite l'espressione:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{2} n_{cp} = \frac{a * (n_c^e/2)}{f} \quad (vii)$$

Ipotizzando che nel mercato le aspettative sul lato dei *content provider* e su quello dei consumatori siano sempre completamente soddisfatte, e dunque siano verificate le condizioni $n_c \equiv n_c^e$ e $n_{cp} \equiv n_{cp}^e$, è possibile derivare le funzioni del numero di utenti e *content provider* attivi nel mercato risolvendo il seguente sistema:

$$\begin{cases} n_c = 2 * \frac{v + b * \left(\frac{n_{cp}}{2}\right) - p + \varphi}{c} \\ n_{cp} = 2 * \frac{a * (n_c/2)}{f} \end{cases} \quad (viii)$$

Risolvendo il sistema si ottengono le seguenti espressioni:

$$n_c(p, \varphi) = 2 \frac{f(\varphi + v - p)}{cf - ab} \quad (ix)$$

$$n_{cp}(p, \varphi) = 2 \frac{a(v + \varphi - p)}{cf - ab} \quad (x)$$

2.4.2.3 Condizioni di equilibrio del mercato in regime di neutralità della rete

Una volta definite le funzioni di domanda sui due versanti del mercato è possibile riscrivere la funzione di profitto dell'internet provider in condizione di neutralità della rete come:

$$\Pi_{ISP}(p, \varphi) = n_c(p, \varphi) * p(\varphi) - \varphi^2 = 2 \frac{f(\varphi + v - p)}{cf - ab} * p - \varphi^2 \quad (xi)$$

Osservando la funzione risulta chiaro come i ricavi della piattaforma siano influenzati dalla fluttuazione di solamente due variabili: il prezzo di connessione p stabilito per gli utenti finali e la capacità della rete φ . In linea generale quindi, si può affermare che un qualsiasi ISP, in condizione di monopolio del mercato e sotto l'ipotesi di perfetta razionalità, cercherà di individuare i valori di φ e p tali per cui la sua funzione di profitto risulta massimizzata. Da un punto di vista temporale, è possibile ipotizzare che la scelta di investimento nell'infrastruttura di rete sia effettuata anteriormente a quella di determinazione del prezzo di vendita della connessione. Considerando come valida questa ipotesi è quindi possibile modellizzare un gioco multistadio dove: nella prima fase l'ISP determina la capacità dell'infrastruttura di rete attraverso un investimento pari ad φ^2 ; al secondo stadio invece, è determinato il prezzo di vendita del servizio di connessione p . Utilizzando una tecnica di risoluzione *backwards* allora, è possibile determinare il livello del prezzo di vendita ottimo P_{nn} stabilito dall'ISP in condizione di neutralità della rete trovando il punto di massimo della funzione di profitto dell'internet provider.

Si deve quindi individuare il valore di p tale per cui:

$$\frac{d\Pi}{dp} = 0 \quad (xii)$$

Si può quindi scrivere:

$$\frac{d\Pi}{dp} = \frac{d}{dp} \left[2 \frac{f(v + \varphi - p)}{cf - ab} * p - \varphi \right] \quad (xiii)$$

Da cui si ottiene che:

$$\frac{d\Pi}{dp} = \left[\frac{-4fp + 2f\varphi + 2fv}{fc - ab} \right] \quad (xiv)$$

Da cui, ponendo la derivata uguale a zero si ottiene:

$$p_{nn}(\varphi) = \frac{\varphi + v}{2} \quad (xv)$$

Ricavato il prezzo di equilibrio in condizione di neutralità della rete è possibile, procedendo *backwards*, calcolare la capacità dell'infrastruttura di rete "ottima" φ_{nn} determinata dall'*Internet provider* in condizione di monopolio.

Procedendo come nel caso precedente si può quindi scrivere:

$$\frac{d\Pi}{d\varphi} = \frac{d}{dp} [n_c(\varphi) * p(\varphi) - \varphi^2] \quad (xvi)$$

O in maniera equivalente:

$$\frac{d\Pi}{d\varphi} = \frac{d}{dp} \left[\frac{f\varphi + fv}{cf - ab} * \frac{\varphi + v}{2} - \varphi^2 \right] \quad (xvii)$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{d\Pi}{d\varphi} = \frac{f\varphi + fv - 2cf\varphi + 2ab\varphi}{cf - ab} \quad (xviii)$$

Ponendo la derivata uguale a zero si ricava che:

$$\varphi_{nn} = \frac{fv}{2(cf - ab) - f} \quad (xix)$$

Che rappresenta la capacità della rete scelta dall'*Internet provider* in condizione di neutralità della rete.

2.4.3 Abolizione del principio di neutralità della rete

Dopo aver determinato i parametri di prezzo e di capacità della rete in condizione di *net neutrality* risulta interessante osservare come variano gli stessi parametri dopo l'introduzione di tariffe di *termination fee*. A questo proposito, è possibile definire tramite il parametro s la tariffa di terminazione richiesta dagli Internet provider ai *content provider* per la trasmissione dei loro contenuti ai consumatori.

2.4.3.1 Determinazione delle funzioni di utilità e di profitto in assenza di neutralità

In questo caso la funzione di utilità dei *content provider* viene modificata in quanto nel mercato è introdotto un nuovo costo che ne abbassa l'utilità percepita.

$$\frac{U_{CPi}}{2} = a * \frac{n_c}{2} - f * \bar{y}_i - s \quad (xx)$$

Di riflesso, la funzione di profitto dell'Internet provider si arricchisce delle entrate determinate dalla riscossione delle *termination fee* e può essere riscritta come:

$$\Pi_{ISP} = p(s, \varphi) * n_c(\varphi, p, s) + s(p, \varphi) * n_{cp}(\varphi, p, s) - \varphi^2 \quad (xxi)$$

2.4.3.2 Derivazione delle funzioni di domanda in condizione di NNN

Stabilita la nuova funzione di utilità per i *content provider* è possibile procedere con il calcolo delle nuove funzioni rappresentanti il numero di consumatori e *content provider* attivi in equilibrio nel mercato. In questo caso il sistema da risolvere può essere scritto come:

$$\begin{cases} n_c = 2 * \frac{v + b * (n_{cp}/2) - p + \varphi}{c} \\ n_{cp} = 2 * \frac{a * (n_c/2) - s}{f} \end{cases} \quad (xxii)$$

Da cui si ottiene i seguenti risultati:

$$n_c(p, s, \varphi) = 2 \frac{f(v + \varphi - p) - bs}{cf - ab} \quad (xxiii)$$

$$n_{cp}(p, s, \varphi) = 2 \frac{a(v + \varphi - p) - cs}{cf - ab} \quad (xxiv)$$

2.4.3.3 Condizioni di equilibrio nel mercato con presenza di termination fee

Dopo aver definito le nuove funzioni di domanda sui due versanti del mercato è possibile riscrivere la funzione di profitto dell'internet provider come:

$$\Pi_{ISP}(p, s, \varphi) = n_c(p, \varphi, s) * p(s, \varphi) + n_{cp}(p, s, \varphi) * s(p, \varphi) - \varphi^2 \quad (xxv)$$

O in maniera equivalente:

$$\Pi_{ISP}(p, s, \varphi) = 2 \frac{f(v + \varphi - p) - bs}{cf - ab} * p + 2 \frac{a(v + \varphi - p) - cs}{cf - ab} * s - \varphi^2 \quad (xxvi)$$

Osservando la funzione risulta chiaro come in questo caso i ricavi della piattaforma sono dipendenti da tre variabili differenti: il prezzo di connessione p stabilito per gli utenti finali, la *termination fee* s richiesta ai *content provider* e l'investimento nella capacità della rete φ . Come nel caso precedente l'ISP, agendo in maniera perfettamente razionale, cercherà di individuare i valori di s , φ e p tali per cui la sua funzione di profitto risulta massimizzata. In questo caso dunque, il gioco sarà modellato nella seguente maniera: nel primo stadio l'ISP determina la capacità dell'infrastruttura di rete φ , mentre nel secondo determina la *termination fee* s e il prezzo di vendita del servizio di connessione p . Utilizzando una tecnica di risoluzione *backwards* allora, è possibile determinare il livello del prezzo di vendita ottimo p_{tf} e della *termination fee* ottima s_{tf} stabiliti dall'ISP risolvendo il seguente sistema:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial p} = 0 \\ \frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial s} = 0 \end{cases} \quad (xxvii)$$

Si può calcolare dunque:

$$\frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial p} = \frac{\partial}{\partial p} \left[\frac{f(\varphi - p) - bs}{cf - ab} * p + \frac{a(\varphi - p) - cs}{cf - ab} * s - \varphi^2 \right] \quad (xxviii)$$

Da cui si ricava:

$$\frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial p} = \frac{-4fp + 2f(\varphi + v) - 2s(a + b)}{cf - ab} \quad (xxix)$$

Ponendo la derivata parziale rispetto a p pari a zero si ottiene:

$$p(s, \varphi) = \frac{f(v + \varphi) - s(a + b)}{2f} \quad (xxx)$$

Procedendo in maniera equivalente con il parametro s si può scrivere:

$$\frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial s} = \frac{\partial}{\partial s} \left[\frac{f(v + \varphi - p) - bs}{cf - ab} * p + \frac{a(v + \varphi - p) - cs}{cf - ab} * s - \varphi^2 \right] \quad (xxxii)$$

Da cui si ricava

$$\frac{\partial \Pi_{ISP}}{\partial s} = \frac{-4cs + 2a(\varphi + v) - 2p(a + b)}{cf - ab} \quad (xxxiii)$$

E ponendo la derivata parziale rispetto a s pari a zero si ottiene:

$$s(p, \varphi) = \frac{a(\varphi + v) - p(a + b)}{2c} \quad (xxxiii)$$

È quindi possibile riscrivere il sistema (xxvii) come:

$$\begin{cases} p(s, \varphi) = \frac{f(\varphi + v) - s(a + b)}{2f} \\ s(p, \varphi) = \frac{a(\varphi + v) - p(a + b)}{2c} \end{cases} \quad (xxxiv)$$

Da cui si ricava:

$$p(\varphi) = \frac{(v + \varphi)(2cf - a^2 - ab)}{4cf - (a + b)^2} \quad (xxxv)$$

e

$$s(\varphi) = \frac{f(v + \varphi)(a - b)}{4cf - (a + b)^2} \quad (xxxvi)$$

Ottenute le funzioni del prezzo di vendita della connessione e della *termination fee* scelte dall'internet provider è possibile, procedendo *backwards*, andare a riscrivere la funzione di profitto dell'internet provider in funzione del solo parametro φ .

Per chiarezza espositiva, prima di riportare la funzione di profitto completa dell'ISP in funzione del parametro φ risulta utile riscrivere le equazioni del numero dei consumatori e dei *content provider* sostituendo al loro interno l'espressione di $p(\varphi)$ ed $s(\varphi)$ individuate.

Per quanto riguarda il numero dei consumatori inserendo (xxxvi) e (xxxv) in (xxiii) si ottiene:

$$n_c(\varphi) = \frac{4f(v + \varphi)}{4cf - (a + b)^2} \quad (xxxvii)$$

Allo stesso modo, per quanto riguarda il numero di *content provider* inserendo (xxxvi) e (xxxv) in (xxiv) si ottiene:

$$n_{cp}(\varphi) = \frac{2(f+v)(a+b)}{4cf - (a+b)^2} \quad (xxxviii)$$

A questo punto è possibile riscrivere la funzione di profitto dell'Internet provider in funzione del solo parametro φ attraverso l'espressione:

$$\Pi_{ISP}(\varphi) = n_c(\varphi) * p(\varphi) + n_{cp}(\varphi) * s - \varphi^2 \quad (xxxix)$$

Dalla quale, derivando la funzione di profitto rispetto alla capacità della rete φ si ricava:

$$\frac{d\Pi_{ISP}}{d\varphi} = \frac{4f(v+\varphi)}{4cf - (a+b)^2} - 2\varphi \quad (xl)$$

Dalla quale, imponendo l'uguaglianza a zero si ottiene:

$$\varphi_{tf} = \frac{2fv}{4cf - (a+b)^2 - 2f} \quad (xli)$$

Che equivale alla capacità della rete scelta dall'Internet provider in condizione di monopolio e di applicazione di *termination fee* nel mercato.

2.4.4 Confronto dei livelli di investimento nell'infrastruttura di rete

Dopo aver determinato i livelli di investimento scelti dall'*Internet provider* in condizione di neutralità della rete e in condizione di applicazione di *termination fee*, risulta interessante verificare quale dei due regimi incentivi maggiormente l'Internet provider ad investire maggiormente nell'infrastruttura di rete. In particolare, confrontando l'espressione (xli) e (xix) si ottiene:

$$\varphi_{tf} = \frac{2fv}{4cf - (a+b)^2 - 2f} \geq \frac{fv}{2(cf - ab) - f} = \varphi_{nn} \quad (xlii)$$

Si può infatti scrivere:

$$\frac{2fv}{4cf - (a + b)^2 - 2f} \geq \frac{fv}{2(cf - ab) - f} * \frac{2}{2} \quad (xliii)$$

Da cui si ottiene:

$$\frac{2fv}{4cf - (a + b)^2 - 2f} \geq \frac{2fv}{4(cf - ab) - 2f} \quad (xliv)$$

La disequazione (xliv) è verificata se e solo se si verifica la seguente condizione:

$$(a + b)^2 \geq 4ab \quad (xlv)$$

La quale è sempre verificata. Si può quindi affermare che il livello di capacità della rete determinato dall'internet provider in condizione di applicazione delle tariffe di *termination fee* è sempre superiore o uguale al livello che sceglierebbe in condizione di applicazione del principio di neutralità della rete.

Più nello specifico, prendendo in considerazione l'uguaglianza della disequazione è possibile riscrivere che l'espressione (xlv) come:

$$(a + b)^2 = 4ab \quad (xlvi)$$

Da cui si potrebbe ricavare che, da un punto di vista del livello di investimento, la condizione di neutralità della rete è equivalente alla condizione di non neutralità se e solo se $a = b$, mentre in tutti gli altri casi è inferiore.

Da un punto di vista delle ipotesi iniziali questa condizione può essere tradotta nella seguente maniera: la condizione NN incentiva di meno gli internet provider ad aumentare le performance della rete a meno che il ricavo proveniente dalla pubblicità dei *content provider* non sia equivalente all'aumento di utilità marginale percepito dai

consumatori per ogni *content provider* aggiuntivo attivo nella rete; in tale caso il livello di investimento è il medesimo.

Tuttavia, esaminando meglio le equazioni derivanti dal mercato in NNN è possibile osservare che se si pone la condizione $a = b$ in (xxxvi) si ottiene:

$$s(\varphi_{tf}) = \frac{f(v + \varphi)(a - a)}{4cf - (a + b)^2} = \frac{f(v + \varphi)(0)}{4cf - (a + b)^2} = 0 \quad (xlvii)$$

Che riconduce al caso di mercato in neutralità della rete.

In definitiva, dati i risultati e le ipotesi del modello, è possibile affermare che per ogni valore di a, b la condizione di neutralità della rete fornisce un incentivo inferiore all'*Internet provider* per l'investimento nell'infrastruttura di rete.

2.4.5 Dimostrazione delle condizioni del secondo ordine per i punti di equilibrio individuati

Date le soluzioni individuate in condizione di applicazione delle *termination fee* nel mercato si ricava che la capacità della rete definita dall'equazione (xli) è un punto di massimo della funzione di profitto dell'*Internet provider* se e solo se è verificata la condizione:

$$\frac{d^2 \Pi_{ISP}}{d\varphi^2} < 0 \quad (xlviii)$$

Dall'equazione (xli) si può scrivere allora:

$$\frac{d^2 \Pi_{ISP}}{d\varphi^2} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{4f(v + \varphi)}{4cf - (a + b)^2} - 2\varphi \right) \quad (xlix)$$

Dalla quale si ricava:

$$\frac{d^2\Pi_{ISP}}{d\varphi^2} = \frac{4f - 2[4cf - (a + b)^2]}{4cf - (a + b)^2} - 2\varphi \quad (xlx)$$

Imponendo la condizione di negatività della derivata seconda si ottiene quindi:

$$4(2cf - f) > (a + b)^2 \quad (xlxi)$$

O in maniera equivalente:

$$c > \frac{1}{2} + \frac{(a + b)^2}{8f} \quad (xlxii)$$

Per quanto riguarda invece i punti $p(\varphi)_{tf}$ e $s(\varphi)_{tf}$ individuati al secondo stadio del gioco, per verificare che questi siano effettivamente dei punti di massimo della funzione di profitto dell'*Internet provider* si deve calcolare:

$$\frac{\partial^2\Pi_{ISP}}{\partial p^2} = \frac{-4f}{cf - ab} \quad (xlxiii)$$

$$\frac{\partial^2\Pi_{ISP}}{\partial s^2} = \frac{-4c}{cf - ab} \quad (xlxiv)$$

$$\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial\Pi_{ISP}}{\partial s} \right) = \frac{-2(a + b)}{cf - ab} \quad (xlxv)$$

$$\frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial\Pi_{ISP}}{\partial s} \right) = \frac{-2(a + b)}{cf - ab} \quad (xlxvi)$$

È possibile quindi comporre la matrice hessiana della funzione di profitto definita come:

$$H_{\Pi_{ISP}} = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2\Pi_{ISP}}{\partial p^2} & \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial\Pi_{ISP}}{\partial s} \right) \\ \frac{\partial}{\partial p} \left(\frac{\partial\Pi_{ISP}}{\partial s} \right) & \frac{\partial^2\Pi_{ISP}}{\partial s^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-4f}{cf - ab} & \frac{-2(a + b)}{cf - ab} \\ \frac{-2(a + b)}{cf - ab} & \frac{-4c}{cf - ab} \end{pmatrix} \quad (xlxvii)$$

In conclusione, si può affermare che i punti $p(\varphi)_{tf}$ e $s(\varphi)_{tf}$ sono di massimo per la funzione Π_{ISP} se e solo se sono verificate le seguenti condizioni:

$$\frac{\partial^2 \Pi_{ISP}}{\partial p^2} = \frac{-4f}{cf - ab} < 0 \quad (xlxviii)$$

La quale è verificata se:

$$cf > ab \quad (xlxix)$$

E che:

$$\det(H_{\Pi_{ISP}}) = \det \begin{pmatrix} \frac{-4f}{cf - ab} & \frac{-2(a+b)}{cf - ab} \\ \frac{-2(a+b)}{cf - ab} & \frac{-4c}{cf - ab} \end{pmatrix} > 0 \quad (xlxx)$$

Da cui si ricava la condizione:

$$4cf > (a+b)^2 \quad (xlxxi)$$

Per quanto riguarda invece il mercato in neutralità della rete è necessario dimostrare, come fatto anteriormente, che la derivata seconda della funzione di profitto dell'Internet provider rispetto alla capacità della rete sia negativa. Riportando l'equazione (xlviii) è quindi possibile scrivere:

$$\frac{d^2 \Pi}{d\varphi^2} = \frac{d}{d\varphi} \left(\frac{f\varphi + fv - 2cf\varphi + 2ab\varphi}{cf - ab} \right) \quad (xlxxii)$$

Da cui si ricava:

$$\frac{d^2\Pi}{d\varphi^2} = \frac{-2cf + f + 2ab}{cf - ab} \quad (xlxxiii)$$

Da cui si ricava la condizione:

$$2cf - f > 2ab \quad (xlxxiv)$$

3 La normativa europea relativa alla neutralità della rete

La normativa europea volta a garantire il principio di neutralità della rete è stata definita attraverso l'emanazione del regolamento della Comunità Europea del 25 novembre 2015 n. 2015/2120¹⁴³ che ha modificato la direttiva 2002/22/CE relativa al servizio universale e ai diritti degli utenti in materia di reti e di servizi di comunicazione elettronica e il regolamento (UE) n. 531/2012 relativo al roaming sulle reti pubbliche di comunicazione mobile all'interno dell'Unione.

In particolare, la tematica della neutralità della rete è affrontata nella prima parte del regolamento ed è disciplinata in tre articoli distinti. Nello specifico, all'articolo 3 sono definite le regole di accesso ad Internet, nel 4 sono stabilite le misure di trasparenza volte a garantire l'accesso dei consumatori alla rete e, infine, nel 5 sono precisati gli organismi di controllo e vigilanza del servizio di accesso a Internet.

3.1 Articolo 3: Salvaguardia dell'accesso ad un'Internet aperta

L'articolo 3 del Regolamento europeo del 25 novembre 2015 pone le fondamentali normative della questione della neutralità della rete. In generale, è possibile affermare che l'articolo affronta le seguenti tematiche:

- a) Nel primo comma sono stabiliti i diritti degli utenti finali derivanti dall'acquisizione di un servizio di accesso alla rete Internet;
- b) Nel secondo comma sono disciplinate le limitazioni contrattuali dei servizi di connessione alla rete e sono definite le pratiche commerciali che possono essere impiegate da parte degli ISP;
- c) Nel terzo comma sono definite le limitazioni alle tecniche di *network management* applicabili da parte degli Internet provider e sono stabiliti i casi specifici nei quali è possibile infrangerle;
- d) Nel quarto comma sono definiti i casi in cui le tecniche di *network management* possono implicare l'elaborazione dei dati personali;

¹⁴³ Per esaminare il testo integrale del regolamento si visiti: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32015R2120>

- e) Nel quinto comma infine, sono definite le condizioni sotto alle quali gli ISP e i CP possono offrire nel mercato servizi specifici adeguatamente sviluppati per offrire determinati livelli di QoS nel mercato.

Da un punto di vista generale, come è possibile esaminare confrontando il punto 33 del preambolo, il regolamento è stato sviluppato in accordo con i diritti fondamentali riconosciuti e tutelati dalla Carta¹⁴⁴, con particolare attenzione al principio della libertà di espressione, di informazione, di impresa, di protezione dei dati personali, di non discriminazione e di protezione dei consumatori.

Per effettuare un'analisi più dettagliata è necessario esaminare i singoli commi del terzo articolo. Nello specifico, nel primo comma è stabilito che:

*“Gli utenti finali hanno il diritto di **accedere** a informazioni e contenuti e di **diffonderli**, nonché di **utilizzare** e **fornire** applicazioni e servizi, e utilizzare apparecchiature terminali **di loro scelta**, indipendentemente dalla sede dell’utente finale o del fornitore o dalla localizzazione, dall’origine o dalla destinazione delle informazioni, dei contenuti, delle applicazioni o del servizio, tramite il servizio di accesso a Internet. Il presente paragrafo non pregiudica il diritto dell’Unione, o il diritto nazionale conforme al diritto dell’Unione, relativo alla legittimità dei contenuti, delle applicazioni o dei servizi.*

Tra gli aspetti più rilevanti del primo comma si può sottolineare come l’attenzione del legislatore sia stata posta in egual misura sulla regolamentazione sia della ricezione dei dati¹⁴⁵ che della capacità di invio degli utenti. Da un punto di vista normativo dunque le capacità di *upload* e *download* del consumatore sono poste sul medesimo livello di importanza¹⁴⁶. Inoltre, si stabilisce la necessità di implementare un principio di indipendenza tecnologica rispetto agli apparecchi che permettono la connessione alla

¹⁴⁴ Si fa riferimento alla Carta dei diritti fondamentali dell’Unione Europea. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=LEGISSUM%3A133501>

¹⁴⁵ In questo contesto il termine dati è utilizzato per generalizzare non solo il concetto di invio e ricezione di contenuti ma anche la fornitura e l’utilizzo di applicazioni e servizi.

¹⁴⁶ Questo principio risulta di particolare interesse in quanto dal punto di vista tecnico e tecnologico è immediato verificare come il servizio di upload dei consumatori sia sempre stato tecnicamente svantaggiato rispetto al servizio di download.

rete, riprendendo la direttiva del Parlamento e del Consiglio europei per la creazione di un *framework* comune per le reti e i servizi di comunicazione elettroniche¹⁴⁷.

Per quanto riguarda il secondo comma, invece l'articolo recita:

*“Gli accordi tra i fornitori di servizi di accesso a Internet e gli utenti finali sulle condizioni e sulle caratteristiche commerciali e tecniche dei servizi di accesso a Internet quali prezzo, volumi di dati o velocità, e le pratiche commerciali adottate dai fornitori di servizi di accesso a Internet **non limitano** l'esercizio dei diritti degli utenti finali di cui al paragrafo 1”.*

Il secondo comma del regolamento sancisce la possibilità da parte degli *Internet provider* di sottoscrivere dei contratti di accesso alla rete in cui sono negoziati sia gli aspetti tecnici che commerciali della fornitura. In particolare, come segnalato dalle linee guida fornite dal BEREC (BEREC, 2016), sono consentite tutte le pratiche commerciali di determinazione di prezzo, volume dei dati e velocità di connessione a condizione che la loro applicazione non sia lesiva del diritto di accesso alla rete stabilito dal primo comma. Come è possibile verificare dal punto 7 del preambolo al regolamento infatti, la tariffazione specifica di determinati volumi di dati o differenti velocità di trasmissione, non è da considerarsi lesiva dei diritti del consumatore. Intervenendo sulla questione il BEREC ha inoltre confermato che è ammissibile offrire differenti classi di connessione, differenziando il servizio in base al volume di dati e alla velocità di trasmissione, a condizione che tutte applicazioni siano servite attraverso il medesimo livello di servizio¹⁴⁸.

Da un punto di vista pratico è possibile quindi affermare che qualsiasi pratica commerciale che applichi un prezzo maggiore ai dati trasmessi da una specifica applicazione è contraria al primo comma dell'articolo 3 del regolamento. Risulta interessante notare inoltre come il BEREC interpreti come dannosa la pratica di aumento del prezzo di connessione anche quando questa è applicata ad un'intera classe di

¹⁴⁷ Directive 2002/21/EC of the European Parliament and of the Council of 7 March 2002. Testo integrale disponibile a: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32002L0021>

¹⁴⁸ Si parla in questo caso di un livello di servizio determinato in una *application-agnostic way*.

servizio (BEREC, 2016). Secondo l'opinione dell'Agenzia infatti, la differenziazione di prezzo può causare un elevato disincentivo all'utilizzo di una determinata categorie di applicazioni, limitandone lo sviluppo tecnologico e riducendo l'offerta generale dei *content provider* ai consumatori.

Seguendo lo stesso filone di ragionamento è possibile considerare potenzialmente dannose per i consumatori anche le pratiche di zero-rating¹⁴⁹, di determinazione di *data cap* per specifiche tipologie di applicazioni¹⁵⁰ e di blocco selettivo di alcuni contenuti specifici, come ad esempio il servizio VoIP.

Procedendo nell'analisi il primo paragrafo del terzo comma risulta di fondamentale importanza per la questione del principio di neutralità della rete, in esso è infatti stabilito che:

*“I fornitori di servizi di accesso a Internet, nel fornire tali servizi, **trattano tutto il traffico allo stesso modo**, senza discriminazioni, restrizioni o interferenze, e a prescindere dalla fonte e dalla destinazione, dai contenuti cui si è avuto accesso o che sono stati diffusi, dalle applicazioni o dai servizi utilizzati o forniti, o dalle apparecchiature terminali utilizzate”.*

Risulta immediato verificare come il primo paragrafo del terzo comma implichi l'implementazione nella rete di una forma molto rigida di neutralità della rete, nella quale non è possibile utilizzare alcuna tecnica di *network management* e i pacchetti di informazione devono essere processati secondo una logica *best effort*. In particolare, si stabilisce che l'ISP non può bloccare, rallentare, ridurre, discriminare o degradare il traffico generato dai consumatori. Il divieto vale tanto per i contenuti quanto per le differenti applicazioni utilizzate. In quest'ottica risulta immediato osservare come qualsiasi restrizione dei servizi, definita tramite accordi di sub-Internet¹⁵¹, sia da

¹⁴⁹ Si ricorda che per pratiche di zero-rating si considera un contratto in cui i dati di tutte le applicazioni sono bloccati al raggiungimento di un determinato data-cap tranne che per le applicazioni *zero rated* per le quali è consentito un consumo di dati illimitato.

¹⁵⁰ A questo proposito il BEREC precisa che l'eliminazione dei *data cap* per poter accedere alle applicazioni del servizio clienti degli ISP per acquistare nuovi pacchetti di dati è da considerarsi come regolare.

¹⁵¹ Con servizi di sub internet il BEREC intende particolari servizi di connessione che limitano l'utilizzo di determinate applicazioni o l'accesso a specifici contenuti della rete.

considerare contraria al regolamento. Allo stesso modo le offerte di zero-rating infrangono chiaramente più commi del terzo articolo.

La forma molto rigida di neutralità introdotta dal primo paragrafo del terzo comma è parzialmente attenuata dal secondo paragrafo in cui si stabilisce che:

*“Il primo comma non impedisce ai fornitori di servizi di accesso a Internet di attuare **misure di gestione ragionevole** del traffico. Per essere considerate ragionevoli, tali misure devono essere trasparenti, non discriminatorie e proporzionate e non devono essere basate su considerazioni di ordine commerciale ma su requisiti di qualità tecnica del servizio obiettivamente diversi di specifiche **categorie di traffico**. Tali misure non controllano i contenuti specifici e sono mantenute per il tempo strettamente necessario”.*

Una prima chiarificazione di questo paragrafo può essere ricavata dal punto 9 del preambolo al Regolamento in cui si stabilisce che l’obiettivo generale di una gestione del traffico ragionevole deve essere quella di contribuire a migliorare le performance generali di trasmissione della rete, aumentare l’efficienza delle risorse utilizzate e deve rispondere a dei requisiti di qualità tecnica e del servizio obiettivamente differenti per specifiche categorie di traffico dati. Chiaramente ogni forma ragionevole di network management per potere essere considerata legittima deve essere trasparente, non discriminatoria, proporzionata e non deve essere basata su alcuna considerazione di ordine commerciale.

Secondo l’interpretazione del BEREC (BEREC, 2016), una tecnica di gestione del traffico di rete può essere considerata ragionevole solamente se risulta conforme ai requisiti di trasparenza, non discriminazione e proporzionalità. In particolare, per quanto riguarda la trattazione del principio di trasparenza, questo è accuratamente approfondito nell’articolo 4 del regolamento, dove viene stabilito il livello minimo di divulgazione delle informazioni riguardanti le tecniche di network management che deve essere effettuato da parte degli Internet provider¹⁵².

¹⁵² Si confronti Articolo 4: Misure di trasparenza per assicurare l’accesso a un’Internet aperta

Per quando riguarda invece il principio di non discriminazione, secondo l'opinione del BEREC i regolatori nazionali dovrebbero considerare che una tecnica di gestione del traffico è conforme a questo principio solamente se l'applicazione di diversi trattamenti di trasmissione è applicata ad altrettante differenti categorie di traffico, le quali richiedono in maniera oggettiva differenti livelli di QoS. Coerentemente con questo principio dunque, pacchetti di dati simili, dove l'analogia deve essere misurata in particolar modo in termini QoS, devono ricevere il medesimo trattamento in termini di performance di trasmissione nella rete.

Esaminando il principio di proporzionalità invece, seguendo sempre le linee guida fornite dal BEREC, si può affermare che ogni forma di gestione del traffico per rispettare questo principio deve contribuire ad un utilizzo più efficiente delle risorse di rete e ad una maggiore qualità generale della trasmissione delle informazioni. Inoltre, non deve esistere un altro strumento di network management che, attraverso una discriminazione meno marcata porti ad un medesimo livello di QoS nella rete.

Infine, qualsiasi forma di discriminazione del traffico, per poter essere considerata conforme alle direttive del Regolamento, deve rispondere a due ulteriori caratteristiche: non deve monitorare i contenuti specifici dei pacchetti di dati inviati e deve essere implementata per il tempo strettamente necessario. Per quanto riguarda il primo punto le pratiche di *network management* basate sulla discriminazione dei pacchetti trasmessi in rete per rispettare il Regolamento devono essere basate sull'analisi generica dei contenuti trasmessi¹⁵³, non potendo verificare attivamente il contenuto specifico delle informazioni trasportate. Per quanto riguarda invece il concetto di necessità, si vuole evidenziare come le tecniche di network management devono essere implementate solamente in caso di effettivo bisogno, i pacchetti di dati dunque in caso di scarsa congestione del *network* devono essere processati attraverso una logica *best effort*. Come sottolineato dal BEREC questo principio non vieta la possibilità di implementare un sistema automatico che, in caso di rilevazione di fenomeni di congestione, applichi un differente livello di priorità ai pacchetti processati, tuttavia l'utilizzo di queste

¹⁵³ Da un punto di vista tecnico dunque l'analisi da parte degli ISP delle informazioni contenute nell'IP *header* e nel transport layer protocol header (TCP) sono considerate conformi rispetto al principio di monitoraggio generico dei pacchetti.

tecniche è consentito solamente se vi è un'oggettiva necessità di miglioramento delle *performance* della rete in un determinato momento e non può essere applicato *tout court* all'intero flusso di informazioni trasmesso.

Nel terzo paragrafo sono stabilite le casistiche nelle quali gli ISP possono infrangere il principio di neutralità della rete. In particolare, il Regolamento consente agli ISP di bloccare, rallentare, discriminare e degradare il traffico solamente nelle seguenti circostanze: per applicare un regolamento dell'Unione o una legge degli Stati Nazionali, per preservare l'integrità e il funzionamento della rete e infine, per prevenire e mitigare gli effetti di possibili fenomeni di congestione straordinari o temporanei della rete. Nello specifico, il terzo paragrafo del terzo comma recita infatti:

“I fornitori di servizi di accesso a Internet non adottano misure di gestione del traffico che vanno oltre quelle di cui al secondo comma e, in particolare, non bloccano, rallentano, alterano, limitano, interferiscono con, degradano o discriminano tra specifici contenuti, applicazioni o servizi, o loro specifiche categorie, salvo ove necessario e solo per il tempo necessario a:

- a) conformarsi **ad atti legislativi** dell'Unione o alla normativa nazionale conforme al diritto dell'Unione, cui il fornitore di servizi di accesso a Internet è soggetto, o alle misure conformi al diritto dell'Unione che danno attuazione a tali atti legislativi dell'Unione o a tale normativa nazionale, compreso ai provvedimenti giudiziari o di autorità pubbliche investite di poteri pertinenti;*
- b) preservare **l'integrità e la sicurezza** della rete, dei servizi prestati tramite tale rete e delle apparecchiature terminali degli utenti finali;*
- c) prevenire un'imminente **congestione** della rete o mitigare gli effetti di una congestione della rete eccezionale o temporanea, purché categorie di traffico equivalenti siano trattate allo stesso modo”.*

Il quinto comma del terzo articolo introduce una distinzione fondamentale per l'intera tematica della neutralità della rete, presentando il concetto di servizi specifici e stabilendo che:

*“I fornitori di comunicazioni elettroniche al pubblico, compresi i fornitori di servizi di accesso a Internet, e i fornitori di contenuti, applicazioni e servizi sono liberi di offrire **servizi diversi** dai servizi di accesso a Internet **ottimizzati** per specifici contenuti, applicazioni o servizi o loro combinazioni, nei casi in cui l’ottimizzazione sia necessaria per **soddisfare i requisiti** relativi a contenuti, applicazioni o servizi per un **livello specifico di qualità**.”*

*I fornitori di comunicazioni elettroniche al pubblico, compresi i fornitori di servizi di accesso a Internet, possono offrire o facilitare tali servizi **solo se la capacità della rete è sufficiente** a fornirli in aggiunta a tutti i servizi di accesso a Internet prestati. Tali servizi non sono utilizzabili o offerti in sostituzione ai servizi di accesso a Internet e non devono andare **a scapito della disponibilità o della qualità** generale dei servizi di accesso a Internet per gli utenti finali.*

Il concetto di servizio Internet ottimizzato introdotto dal quinto comma è sostanzialmente differente da quello di categoria di traffico trattato precedentemente. In generale infatti, è possibile affermare che, come specificato dal terzo comma, l’applicazione di tecniche di *network management* discriminatorie tra differenti categorie di traffico è permesso solo temporaneamente per aumentare l’efficienza complessiva della trasmissione dei dati nella rete. Al contrario, l’offerta i servizi Internet ottimizzati possono essere offerti per soddisfare i requisiti specifici di QoS di particolari applicazioni o servizi.

Tuttavia, questa particolare categoria di servizi può essere offerta solamente quando sono verificate una serie di condizioni volte a tutelare il primo comma del terzo articolo. Nelle linee guida del BEREC si precisa come i servizi ottimizzati sono considerati conformi al regolamento relativo alla neutralità della rete solamente se offrono servizi sostanzialmente differenti rispetto al semplice accesso ad Internet. In particolare, questi non possono essere utilizzati o semplicemente offerti come alternativa al servizio di connessione e, soprattutto, non devono danneggiare o abbassare la qualità del servizio di connessione offerto a tutti gli altri utenti della rete. Inoltre, questi servizi devono richiedere una specifica ottimizzazione, necessaria per fornire un determinato livello di

QoS oggettivamente necessario per il consumo del servizio, contenuto o applicazione richiesto da parte degli utenti finali.

3.2 Articolo 4: Misure di trasparenza per assicurare l'accesso a un'Internet aperta

Come è stato discusso nel capitolo relativo all'analisi dei principali episodi di violazione del principio di neutralità ristretto della rete¹⁵⁴, uno degli aspetti più rilevanti del caso Comcast è stato senza dubbio la mancanza di trasparenza dell'*Internet provider*, il quale ha più volte negato l'utilizzo e l'implementazione di tecniche di *network management* nella sua infrastruttura di rete. L'opacità dell'ISP ha generato una grande diffidenza sia da parte dei media che dei consumatori, fornendo la base per le critiche di maggior rilievo mosse dai sostenitori del principio di neutralità della rete.

Intervenendo su questo tema, Krämer *et al.* (Krämer, Wiewiorra, & Weinhardt, 2013) affermano che uno dei principali pericoli dello *status quo* della rete e dell'utilizzo di pratiche di *network management* è la poca chiarezza sulla tipologia e sulla quantità di tecniche di discriminazione del traffico implementate. Per attenuare questo pericolo e permettere quindi ai consumatori di effettuare delle scelte informate al momento dell'acquisto del servizio di connessione, è necessario stabilire delle norme di trasparenza per tutti i fornitori del servizio Internet.

Da un punto di vista generale, gli Autori affermano che il principio di trasparenza può essere stabilito utilizzando un approccio sia *bottom-up* che *top-down*. Nel primo caso i consumatori hanno la possibilità di verificare attivamente quale tipologia di discriminazione è applicata sulla loro connessione. A questo proposito, progetti specifici come il *Glasnot Project*¹⁵⁵ hanno cercato di fornire ai consumatori gli strumenti informatici necessari a verificare la connessione da parte dei propri Internet provider. Al contrario, per quanto riguarda la verifica dall'alto verso il basso, si richiede agli *Internet provider* di rendere disponibili ai consumatori le informazioni riguardanti le tecniche di

¹⁵⁴ Si confronti: Principali episodi di violazione della *strict net neutrality*.

¹⁵⁵ Progetto finanziato dal *Max Planck Institute For Software Systems* e attivo fino al 2002. L'obiettivo generale dell'Istituto era quello di fornire ai consumatori uno strumento gratuito per verificare l'implementazione di tecniche di *network management* nelle loro connessioni.

network management implementate nelle loro reti. Tuttavia, gli episodi di violazione del principio di neutralità ristretta della rete hanno chiaramente dimostrato come gli ISP difficilmente provvedono alla divulgazione chiara e volontaria di questi dati. A questo proposito, per rendere sufficientemente informati i consumatori e disciplinare gli strumenti e le modalità con cui rendere pubbliche le informazioni da parte degli *Internet provider*, l'Unione Europea ha ritenuto necessario emanare una normativa specifica.

L'articolo 4 del regolamento della comunità Europea del 25 novembre 2015 n. 2015/2120 infatti disciplina le *“misure di trasparenza per assicurare l'accesso a un'Internet aperta”*. Nello specifico, per quanto riguarda il tema della divulgazione delle tecniche di gestione del traffico utilizzate, il primo comma afferma che i contratti dei fornitori del servizio di accesso alla rete devono contenere almeno le seguenti informazioni:

- a) Devono informare adeguatamente i consumatori sul potenziale impatto derivante delle misure di gestione del traffico sulla qualità dei servizi di accesso a Internet, sulla loro vita privata e sulla protezione dei loro dati personali;
- b) Spiegare in modo chiaro e comprensibile le conseguenze pratiche che eventuali restrizioni del volume, della velocità o altri parametri relativi alla QoS possono avere sui servizi di accesso a Internet e soprattutto sulla fruizione di applicazioni, contenuti e servizi;
- c) Una spiegazione chiara e comprensibile delle conseguenze pratiche che i servizi alternativi offerti dagli Internet provider possono avere sulla qualità della connessione alla rete.

Risulta interessante osservare come la normativa europea sia fortemente incentrata, oltre che sulla tipologia di informazione da rendere pubblica da parte degli Internet provider, anche sull'accessibilità e la comprensibilità di tali informazioni da parte dei consumatori¹⁵⁶. Come evidenziato da Faulhaber infatti, (Faulhaber, 2010) nel contesto

¹⁵⁶ Lo stesso approccio era stato precedentemente adottato dalla *Federal Communications Commission* o (FCC) che il 21 dicembre 2010 ha approvato l'Open Internet Order. Al punto B delle Open Internet Rules infatti, è affrontato il tema della trasparenza degli ISP nel quale si dichiara: *“A person engaged in the provision of fixed broadband Internet access service, insofar such person is so engaged, shall...publicly disclose accurate information regarding the network management practices, performance and commercial terms...”*. Per ulteriori informazioni si confronti:

https://docs.fcc.gov/public/attachments/FCC-10-201A1_Rcd.pdf .

del dibattito sulla NN l'informazione divulgata da parte degli ISP per poter effettivamente portare i consumatori ad effettuare delle scelte informate sul servizio di connessione, deve essere facilmente accessibile e comprensibile al pubblico.

3.3 Articolo 5: Vigilanza e applicazione

L'articolo 5 del regolamento della comunità Europea del 25 novembre 2015 n. 2015/2120 determina gli organismi preposti al controllo delle direttive relative alla neutralità della rete stabilite dal Parlamento e dal Consiglio europei. In particolare, nel comma 1 si affida alle singole autorità nazionali di regolamentazione, in Italia rappresentata dall'AGCOM¹⁵⁷, il compito di monitorare e assicurare il rispetto degli articoli 3 e 4 del regolamento, adoperandosi per mantenere una costante disponibilità del servizio di accesso ad Internet a livelli qualitativi che siano al passo con il progredire tecnologico e in maniera non discriminatoria. Nello specifico, per garantire un livello di servizio idoneo, le autorità nazionali di regolamentazione possono stabilire le caratteristiche tecniche e i requisiti minimi di qualità del servizio dei servizi di connessione Internet.

Inoltre, per quanto riguarda i fornitori di comunicazioni elettroniche in generale, tra i quali è possibile includere gli *Internet provider*, nel comma 2 del regolamento si stabilisce l'obbligo di divulgazione alle autorità nazionali sia delle informazioni concernenti la gestione della capacità dell'infrastruttura di rete che dei livelli di traffico processati. Infine, periodicamente gli Internet provider devono specificare e motivare le misure di gestione del traffico eventualmente applicate. I termini e il livello di dettaglio di queste informazioni sono specificati dall'autorità nazionale di regolamentazione.

¹⁵⁷ Autorità per le garanzie nelle Comunicazioni istituita dalla legge 249 del 1997. All'Autorità è affidato il duplice compito di assicurare la corretta competizione degli operatori sul mercato e di tutelare i consumi di libertà fondamentali degli utenti. Per maggiori informazioni si consulti: <https://www.agcom.it/che-cos-e-l-autorita>

4 La rete 5G

4.1 Requisiti di *performance* e principali applicazioni della rete 5G

Con il termine 5G si identifica la quinta generazione dello standard di comunicazione globale mobile. Come analizzato da numerosi lavori, tra cui l'*Architecture Working Group* (5G PPP, 2016) e il METIS Project (Osseiran et al., 2014), in generale l'obiettivo della rete 5G è quello di garantire le caratteristiche tecniche e di *performance* richieste dalle seguenti tipologie di applicazioni:

- I. *Massive Broadband* (XMBB): per garantire la funzionalità di applicazioni che richiedono l'utilizzo di gigabyte di banda *on demand*;
- II. *Massive Machine-type communications* (mMTC): per permettere la connessione e la comunicazione di miliardi di macchine e sensori;
- III. *Critical Machine-type communications* (uMTC): per permettere la comunicazione umano-macchina e macchina-macchina ad estrema affidabilità e con latenza minima;
- IV. *Direct device to device communication* (D2D): per permettere la connessione diretta tra più dispositivi senza attraversare alcuna infrastruttura di rete;
- V. *Moving Networks* (MN): per garantire la possibilità di creare un "network in movimento" che consenta la comunicazione sia tra i nodi che appartengono al *network* principale (comunicazione interna) che tra i nodi e l'ambiente (comunicazione esterna).

Da un punto di vista concettuale risulta immediato comprendere come una tipologia di *network* creata appositamente per garantire la tipologia di servizi sopra descritti deve presentare delle marcate differenze sia in termini di *performance* che di infrastruttura rispetto alle reti di precedente generazione. È possibile affermare infatti, che la filosofia alla base della progettazione *network* sia radicalmente mutata tra la vecchia e la nuova generazione di rete. Se la tecnologia 4G è stata sviluppata con l'intento principale di soddisfare il bisogno del mercato di massa di poter utilizzare un servizio Internet ad alta velocità infatti, la rete 5G è stata progettata per offrire al mercato servizi professionali,

rivolgendosi dunque, oltre che al mercato BTC, anche a quello BTB. Tale cambio di paradigma economico, abilitato dall'evoluzione tecnologica della rete, rende possibile lo sviluppo e l'impiego di uno smisurato numero di nuove applicazioni, aprendo le porte a innovazioni radicali in numerosi settori industriali.

Volendo fornire solo una breve introduzione al tema, lasciando ai lettori interessati la lettura di studi più esaustivi (Lema & al., 2017) (Afif, Katsutoshi, Federico, & Patrick, 2014) (Peter, Colin, & Jean Pierre, 2019), si possono individuare due filoni principali di innovazione basati sull'introduzione della rete 5G. Il primo, in continuità con i servizi e le applicazioni offerte dalle reti delle precedenti generazioni, si focalizza sul miglioramento dell'esperienza d'uso (QoE) dell'utente finale, utilizzando una visione classica di progettazione umano-centrica. Il secondo invece, servendosi sia del miglioramento delle performance del *network* che dello sviluppo di tecnologie complementari, si pone come obiettivo l'incremento e il potenziamento dei metodi di interazione, comunicazione e controllo delle relazioni umano-macchina (U2M) e di quelle macchina-macchina (M2M).

Per quanto riguarda l'esperienza d'uso dell'utente, la rete 5G dovrà garantire una velocità di *download* compresa tra 1 e 10 Gbs e una latenza inferiore a 1ms (Agiwal, Roy, & Saxena, 2016). Grazie a queste caratteristiche il consumatore finale potrà utilizzare applicazioni che richiedono sia una grande capacità di banda che una latenza minima, come lo streaming video di alta qualità, giochi basati sulla realtà virtuale e chiamate in telepresenza grazie a *rendering* 3D ad alta definizione.

Inoltre, la struttura della rete sarà appositamente dimensionata per garantire una copertura del 100% secondo il principio "anything *anytime*" (Wen & Peiying, 2014) garantendo delle ottime performance anche in luoghi densamente frequentati come stadi, concerti e festival, o in mezzi di trasporto in rapido movimento. Infine, grazie al netto miglioramento delle capacità di download e alla riduzione della latenza della rete, si rende possibile lo sviluppo e l'utilizzo esteso di accessori che permettono esperienze di realtà aumentata e virtuale che vedono un'applicazione diretta sia nel mondo dell'intrattenimento che su quello del lavoro (Nee & al, 2012) (Stapleton, Hughes, Moshell, Micikevicius, & Altman, 2002).

L'aumento delle performance della rete, unito allo sviluppo di tecnologie complementari consentiranno lo sviluppo e la diffusione di nuovi servizi e dispositivi, la connessione di nuovi settori industriali e nuove forme di comunicazione e interazione macchina-persona e macchina-macchina. Se da un punto di vista storico Internet è nato come mero strumento di scambio di informazioni e contenuti tra utenti umani, l'avvento dell'IoT ha permesso lo sviluppo di un sistema di comunicazione e connessione condiviso con le macchine grazie alla comunicazione *user-to-machine* (U2M) e *machine-to-machine* (M2M) (Gubbi, 2013). L'ultima evoluzione di questo concetto, basata principalmente sulla tecnologia 5G, è lo sviluppo del "*Tactile Internet*" (Fettweis, 2014) grazie al quale l'utente avrà il controllo in tempo reale e a bassissima latenza sui vari dispositivi connessi, permettendo lo sviluppo di una nuova generazione di applicazioni IoT (Palattella et al., 2016).

Da un punto di vista economico le innovazioni fino ad ora discusse consentono la crescita e l'espansione dei settori "*verticali*" dell'industria tra i quali si possono ricordare: (i) il mercato delle *smart cities* con la costruzione di case ed edifici connessi e la gestione più efficiente dei sistemi di trasporto pubblico (ii) la salute digitale (M-health) e la telemedicina (iii) l'industria *automotive* per l'implementazione di veicoli cooperativi, lo scambio di informazioni tra veicoli e l'interazione tra i veicoli e l'ambiente esterno (iv) *smart grid* e infrastrutture intelligenti (v) intrattenimento con applicazioni basate sulla realtà virtuale, giochi cooperativi *online* e media interattivi.

4.1.1 Requisiti complementari della rete

Indipendentemente dal punto di vista del campo applicativo, per fare fronte alle esigenze della società del futuro la tecnologia 5G deve garantire due aspetti fondamentali: un elevato livello di sicurezza della rete e un netto miglioramento dell'efficienza energetica dell'intera infrastruttura.

Il tema di sicurezza della rete risulta di cruciale importanza se si pensa alle dimensioni e alla rilevanza dei settori verticali che sono interessati dallo sviluppo della tecnologia 5G.

Rimandando la discussione tecnica a studi specifici a riguardo (Zhang & Kunz) (3GPP Specifications per TSG/WG, s.d.), risulta chiaro come *smart grid*, infrastrutture, viabilità e *industry 4.0* siano settori di importanza strategica per la società e non possano essere esposti a rischio di attacchi esterni. Per fare fronte a questa minaccia per i sistemi 5G si è adottato l'approccio già utilizzato per la rete 4G denominato "built-in-security" (Schneider & Horn, 2015) integrando le caratteristiche di sicurezza direttamente nelle specifiche di sistema. Tuttavia, a causa della numerosità e della diversificazione delle applicazioni della nuova rete, non è più possibile utilizzare una soluzione di sicurezza unica come è avvenuto per la rete di precedente generazione, ma si dovranno sviluppare, partendo da una base comune, tecniche specifiche per garantire i livelli di sicurezza adeguati alle singole applicazioni.

Per quanto riguarda l'efficienza energetica, grazie alla flessibilità della tecnologia 5G, i gestori della rete hanno la possibilità di ottimizzare il numero di elementi fisici attivi nel network sia in base al numero di utenti attivi che alle varie fasce di orario. Questa caratteristica risulta determinante soprattutto negli ambienti urbani altamente popolati, dove applicazioni che richiedono un elevato utilizzo di banda, come lo streaming video, sono maggiormente diffuse e presentano allo stesso tempo picchi di richieste molto variabili nel tempo. Da un punto di vista storico i network classici presentavano un'efficienza relativamente bassa, basti pensare che le sole *base station*¹⁵⁸ della rete 4G LTE sono responsabili del 60-80% del consumo energetico dell'intera rete mobile (Antonio, Emilio, Strinati, & Antonio, 2014).

Per fare fronte all'esigenza di un network più performante dal punto di vista energetico, la rete 5G è stata progettata utilizzando una struttura di base composta da celle di piccole dimensioni caratterizzate da un ridotto costo di acquisto e un basso consumo energetico. La gestione dinamica di un numero elevato di queste celle in base ai picchi di domanda garantisce la minimizzazione degli sprechi energetici lasciando invariata la QoE dell'utente finale. Tra i principali progetti attivi in questo campo si possono

¹⁵⁸ Nelle comunicazioni radio, una base station è uno dei componenti base di un'infrastruttura di comunicazione wireless capace di emettere, ricevere e scambiare segnali.

ricordare Green-Touch (The green touch project, s.d.) e Green 5G Mobile Networks (5GrEEen) (Olsson, Cavdar, P. Frenger, Sabella, & Jantti, 2013).

4.1.2 Performance tecniche della rete 5G

Da un punto di vista quantitativo si possono considerare le performance tecniche della tecnologia 5G equivalenti a quelle fissate dai requisiti tecnici dalla ITU¹⁵⁹ nel corso delle sue varie pubblicazioni (Union, 2015). Nella tabella seguente sono state riassunte le principali caratteristiche tecniche della rete 5G confrontandole con le prestazioni offerte dalla rete di precedente generazione. Tramite questa comparazione si vuole sottolineare l'elevato grado di discontinuità dal punto di vista delle *performance* delle due tecnologie.

	4G	5G
Limite massimo di velocità trasmissione dati	DL: 1 Gbps UL: 0,05 Gbps	DL: 20 Gbps UL: 10 Gbps
Velocità trasmissione reale	10 Mbps	100 Mbps
Efficienza dello spettro utilizzato	DL: 15 bps/Hz UL: 6,75 bps/Hz	DL: 30 bps/Hz UL: 15 bps/Hz
Mobilità	350 km/h	500 km/h
Latenza	>10 ms	1ms
Densità di dispositivi	1000 dispositivi/ km^2	1 milione dispositivi/ km^2

Tabella 2: confronto performance rete 5G e 4G

Nella tabella precedente i dati devono essere intesi come:

¹⁵⁹ La ITU è l'agenzia delle Nazioni Unite specializzata in tecnologie di informazione e comunicazione.

Per limite massimo di velocità di trasmissione dei dati si intende la velocità massima raggiungibile in condizioni ideali per singolo utente o dispositivo [Gbps];

Per velocità di trasmissione reale si intende la velocità di trasmissione mediamente sperimentata da un singolo utilizzatore o dispositivo [Gbps];

Per efficienza dello spettro utilizzato si intende la media di dati trasmissibili per singola unità di spettro utilizzata [bit/s/Hz];

Per mobilità si intende la velocità massima a cui è possibile offrire una determinata QoS con un trasferimento continuo tra nodi radio che appartengono a diversi strati o tecnologie dell'infrastruttura (multy-layer e multy-RAT)¹⁶⁰ [km/h].

Per latenza si intende il tempo trascorso tra l'invio di un pacchetto dati da una sorgente al suo arrivo al destinatario [ms].

Per densità si intende il numero massimo di dispositivi che è possibile connettere in una determinata area [n° disp/km²]

Per velocità di trasmissione per area si intende la portata di traffico che è possibile offrire data una specifica area geografica [Mbit/s/m²]

4.2 Nuovi principi di progettazione

Data la marcata differenza sia in termini di performance che di KPI della tecnologia 5G, si è reso necessario rivedere sia dal punto di vista tecnico che tecnologico gran parte dell'infrastruttura di rete. In particolare, le differenze di progettazione più significative riguardano i vari sottosistemi di rete, le interfacce tra i vari componenti e il collegamento tra rete di nuova e vecchia generazione. A livello internazionale sono stati introdotti una serie di principi guida al fine di rendere il più possibile omogenei i nuovi principi di progettazione. Tra questi principi, il cui testo integrale è consultabile nelle ricorrenti pubblicazioni del progetto 3GPP (ETSI, 2018), i più rilevanti sono:

¹⁶⁰È la possibilità per un apparecchio telefonico di collegarsi con diversi tipi di rete come i network 3G, 4G ed LTE.

- I. Architettura *network* modulare: raggiunta grazie all'utilizzo di un insieme di elementi di rete elementari che permettono di utilizzare tecniche di *slicing* di rete efficienti e flessibili;
- II. Architettura *Service Based* (SBA): grazie alla possibilità di interazione delle singole *network function*;
- III. Indipendenza: minimizzazione della dipendenza tra l'*Acess Network* (AN) della rete e il *Core Network*;
- IV. Accesso simultaneo: garantire l'accesso simultaneo a servizi sia locali (*local*) che centralizzati (*centralized*) per supportare i servizi a bassa latenza e l'accesso alle reti di dati locali;
- V. *Data Analytics*: introduzione di funzioni di *data analytics* per garantire una maggior automazione della rete;
- VI. Separazione: separazione dell'*User Plane* (UP) e del *Control Plane* (CP), come già introdotto nelle reti di precedente generazione.

Questi nuovi principi di progettazione dovrebbero garantire alla tecnologia 5G di offrire le *performance* e la flessibilità di rete richieste dalle più svariate tipologie di applicazioni precedentemente analizzate, garantendo allo stesso tempo la possibilità di implementare tecniche fondamentali per lo sviluppo dei servizi 5G come il *Software-Defined Networking* (SDN), la *Network Function Virtualization* (NFV) e il *Multy Access Edge Computing* (MEC).

Nei prossimi paragrafi, dopo una breve presentazione dell'architettura della rete 5G, saranno introdotte le principali innovazioni sviluppate seguendo i nuovi principi di progettazione, partendo dall'infrastruttura di rete fino al *core network*.

4.3 Elementi principali hardware e software della rete 5G

Storicamente la progettazione delle reti si rivolgeva in maniera pressoché esclusiva ai consumatori finali cercando di sviluppare, generazione dopo generazione, infrastrutture sempre più performanti in termini di velocità e capacità di trasmissione dei dati. Da un punto di vista qualitativo è possibile descrivere la struttura dei *network* di vecchia

generazione come un insieme di nodi composti da una parte *hardware* e *software*, di proprietà del fornitore del servizio, operanti in un unico dispositivo fisico.

Come introdotto in precedenza, grazie all'incremento nelle prestazioni della rete 5G l'attenzione dei progettisti si è spostata dagli utenti finali a un nuovo settore economico composto da quelli che sono comunemente chiamati settori verticali. In questa prospettiva la rete 5G dovrà essere progettata considerando un gruppo eterogeneo di utilizzatori composto, ad esempio, da semplici utenti finali, dalle industrie *automotive*, dell'energia, dell'*health care*, dell' *industry 4.0.*, delle smart grid, etc. Chiaramente una tale varietà di utenti finali richiede, dal punto di vista infrastrutturale, un'elevata agilità e flessibilità (Detti, 2018), la velocizzazione della consegna del servizio e l'integrazione di tecniche di *massive computing* e di infrastrutture di *storage*, caratteristiche esclusive, fino a poco tempo fa, del mondo della progettazione *software*. Nei paragrafi seguenti saranno discusse le caratteristiche principali della rete 5G ponendo particolare attenzione sulle tecnologie che renderanno possibile la completa implementazione delle sue potenzialità e sottolineando i principali punti di discontinuità tecnici e concettuali con i *network* di precedente generazione.

4.3.1 Panoramica dell'architettura e dei principali *layer* della rete 5G

Come le reti di precedente generazione, anche l'architettura 5G è composta da una serie di diversi *layer* con compiti, funzionalità e tecnologie estremamente differenti tra loro. L'implementazione congiunta di queste tecnologie consente, in estrema sintesi, il corretto funzionamento della rete, rendendo possibile il trasferimento di pacchetti di dati tra i diversi utilizzatori del *network*.

Da un punto di vista strutturale si può affermare che l'architettura generica della rete non presenta un elevato grado discontinuità con le reti LTE delle precedenti generazioni. La maggior parte dell'innovazione infatti, come sarà approfonditamente analizzato in seguito, è riconducibile alle nuove forme di interazione e forme di utilizzo dei componenti che ha modificato profondamente il rapporto esistente tra tecnologie appartenenti sia a domini differenti che a diversi livelli dell'infrastruttura di rete. Nel

caso della rete 5G i *layer* individuati dal progetto 5GPPP (5GPPP, 2019) sono cinque e sono denominati: *business service layer*, *business function layer*, *multi-service control layer*, *network function layer* e *infrastructure layer*. Di seguito è fornita una breve analisi dell'architettura di rete, presentando i diversi livelli in accordo alla vicinanza fisica con il consumatore finale.

Al primo livello si trova il *business service layer* dove sono implementate le diverse applicazioni rivolte alle industrie verticali e ai servizi di *mobile broadband*. Data l'eterogeneità dei servizi offerti, ogni applicazione dovrà rispettare caratteristiche di *performance* differenti in termini di latenza, sicurezza, consumo di energia e, in generale, di KPI specifici. Si può affermare quindi che il *business service layer* stabilisce i requisiti di *Quality of Service (QoS)* specifici di ogni applicazione che devono essere rispettati dai *layer* sottostanti.

Il *business function layer* contiene le funzioni dedicate alle applicazioni del *business service layer*. Queste funzioni vengono salvate e organizzate in appositi sistemi di *storage* denominati *function repository*. In generale, è possibile dividere le diverse funzioni in due macro-categorie: un insieme composto da funzioni di carattere generale, condiviso quindi da tutte le applicazioni dello strato precedente (come il *logging*) e una serie di altre funzioni raggruppate e organizzate in relazione ai requisiti specifici richiesti dalla tipologia di applicazioni a cui sono rivolte. Si faccia attenzione che le varie funzioni mantengono una natura neutrale rispetto alla specificità del servizio offerto a livello di *business service layer*. A questo proposito, in gergo tecnico si è soliti parlare di definizione astratta delle funzioni. Grazie a questa caratteristica è possibile offrire a clienti differenti servizi su misura, appositamente ottimizzati per le loro esigenze e basati sullo stesso gruppo di funzioni astratte a livello di *business function layer*. Infine, per ogni funzione sono definite delle regole specifiche che governano le fasi di *invoking*, *operating* e *resaluts* e sono stabiliti i vari gradi di utilizzo che garantiscono specifici livelli di QoS per il consumatore finale.

Il *multi-service control layer* ha la funzione di intermediare tra i livelli superiori, impiegati per la fornitura di applicazioni e funzioni ai business verticali (*vertical centric services*) e

i *layer* inferiori, dove si trovano le funzioni e l'infrastruttura fisica del *network (network-centric service)*. In generale, il compito principale di questo livello è quello di creare, gestire e controllare diversi *network* di comunicazione, operanti grazie ad un'infrastruttura sottostante standard e condivisa. In questo contesto di mediazione tra i diversi strati dell'architettura di rete, il *multi-service control layer* deve garantire che le specifiche di performance delle singole reti garantiscano i livelli di performance richiesti dai vari fornitori del servizio e delle applicazioni utilizzate. Il *multi-service control layer* può essere quindi definito come il coordinatore dei *layer* superiori e inferiori. Alla richiesta di un nuovo servizio di rete, infatti, viene istantaneamente eseguita una mappatura dei livelli inferiori ed è stabilito un set di funzionalità e risorse adeguato a garantire il livello di servizio richiesto dai *business layer* superiori. Più nello specifico, questa fase consiste nel determinare l'insieme di *business function* allocando le risorse di *function network* e quelle fisiche relative all'infrastruttura sottostante esistente più adeguate ad implementarle. Infine, il *multi-service control layer* è responsabile della gestione di tutto il ciclo di vita del servizio di rete richiesto.

Nel *network function layer* sono implementate due funzioni fondamentali per la tecnologia 5G: la *Software-Defined Networking* e la *Network Function Virtualization*. Come sarà analizzato più in dettaglio in seguito, grazie a queste funzionalità di astrazione è possibile offrire le funzionalità *network* della rete 5G come un servizio (Tarik, Adlen, & Riku, 2016). Implementato a questo livello di architettura si trovano inoltre le funzionalità di gestione ed *orchestration* necessarie per permettere alle risorse virtuali della rete di eseguire le *network function* richieste dai livelli superiori lungo il ciclo di vita del servizio di rete.

Il livello più basso dell'infrastruttura è composto dall'*infrastructure layer* che comprende la componente *hardware* della rete e un servizio *cloud* distribuito orizzontalmente che, partendo dalla periferia della rete, denominata *edge*, si sviluppa fino alla parte *core* del *network*. Scendendo nello specifico è possibile dividere l'*infrastructure layer* nelle seguenti componenti:

- I. Infrastruttura di comunicazione: in questa categoria si trovano tutte quelle componenti che permettono la trasmissione dei dati lungo la rete, abilitando l'utilizzo della connessione end-to-end degli utilizzatori. Analizzando più nello specifico i componenti è possibile partire dalla vasta ed eterogenea infrastruttura di accesso alla rete composta da: rete cellulare, rete fissa, satelliti, WIFI, etc. passando in seguito per le componenti del *backhaul* e del *fronthaul*, che possono essere basate sia su una tecnologia a cavo che *wireless*, interessando inoltre l'infrastruttura che consente la *metro aggregation* nelle aree metropolitane e terminando con la struttura di trasporto dei dati composta da fibra ottica ad alta capacità di trasmissione.
- II. Infrastruttura Cloud distribuita: l'infrastruttura *cloud* della rete 5G deve essere progettata con l'obiettivo della distribuzione delle risorse, al fine di ottimizzare il più possibile il flusso di informazioni di passaggio per la rete. In generale, l'infrastruttura *cloud* deve essere composta sia da centri di stoccaggio e salvataggio delle informazioni, che da centri adibiti alle funzioni di *computing*. In generale, più ci si allontana dal *core* della rete più i centri possono risultare meno performanti da un punto di vista di capacità computazionale a favore di una maggiore rapidità dei tempi di risposta, caratteristica fondamentale per i centri che si trovano nella parte *edge* della rete, al fine di soddisfare le richieste di servizi e applicazioni che richiedono una bassa latenza. In questo caso si parla di *Mobile edge computing* che come sarà analizzato in seguito svolgerà un ruolo fondamentale per quanto riguarda l'implementazione di servizi e applicazioni a bassissima latenza.
- III. Apparecchi e attrezzature collegati alla rete: questa categoria comprende l'intera famiglia dei dispositivi *smart* utilizzati dagli utenti della rete, tutta la componentistica utilizzata per il mondo dell'IoT come: sensori, attuatori, telecamere e sistemi di controllo e i dispositivi autonomi legati all'universo delle industrie verticali come robot, veicoli a guida autonoma e droni. Chiaramente uno degli aspetti più complicati dell'utilizzo della rete 5G sarà rappresentato

dalla necessità di integrare una varietà di dispositivi e servizi differenti con un'infrastruttura fisica e *software* appartenente a provider diversi.

4.3.2 Interazione dei diversi *layer* e funzionamento base della rete

Per analizzare nello specifico l'interazione tra i principali livelli della rete 5G è possibile partire dal *business service layer*, incaricato, come visto in precedenza, di offrire applicazioni e servizi BTB e BTC agli utilizzatori finali. Alla richiesta del mercato di un determinato servizio, gli operatori di primo livello dovranno richiedere ai fornitori della parte hardware dell'infrastruttura della rete, che compongono i *layer* sottostanti dell'ecosistema, di offrire le componenti necessarie per soddisfare i servizi richiesti. In generale, si potranno verificare due situazioni distinte sul mercato: in caso di integrazione verticale, molto comune nel mercato attuale, i fornitori di servizi offriranno anche il servizio di telecomunicazione e di consegna "*last-mile*" dei dati al consumatore finale, oppure, in una visione più frammentata, un fornitore di servizi potrà servirsi di uno o più *telecommunication provider*.

Come introdotto in precedenza, al fine di garantire un'ampia indipendenza e flessibilità delle applicazioni offerte al mercato, i fornitori di servizi potranno scomporre le varie tipologie di servizio in sotto-funzioni; queste componenti sono quindi raccolte in specifiche *repository* e possono essere allocate in maniera dinamica per creare nuovi servizi o supportare applicazioni che richiedono KPI specifici. Si noti che questa possibilità rappresenta un grande livello di discontinuità con la rete del passato, permettendo un elevato grado di flessibilità tecnologica per i livelli superiori del *network*.

Volendo operare in un ecosistema così dinamico e flessibile, risulta chiaro come per i fornitori di servizi sia di vitale importanza sviluppare una funzione di gestione e controllo delle risorse, che nel mondo del 5G prende il nome di *orchestrator function*. Questa funzione ha il delicato compito di richiedere e allocare nel tempo l'esatto numero di risorse dei *layer* sottostanti, al fine di garantire il raggiungimento dei KPI specifici delle funzioni implementate e offerte nel mercato. Chiaramente l'ottimizzazione del numero

delle risorse garantisce sia un risparmio economico per il fornitore del servizio, sia il raggiungimento di un'adeguata QoS per il consumatore finale, elemento di cruciale importanza per molte applicazioni dei settori verticali. Infine, in base alle caratteristiche del servizio offerto, l'*orchestrator layer* dovrà identificare i *logical network* del layer sottostante più adeguati a supportare le funzioni del *business function layer* superiore.

A differenza delle reti delle precedenti generazioni, le innovazioni introdotte con la rete 5G permettono ai fornitori di servizi di utilizzare contemporaneamente l'infrastruttura di diversi operatori del *function layer*. Questa possibilità risulta di fondamentale importanza nel caso in cui un singolo fornitore dell'infrastruttura non sia in grado di soddisfare i requisiti specifici (come latenza, capacità computazionale, data *throughput*, etc.) delle funzioni richieste dal mercato. Grazie a questa innovazione è quindi possibile implementare tecniche di *cross-domain orchestration* delle risorse e servirsi di *logical network*, chiamati anche *network slices* nel gergo 5G, per raggiungere un elevato grado di condivisione delle risorse.

Nello specifico per *network slices* si intende un insieme di funzioni network e di computazione che garantiscono il raggiungimento di un determinato livello di KPI del servizio. Nella visione del progetto 5G PPP (5G PPP, 2016), diversi network virtuali potranno essere implementati contemporaneamente in differenti *slices* della rete, che saranno basate sulla medesima componente *hardware* sottostante. Questo permette, come sarà analizzato più dettagliatamente in seguito, di avere un'elevata standardizzazione degli elementi fisici, con degli evidenti vantaggi sia dal punto di vista economico che di flessibilità dell'infrastruttura. In questo modo è possibile estendere il medesimo concetto di flessibilità delle risorse già discusso per il *business service layer* anche al *network function layer*.

Questa possibilità rappresenta, anche dal punto di vista concettuale, un elevato grado di discontinuità con la rete del passato, è infatti possibile affermare che si sia mutato il paradigma utilizzato fino ad oggi passando da un "*network di entità*" a un "*network di funzioni (virtuali)*" (5G PPP, 2016). Questa innovazione conduce principalmente a due vantaggi: la possibilità di eliminare le entità rigide e monolitiche dei network precedenti

in favore dello sviluppo di una serie di nuove funzioni programmabili e dinamiche, e alla creazione di un'infrastruttura di base in grado di favorire l'integrazione futura di nuove tecnologie. Nel primo caso infatti, sarà possibile creare nuove funzioni network sfruttando un approccio "*on-demand*" e "*on the fly*" *market driven*, utilizzando un set di funzioni elementari come elementi base per lo sviluppo di funzioni via via più complesse. Infine, l'elevato grado di softwarizzazione e di apertura del sistema pone le basi sia per una più semplice integrazione con le reti già utilizzate sul mercato che per lo sviluppo e l'integrazione delle tecnologie del futuro.

Da un punto di vista infrastrutturale è necessario implementare un'infrastruttura *cloud* e di *computing* adeguata a sostenere i servizi dei diversi *layer* fino ad ora descritti, sviluppando una struttura di supporto estesa e specificatamente ingegnerizzata per rispondere alle diverse necessità dei *layer* della rete. Per il trasporto delle informazioni tra i diversi domini della rete è necessario sviluppare differenti tipologie di *backhaul* utilizzando tecnologie ottiche e anche wireless, come i satelliti. Inoltre, in un'ottica locale è essenziale permettere tecniche di *self-backhauling* permettendo ai dispositivi degli utenti di funzionare come nodi integranti della rete. Infine, la tecnologia 5G deve permettere il collegamento attivo di rete fissa e mobile consentendo agli operatori di sfruttare la stessa infrastruttura di base per raggiungere il maggior numero possibile di consumatori finali.

Dal punto di vista di accesso alla rete, il 5G deve garantire un servizio di multi-connectivity dei dispositivi, abilitando la connessione contemporanea di un dispositivo con diversi nodi della rete operanti con RAT differenti. In aggiunta, come sarà analizzato più in dettaglio nei paragrafi successivi, per raggiungere un livello adeguato di performance è necessario implementare sistemi di comunicazione *network-controlled device-to-device* (D2D) e di estensione virtuale della rete grazie a meccanismi di *device duality*.

4.4 Tecnologie abilitanti e frequenze della rete 5G

Nel capitolo precedente è stato introdotto il funzionamento di base della rete 5G, sottolineando i vari rapporti esistenti tra i diversi *layer* dell'infrastruttura ed evidenziando le discontinuità di maggior rilievo con le reti del passato. In questa sezione invece, si andranno ad analizzare nel dettaglio le tecnologie chiave che permettono lo sviluppo del nuovo *network*. In particolare, il capitolo si apre introducendo le nuove frequenze che saranno utilizzate per la trasmissione dei dati, presentando le iniziative di maggior rilievo che sono state intraprese a livello europeo e italiano per l'introduzione e lo sviluppo della rete. Subito dopo è introdotta una degli aspetti più innovativi della nuova rete: le tecniche di *network slicing*. L'analisi prosegue con la discussione della nuova infrastruttura di accesso alla rete, presentando le nuove tipologie di celle utilizzate. L'analisi si conclude con la descrizione di una serie di tecnologie fondamentali per lo sviluppo della rete 5G, caratterizzate dallo sviluppo congiunto di sistemi hardware e software complementari tra loro come: MIMO, *beamforming*, *full duplex*, polarizzazione e comunicazione D2D.

4.4.1 Le nuove frequenze utilizzate nella rete 5G

Per garantire le *performance* di velocità, affidabilità e latenza della rete 5G si è reso necessario utilizzare un ampio spettro di banda superiore alle centinaia di MHz. Come è stato analizzato nei paragrafi precedenti infatti, è prevedibile che la rete 5G sarà chiamata a garantire connettività per un numero di dispositivi 100 volte superiore a quello attuale, permettendo velocità di *download* superiore ai 10 Gbps, un traffico di dati 1000 volte superiore a quello attuale e una latenza ridotta di più di cinque volte (Osseiran et al., 2014). Per riuscire a soddisfare tutte queste richieste l'intera infrastruttura di rete dovrà procedere lungo tre filoni principali di innovazione: l'utilizzo di un ampio blocco di spettri di emissione continui di onde millimetriche [mmW], l'aumento dell'efficienza dello spettro di emissione utilizzato e l'incremento della densità dell'infrastruttura *network* grazie all'impiego di celle di nuova generazione (Osseiran, Jose, & Marsch, 2016). Nel corso di questo paragrafo saranno discusse le

principali innovazioni per quanto riguarda lo spettro di radiazione utilizzato, destinando alle prossime sezioni l'analisi delle tecniche di aumento dell'efficienza e dell'infrastruttura *hardware*.

Senza dubbio, uno degli aspetti fondamentali che ha portato alla scelta di utilizzare le onde millimetriche, per quanto riguarda l'utilizzo nella rete 5G, è l'abbondanza di spettro che è possibile sfruttare al di sopra dei 30 GHz capace di soddisfare le caratteristiche specifiche richieste al 5G. Chiaramente da un punto di vista fisico esiste un preciso *trade-off* tra l'aumento della frequenza utilizzata e i costi e la complessità associati alla costituzione del *network*. Se un'elevata frequenza garantisce una dimensione di banda nettamente maggiore infatti, è anche vero che si verifica un aumento della complessità tecnologica della rete, della trasmissione del segnale e dei componenti dei dispositivi utilizzati, generando un costo maggiore per tutti i soggetti interessati.

Ad oggi l'interesse della rete 5G si è focalizzato su due spettri principali di frequenze: quelle inferiori ai 6GHz e quelle comprese tra i 6 e i 100 GHz, comprendendo quindi onde centimetriche e millimetriche. Si faccia attenzione che l'utilizzo di una banda superiore di spettro non andrà a liberare le frequenze già occupate dalle attuali reti che saranno adoperate in maniera integrata, cooperando attivamente per la fornitura di servizi con richieste di *performance* differenti. La rete 5G sarà infatti appositamente progettata per poter cooperare attivamente non solo con le reti attuali, ma anche con le future evoluzioni della tecnologia LTE, che potranno facilmente garantire i livelli di QoS richiesti da applicazioni particolari come il *Narrow Band Internet-of-Things* (NB-IoT) (Wang, et al., 2017).

Tra i problemi principali che caratterizzeranno l'adozione della nuova tecnologia due saranno condivisi a livello globale: l'armonizzazione dei canali tra i diversi stati e la liberazione delle frequenze attualmente occupate da altri servizi. La maggior parte delle bande che operano al di sotto dei 60 GHz, infatti, sono state globalmente assegnate ad applicazioni come radar, telecomunicazioni militari, comunicazioni via satellite, etc. Come esempio generale si può prendere l'Italia dove la banda relativa ai 700 MHz, che

è stata individuata come una delle possibili bande di transizione prima del completo sviluppo della tecnologia 5G, era stata affidata alla trasmissione del segnale televisivo del digitale terrestre

A livello globale, grazie alla decisione del World Radiocommunication Conference (WRC) del 2015 (World Radiocommunication Conference, 2015) si è stabilito di utilizzare principalmente lo spettro inferiore ai 6 GHz per la trasmissione dei dati legata ai servizi IMT e per le applicazioni *mobile broadband*. Tuttavia, lo sfruttamento di bande di frequenza più elevata è stato relegato a fasi di trial e sperimentazione e non si è riusciti a raggiungere un accordo condiviso sull'assegnazione delle altre frequenze.

A livello Europeo, invece, grazie alla consapevolezza dell'impatto potenzialmente dirompente e dei benefici sociali ed economici derivanti dall'utilizzo diffuso della nuova tecnologia, si è tentato di implementare una strategia unitaria guidata dalla Commissione Europea, con il fine di amministrare e facilitare l'adozione del nuovo standard *mobile*. Tra tutti i documenti pubblicati uno dei più rilevanti è senza dubbio quello firmato nel dicembre del 2017 presso il Transport, Telecommunication and Energy Council (Paolo, 2017) grazie al quale gli stati membri hanno raggiunto un accordo comune sulla *roadmap* da seguire per l'adozione della tecnologia e per l'armonizzazione dello spettro, elemento di fondamentale importanza per lo sviluppo di una rete europea. I passi fondamentali individuati dal lavoro del Consiglio sono:

- I. Fine 2019: armonizzazione tecnica delle bande da 3.4-3.8 e 24.25-27.5 GHz per consentire la liberazione delle bande d'interesse e l'introduzione coordinata del 5G in tutti gli Stati membri;
- II. Metà 2020: recepimento dell'*European Electronic Communications code* negli ordinamenti Nazionali;
- III. 2020: assegnazione delle bande da 700 MHz nella maggior parte degli Stati membri;
- IV. Fine 2020: abilitazione dei servizi 5G in almeno una delle città degli Stati membri.
- V. 2018-2025: costruzione e sviluppo dell'infrastruttura 5G;

- VI. 2025: raggiungimento della “*global society*” con l’implementazione del servizio 5G in tutte le maggiori città e le principali vie di comunicazione e trasporto.

4.4.1.1 Le frequenze in Italia

Per quanto riguarda la situazione Nazionale la procedura di assegnazione delle bande risulta particolarmente complessa essendo la frequenza da 3,4 a 3,8 Ghz occupato dalla Difesa, dai ponti radio e dai collegamenti satellitari fino al 2022, e quella dei 26-28 GHz parzialmente occupata, sempre fino al 2022, da Enel Open Fiber ed Eolo dopo la gara di assegnazione tenuta del 2016. Tuttavia, il processo di transizione e di liberazione delle frequenze è già iniziato, rispettando la tabella di marcia imposta dall’Unione Europea. In particolare, il Ministero dello Sviluppo Economico (MISE) ha già provveduto a dividere in blocchi di base le varie frequenze ottenendo: 5 blocchi per la banda 700 MHz FDD, 4 lotti per la banda 3.700 MHz e 5 lotti per la banda 26 GHz che sono state assegnate a diversi operatori tramite un’asta pubblica (Ministero dello sviluppo economico, 2018), i cui risultati sono riassunti di seguito:

Banda 700 MHz FDD

700 MHz blocco riservato 10 MHz aggiudicato a Iliad

700 MHz blocco generico 5 MHz aggiudicato a TIM

700 MHz blocco generico 5 MHz aggiudicato a TIM

700 MHz blocco generico 5 MHz aggiudicato a Vodafone

700 MHz blocco generico 5 MHz aggiudicato a Vodafone

Banda 3.700 MHz

3.700 MHz blocco specifico 80 MHz aggiudicato a Vodafone

3.700 MHz blocco generico 80 MHz aggiudicato a TIM

3.700 MHz blocco generico 20 MHz aggiudicato a Wind Tre

3.700 MHz blocco generico 20 MHz aggiudicato a Iliad

Banda 26 GHz

26 GHz blocco generico aggiudicato a Iliad

26 GHz blocco generico aggiudicato a Vodafone

26 GHz blocco generico aggiudicato a Fastweb

26 GHz blocco generico aggiudicato a Wind Tre

26 GHz blocco generico aggiudicato a TIM

Infine, in Italia il Ministero dello sviluppo economico ha individuato 5 differenti città per la sperimentazione e l'implementazione dei primi servizi 5G comprendenti: Milano, Bari, Matera, Prato e L'Aquila (Ministero dello sviluppo economico, 2017). In particolare, la sperimentazione nel Capoluogo Lombardo affidata a Vodafone S.p.a. è partita alla fine del 2017 ed ha coinvolto 2 diversi centri di ricerca, 25 aziende e 10 *endorser* (Vodafone , 2017).

4.4.2 Network slicing nella rete 5G

Seguendo la definizione del 5GPPP *Architecture Working Group* (5GPPP, The European 5G Annual Journal , 2019) con *network slice* si intende un insieme di differenti *network functions*, *network applications* e componenti dell'infrastruttura¹⁶¹ appositamente raggruppati per offrire sul mercato un servizio di rete adatto a soddisfare i requisiti¹⁶² richiesti da specifiche applicazioni e *use case*. È importante sottolineare come il concetto di *network slice* si estende lungo tutta l'infrastruttura di rete, partendo dal *mobile edge*, interessando sia il *backhaul* che il *fronthaul* e raggiungendo il core network della rete.

¹⁶¹ Con infrastruttura si intende non solo la componente fisica che compone RAN, backhaul, fronthaul e core network della rete ma anche l'insieme delle risorse virtuali ed emulate utilizzate (VNF).

¹⁶² Per requisiti si intende l'insieme delle caratteristiche di performance specifiche richieste dalle macro-categorie di applicazioni che si intendono sviluppare con la rete 5G come: il *Massive Broadband* (XMBB), il *Massive Machine-type communications* (mMTC), il *Critical Machine-type communications* (uMTC), il *Direct device to device communication* (D2D) e i *Moving Networks* (MN). Risulta chiaro come queste differenti applicazioni richiedano prestazioni differenti in termini di latenza, affidabilità, resilienza e larghezza di banda.

In estrema sintesi questa tecnologia permette agli operatori di offrire un servizio di rete *as-a-service* adattando la loro offerta in maniera dinamica e istantanea alle esigenze del mercato.

Per comprendere approfonditamente il grado di discontinuità tecnologica e progettuale raggiunto con l'utilizzo dello *slicing* si deve analizzare brevemente l'architettura classica utilizzata prima dell'avvento del 5G. Le reti delle precedenti generazioni infatti, sono state sviluppate seguendo uno schema infrastrutturale molto più rigido rispetto a quello attuale. A causa dell'architettura monolitica dei sistemi *legacy*¹⁶³ infatti, ancora oggi servizi di telecomunicazione diversi devono essere offerti al mercato utilizzando il medesimo numero e la medesima struttura delle risorse di rete, indipendentemente dalle caratteristiche di performance specifiche richieste dall'applicazione. Da un punto di vista visivo è possibile immaginare questa tipologia di rete come un monolite, in cui tutti i servizi offerti sul mercato sono frutto di un unico grande insieme che raccoglie la totalità dei *logical network* e dei componenti *hardware* dell'infrastruttura. A titolo di esempio è possibile ricordare che nella rete 4G servizi molto differenti tra loro come SMS e MBB devono essere implementati utilizzando il medesimo gruppo di risorse, nonostante i requisiti richiesti dalle due applicazioni siano radicalmente differenti tra loro. In generale quindi, risulta chiaro come l'impossibilità di allocare le risorse in modo differente ai diversi servizi conduce ad un basso livello di efficienza generale della rete, producendo un alto costo per i fornitori del servizio e un basso livello di QoE dell'utilizzatore finale.

La tecnica del *network slicing* è stata introdotta per ridurre gli effetti negativi derivanti dalla rigidità dell'infrastruttura di rete, permettendo un alto livello di efficienza e di flessibilità ai diversi operatori. Grazie a questa tecnica è possibile infatti creare *logical network* dedicati ad applicazioni specifiche dei *service provider* modificando l'architettura della rete in funzione del livello di performance richiesto. Questo grado di flessibilità è reso possibile grazie alla divisione tra il livello infrastrutturale della rete e

¹⁶³ Nelle telecomunicazioni per sistema *legacy* si intende un sistema o un'applicazione di vecchia generazione che continua ad essere utilizzata nonostante ne esista una versione più aggiornata e performante.

quello funzionale che consente ai fornitori dell'infrastruttura di ampliare, ridurre e riassegnare le risorse assegnate a un *logical network* in maniera istantanea. Volendo paragonare la rete 5G con quelle *legacy* è possibile immaginarla come una piramide rovesciata. Nella punta si trova infatti una base comune di componenti hardware, che viene sfruttata come infrastruttura comune per l'implementazione di un elevato numero di *logical network* del livello superiore. Ogni *logical network* è isolato dagli altri e presenta caratteristiche di performance differenti, appositamente scelte per implementare il servizio di telecomunicazione a cui sono rivolti.

Per riassumere, è possibile descrivere il classico ciclo di vita delle *network slice* nella seguente maniera. Dato un portafoglio di servizi di telecomunicazione offerti nel mercato dai service provider (caratterizzati da KPI specifici), i fornitori dell'infrastruttura raccolgono un insieme di *network functions*, *network applications* e componenti *hardware* per soddisfare queste richieste. In questo modo vengono create delle *network slice* specifiche, appositamente ingegnerizzate per il servizio offerto sul mercato come: *health network mMtc slice*, *URLLC network slice*, *URLLC smart grid slice*, etc.. Le *network slice* sono implementate grazie a un livello infrastrutturale sottostante, composto da una serie di componenti hardware standard¹⁶⁴. Chiaramente i logical network creati possono essere modificati nel tempo, in relazione alla richiesta puntuale del mercato. In conclusione, grazie all'introduzione delle *network slice* è possibile evitare il fenomeno del *multiplexing*¹⁶⁵ limitandolo solamente al livello dell'infrastruttura e non più alla totalità della rete permettendo una maggiore QoE per l'utente finale del servizio.

4.4.3 L'infrastruttura radio della rete 5G

Da un punto di vista tecnico l'adozione della tecnologia 5G richiede la costituzione di un'innovativa infrastruttura radio denominata 5G *New Radio* (NR), appositamente

¹⁶⁴ Queste componenti hardware sono comunemente chiamate COTS (Commercial Off-The-Shelf servers) per sottolineare il livello di standardizzazione della tecnologia.

¹⁶⁵ Il multiplexing è un metodo che permette di combinare due o più segnali (analogici o digitali) in un unico consentendo di trasmetterli attraverso la condivisione di un'unica risorsa o infrastruttura. Il multiplexing divide infatti la capacità del canale di comunicazione in diversi sottocanali, uno per ogni pacchetto di segnali che deve essere trasmesso.

progettata per supportare il trasferimento dei dati con i livelli di performance descritti nei paragrafi precedenti. Inoltre, l'infrastruttura di rete dovrà garantire le caratteristiche di flessibilità e affidabilità necessarie a soddisfare la grande varietà di applicazioni sviluppabili grazie agli attributi innovativi del 5G.

Come precedentemente introdotto, tali applicazioni si serviranno sia di bande "low", con frequenze inferiori a 6GHz, che di bande "high", con frequenze che superano i 6Ghz. Per garantire uno spettro di banda così ampio, esaminando la parte *hardware* dell'infrastruttura, si prevede l'utilizzo di celle di varie dimensioni, l'uso intensivo di tecnologie wireless come il Wi-Fi e una buona integrazione con la tecnologia di rete della generazione passata, come il 4G e il 3G. Infine, per alcune applicazioni specifiche in aree urbane o al coperto, la tecnologia 5G si baserà sull'utilizzo di reti Ultra-Dense (UD) (Ge, Tu, Mao, Wang, & Han, 2016) grazie all'impiego simultaneo di micro e macro-celle.

Formalmente i requisiti di progettazione generici dell'infrastruttura di rete sono consultabili nelle varie pubblicazioni del 5GPPP (Group 5. A., 2017), tra cui le più rilevanti sono:

- I. Funzionamento su uno spettro molto ampio di banda, da bassa a molto alta: 0,4 - 100 Ghz, comprendendo inoltre il funzionamento autonomo in bande senza licenza (*outband*);
- II. *Component-carrier*¹⁶⁶ con una larghezza di banda che può raggiungere i 400 MHz (fino a 100 MHz in <6 GHz; fino a 400 MHz in > 6 GHz) utilizzando fino a 16 differenti Component-Carrier;
- III. Nuova codifica dei canali ("LDPC" per il canale dati, codifica "Polar" per il canale di controllo);
- IV. Supporto tecnico per garantire servizi a bassa latenza (*Shortened Transmission Time Interval* o TTI);

¹⁶⁶ Con *Component-Carrier* si intende una tecnica che combina più *carrier* singoli che utilizzano larghezze di banda differenti dello spettro di segnale assegnato, consentendo di aumentare la larghezza di banda utilizzabile e aumentando di conseguenza la velocità complessiva di trasmissione della rete.

- V. Supporto tecnico per garantire connessioni ultra-affidabili (*Multiple Diversity Mechanisms*);
- VI. Architettura RAN flessibile e modulare;
- VII. Supporto per dispositivi che si collegano in maniera diretta, senza rete (D2D¹⁶⁷, V2x¹⁶⁸).

Da un punto di vista temporale la rete 5G sfrutterà in un primo tempo l'infrastruttura della rete esistente per poi sviluppare un'infrastruttura parallela indipendente. A tale proposito l'Unione Europea ha programmato di raggiungere la copertura completa delle aree urbane entro la fine del 2025 (European Commission - Policies, s.d.).

Per raggiungere questo obiettivo si stanno sviluppando a livello globale una serie di nuove tecnologie radio in grado di permettere la comunicazione attraverso gli spettri di banda discussi nel capitolo precedente, incrementare la copertura e la stabilità della connessione e di diminuire la latenza.

Iniziando ad analizzare la parte hardware, il nuovo network richiederà l'utilizzo di una nuova famiglia di celle di dimensioni inferiori rispetto a quelle attualmente utilizzate, in grado di supportare e lavorare congiuntamente all'architettura di rete esistente. Proponendole in ordine di grandezza crescente le tre macro-categorie di nuova introduzione sono: femtocelle, picocelle e microcelle. L'appartenenza di una cella a una delle famiglie sopra descritte dipende principalmente dal numero di utenti che possono servire e all'area coperta in modo efficace¹⁶⁹. La tabella seguente compara schematicamente le performance principali offerte (Accenti, 2019):

¹⁶⁷ Per comunicazione Device-to-Device o D2D si intende la comunicazione diretta tra due utenti mobili che non utilizza né una Base Station né il *core network* della rete. La comunicazione generalmente può servirsi dello stesso spettro della rete cellulare come di spettri alternativi detti "senza licenza" che si trovano quindi fuori dalla banda (*outband*).

¹⁶⁸ Con Vehicle-to-everything (V2X) si intende la specifica tecnologia che consente ai veicoli di comunicare e interagire con tutti i soggetti umani e non che li circondano.

¹⁶⁹ Con efficace si intende la possibilità di permettere una connessione che rispetti i KPI specifici della rete 5G.

	Potenza di trasmissione	Area di copertura	Utenti	Rete di ritorno	Applicazione principale
Femtocelle	100 <i>milliwatt</i>	10-50 <i>m</i>	8-16	Cavo o fibra	Principalmente interne-private
Picocelle	250 <i>milliwatt</i>	100-250 <i>m</i>	32-64	Cavo o fibra	Principalmente interne-commerciali
Microcelle	2-5 <i>watt</i>	0,5-2,5 <i>Km</i>	200	Cavo, fibra o microonde	Esterne

Tabella 3: Confronto nuove celle di trasmissione

In generale queste celle, pur essendo di dimensioni ridotte, esplicano le stesse funzioni delle stazioni fisse convenzionali consentendo di gestire una grande quantità di dati sia in trasmissione che in ricezione.

Visivamente questa nuova tipologia di celle vedrà una diffusione capillare sul territorio. Data la scarsa capacità di trasmissione del segnale ad alta frequenza in ambienti urbani ricchi di ostacoli fisici, le celle più piccole dovranno essere disseminate per le città al fine di permettere una linea di connessione diretta con gli utenti collegati alla rete.

Si potrebbe affermare che alla base di questa decisione di ramificazione estrema della rete ci sia un cambio di paradigma della trasmissione dei dati. Se storicamente si era deciso di utilizzare grandi potenze per aumentare le distanze di trasmissione, oggi a causa della quantità di dati trasmessa e di utenti connessi, si è deciso di diminuire la potenza delle celle ma di aumentare notevolmente il numero di antenne in prossimità dell'utente finale.

4.4.4 Massive MIMO e beamforming

La tecnologia MIMO è stata inizialmente sviluppata con l'intenzione di migliorare le prestazioni generali dei router WIFI, al fine di permettere un aumento del numero dei potenziali collegamenti mantenendo inalterata la velocità e la stabilità di connessione. Ad oggi, con l'applicazione di questa tecnologia alla rete 5G e la conseguente evoluzione denominata *Massive MIMO*, è possibile connettere ad una singola cella un numero molto elevato di utilizzatori, evitando le problematiche di interferenza tra i segnali e di velocità di connessione che caratterizzavano le celle di precedente generazione.

Da un punto di vista fisico l'applicazione di questa tecnologia si concretizza nell'utilizzo di centinaia di antenne di piccole dimensioni installate fianco a fianco in una singola cella, in questo modo è possibile creare una matrice di antenne a bassa potenza. Grazie all'elevato numero di antenne e all'utilizzo di tecniche di *beamforming* è possibile gestire in maniera più efficiente la rete focalizzando le emissioni delle antenne verso zone particolari. Con *beamforming*, infatti, si intende la capacità di concentrare e direzionare il segnale radio verso una specifica direzione, intervenendo opportunamente sui parametri delle onde elettromagnetiche come ampiezza, angolazione e fase (S, M, & I, 2014). Da un punto di vista pratico la tecnica del *beamforming* si serve di un algoritmo appositamente sviluppato per triangolare gli utenti connessi a una cella. Grazie all'individuazione della posizione esatta di un dispositivo è quindi possibile individuare il percorso ottimale per la trasmissione dei pacchetti di dati tra una cella e un utente, tenendo in considerazione gli ostacoli naturali presenti sul percorso. È quindi possibile minimizzare le interferenze tra i segnali, massimizzando le possibilità che il segnale giunga a destinazione.

Anche dal punto di vista dell'efficienza energetica l'utilizzo congiunto di queste due tecniche presenta un notevole passo avanti rispetto alle celle di precedente generazione. Il sistema tradizionale infatti, si basava su un sistema di irraggiamento tridimensionale di ogni antenna, sfruttando l'emissione di un segnale a 360° intorno al punto di origine. Chiaramente questo approccio causava una dispersione notevole del segnale emesso, richiedendo, di conseguenza, una potenza superiore per il funzionamento delle celle, non essendo possibile indirizzare attivamente il segnale

lungo il percorso ideale fonte-ricevitore. Inoltre, le celle moderne adottate per la creazione del network presentano la possibilità di controllare la potenza utilizzata, in modo tale da poterla regolare nel tempo in funzione della domanda di connessione.

Per concludere, è possibile riassumere i vantaggi dell'utilizzo delle tecnologie di MIMO e *beamforming* in tre punti fondamentali:

- I. Aumento del volume di dati scambiati: chiaramente la tecnologia MIMO permette un aumento della quantità di dati scambiati tra una singola cella e gli utenti collegati, grazie alla possibilità di raggiungere frequenze di trasmissione più elevate rispetto alle celle di precedente generazione. grazie all'utilizzo del MU-MIMO le risorse di una singola cella sono suddivise in maniera equa per ogni utilizzatore. Sfruttando questa proprietà non è più necessario implementare un algoritmo di prioritizzazione dello scambio di informazioni tra *router* e dispositivi, permettendo agli utilizzatori di poter usufruire simultaneamente della stessa frequenza di trasmissione dei dati;
- II. Aumento della copertura: grazie alla tecnologia MIMO è possibile ottenere una connessione di rete omogenea in tutto il raggio di copertura di una cella. Inoltre, a differenza della rete attuale, l'utilizzatore potrà usufruire di una rete che offre le stesse prestazioni di scambio di dati in qualsiasi punto di copertura, con lievissime variazioni rispetto alla distanza della cella. Inoltre, grazie all'utilizzo della tecnologia della *beamforming* è possibile seguire un utilizzatore che si trova in rapido movimento offrendoli una connessione estremamente stabile che adatta le sue caratteristiche in base alle variazioni di posizione dell'utente;
- III. Aumento del numero di dispositivi connessi: sfruttando la tecnologia MIMO è possibile aumentare il numero di dispositivi collegati ad una singola cella. Questa caratteristica, oltre ad aumentare le performance in termini di volume di dati scambiato, permette la connessione di migliaia di dispositivi alla rete, aprendo le porte di fatto a tutte le applicazioni derivanti dall' IoT;
- IV. Miglioramento della QoE dell'utente finale: chiaramente i vantaggi tecnici discussi nei punti precedenti si riflettono in un miglioramento generale dell'esperienza d'uso dell'utilizzatore finale consentendo l'utilizzo stabile di app

che richiedono un elevato consumo di dati e permettendo una velocità di download e upload superiore rispetto alle reti di precedente generazione.

4.4.5 Full duplex e polarizzazione

Come per il caso del *massive* MIMO e del *beamforming*, anche le tecniche del duplex e di polarizzazione del segnale sono implementate congiuntamente. Queste due tecnologie permettono ad una cella o ad un dispositivo di trasmettere e ricevere contemporaneamente un segnale sulla stessa frequenza senza alcuna interruzione. Questo risultato, tutt'altro che banale sul piano tecnico, consente di evitare di assegnare a diversi utenti frequenze differenti o di dividere i tempi di attività tra trasmissione e ricezione dei segnali. Più approfonditamente, con questa tecnologia è come se si riuscisse a sdoppiare virtualmente il canale di trasmissione, evitando l'interferenza tra due onde elettromagnetiche che si incontrano nello stesso punto con la medesima frequenza nonostante la differenza di potenza dei due segnali sia notevole.

Questo risultato è stato raggiunto tramite una tecnica di polarizzazione delle onde elettromagnetiche grazie alla quale si è riuscito a modulare contemporaneamente sia il dominio temporale che spaziale della radiazione ottenendo un buon isolamento tra il segnale in entrata e in uscita (Zhang, Chai, Long, Vasilakos, & Hanzo, 2015). Chiaramente l'avanzamento tecnologico in questo campo pone le basi per lo sviluppo e la produzione dei primi *smartphone* e dispositivi dalle dimensioni ridotte che possano effettivamente operare sfruttando le caratteristiche delle frequenze millimetriche.

Volendo riassumere i vantaggi dell'impiego di questa tecnologia sicuramente si verifica una riduzione dei tempi di trasmissione del segnale tra la fonte e il dispositivo ricevente non essendo più necessario dividere i tempi di funzionamento di un'antenna in emissione e ricezione. Inoltre, si ha una notevole diminuzione dei fenomeni di interferenza tra diverse antenne poste fisicamente vicine tra loro e operanti sulle medesime frequenze con segnali a potenza differente. Infine, da un punto di vista economico è possibile utilizzare, a parità di performance, un singolo componente hardware che funga sia da trasmettitore che da ricevitore grazie all'utilizzo di un

software di controllo. Per ulteriori approfondimenti sul tema, si rimanda il lettore ai seguenti lavori specialistici (Zhongshan, Xiaomeng, Keping, Athanasios, & Hanzo, 2015) (Liempd, et al., 2015) (Le, Do, Bao, & An, 2016).

4.4.6 Comunicazione device to device (D2D)

Alcuni studi hanno evidenziato come il traffico internet tenderà ad aumentare dalle 100 alle 250 volte nel corso di questo decennio (Motorola, 2007) e (Ericsson, 2007). Si rende quindi necessario, oltre ad un aumento della capacità di trasmissione dei dati, una razionalizzazione del flusso di informazioni, al fine di indirizzare il traffico lungo il percorso più breve possibile e di utilizzare quindi il minor numero possibile di nodi dell'infrastruttura di rete. Con la progettazione della rete 5G si è cercato di risolvere questa problematica introducendo un nuovo sistema di comunicazione capace di far comunicare due dispositivi in maniera diretta.

L'idea di fondo della comunicazione D2D consiste infatti nella separazione del traffico locale da quello globale, non essendo necessario, data la vicinanza fisica dei due dispositivi posti in comunicazione, il passaggio delle informazioni attraverso il *backhaul* e il *core network* della rete. Tecnicamente per descrivere questa tecnica si è soliti parlare di *local traffic offloading* (Elgendi, Munasinghe, & Sharma, 2016) e di *Proximity Service* o ProSe. Da un punto di vista pratico, per implementare questa tecnica è necessario che ogni cella sia abilitata a riconoscere due dispositivi posti in comunicazione tra loro attraverso la medesima cella in modo tale da sganciarli dalla rete e permetterli di comunicare in maniera diretta. Chiaramente la cella dovrà comunque mantenere un determinato grado di controllo sulla comunicazione D2D dei due dispositivi, in modo tale da riconnettere il dispositivo alla rete non appena la comunicazione o la richiesta di dati fosse estesa ad un terzo dispositivo o server geograficamente distante dai primi due. Questa tipologia di comunicazione può essere inoltre utilizzata per la condivisione di dati in maniera locale tra diversi dispositivi, senza dover effettuare più richieste differenti a uno stesso server per il medesimo pacchetto di informazioni. Si faccia attenzione che in questo contesto si rende necessario implementare nella rete nuovi

schemi di *multy-connectivity* dove un singolo dispositivo deve poter comunicare contemporaneamente con due o più nodi dell'infrastruttura di rete tramite RAT potenzialmente differenti operanti su spettri di banda diversi.

Infine, grazie alla completa applicazione del principio di D2D è possibile implementare il concetto di *distributed network* (Giust, Luca, & Carlos, 2015) grazie al quale è possibile utilizzare i dispositivi wireless degli utenti come elemento attivo della rete in modo tale da poter farlo operare sia come nodo del *network* che come un classico dispositivo, estendendo di fatto l'infrastruttura di rete esistente.

Per concludere, risulta chiaro come l'impiego diffuso di questa tecnologia possa abilitare un numero smisurato di innovazioni e di nuove applicazioni. Nel seguente paragrafo si desidera presentare sinteticamente i principali vantaggi dell'utilizzo della comunicazione D2D che è possibile riassumere nei seguenti punti:

- I. Incremento capacità di trasmissione dati per area e per utente: la possibilità di scaricare il network principale dalle comunicazioni tra utenti vicini infatti, aumenta, a parità di infrastruttura, la capacità di trasmissione del *backhaul* e del core *network*, diminuendo la necessità di nuovi investimenti e mitigando i problemi legati al sovraccarico della rete. Inoltre, la tecnica del *distributed network* incrementa sia la velocità di scambio di dati tra gli utenti che l'efficienza complessiva della rete, relegando a connessioni *peer-to-peer* e *multilink* locali gran parte del traffico della rete. Questa applicazione risulta di vitale importanza per consentire uno sviluppo sostenibile dal punto di vista delle risorse di rete per tutta l'economia legata al mondo dell'IoT. Con la connessione di migliaia di dispositivi e sensori alla rete infatti, la soluzione di una comunicazione locale risulta l'unica possibilità percorribile per non sovraccaricare eccessivamente l'intero *network*. Infine, la comunicazione ProSe aumenta la sicurezza e l'affidabilità della connessione tra gli utenti. In particolare, questa tecnologia potrebbe trovare un'ottima applicazione negli scenari di calamità naturali dove una connessione di questa natura potrebbe garantire un grado di affidabilità e

- facilità di ripristino della rete di gran lunga superiore rispetto a quello delle reti di precedente generazione;
- II. Aumento copertura di rete: grazie all'implementazione del concetto di *distributed network* è possibile aumentare la copertura totale della rete utilizzando i dispositivi degli utenti come veri nodi della rete. Questa tecnica può trovare delle dirette applicazioni sia in ambientazioni interne che esterne e può essere sfruttata per garantire un livello costante di performance in una zona maggiorata;
 - III. Diminuzione latenza: grazie alla possibilità di poter sfruttare le comunicazioni locali *peer-to-peer* e la tecnologia del *distributed network* i tempi di latenza sperimentati dall'utente finale risultano profondamente diminuiti e più costanti nel tempo. Questo aumento della velocità è fisicamente possibile grazie alla vicinanza fisica degli utenti posti in comunicazione e alla possibilità di sganciarli momentaneamente dal network principale. Inoltre, anche le comunicazioni *standard* possono beneficiare di una diminuzione media della latenza dovuta principalmente al calo del carico di lavoro del *backhaul* e del *core network* della rete;
 - IV. Diminuzione dei costi ed efficienza energetica: come già introdotto in precedenza un flusso inferiore di informazioni passante per il *network* richiede un minor grado di investimento da parte dei *provider* che può riflettersi su un costo minore per l'utilizzatore finale del servizio. Inoltre, grazie alla riduzione del volume e della distanza dello scambio di informazioni tra i vari *user* si ricava una generale diminuzione del consumo energetico generale, soprattutto per quanto riguarda i veri dispositivi utilizzati;
 - V. Possibilità di innovazione: le nuove funzionalità introdotte dalla comunicazione D2D possono aprire le porte ad un numero attualmente inimmaginabile di nuovi servizi e applicazioni. Ad oggi le principali che possono essere individuate si basano principalmente sullo sfruttamento delle caratteristiche di comunicazione ProSe *peer to peer* e *multicast* caratterizzate da una bassissima latenza. In questo scenario è facile immaginare lo sviluppo di servizi mirati di pubblicità, sconto e

promozione, di cui potranno usufruire in particolar modo i piccoli negozi e i centri commerciali. In questo modo sarà quindi possibile effettuare attività di marketing indirizzata ai potenziali consumatori che si trovano in prossimità delle attività commerciali. Per quanto riguarda le *vertical industries* invece, tra le principali applicazioni che possono essere individuate è possibile mettere in luce la comunicazione veicolo-veicolo (VoV) grazie alla quale, i veicoli in viaggio avranno la possibilità di scambiarsi informazioni in tempo reale e a bassissima latenza. Pensando allo sviluppo della guida autonoma questa applicazione risulterebbe di grande interesse soprattutto per quanto riguarda il trasporto di merci su gomma. È possibile immaginare un futuro nel quale una colonna di automezzi sia guidata dal primo veicolo che, scambiando informazioni sulla sua guida e sugli elementi esterni è capace di governare tutti gli automezzi che lo seguono consentendo all'intera autocolonna di adattarsi in maniera automatica e sicura al suo comportamento. Inoltre, come diretta estensione di questa visione è possibile individuare la possibilità di interazione tra veicoli e dispositivi esterni distribuiti nell'ambiente circostante come telecamere e sensori di controllo. Tutte queste innovazioni chiaramente porteranno ad un aumento generale della sicurezza e dell'automazione del trasporto, a cui si accompagna un incremento dell'efficienza energetica e della gestione dei flussi di autoveicoli.

5 Fattori di incompatibilità tra la normativa della neutralità della rete e la tecnologia 5G

Dopo avere introdotto le principali caratteristiche della tecnologia 5G e aver discusso la normativa europea relativa al principio di *net neutrality* risulta interessante osservare come lo sviluppo tecnologico della rete presenti alcuni elementi in conflitto con il Regolamento introdotto dalla Comunità Europea. Da un punto di vista storico infatti, si può constatare come lo sviluppo tecnico della rete abbia seguito una strada indipendente rispetto allo sviluppo normativo, focalizzandosi in maniera rilevante sull'aumento delle *performance* della rete e sull'efficienza delle risorse utilizzate, dimostrando un certo grado di autonomia rispetto al complesso dibattito riguardante la neutralità della rete sviluppato negli ultimi anni.

In generale, è possibile dividere i punti di maggior divergenza in due macro-categorie distinte. La prima di carattere più generico, si concentra attorno alla normativa relativa all'offerta di servizi ottimizzati, incentrandosi sull'ambiguità relativa alle condizioni di fornitura introdotte dal terzo articolo. La seconda categoria invece, di carattere più tecnico, riguarda una serie di innovazioni tecnologiche introdotte dalla rete 5G, tra le quali si possono ricordare: la possibilità di offrire servizi differenziati e ottimizzati, l'utilizzo di tecniche di *network slice* e l'implementazione di *content delivery networks* per le reti mobili.

5.1 Il problema relativo alle condizioni di fornitura dei servizi ottimizzati

Durante l'analisi del Regolamento Europeo relativo alla problematica della neutralità della rete è stato evidenziato come tanto gli ISP quanto i *content provider* possono offrire al pubblico dei servizi ottimizzati per specifici livelli di QoS. Nel terzo comma del terzo articolo del Regolamento europeo 2015/2120 è stabilito infatti che: *“I fornitori di comunicazioni elettroniche al pubblico, compresi i fornitori di servizi di accesso a Internet, e i fornitori di contenuti, applicazioni e servizi sono liberi di offrire **servizi diversi dai servizi di accesso a Internet ottimizzati per specifici contenuti, applicazioni o servizi o loro combinazioni, nei casi in cui l'ottimizzazione sia necessaria per soddisfare i***

requisiti relativi a contenuti, applicazioni o servizi per un livello specifico di qualità. I fornitori di comunicazioni elettroniche al pubblico, compresi i fornitori di servizi di accesso a Internet, possono offrire o facilitare tali servizi solo se la capacità della rete è sufficiente a fornirli in aggiunta a tutti i servizi di accesso a Internet prestati.

Esaminando il precedente paragrafo alla luce delle caratteristiche della tecnologia 5G introdotte in precedenza, risulta immediato verificare come siano presenti alcuni elementi di ambiguità rispetto alla possibile interpretazione dei requisiti necessari per poter offrire i servizi ottimizzati ai consumatori. Da un punto di vista strettamente tecnico infatti, nel capitolo precedente è stato discusso come, per definizione, le risorse di rete utilizzate nel *network* 5G sono ottimizzate per offrire le risorse di rete specifiche richieste dall'*application layer* della rete attraverso delle procedure di *application programming interface* automatizzate. Come discusso nel lavoro di Frias *et al.* (Frias & Martínez, 2018) allora, risulta spontaneo interrogarsi attorno a tre questioni principali: in primo luogo infatti risulta necessario chiarire il significato di "*servizio di connessione*" utilizzato dai regolatori europei, successivamente è opportuno chiarire dal punto di vista operativo quando è possibile considerare una capacità di rete "sufficiente" e infine, è necessario determinare una serie di indicatori che stabiliscano l'oggettiva necessità di offrire un servizio ottimizzato.

Per quanto riguarda la prima e la seconda questione, leggendo il terzo articolo si può facilmente verificare come i regolatori europei considerino la fornitura di servizi ottimizzati come un servizio eccezionale, appartenente a mercati specifici subordinati alla fornitura del più comune servizio di connessione alla rete richiesto dai consumatori. Tuttavia, come discusso da Frias (Frias & Martínez, 2018) nel suo lavoro, lo stesso concetto di servizio di connessione alla rete può essere considerato da punti di vista considerevolmente differenti tra loro. Nel quarto punto del preambolo al Regolamento, ad esempio, è possibile individuare una prima definizione ufficiale del servizio di accesso alla rete, descritto come: "*un servizio che fornisce accesso a Internet e, in linea di principio, a tutti i suoi punti finali, a prescindere dalla tecnologia di rete e dalle apparecchiature terminali utilizzate dagli utenti finali*". Da un punto di vista formale risulta evidente come una tipologia di servizio che permetta il mero scambio di un

messaggio di *Ping* tra due nodi della rete sia molto differente dall'idea generale di utilizzo della connessione diffusa tra i consumatori e i produttori di contenuti, i quali, nella maggior parte dei casi, sono maggiormente interessati alla possibilità di consumare una certa varietà di contenuti e applicazioni. Dal punto di vista degli utilizzatori quindi, porre i servizi ottimizzati su un piano differente rispetto a quello di connessione può risultare approssimativo, in quanto alcuni consumatori potrebbero avere interesse a collegarsi alla rete solamente nel caso in cui siano possibilitati a consumare una determinata tipologia di servizio, contenuto o applicazione. Tuttavia, è innegabile come da un punto di vista tecnico, la definizione adottata dai regolatori dell'Unione presenti il grande vantaggio di essere chiaramente verificabile e misurabile da parte delle autorità competenti.

Ad ogni modo, ritenendo valida la definizione del Regolamento sopra riportata, e ipotizzando quindi che il servizio di accesso alla rete possa essere effettivamente limitato alla connessione dei diversi nodi della rete, persiste un certo grado di ambiguità riguardo sia al tema della verifica della "*sufficienza della capacità di rete*", e del concetto di "*necessità di ottimizzazione dei servizi*", requisiti necessari al fine di offrire dei servizi paralleli a quelli di connessione ottimizzati per determinati livelli di QoS. In particolare, né il Regolamento né il BEREC, attraverso le linee guida emanate, forniscono una definizione chiara ed esaustiva sulla questione, non definendo dei parametri chiari e oggettivi per la determinazione del raggiungimento di tali requisiti.

5.2 I fattori di incompatibilità tecnologica

Come è stato discusso nel corso del precedente capitolo, lo sviluppo della tecnologia 5G pone le sue fondamenta su un nutrito gruppo di tecnologie innovative, tra le quali si possono ricordare: le tecniche di *network slicing* e di *software virtualization*, l'impiego di *content delivery networks* per le reti mobili e l'utilizzo di spettri di emissione ad alta ed altissima frequenza per la trasmissione dei dati.

Da un punto di vista generale è immediato verificare come la flessibilità della rete introdotta grazie all'impiego di queste nuove tecnologie sia in forte contrasto con la più rigida normativa europea emanata a tutela del servizio di accesso a Internet.

Da un punto di vista generale infatti, l'architettura della rete 5G presuppone l'utilizzo massiccio delle cosiddette tecniche di *network slice*, implementate, come è stato discusso nel corso del precedente capitolo, per raggiungere un elevato livello di efficienza e di flessibilità delle risorse di rete. Grazie al considerevole utilizzo delle *network slice* e il conseguente raggruppamento di differenti *network functions* e *network applications*, gli operatori di rete potranno dunque offrire sul mercato un servizio di connessione adatto a soddisfare i requisiti richiesti da specifiche applicazioni e *use case*. Tuttavia, è necessario sottolineare come questo elevato grado di flessibilità sia reso possibile solo grazie alla divisione del livello infrastrutturale della rete da quello funzionale, fattore che permette ai fornitori dell'infrastruttura di ampliare, ridurre e riassegnare le risorse assegnate a un *logical network* in maniera pressoché istantanea. Da un punto di vista architetturale tuttavia, risulta evidente come ogni *logical network* sia isolato dagli altri, presentando caratteristiche di performance uniche, appositamente individuate per soddisfare il servizio di telecomunicazione a cui sono rivolti. Risulta immediato verificare dunque come, da un punto di vista generale, ogni *slice* creata rappresenti una forma di network distinta, indipendente dalle altre e caratterizzata da uno specifico livello di *performance*. L'elevato grado di frammentazione della rete derivante dall'implementazione delle *network slice* è chiaramente incompatibile con il principio di neutralità stabilito nel Regolamento 2015/2120, sia per quanto riguarda la discriminazione di differenti categorie di traffico sia per quanto riguarda la fornitura dei servizi ottimizzati. Utilizzando una visione d'insieme infatti è possibile affermare che, per definizione, l'intero servizio Internet trasmesso attraverso la rete 5G possa essere considerato come ottimizzato, in quanto sfrutta l'insieme di risorse, componenti e funzioni di rete ideale per soddisfare un determinato livello di QoS.

Procedendo nell'analisi, un ruolo di fondamentale importanza nello sviluppo della rete 5G sarà svolto dalla creazione di un servizio *cloud* distribuito, progettato con l'obiettivo di decentralizzare le risorse di *storage* impiegate e di ottimizzare il flusso di informazioni

trasmesso nella rete. In quest'ottica di miglioramento della trasmissione dei dati, saranno inoltre impiegati una serie di *virtual content delivery network*, grazie all'impiego di tecniche di *function virtualization* che permetteranno sia ai servizi *cloud* che ai *network* privati di connettersi direttamente con le *base station* della rete. Grazie a questa tecnologia sarà dunque possibile emulare nelle reti *wireless* la funzione dei *content delivery network* utilizzati nelle reti cablate. Sebbene l'utilizzo di questa architettura di distribuzione delle informazioni non sia mai stata ritenuta dannosa da parte dei sostenitori del principio di neutralità della rete, è evidente come tanto nelle reti fisse come in quelle *wireless* i contenuti che potranno essere salvati fisicamente più vicini agli utenti finali e trasmessi ai consumatori attraverso porzioni di *network* privati godranno di un trattamento privilegiato rispetto al restante traffico trasmesso nella rete, fattore manifestamente contrario ai principi del Regolamento europeo.

Infine, nel corso del precedente capitolo è stato esaminato come la rete 5G, al fine di soddisfare un vasto numero di casi d'uso differenti, richieda l'utilizzo di un ampio spettro di banda per la trasmissione del segnale, integrando alle nuove frequenze individuate anche quelle utilizzate dallo standard LTE delle precedenti generazioni. Da un punto di vista logico e di ottimizzazione delle risorse di rete dunque, è possibile trasmettere i vari pacchetti di informazioni utilizzando la frequenza più adatta alle esigenze tecniche del servizio a cui le informazioni sono associate. Tuttavia, risulta evidente come, da un punto di vista tecnico, i servizi trasmessi all'interno di una frequenza di banda inferiore sono tecnologicamente svantaggiati rispetto a quelli trasmessi a più alta frequenza, determinando, ancora una volta, una forma di discriminazione del traffico contraria ai principi del Regolamento europeo.

Conclusioni

Grazie alla rivoluzione digitale verificatasi negli ultimi anni, Internet ha assunto un ruolo sempre più centrale nella società moderna, trasformando profondamente la maggior parte dei canali e degli strumenti utilizzati per comunicare, acquistare, lavorare e divertirsi. Nell'ambito di questo cambiamento, lo sviluppo della tecnologia 5G porterà inevitabilmente ad un'accelerazione dell'evoluzione della maggior parte dei modelli di *business* relativi alla fornitura dei servizi e dei contenuti in rete, determinando un'autentica rivoluzione tecnologica che, partendo dal settore delle telecomunicazioni, si estenderà alla maggior parte dei settori industriali, incentivando in particolar modo lo sviluppo delle cosiddette industrie verticali. Dato il contesto di rapida evoluzione tecnologica e il crescente impatto della rete sulla società e l'economia moderna, in questo studio si è cercato di analizzare i risvolti sociali e tecnologici derivanti dall'imposizione *ex ante* di una normativa volta a tutelare il principio di neutralità della rete.

Inizialmente il lavoro si è concentrato sullo studio e la presentazione dei principali modelli economico-matematici relativi alla neutralità della rete. In particolare, dai vari articoli analizzati è emerso che l'implementazione di una forma ristretta di neutralità della rete, in cui tutti i pacchetti di informazione trasmessi sono processati attraverso un principio *best effort*, comporta una serie di effetti collaterali che, nel complesso, portano ad una diminuzione del livello di benessere generale della società. Il divieto di adottare qualsiasi forma di *network management* da parte dei fornitori del servizio di rete infatti, porta inevitabilmente ad un aumento dei fenomeni di congestione del *network*, ad un abbassamento della QoE media percepita dagli utilizzatori e alla necessità di effettuare un continuo sovradimensionamento dell'infrastruttura di rete. Dal punto di vista degli investimenti effettuati da parte dei *content provider* inoltre, dati i differenti requisiti di rete richiesti dai vari contenuti e applicazioni, è immediato verificare come una forma di neutralità ristretta della rete canalizza artificialmente l'evoluzione tecnologica lungo determinati filoni di ricerca, tecnicamente avvantaggiati rispetto ad altri.

Procedendo nell'analisi di questa tematica, ed estendendo la ricerca a forme più spinte di violazione del principio di neutralità della rete, come ad esempio l'introduzione di *termination fee* e di tecniche di *tiering* dei consumatori e dei fornitori, è stato verificato come, in accordo con i risultati precedenti, anche in questo caso sia preferibile un approccio di verifica *ex-post* affidata alle autorità regolatrici nazionali piuttosto che l'imposizione *ex-ante* di una normativa volta a tutelare il principio di neutralità della rete. In particolare, la maggior parte degli studi ha dimostrato come la neutralità della rete sia preferibile solamente nel caso in cui non sia tecnicamente possibile evitare alcune forme distorsive della concorrenza, come per esempio il fenomeno della "*dirty road*", che tuttavia può essere facilmente mitigata grazie ad una normativa *ad hoc*, meno restrittiva ed impattante rispetto a quella richiesta per stabilire il principio di neutralità.

In seguito, nel lavoro sono stati esaminati approfonditamente gli effetti della neutralità sulla scelta del livello di investimento nell'infrastruttura da parte degli *Internet provider*. A questo proposito è stato sviluppato un modello matematico in cui sono state comparate le scelte di investimento "ottime" effettuate dagli ISP in caso di applicazione del principio di neutralità e nel caso in cui nel mercato agli ISP sia permesso di richiedere dei contributi di *termination fee* per la trasmissione dei dati ai consumatori finali. Dai risultati del modello si è ricavato come la condizione di neutralità della rete deprime gli incentivi degli *Internet provider* ad investire nella rete, determinando, da un punto di vista generale, una minore performance della trasmissione dei dati.

Dopo aver analizzato lo stato attuale della rete, l'attenzione si è quindi gradualmente spostata sulle tecnologie future, che nei prossimi anni rivoluzioneranno radicalmente il mercato della telecomunicazione. In particolare, nel lavoro sono state esaminate le principali innovazioni introdotte dalla rete 5G, approfondendo le caratteristiche che ne determinano il maggior cambiamento rispetto alle reti di precedente generazione, sia dal punto di vista delle tecnologie utilizzate che rispetto ai cambiamenti dell'architettura di rete. Dal lavoro è emerso un certo grado di divergenza tra le innovazioni apportate dalla tecnologia 5G e la normativa europea relativa al principio di neutralità della rete. In particolare, è stato verificato come alcune delle principali innovazioni alla base della

tecnologia del 5G, come per esempio le *network slice*, i *virtual content delivery network* e le tecniche di *function virtualization*, siano in chiaro contrasto con il Regolamento europeo 2015/2120 richiedendo un intervento da parte del Legislatore per conciliare l'avanzamento tecnologico con l'attuale normativa a tutela dell'apertura della rete.

Appendice

Tabella riassuntiva delle pubblicazioni esaminate sul tema della neutralità della rete

<i>Autori pubblicazione</i>	<i>Tipologia di infrazione della NN</i>	<i>Struttura di mercato analizzata</i>	<i>Fenomeni di congestione</i>	<i>Principali risultati ottenuti</i>	<i>Incentivi Investimenti nell'infrastruttura di rete</i>
(Economides & Tåg, 2012)	Termination fee	Monopolio e duopolio di ISP No competizione tra CP	Non modellato	Miglioramento del benessere per la maggior parte dei parametri in NNN	Non modellato
(Musacchio, Schwartz, & Walrand, 2009)	Termination fee	Più ISP nel mercato ognuno detentore di un monopolio locale No competizione tra CP	Non modellato	Pericolo tragedia dei beni comuni. NNN porta a maggior benessere per alcuni parametri.	Maggiore in condizione di NNN
(Njoroge, Ozdaglar, Moses, & Weintraub, 2010)	Termination fee	Duopolio di ISP nel mercato	Non modellato	Maggiore benessere in condizione di NNN. Crescita consumatori e profitti di ISP e CP	Maggiori performance della rete in condizioni di NNN
(Lee & Wu, 2009)	Termination fee	Studio qualitativo	Non modellato	Con NNN pericolo frammentazione di Internet e maggiori costi di transazione	Non modellato
(Hermalin & Katz, 2007)	Differenti QoS CSP tiering	Monopolio o duopolio di ISP	Non modellato	Livello di benessere probabilmente maggiore in NN (incerto)	Investimento inferiore nell'infrastruttura in NNN

(Jamison & Huges, 2008)	Differenti QoS CSP tiering	ISP monopolista No competizione CP	Non modellato	Una sola qualità di connessione porta a un livello di benessere inferiore e ad un livello di contenuti più basso	Investimento maggiore in caso di NNN
(Choi & Kim, 2010)	Differenti QoS CSP tiering	ISP monopolista Duopolio CP	M/M/1	Crescita benessere sociale ambigua nel passaggio da NN a NNN	Maggiori investimenti in infrastruttura, inferiori nella varietà dei contenuti
(Cheng, Bandyopadhyay, & Guo, 2011)	Differenti QoS CSP tiering	ISP monopolista Duopolio CP	M/M/1	Riduzione del benessere nel passaggio da NN a NNN	Maggiore investimento nell'infrastruttura di rete con NNN
(Krämer & Wiewiorra, 2012)	Differenti QoS CSP tiering	ISP monopolista CP non in competizione	M/M/1	Riduzione del benessere nel passaggio da NN a NNN	Minore investimento nell'infrastruttura e minore innovazione dei contenuti nel lungo periodo
(Bourreau, Kourandi, & Valletti, 2012)	Differenti QoS CSP tiering	Duopolio ISP CP non in competizione	Parametri di congestione che modifica il click- rate dei CP	Miglior allocazione delle risorse di rete in NNN, crescita benessere e QoE degli utenti	Maggiore incentivo all'investimento nella rete in NNN
(Schwartz, Shetty, & Walrand, 2008)	Differenti QoS CU tiering	Competizione tra ISP nel mercato CP non in competizione	Non modellato	Crescita generale del benessere, maggiore con l'aumentare del numero degli ISP attivi	Non modellato
(Bandyopadhyay & Cheng, 2006)	Differenti QoS CU tiering	ISP monopolista CP non in competizione Due gruppi consumatori	M/M/1	Crescita benessere dipendente dal grado di partecipazione sui due lati della piattaforma con le diverse configurazioni di prezzo	Non modellato

(Guo, Cheng, & Bandyopadhyay, 2010)	Vertical foreclosure	Duopolio ISP	Non modellato	L'incentivo al blocco dei contenuti dell'ISP dipende dal valore percepito dai consumatori per i contenuti non affiliati	Non modellato
(Chen, Nalebuf, & Keith, Competition in Two-Sided Markets, 2006)	Vertical foreclosure	Duopolio ISP	Non modellato	Non esiste alcun incentivo da parte degli ISP a bloccare i contenuti non affiliati	Non modellato

Bibliografia

- 3GPP Specifications per TSG/WG. (s.d.). Tratto da <https://www.3gpp.org/DynaReport/TSG-WG--S3.htm>
- 5G PPP, A. W. (2016, JULY). View on 5G Architecture.
- 5GPPP. (2019). *5G - A DRIVER FOR INDUSTRIAL AND SOCIETAL CHANGES*. Tratto da 5GPPP: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2016/02/BROCHURE_5PPP_BAT2_PL.pdf
- 5GPPP. (2019). The European 5G Annual Journal . *5GPPP Annual Journal*.
- Accenti, E. (2019). *La rete 5G*. Ettore Accenti Publishing .
- Afif, O., Katsutoshi, K., Federico, B., & Patrick, M. (2014). Scenarios for 5G Mobile and Wireless Communications: The Vision of the METIS Project. *IEEE Communications Magazine*.
- Agiwal, M., Roy, A., & Saxena, N. (2016). Next generation 5G wireless networks: a comprehensive survey. *IEEE Communications* , p. 1617-1655.
- Agusto, C., García, P. A., & Díaz. (2017). Supporting New Application and Services over LTE Public Safety Networks. *Wireless Public Safety Networks* , p. 113-132.
- Antonio, D. D., Emilio, C., Strinati, & Antonio, C. (2014). Enabling green cellular networks: A survey and outlook. *Computer Communications*, 37, p. 5-24.
- Armstrong, & Mark. (2006). Competition in Two-Sided Market. *RAND Journal of Economics* , 668-691.
- Austen, I. (2005). A Canadian Telecom's Labor Dispute Leads to Blocked Web Sites and Questions of Censorship. *The New York Times* .
- Balachandran. (1972). "Purchasing Priorities in Queues. *Management Science*, 18, 319-326.
- Bastian, Kliebe, Livingood, Mills, & Woundy. (2010, December). *Internet Engineering Task Force (IETF)* . Tratto da Comcast's Protocol-Agnostic Congestion Management System: <https://tools.ietf.org/html/rfc6057>
- Bhagat, S. (2018). *QoS: SolutionWaiting For A Problem*. Tratto da citeseerx: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.119.1234&rep=rep1&type=pdf>
- Braden, Zhang, Berson, & Herzog. (1997 , September). Tratto da IETF: <https://tools.ietf.org/html/rfc2205>
- Brennan. (2010). Net neutrality or minimum quality standards: Networks effects vs. market power justifications. *Network neutrality and open access*, 1-21.
- Broos, & Gautier. (2017). The exclusion of competing one-way essential complements: implication for net neutrality . *Indust. Organ.*, 358-392.
- Cadwalladr, & Graham-Harrison. (2018). Revealed: 50 million Facebook profiles harvested for Cambridge Analytica in major data breach. *The Guardian*.
- Callet, L., Möller, & Perkis. (2013). Qualinet White Paper on Definitions of Quality of Experience. *European Network on Quality of Experience in Multimedia Systems and Services*.
- Cardoso, R. (2018, July 18). *Commissione Europea* . Tratto da Antitrust: la Commissione infligge a Google un'ammenda di 4.34 miliardi di € per pratiche

- illegali riguardanti i dispositivi mobili Android volte a rafforzare la posizione dominante del motore di ricerca di Google:
https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/it/IP_18_4581
- Chen, & Nalebuff. (2006). *One-way essential complements*. Working Paper, Yale University .
- Chen, Nalebuf, & Keith. (2006). Competition in Two-Sided Markets. *Cowles Foundation Discussion Paper , No. 1588*.
- Cheng, Bandyopadhyay, & Guo. (2011). The Debate on Net Neutrality: A Policy Perspective. *Information Systems Research*, 60-82.
- Chipty, & Tasneem. (2001). Vertical Integration, Market Foreclosure, and Consumer Welfare in the Cable Television Industry . *American Economic Review*, 428-453.
- Choi, & Kim. (2010). *RAND Journal of Economics*, 41.
- Christos, G., & Tommaso, V. (2011). Regulating prices in two-sided markets: The waterbed experience in mobile telephony . *Telecommunications Policy* , 360-368.
- Church, J. (2011, May 1). Tratto da Policy Options Politiques :
<https://policyoptions.irpp.org/magazines/provincial-deficits-and-debt/too-many-tweets-internet-billing-practices-in-canada/>
- Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper*. (2020, March 9). Tratto da Cisco: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html>
- Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2015–2020*. (2015). Tratto da Cisco:
https://www.cisco.com/c/dam/m/en_in/innovation/enterprise/assets/mobile-white-paper-c11-520862.pdf
- Confessore, & Rosenberg. (2018). Cambridge Analytica and Facebook: The Scandal and the Fallout So Far. *New York Times* .
- Corinto, A. d. (2016). La vera storia di Arpanet. Attenzione: non nacque come progetto militare. *La Repubblica* .
- Crawley, Sandick, Nair, & Rajagopalan. (1998). A framework for QoS-based routing in the internet. *IETF RFC 2386*.
- Daniel, S., & Christopher, Y. (2005). On the Regulation of Networks as Complex Systems: A Graph Theory Approach. *U. L. REV*.
- DeCarlo, A. L. (2018, September). What metrics and tools can accurately measure network performance? *TechTarget*.
- Detti, A. (2018, November). Functional Architecture. *5G Italy White Book: from Research to Market*, p. 59-69.
- Dwenter, & Rösch. (2016). Net neutrality and the incentives (not) to exclude competitors. *Rev. Econom.*, 209-229.
- Economides, & Tåg. (2007). Network neutrality on the Internet: a two sided market analysis . *Information Economics and Policy*.
- Economides, & Tåg. (2012). Net Neutrality on the Internet: A Two-Sided Market Analysis. *Stern School of Business, Working Paper*.
- Economides. (2005). The economics of the Internet backbone. *Handbook of of telecommunications* .

- Elgendi, Munasinghe, & Sharma. (2016). Traffic offloading techniques for 5G cellular: a three-tiered SDN architecture. *Annual Telecommunications*, 71, 583–593.
- Ericsson. (2007). Collection of PDSCH results. *Work Item R4-072218, 3GPP TSG RAN WG4, Meeting #45*.
- ETSI, 3. (2018). System Architecture for the 5G System. *TS 23.501 version 15.2.0 Release 15*.
- European Commission - Policies. (s.d.). Tratto il giorno March 21, 2020 da <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/5g-europe-action-plan>
- European Commission . (2019). *RADIO SPECTRUM POLICY GROUP STRATEGIC ROADMAP TOWARDS 5G FOR EUROPE*. Brussels.
- Fettweis, G. (2014, March). The Tactile Internet: Applications and Challenges. 9, p. 64-70.
- Free press. (s.d.). Tratto da Save the Internet : <https://www.freepress.net/issues/free-open-internet/net-neutrality>
- Ge, Tu, Mao, Wang, & Han. (2016). 5G Ultra-Dense Cellular Networks. *IEEE Wireless Communications*, 72-79.
- Giust, F., Luca, C., & Carlos, B. (2015). Distributed mobility management for future 5G networks: overview and analysis of existing approaches. *IEEE Communications Magazine*, 142-149.
- Goldman, D. (2011, December 6). *Verizon blocks Google Wallet*. Tratto da Cnn money: https://money.cnn.com/2011/12/06/technology/verizon_blocks_google_wallet/index.htm
- Group, 5. A. (2017, December). View on 5G Architecture.
- Group, M. B. (2013). *AT&T/FaceTime Case Study* . Open Internet Advisory Committee.
- Gubbi, J. e. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future generation computer systems*, p. 1645-1660.
- Guo, Cheng, & Bandyopadhyay. (2010). Net Neutrality and vertical integration of content and broadband services. *Management Information Systems*, 243-275.
- Hahn, & Wallsten. (2006). The economics of net neutrality. *The Economists' Voice* , 1-7.
- Hansell, S. (2009). AT&T Reverses Policy on iPhone Internet Calls. *The New York Times* .
- Hardim, G. J. (1968). The Tragedy of Commons. *Science*, 162.
- Heller. (2008). *The Gridlock Economy*. New York : Basic Book.
- Hermalin, & Katz. (2007). *The Economics of Product-Line Restrictions With an Application to the Network Neutrality Debate*. AEI-BROOKINGS JOINT CENTER.
- Holznagel, & Nüßing. (2011). Legal framework of net neutrality: USA vs Europa . *Network Neutrality and and opn access*, 27-49.
- IETF. (2001, September). *IETF*. Tratto da IETF 3168: <https://tools.ietf.org/html/rfc3168>
- ITU-T. (2008). Definitions of terms related to quality of service. *Recommendation E.800* .
- Jamison, & Huge. (2008, January 14). *Getting What You Pay For: Analyzing the Net Neutrality Debate*. Tratto da SSRN: <http://ssrn.com/abstract=1081690>
- Jan, K., Lukas, W., & Christof, W. (2012). Net neutrality: a progress report. *Telecommunications Policy* , 974-813.
- Kang, C. (2012, July 31). *FCC fines Verizon \$1.25M for blocking tethering apps*. Tratto da The Washington Post : <https://www.washingtonpost.com/blogs/post->

- tech/post/fcc-fines-verizon-125m-for-blocking-tethering-apps/2012/07/31/gJQAXjRLNX_blog.html
- Kilkki. (2008). Quality of experience in communications ecosystem . *Journal of Universal Computer Science* , 615-624.
- Krämer, & Wiewiorra. (2012). Network Neutrality and Congestion Sensitive Content Providers: Implications for Content Variety, Broadband Investment and Regulation. *Information Systems Research*, 1303-1321.
- Krämer, Guo, & Easley. (2018). From net neutrality to data neutrality: a techno-economic framework and research agenda. *Information Systems Research*, 253-272.
- Krämer, J., Wiewiorra, L., & Weinhardt, C. (2013). Net neutrality: a progress report. *Telecommunications Policy* , p. 794-813.
- Krim, J. (2005). Phone Company Settles in Blocking of Internet Calls. *Washington Post*.
- Le, Q. N., Do, N. T., Bao, V. N., & An, B. (2016). Full-duplex distributed switch-and-stay networks with wireless energy harvesting: design and outage analysis. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* .
- Lee, & Wu. (2009). Subsidizing Creativity through Network Design: Zero-Pricing and Net Neutrality. *Journal of Economic Perspectives*, 61–76.
- Lee, Wu, & Tim. (2009). Subsidizing Creativity through Network Design: Zero pricing and Net Neutrality. *Journal of Economic Perspectives*, 61-76.
- Lema, M., & al., e. (2017). Business case and technology analysis for 5G low latency applications. 5, p. 5917-5935.
- Liempd, Hershberg, Craninckx, Rikkinen, Broek, v. d., Klumperink, & Nauta. (2015). In-Band Full-Duplex Transceiver Technology for 5G Mobile Networks. *ESSCIRC Conference 2015-41st European Solid-State Circuits Conference (ESSCIRC)*. IEEE.
- Marc, B., Kourandi, F., & Valletti, T. (2012). Net Neutrality with Competing Internet Platforms. *Economics of Networks eJournal*.
- Mark, A., & John, V. (1991). *Welfare Effects of Price Discrimination by a Regulated Monopolist*. Wiley .
- Mendelson, & Whang. (1990). Optimal Incentive-Compatible Priority Pricing for the M/M/1 Queue. *Operations Research*, 38, 870-883.
- Ministero dello sviluppo economico. (2017). Tratto da Sperimentazione 5G: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/198-notizie-stampa/2037482-sperimentazione-5g-a-milano>
- Ministero dello sviluppo economico. (2018). Tratto da Bando 5G per l'assegnazione di diritti d'uso delle frequenze: <https://www.mise.gov.it/index.php/it/comunicazioni/servizi-alle-imprese/tecnologia-5g/bando-5g>
- Motorola. (2007). Agreed UE demodulation simulation assumptions. *Work Item R4-071800, 3GPP TSG RAN WG4, Meeting #44bis*.
- Musacchio, Schwartz, & Walrand. (2009). A Two-Sided Market Analysis of Provider Investments Incentives with an Application to the Net-Neutrality Issue. *Review of Network Economics* , 22-39.
- Mussa, & Rosen. (1978). Monopoly and Product Quality . *Journal of Economic Theory* , 301-317.

- Naor. (1969). "The Regulation of Queue Size by Levying Tolls. *Econometrica*, 37, 15-24.
- Nee, & al, A. e. (2012). Augmented reality applications in design and manufacturing. *61.2*, p. 657-679.
- Njoroge, Ozdaglar, Moses, S., & Weintraub. (2010). INVESTMENT IN TWO-SIDED MARKETS AND THE NET NEUTRALITY DEBATE. *Columbia Business School DRO (Decision, Risk and Operations) Working Paper, No. 2010-05*.
- Odlyzko. (2009). Network Neutrality, Search Neutrality, and the Never-ending Conflict between Efficiency and Fairness in Markets. *Review of Network Economics*.
- Olsson, M., Cavdar, C., P. Frenger, S. T., Sabella, D., & Jantti, R. (2013). 5GrEen: towards green 5G mobile networks. *9th International Conference Wireless and Mobile Computing Networks*.
- Osseiran et al. (2014, May). Scenarios for the 5G Mobile and Wireless Communications: the Vision of the METIS Project. *IEEE Communications Magazine*.
- Osseiran, A., Jose, M., & Marsch, P. (2016). *5G Mobile and Wireless Communications Technology*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Ou, G. (2008, December). Managing broadband networks: a policymaker's guide. *The information technology & innovation foundation*.
- Outlooks: Video streaming (SVoD). (2020, August 8). Tratto da Statista : <https://www.statista.com/outlook/206/100/video-streaming--svod-/worldwide?currency=eur#market-revenue>
- Page, & Brin. (1998, April). The Anatomy of a Large-scale Hypertextual Web Search Engine. *7 th International World-Wide Web Conference*.
- Palattella et al. (2016, March). Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture and Business Models. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 34, p. 510-527.
- Paolo, U. (2017, December). *European Council Council of the European Union*. Tratto da https://www.mkm.ee/sites/default/files/8.a_b_aob_5g_roadmap_final.pdf
- Peter, S., Colin, W., & Jean Pierre, B. (2019). *The European 5G Annual Journal*.
- Phillips, R. (2005). *Pricing and Revenue Optimization*. Stanford University Press.
- Podesta, A. (2020, June 16). *Antitrust: Commission opens investigations into Apple's App Store rules*. Tratto da European Commission : https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_20_1073
- Ray, & Tirole. (2003). *A Primer on Foreclosure in Handbook of Industrial Organization*. Elsevier.
- RFC 791. (1981, September). Tratto da RFC: <https://tools.ietf.org/html/rfc791>
- Rocket, & Tirole. (2003). Platform Competition in Two-Sided Market. *Journal of the European Economic Association*, 990-1029.
- Ryan, P. S. (2011). Everyone Already Pays their Fair Share. *Policy by the Numbers Data for policymaking*.
- S, R., M, A., & I, L. (2014). Three-Dimensional Beamforming: A new enabling technology for 5G wireless networks. *EEE Signal Processing Magazine*, 94-101.
- Schneider, P., & Horn, G. (2015). Towards 5G security. *Trustcom/BigDataSE/ISPA*, 1.
- Schoen, S. (2007). *Comcast and BitTorrent*. Tratto da Electronic Frontier Foundation: <https://www.eff.org/it/deeplinks/2007/09/comcast-and-bittorrent>

- Schuett. (2010). Network Neutrality: A survey of the economic literature. *Network Economics*, 1-15.
- Singel, R. (2011, July 01). *MetroPCS 4G Data-Blocking Plans May Violate Net Neutrality*. Tratto da Wired : <https://www.wired.com/2011/01/metropcs-net-neutrality/>
- Singleton, & Micah. (2015). The FCC Has Changed the Definition of Broadband . *The Verge* .
- Stapleton, C., Hughes, C., Moshell, M., Micikevicius, P., & Altman, M. (2002, December). Applying mixed reality to entertainment. *Computer*, 35, p. 122-124.
- Stevenson, P. (2007). Comcast blocks some Internet traffic. *NBC News* .
- Svensson, P. (2007, October 10). *Comcast blocks some Internet traffic*. Tratto da NBCnews:
http://www.nbcnews.com/id/21376597/ns/technology_and_science-internet/t/comcast-blocks-some-internet-traffic/#.X2CAg2czY1l
- Swanson, & Gilder. (s.d.). Estimating the Exaflood. *Discovery Institute*.
- Tarik, T., Adlen, K., & Riku, J. (2016, November). "Anything as a Service" for 5G Mobile Systems.
The green touch project. (s.d.). Tratto il giorno March 2020 da <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/belllabs-microsite-greentouch/index.html>
- Union, I. T. (2015, September). Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond. *M Series Mobile, radiodetermination, amateur and related satellite services, Rec. ITU-R M.2083-0*.
- Varela, Kapov, S., & Ebrahimi. (2014). *Quality of Experience - Advanced Concepts, Applications and Methods*. Springer .
- Varian. (1987). *Price Discrimination*. DEPARTMENT OF ECONOMICS University of Michigan.
- VNI Complete Forecast Highlights. (2016). Tratto da Cisco:
https://www.cisco.com/c/dam/m/en_us/solutions/service-provider/vni-forecast-highlights/pdf/Global_2020_Forecast_Highlights.pdf
- Vodafone . (2017, December 11). Tratto da Ministero dello sviluppo economico:
https://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/20171211_Vodafone-5G-Trial-for-Milan.pdf
- Wang, Y.-P. E., Lin, X., Adhikary, A., Grovlen, A., Sui, Y., & Blankenship, Y. (2017, March). A Primer on 3GPP Narrowband Internet of Things. *IEEE Communications Magazine*, 55, 117-123.
- Wen, T., & Peiying, Z. (2014, March). 5G: A technology vision.
- Whitacre, E. (2005). At SBC, It's All About "Scale and Scope". (B. Week, Intervistatore)
- World Radiocommunication Conference. (2015). Tratto da
https://www.itu.int/en/itu-news/Documents/2015_ITUNews05-en.pdf
- Wu, & Tim. (2003). Network Neutrality, Broadband Discrimination. *Journal of Telecommunications and High Technology Law*.
- Wu. (2003). Network Neutrality, broadband discrimination . *Journal of Telecommunication & High Technology Law*, 141-178.
- Wyatt. (2010). Google and Verizon near deal on web pay tiers. *New York Times*.
- Yoo. (2005). *Beyond Network Neutrality* . University of Pennsylvania Carey Law School .

- Zhang, Chai, Long, Vasilakos, & Hanzo. (2015). Full duplex techniques for 5G networks: self-interference cancellation, protocol design, and relay selection. *IEEE Communications Magazine*, 128-137.
- Zhang, X., & Kunz, A. (s.d.). Overview of 5G security in 3GPP. *IEEE Conference on Standards for Communications & Networking*. Helsinki.
- Zhongshan, Z., Xiaomeng, C., Keping, L., Athanasios, V., & Hanzo, L. (2015). Full Duplex Techniques for 5G Networks: Self-Interference Cancellation, Protocol Design, and Relay Selection. *IEEE Communications Magazine*, 3-10.