

tutti i tempi. Ad esempio, con il TDM a commutazione di circuito, se un frame di un secondo viene suddiviso in 10 time slot di 100 ms ciascuno, a ogni utente viene assegnato un time slot per frame.

Pertanto, il collegamento a commutazione di circuito può supportare solo 10 (= 1 Mbps/100 kbps) utenti simulati. Con la commutazione di pacchetto, la probabilità che uno specifico utente sia attivo è

0,1 (cioè il 10%). Se ci sono 35 utenti, la probabilità che ci siano 11 o più utenti simultaneamente attivi è circa 0,0004 (il problema P8 spiega come si ottiene questa probabilità). (Quando ci sono 10 o meno utenti simultaneamente attivi (il che accade con probabilità 0,9996), la velocità di arrivo aggregata dei dati è inferiore o uguale a 1 Mbps, la velocità di uscita del collegamento. Pertanto, quando ci sono 10 o meno utenti attivi, i pacchetti degli utenti scorrono attraverso il collegamento essenzialmente senza ritardi, come nel caso della commutazione di circuito. Quando ci sono più di 10 utenti attivi simultaneamente, la velocità di arrivo aggregata dei pacchetti supera la capacità di uscita del collegamento e la coda di uscita inizia a crescere. (Continua a crescere fino a quando la velocità di ingresso aggregata non scende sotto 1 Mbps, a quel punto la coda inizierà a diminuire in lunghezza). Poiché in questo esempio la probabilità di avere più di 10 utenti attivi simultaneamente è minima, la commutazione di pacchetto fornisce essenzialmente le stesse prestazioni della commutazione di circuito, *ma lo fa consentendo un numero di utenti più che triplo*.

Consideriamo ora un secondo semplice esempio. Supponiamo che ci siano 10 utenti e che un utente generi improvvisamente mille pacchetti da 1.000 bit, mentre gli altri utenti rimangono inattivi e non generano pacchetti. In una commutazione di circuito TDM con 10 slot per frame e ogni slot composto da 1.000 bit, l'utente attivo può utilizzare solo un time slot per frame per trasmettere dati, mentre i restanti nove time slot di ogni frame rimangono inattivi. Passeranno 10 secondi prima che tutto il milione di bit di dati dell'utente attivo sia stato trasmesso. Nel caso della commutazione di pacchetto, l'utente attivo può inviare continuamente i suoi pacchetti alla velocità di collegamento completa di 1 Mbps, poiché non ci sono altri utenti che generano pacchetti che devono essere multiplexati con quelli dell'utente attivo. In questo caso, tutti i dati dell'utente attivo saranno trasmessi entro 1 secondo.

Gli esempi precedenti illustrano due modi in cui le prestazioni della commutazione di pacchetto possono essere superiori a quelle della commutazione di circuito. Inoltre, evidenziano la differenza cruciale tra le due forme di condivisione della velocità di trasmissione di un collegamento tra più flussi di dati. La commutazione di circuito pre-alloca l'uso del collegamento di trasmissione a prescindere dalla domanda, e il tempo di collegamento allocato ma non necessario rimane inutilizzato. La commutazione di pacchetto, invece, assegna l'uso del collegamento *su richiesta*. La capacità di trasmissione del collegamento sarà condivisa, pacchetto per pacchetto, solo tra gli utenti che hanno pacchetti da trasmettere sul collegamento.

Sebbene la commutazione di pacchetto e la commutazione di circuito siano entrambe prevalenti nelle reti di telecomunicazione odierne, la tendenza è stata

sicuramente quella della commutazione di pacchetto. Anche molte delle attuali reti telefoniche a commutazione di circuito stanno lentamente migrando verso la commutazione di pacchetto. In particolare, le reti telefoniche utilizzano spesso la commutazione di pacchetto per la costosa parte estera di una chiamata telefonica.

1.3.3 Una rete di reti

Abbiamo visto in precedenza che i sistemi finali (PC, smartphone, server Web, server di posta e così via) si collegano a Internet tramite un ISP di accesso. L'ISP di accesso può fornire connettività via cavo o wireless, utilizzando una serie di tecnologie di accesso tra cui DSL, cavo, FTTH, Wi-Fi e cellulare. Si noti che l'ISP di accesso non deve essere necessariamente una telco o un'azienda via cavo; può invece essere, ad esempio, un'università (che fornisce l'accesso a Internet a studenti, personale e docenti) o un'azienda (che fornisce l'accesso ai propri dipendenti). Ma collegare gli utenti finali e i fornitori di contenuti a un ISP di accesso è solo una piccola parte della soluzione del puzzle di connessione dei miliardi di sistemi finali che compongono Internet. Per completare il puzzle, gli stessi ISP di accesso devono essere interconnessi. Ciò avviene creando una *rete di reti*: *comprendere* questa frase è la chiave per capire Internet.

Nel corso degli anni, la rete di reti che costituisce Internet si è evoluta in una struttura molto complessa. Gran parte di questa evoluzione è guidata dall'economia e dalle politiche nazionali, piuttosto che da considerazioni sulle prestazioni. Per comprendere l'attuale struttura di rete di Internet, costruiamo progressivamente una serie di strutture di rete, in cui ogni nuova struttura rappresenta una migliore approssimazione della complessa Internet che abbiamo oggi. Ricordiamo che l'obiettivo generale è quello di interconnettere gli ISP di accesso in modo che tutti i sistemi finali possano inviare pacchetti tra loro. Un approccio ingenuo sarebbe quello di far collegare *direttamente* ogni ISP di accesso con ogni altro ISP di accesso. Un simile progetto di rete è, ovviamente, troppo costoso per gli ISP di accesso, in quanto richiederebbe che ogni ISP di accesso abbia un collegamento di comunicazione separato con ciascuna delle centinaia di migliaia di altri ISP di accesso in tutto il mondo.

La nostra prima struttura di rete, la *Struttura di rete 1*, interconnette tutti gli ISP di accesso con un *unico ISP di transito globale*. Il nostro (immaginario) ISP di transito globale è una rete di router e collegamenti di comunicazione che non solo si estende su tutto il globo, ma ha anche almeno un router vicino a ciascuna delle centinaia di migliaia di ISP di accesso. Naturalmente, per l'ISP globale sarebbe molto costoso costruire una rete così estesa. Per essere redditizio, dovrebbe naturalmente far pagare la connettività a ciascuno degli ISP di accesso, con una tariffazione che rifletta (ma non necessariamente direttamente proporzionale) la quantità di traffico che un ISP di accesso scambia con l'ISP globale. Poiché l'ISP di accesso paga l'ISP di transito globale, si dice che l'ISP di accesso è un **cliente** e l'ISP di transito globale è un **fornitore**.

Ora, se una società costruisce e gestisce un ISP di transito globale che è redditizio, è naturale che altre società costruiscano i propri ISP di transito globale e facciano concorrenza all'ISP di transito globale originale. Questo porta alla *Struttura di rete 2*, che consiste in centinaia di migliaia di ISP di accesso e *molteplici* ISP di transito globale. Gli ISP di accesso preferiscono certamente la Struttura di rete 2 rispetto alla Struttura di rete 1, poiché ora possono scegliere tra i fornitori di transito globale concorrenti in funzione dei loro prezzi e servizi. Si noti, tuttavia, che gli ISP di transito globale

devono interconnettersi: In caso contrario, gli ISP di accesso collegati a uno dei fornitori di transito globale non sarebbero in grado di comunicare con gli ISP di accesso collegati agli altri fornitori di transito globale.

La struttura di rete 2, appena descritta, è una gerarchia a due livelli con i fornitori di transito globale che risiedono al livello superiore e gli ISP di accesso al livello inferiore. Questo presuppone che gli ISP di transito globale non solo siano in grado di avvicinarsi a ogni singolo ISP di accesso, ma che lo trovino anche economicamente desiderabile. In realtà, sebbene alcuni ISP abbiano una copertura globale impressionante e si colleghino direttamente con molti ISP di accesso, nessun ISP è presente in ogni città del mondo. Al contrario, in una determinata regione, può esserci un **ISP regionale** a cui si collegano gli ISP di accesso della regione. Ogni ISP regionale si collega poi agli **ISP di livello 1**. Gli ISP di livello 1 sono simili al nostro (immaginario) ISP di transito globale; ma gli ISP di livello 1, che esistono davvero, non sono presenti in tutte le città del mondo. Esistono circa una dozzina di ISP di primo livello, tra cui Level 3 Communications, AT&T, Sprint e NTT. È interessante notare che nessun gruppo sancisce ufficialmente lo status di tier-1; come si suol dire, se devi chiedere se sei membro di un gruppo, probabilmente non lo sei.

Tornando a questa rete di reti, non solo ci sono più ISP di livello 1 in concorrenza tra loro, ma ci possono essere più ISP regionali in concorrenza tra loro in una regione. In questa gerarchia, ogni ISP di accesso paga l'ISP regionale a cui si collega e ogni ISP regionale paga l'ISP di livello 1 a cui si collega. (Un ISP di accesso può anche collegarsi direttamente a un ISP di livello 1, nel qual caso paga l'ISP di livello 1). Esiste quindi un rapporto cliente-fornitore a ogni livello della gerarchia. Si noti che gli ISP di livello 1 non pagano nessuno, poiché si trovano al vertice della gerarchia. Per complicare ulteriormente le cose, in alcune regioni può esistere un ISP regionale più grande (che può estendersi su un intero Paese) a cui si collegano gli ISP regionali più piccoli di quella regione; l'ISP regionale più grande si collega quindi a un ISP di livello 1. In Cina, ad esempio, ci sono ISP di accesso in ogni città, che si collegano a ISP provinciali, che a loro volta si collegano a ISP nazionali, che infine si collegano a ISP di livello 1 [Tian 2012]. Questa gerarchia a più livelli, che è ancora solo un'approssimazione grossolana dell'Internet di oggi, viene definita *Struttura di rete 3*.

Per costruire una rete più simile all'Internet di oggi, dobbiamo aggiungere alla struttura gerarchica della rete 3 i punti di presenza (PoP), il multi-homing, il peering e i punti di scambio Internet (IXP). I PoP esistono in tutti i livelli della gerarchia, tranne quello inferiore (ISP di accesso). Un **PoP** è semplicemente un gruppo di uno o più router (nella stessa posizione) nella rete del provider dove gli ISP clienti possono collegarsi all'ISP del provider. Per connettersi al PoP di un provider, una rete cliente può affittare un collegamento ad alta velocità da un provider di telecomunicazioni terzo per collegare direttamente uno dei suoi router a un router del PoP. Qualsiasi ISP (ad eccezione di quelli di livello 1) può scegliere di fare **multi-home**, cioè di collegarsi a due o più provider ISP. Così, ad esempio, un ISP di accesso può fare multi-home con due ISP regionali, oppure può fare multi-home con due ISP regionali e anche con un ISP di primo livello. Allo stesso modo, un ISP regionale può essere multi-home con più ISP di primo livello. Quando un

ISP multi-home, può continuare a inviare e ricevere pacchetti in Internet anche se uno dei suoi provider ha un guasto.

Come abbiamo appena appreso, gli ISP clienti pagano gli ISP provider per ottenere l'interconnettività Internet globale. L'importo che un ISP cliente paga a un ISP provider riflette la quantità di traffico che scambia con quest'ultimo. Per ridurre questi costi, una coppia di ISP vicini allo stesso livello gerarchico può **fare peering**, cioè collegare direttamente le proprie reti in modo che tutto il traffico tra loro passi attraverso la connessione diretta anziché attraverso intermediari a monte. Quando due ISP fanno peering, di solito non c'è alcun regolamento, cioè nessuno dei due ISP paga l'altro. Come già detto, anche gli ISP di livello 1 fanno peering tra di loro, senza alcun regolamento. Per un'esauriente trattazione del peering e delle relazioni cliente-fornitore, si veda [Van der Berg 2008]. Su questa falsariga, un'azienda terza può creare un **Internet Exchange Point (IXP)** (in genere in un edificio indipendente con i propri switch), che è un punto di incontro in cui più ISP possono fare peering. Oggi esistono circa 300 IXP in Internet [Augustin 2009]. Ci riferiamo a questo ecosistema - composto da ISP di accesso, ISP regionali, ISP di livello 1, PoP, multi-homing, peering e IXP - come *Struttura di Rete 4*.

Arriviamo finalmente alla *Struttura di rete 5*, che descrive l'Internet del 2012. La Struttura di rete 5, illustrata nella Figura 1.15, si basa sulla Struttura di rete 4 aggiungendo le **reti di fornitori di contenuti**. Google è attualmente uno dei principali esempi di rete di fornitori di contenuti. Al momento della stesura del presente documento, si stima che Google disponga di 30-50 data center distribuiti tra Nord America, Europa, Asia, Sud America e Australia. Alcuni di questi centri dati ospitano oltre centomila server, mentre altri sono più piccoli e ospitano solo centinaia di server. I centri dati di Google sono tutti interconnessi tramite la rete TCP/IP privata di Google, che si estende su tutto il globo ma è comunque separata dalla rete Internet pubblica. È importante notare che la rete privata di Google

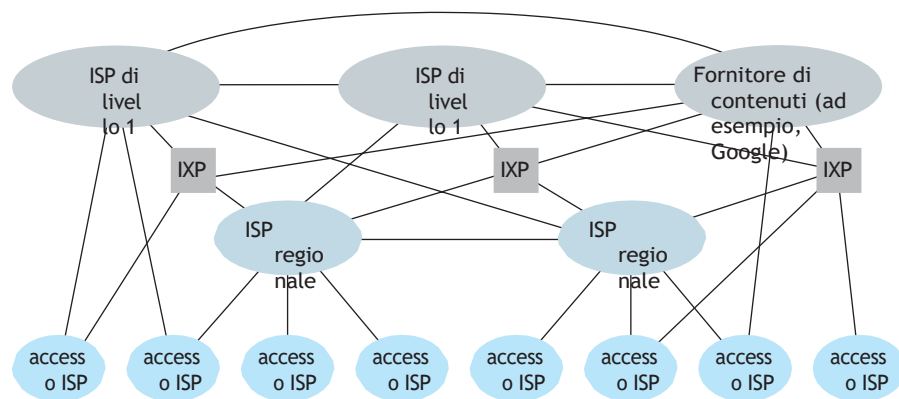


Figura 1.15 Interconnessione degli ISP

trasporta il traffico da/verso i server di Google. Come illustrato nella Figura 1.15, la rete privata di Google tenta di "bypassare" i livelli superiori di Internet effettuando il peering (regolamento gratuito) con gli ISP di livello inferiore, collegandosi direttamente con loro o collegandosi con gli IXP [Labovitz 2010]. Tuttavia, poiché molti ISP di accesso possono ancora essere raggiunti solo transitando attraverso reti di livello 1, anche la rete di Google si connette a ISP di livello 1 e paga questi ISP per il traffico che scambia con loro. Creando una propria rete, un fornitore di contenuti non solo riduce i pagamenti agli ISP di livello superiore, ma ha anche un maggiore controllo sul modo in cui i suoi servizi vengono forniti agli utenti finali. L'infrastruttura di rete di Google è descritta in modo più dettagliato nella Sezione 7.2.4.

In sintesi, l'Internet di oggi - una rete di reti - è complessa, composta da una dozzina di ISP di primo livello e da centinaia di migliaia di ISP di livello inferiore. La copertura degli ISP è varia: alcuni si estendono su più continenti e oceani, mentre altri si limitano a regioni geografiche ristrette. Gli ISP di livello inferiore si collegano agli ISP di livello superiore e gli ISP di livello superiore si interconnettono tra loro. Gli utenti e i fornitori di contenuti sono clienti degli ISP di livello inferiore e gli ISP di livello inferiore sono clienti degli ISP di livello superiore. Negli ultimi anni, anche i principali fornitori di contenuti hanno creato le proprie reti e si collegano direttamente agli ISP di livello inferiore, ove possibile.

1.4 Ritardo, perdita e throughput nelle reti a commutazione di pacchetto

Nella sezione 1.1 abbiamo detto che Internet può essere vista come un'infrastruttura che fornisce servizi alle applicazioni distribuite in esecuzione sui sistemi finali. Idealmente, vorremmo che i servizi Internet fossero in grado di spostare tutti i dati che vogliamo tra due sistemi finali, istantaneamente, senza alcuna perdita di dati. Purtroppo, questo è un obiettivo ambizioso e irraggiungibile nella realtà. Le reti di computer, invece, limitano necessariamente il throughput (la quantità di dati al secondo che possono essere trasferiti) tra i sistemi finali, introducono ritardi tra i sistemi finali e possono effettivamente perdere pacchetti. Da un lato, è spiacevole che le leggi fisiche della realtà introducano ritardi e perdite e limitino il throughput. D'altra parte, poiché le reti di computer hanno questi problemi, ci sono molte questioni affascinanti che riguardano il modo in cui affrontarli: più che sufficienti per riempire un corso sulle reti di computer e per motivare migliaia di tesi di dottorato! In questa sezione inizieremo a esaminare e quantificare il ritardo, la perdita e il throughput nelle reti di computer.

1.4.1 Panoramica del ritardo nelle reti a commutazione di pacchetto

Ricordiamo che un pacchetto parte da un host (la sorgente), passa attraverso una serie di router e termina il suo viaggio in un altro host (la destinazione). Mentre un pacchetto viaggia da un nodo (host o router) al nodo successivo (host o router)

lungo questo percorso, il