Table of Contents

Capitolul 1 – Rețele de calculatoare și Internetul

Internetul este una dintre cele mai remarcabile inovații tehnologice ale epocii moderne. A schimbat radical felul în care trăim, lucrăm, studiem, comunicăm, ne informăm, cumpărăm și ne distrăm.
De la trimiterea unui simplu mesaj de tip e-mail, până la vizionarea unui film în streaming, efectuarea de plăți online sau participarea la o videoconferință, toate aceste activități au în comun o rețea vastă de dispozitive interconectate — Internetul.

Dar ce este, mai exact, Internetul? Cum funcționează această rețea globală, care permite comunicarea instantanee între miliarde de oameni și mașini?
Și, poate mai important, cum sunt proiectate, construite și administrate aplicațiile și sistemele care se bazează pe el?

Pentru a răspunde acestor întrebări, vom analiza Internetul din mai multe perspective: ca infrastructură fizică, ca platformă de servicii și ca ecosistem de protocoale care fac posibilă comunicarea dintre dispozitive.
De asemenea, vom descoperi principiile generale care stau la baza oricărei rețele de calculatoare — principii aplicabile nu doar Internetului, ci și altor tipuri de rețele moderne.

1.1 Ce este Internetul?

Există mai multe moduri de a descrie Internetul, iar fiecare scoate în evidență o altă dimensiune a sa.
Îl putem privi, pe de o parte, ca pe o rețea de componente fizice și logice — adică un ansamblu de calculatoare, rutere, cabluri și protocoale care colaborează pentru a transporta informația.
Pe de altă parte, îl putem considera o infrastructură de servicii care permite aplicațiilor distribuite (precum web-ul, e-mailul sau rețelele sociale) să comunice între ele.

Vom analiza ambele perspective, pentru a construi o imagine completă.

1.1.1 O descriere din perspectiva „mecanicii interne” (nuts-and-bolts)

Din punct de vedere practic, Internetul este o rețea globală care interconectează miliarde de dispozitive:
calculatoare personale, servere, laptopuri, telefoane inteligente, televizoare, camere video, senzori, mașini și multe alte „lucruri” care fac parte din ceea ce numim Internetul lucrurilor (IoT).

Aceste dispozitive se numesc, generic, gazde (hosts) sau sisteme terminale (end systems), pentru că ele se află la capetele procesului de comunicare: sunt cele care trimit și primesc datele.

Gazdele sunt conectate între ele printr-o multitudine de legături de comunicație (communication links) și comutatoare de pachete (packet switches).
Legăturile pot fi de natură diferită — de la cabluri de cupru răsucite sau fibră optică până la conexiuni radio —, fiecare având o anumită viteză de transmisie, măsurată în biți pe secundă (bps).

Când o gazdă sursă are de trimis informații către o altă gazdă, ea:

1. împarte datele în bucăți mai mici, numite pachete (packets);
2. adaugă fiecărei bucăți informații suplimentare (anteturi, headere) pentru a permite rutarea și reasamblarea;
3. trimite aceste pachete prin rețea;
4. la destinație, pachetele sunt reasamblate pentru a recrea mesajul original.

Comutatoarele de pachete (cum ar fi ruterele) sunt nodurile intermediare care primesc un pachet pe o legătură de intrare și îl redirecționează către o legătură de ieșire, spre destinație.
Drumul complet parcurs de un pachet, de la sursă până la destinație, se numește rută (path).

Furnizorii de servicii Internet (ISP-uri)

Gazdele sunt conectate la Internet prin intermediul unor organizații numite furnizori de servicii Internet (Internet Service Providers – ISP).
Un ISP poate fi:

- un furnizor rezidențial (pentru case și apartamente),
- unul de afaceri (pentru companii și instituții),
- sau unul public (de exemplu, hotspoturi Wi-Fi sau rețele de campus).

Fiecare ISP este, la rândul său, o rețea de legături și comutatoare interconectate.
ISP-urile locale și regionale sunt legate între ele prin ISP-uri naționale sau internaționale, formând astfel o rețea de rețele.
Aceasta este, de fapt, esența Internetului: o structură descentralizată în care multiple rețele independente colaborează pentru a transporta datele la nivel global.

Protocoalele de comunicare

Toate aceste componente – gazdele, legăturile, comutatoarele și ruterele – trebuie să urmeze reguli clare de comunicare, pentru ca mesajele să poată fi înțelese și procesate corect. Aceste reguli se numesc protocoale (protocols).

Cele mai fundamentale două protocoale ale Internetului sunt:

- IP (Internet Protocol) – definește formatul pachetelor și modul în care acestea sunt adresate și livrate;
- TCP (Transmission Control Protocol) – asigură fiabilitatea transmiterii, controlul fluxului și ordonarea pachetelor.

Împreună, ele formează ceea ce se numește suita TCP/IP, coloana vertebrală a Internetului. Mii de alte protocoale sunt construite peste acestea, pentru diverse aplicații (HTTP, SMTP, DNS, FTP etc.).

Standardele Internetului

Pentru ca toate aceste tehnologii diferite să coopereze, este nevoie de un proces comun de standardizare.
Aici intervine Internet Engineering Task Force (IETF), organizația care stabilește specificațiile oficiale ale protocoalelor Internetului.
Documentele elaborate de IETF se numesc RFC – Request for Comments și sunt disponibile public.
Oricine poate citi un RFC pentru a înțelege în detaliu cum funcționează un protocol sau o tehnologie de rețea.

1.1.2 Internetul ca infrastructură de servicii

O altă perspectivă utilă este să privim Internetul ca o platformă care oferă servicii aplicațiilor distribuite.
Aplicațiile nu rulează „în interiorul" Internetului, ci la marginea lui, pe sistemele terminale (gazdele).
Ruterele și comutatoarele din nucleul rețelei au rolul de a transporta pachetele, nu de a înțelege logica aplicațiilor.

Exemple de aplicații distribuite:

- e-mailul (SMTP, IMAP, POP3),
- navigarea web (HTTP),
- apelurile și conferințele video (SIP, RTP),
- serviciile cloud,
- rețelele sociale,
- jocurile online.

Aceste aplicații sunt formate din mai multe procese software care rulează pe gazde diferite și comunică între ele trimițând mesaje prin Internet.

1.2 Marginea rețelei (The Network Edge)

Când privim structura Internetului, putem imagina două componente principale:

1. Marginea rețelei (the network edge), care cuprinde sistemele terminale – adică dispozitivele aflate la capetele comunicării: computere, laptopuri, telefoane, servere web etc.
2. Nucleul rețelei (the network core), alcătuit din rutere și legături de mare viteză, care transportă datele între aceste terminale.

În această secțiune vom explora în detaliu ce se află la marginea rețelei: sistemele terminale, rolurile lor (client–server), și rețelele de acces care conectează utilizatorii la furnizorii de servicii Internet.

1.2.1 Sistemele terminale: clienți și servere

Sistemele terminale (sau gazdele) sunt dispozitivele care se află la capetele comunicației de date. Ele pot fi:

- clienți (clients) – dispozitivele care inițiază cereri de servicii sau informații;
- servere (servers) – dispozitivele care furnizează acele servicii sau informații.

De exemplu, atunci când deschidem un browser și accesăm o pagină web, calculatorul nostru acționează ca client, iar serverul pe care este găzduit site-ul este serverul.
Browserul trimite o cerere (HTTP request), iar serverul răspunde cu fișierul corespunzător (HTTP response).

Această arhitectură, numită model client–server, este fundamentală pentru Internetul modern. Clientul trimite cereri individuale, iar serverul răspunde cu informația cerută.
De regulă, serverele nu se află în locuințele utilizatorilor, ci în centre de date (data centers), unde există mii de servere conectate la rețele de mare viteză și alimentate redundant cu energie electrică.

Centrele de date (Data Centers)

Un centru de date este o instalație specializată care găzduiește și întreține servere la scară largă.
Aceste centre sunt esențiale pentru servicii precum Google, Amazon, Microsoft, Facebook sau Netflix.

Ele oferă:

- conectivitate de mare viteză (prin fibre optice redundante);
- sisteme de răcire și control al temperaturii;
- securitate fizică și cibernetică;
- alimentare electrică neîntreruptă;
- distribuirea echilibrată a traficului (load balancing) între servere.

Astfel, atunci când un utilizator trimite o cerere către un server Google, pachetele sale pot ajunge la oricare dintre centrele de date Google din lume, în funcție de locație, latență și încărcare.
Răspunsul revine apoi pe cea mai rapidă rută disponibilă.

Arhitecturi alternative: Peer-to-Peer (P2P)

Pe lângă modelul client–server, există și alte tipuri de arhitecturi de comunicație, cum ar fi peer-to-peer (P2P).
Într-o rețea P2P, fiecare gazdă acționează atât ca client, cât și ca server, partajând direct resursele cu alte gazde.
Nu mai există un punct central care controlează schimbul de date.

Exemple clasice:

- aplicațiile de partajare de fișiere (BitTorrent),
- unele sisteme de mesagerie descentralizată,
- rețelele blockchain.

Avantajul arhitecturii P2P este scalabilitatea: pe măsură ce crește numărul de utilizatori, crește și capacitatea totală a sistemului, pentru că fiecare utilizator contribuie cu resurse (bandă, stocare, procesare).
Dezavantajul este însă lipsa de control centralizat, ceea ce face gestionarea securității și integrității mai dificilă.

1.2.2 Rețele de acces (Access Networks)

Pentru ca un sistem terminal să comunice prin Internet, el trebuie să fie conectat la un furnizor de servicii Internet (ISP).
Rețelele de acces sunt „podurile” dintre utilizatori și infrastructura globală a Internetului.

Există mai multe tipuri de rețele de acces, în funcție de:

- tipul de utilizator (rezidențial, de întreprindere, mobil);
- mediul fizic de transmisie (cupru, fibră, radio);
- viteză și lățime de bandă disponibile;
- tehnologia de acces (DSL, cablu, fibră, Ethernet, 4G/5G, Wi-Fi).

Vom analiza principalele tipuri de acces: rezidențial, de întreprindere și mobil.

A. Rețele rezidențiale (Home Access Networks)

O rețea casnică tipică include:

- un router de acasă, care acționează ca interfață între rețeaua locală și ISP;

- un modem (DSL, cablu sau fibră), care transformă semnalul ISP-ului în format digital;
- un punct de acces Wi-Fi;
- dispozitivele utilizatorului (calculatoare, telefoane, televizoare inteligente, camere de supraveghere etc.).

Routerul gestionează traficul între rețeaua locală (LAN) și Internet, asigurând funcții precum:

- traducerea adreselor de rețea (NAT);
- filtrarea pachetelor (firewall);
- distribuirea conexiunilor wireless (Wi-Fi);
- alocarea automată de adrese IP locale (DHCP).

B. Acces prin cablu (Cable Internet Access)

Internetul prin cablu utilizează infrastructura rețelelor de televiziune prin cablu. Abonații se conectează printr-un cable modem la o linie coaxială partajată, care ajunge la un punct central numit headend (centrul furnizorului).

Semnalul este transmis bidirecțional, folosind diferite benzi de frecvență pentru upload și download.
Aceasta înseamnă că mai mulți utilizatori dintr-un cartier împart aceeași lățime de bandă.
Astfel, viteza efectivă poate scădea în perioadele de vârf, când mulți abonați folosesc rețeaua simultan.

Totuși, standardele moderne precum DOCSIS 3.1 permit viteze foarte mari — de la sute de megabiți pe secundă până la mai mulți gigabiți, prin tehnici de multiplexare și agregare a canalelor.

C. Acces DSL (Digital Subscriber Line)

Tehnologia DSL utilizează liniile telefonice existente pentru a transmite date la frecvențe mai mari decât cele folosite pentru voce.
Astfel, apelurile telefonice și conexiunea Internet pot funcționa simultan pe același cablu.

La abonat, un DSL modem convertește semnalul în format digital, iar la centrala furnizorului există un echipament numit DSLAM (Digital Subscriber Line Access Multiplexer), care combină semnalele provenite de la mai mulți utilizatori.

DSL oferă viteze asimetrice: descărcarea (download) este mai rapidă decât încărcarea (upload).
De exemplu, o conexiune tipică ADSL poate oferi 24 Mbps pentru download și 3 Mbps pentru upload.
Viteza scade însă odată cu distanța până la centrala telefonică – peste 5 km, semnalul devine instabil.

D. Acces prin fibră optică (FTTH – Fiber To The Home)

Cea mai performantă tehnologie de acces este fibra optică până la domiciliu (FTTH).
În acest caz, cablul de fibră este instalat direct până la casa abonatului, oferind viteze de ordinul gigabiților pe secundă, latență foarte mică și fiabilitate ridicată.

Există două mari modele de rețele FTTH:

- PON (Passive Optical Network) – mai mulți abonați împart o fibră comună, semnalul fiind distribuit prin splittere optice pasive;
- Active Ethernet – fiecare abonat are o conexiune dedicată până la un echipament activ al furnizorului.

Deși costurile de implementare sunt mai ridicate, rețelele FTTH reprezintă direcția dominantă în infrastructura modernă, fiind deja standard în multe țări dezvoltate.

E. Rețele fără fir în locuință (Wireless Home Networks)

În majoritatea caselor, conectarea dispozitivelor la router se face fără fir, prin Wi-Fi (standardele IEEE 802.11).
Routerul acționează ca un punct de acces (access point), trimițând și primind date în bandă radio.

Avantajele sunt evidente: libertate de mișcare, conectivitate multiplă, instalare simplă. Totuși, există și limitări: semnalul Wi-Fi poate fi afectat de distanță, pereți, interferențe și numărul de dispozitive conectate.
Standardele moderne (Wi-Fi 6 și Wi-Fi 6E) folosesc tehnici MIMO (multiple antene) și benzi suplimentare pentru a crește performanța.

F. Rețele hibride

În practică, multe gospodării folosesc combinații de tehnologii – de exemplu, fibră până la bloc și Wi-Fi în interiorul locuinței, sau conexiune prin cablu și distribuție internă prin Ethernet.
Aceste rețele hibride oferă un echilibru optim între viteză, cost și flexibilitate.

Pentru a permite acest schimb, fiecare sistem terminal oferă o interfață numită socket – un set de reguli prin care aplicația poate trimite și primi date.
Socketul este interfața dintre aplicație și rețea.

O analogie utilă:
așa cum o persoană trebuie să respecte anumite reguli când trimite o scrisoare (scrie adresa, pune timbru, o depune la poștă), o aplicație trebuie să respecte regulile interfeței socket pentru a trimite mesaje prin Internet.
Rețeaua se ocupă apoi de transportul efectiv al acestor „scrisori digitale” până la destinație.

1.1.3 Ce este un protocol?

Comunicarea pe Internet (și în general, în orice rețea de calculatoare) se bazează pe protocoale.
Dar ce înseamnă exact acest termen?

În viața de zi cu zi, avem multe situații care urmează protocoale neoficiale.
De exemplu, atunci când două persoane se salută, există o ordine previzibilă de acțiuni:
una spune „Bună ziua!”, cealaltă răspunde, apoi începe conversația.
Dacă răspunsul nu vine, prima persoană știe că ceva nu e în regulă.

În mod similar, în rețele, un protocol definește:

- formatul mesajelor schimbate între entitățile care comunică,
- ordinea acestor mesaje,
- acțiunile care trebuie întreprinse la trimiterea și primirea fiecărui mesaj,
- și ce trebuie făcut atunci când apar erori sau evenimente neașteptate.

Un exemplu simplu de protocol în Internet

Atunci când un utilizator introduce o adresă web în browser, de exemplu www.example.com, are loc o succesiune de acțiuni foarte bine definite:

1. Browserul trimite o cerere către serverul DNS pentru a obține adresa IP a domeniului.
2. Odată obținută adresa IP, browserul inițiază o conexiune TCP cu serverul web.
3. Browserul trimite o cerere HTTP (GET /index.html) pentru pagina principală.
4. Serverul răspunde cu un mesaj HTTP conținând fișierul cerut.
5. Browserul afișează conținutul pentru utilizator.

Fiecare pas este guvernat de un protocol – DNS, TCP, HTTP – care definește exact formatul mesajului și reacția așteptată.

Astfel, două calculatoare complet diferite (cu sisteme de operare, procesoare și aplicații distincte) pot comunica fără probleme, atâta timp cât respectă aceleași protocoale.

1.2.3 Rețele de acces pentru întreprinderi (Enterprise Access Networks)

Pe lângă utilizatorii casnici, o categorie importantă de conexiuni la Internet o reprezintă întreprinderile, organizațiile și instituțiile (școli, universități, birouri, spitale, bănci etc.).
Acestea folosesc rețele interne proprii – numite rețele locale (LAN – Local Area Networks) – pentru a conecta calculatoarele, serverele și echipamentele din interiorul clădirii sau campusului.

Cea mai comună tehnologie LAN este Ethernetul, care există de peste 40 de ani și a evoluat constant în privința vitezei și fiabilității.
Într-o rețea Ethernet, dispozitivele (stațiile de lucru, imprimantele, serverele) sunt conectate la comutatoare (switches), iar acestea la rândul lor sunt interconectate într-o topologie ierarhică.

La vârf se află de obicei un router de nivel superior, care conectează rețeaua internă a organizației la Internet printr-o linie dedicată, furnizată de un ISP.

Ethernet și vitezele sale

De-a lungul timpului, vitezele Ethernet au crescut dramatic:

- primele versiuni (anilor ’80) transmiteau la 10 Mbps;
- apoi au apărut Fast Ethernet (100 Mbps),
- Gigabit Ethernet (1 Gbps),
- 10 Gigabit Ethernet (10 Gbps),
- iar în prezent există implementări comerciale de 40 și 100 Gbps în mediul profesional.

Majoritatea clădirilor de birouri moderne au cablare internă Cat5e sau Cat6, capabilă să transporte semnale Gigabit Ethernet pe distanțe de până la 100 de metri.
Pentru conexiuni între etaje, campusuri sau centre de date, se folosesc fibre optice.

Wi-Fi în mediul corporativ

În ultimii ani, rețelele Wi-Fi (IEEE 802.11) au devenit omniprezente și în mediile profesionale.
Multe companii implementează rețele hibride, în care angajații pot alege între conexiuni prin cablu (Ethernet) și conexiuni wireless.
Accesul este gestionat de controlere centrale, care coordonează punctele de acces pentru a evita interferențele și a menține securitatea.

De exemplu, un campus universitar mare poate avea sute de puncte de acces Wi-Fi interconectate, configurate astfel încât studenții să se poată deplasa liber între clădiri fără întreruperi în conexiune.

Rețele de acces mobile (Mobile Access Networks)

O altă categorie majoră este cea a rețelelor mobile, prin care telefoanele, tabletele și dispozitivele IoT se conectează la Internet fără cabluri.
Aceste rețele sunt furnizate de operatorii de telefonie mobilă și se bazează pe tehnologii celulare (4G LTE, 5G NR etc.).

Structura generală a unei rețele celulare

Într-o rețea celulară, suprafața geografică este împărțită în celule, fiecare deservită de o stație de bază (base station).
Dispozitivele mobile comunică prin unde radio cu stația de bază cea mai apropiată, care la rândul ei este conectată la rețeaua operatorului printr-o legătură de mare viteză (de obicei fibră optică).

De la rețeaua operatorului, traficul este transmis prin nucleul rețelei celulare (care asigură rutarea, autentificarea și controlul traficului) către Internetul public.

Generațiile de rețele mobile

- 2G (GSM, CDMA): primele rețele digitale, destinate în principal convorbirilor și mesajelor text.
- 3G (UMTS, EVDO): introducerea datelor mobile la viteze de până la câteva sute de Kbps.
- 4G (LTE): trecerea completă la transmisii bazate pe IP, cu viteze de ordinul sutelor de Mbps.
- 5G: tehnologia actuală, cu viteze de ordinul gigabiților, latență sub 10 ms și capacitate de conectare masivă pentru dispozitive IoT.

O conexiune tipică 4G oferă utilizatorului final între 20 și 100 Mbps, iar 5G poate depăși 1 Gbps în condiții ideale.
Aceste rețele permit aplicații care necesită timp de reacție foarte scurt (realitate augmentată, vehicule autonome, telemedicină etc.).

Mobilitatea și comutarea între celule

Pe măsură ce utilizatorul se deplasează, dispozitivul său poate trece de la o celulă la alta. Procesul se numește handover sau handoff și trebuie să fie imperceptibil, pentru a nu întrerupe conexiunea.
De exemplu, când un utilizator vorbește la telefon și se deplasează cu mașina, apelul trece automat de la o antenă la alta fără întreruperi.

Mediile fizice de transmisie (Physical Media)

Indiferent de tipul rețelei (rezidențială, de întreprindere, mobilă), datele sunt transportate printr-un mediu fizic.
Acesta poate fi:

- ghidat (guided) – unde semnalul se propagă printr-un mediu solid (cupru, fibră optică);
- neghidat (unguided) – unde semnalul se transmite prin aer, apă sau vid (unde radio, microunde, satelit).

Să analizăm pe scurt principalele tipuri.

1. Cablu de cupru răsucit (Twisted Pair Copper Wire)

Este cel mai comun mediu în rețelele Ethernet și DSL.
Două fire de cupru sunt răsucite împreună pentru a reduce interferențele electromagnetice.
Cele mai folosite standarde sunt:

- Cat5e – până la 1 Gbps;
- Cat6/Cat6a – până la 10 Gbps pe distanțe de 55–100 m;
- Cat7/Cat8 – pentru aplicații profesionale de mare viteză.

Avantajele: cost redus, instalare ușoară, compatibilitate.
Dezavantaje: distanță limitată și sensibilitate la zgomot electromagnetic.

2. Cablul coaxial (Coaxial Cable)

Folosit în special pentru rețelele de televiziune și Internet prin cablu.
Are un conductor central de cupru, înconjurat de un strat izolator și un ecran metalic.
Permite transmisii de mare viteză și distanțe mai lungi decât cablul răsucit.

Poate transporta simultan semnale pentru mai mulți abonați, fiind folosit pe scară largă în rețelele de acces partajat (DOCSIS).

3. Fibra optică (Optical Fiber)

Mediul fizic cu cea mai mare performanță.
Folosind pulsuri de lumină transmise printr-un fir subțire de sticlă, poate transporta zeci de terabiți pe secundă pe distanțe de sute de kilometri fără amplificare.

Avantaje:

- bandă foarte mare;
- imunitate la interferențe electromagnetice;
- securitate sporită (dificil de interceptat).

Dezavantaje:

- cost de instalare mai mare;
- necesită echipamente optice specializate.

Fibrele sunt utilizate în special pentru backbone-ul Internetului, legăturile dintre centre de date și rețelele FTTH.

4. Medii de transmisie neghidate (Wireless Media)

Acestea folosesc unde electromagnetice pentru a transmite semnale prin aer.
Cele mai comune exemple:

- unde radio (Wi-Fi, Bluetooth) – pentru comunicații pe distanțe scurte (până la 100 m);
- microunde terestre – pentru legături între clădiri sau stații fixe;
- satelit – pentru comunicații la scară globală, inclusiv în zone fără infrastructură terestră.

Transmisiile wireless sunt foarte flexibile, dar sunt afectate de:

- obstacole fizice (pereți, terenuri, clădiri);
- condiții atmosferice;
- interferențe radio.

Pentru a minimiza aceste efecte, sistemele moderne folosesc tehnici avansate de modulare, codare și multiplexare (OFDM, MIMO, beamforming).

1.3 Nucleul rețelei (The Network Core)

După ce am discutat despre marginea rețelei, adică locul în care utilizatorii și aplicațiile interacționează cu Internetul, vom privi acum în interior, spre nucleul rețelei.
Nucleul este format dintr-un ansamblu de rutere și legături de mare viteză care transportă pachetele de date între sistemele terminale.

Atunci când o aplicație trimite informații – de exemplu, un e-mail, o cerere web sau un apel video – datele nu sunt trimise ca un flux continuu, ci sunt împărțite în pachete (packets). Acestea sunt apoi direcționate, unul câte unul, printr-o rețea de rutere interconectate, până ajung la destinație.

Nucleul Internetului este, așadar, un mecanism de transport de pachete, care asigură legătura logică dintre margini.

1.3.1 Comutarea de pachete (Packet Switching)

Modelul fundamental de funcționare al Internetului se bazează pe comutarea de pachete (packet switching).
În acest model, fiecare mesaj de la sursă la destinație este fragmentat în unități discrete – pachete – care sunt transmise independent unele de altele.

Fiecare pachet conține două părți:

- datele utile (payload) – bucata efectivă de informație transmisă;
- antetul (header) – care conține informații de control, precum adresele sursă și destinație, numere de secvență și alte câmpuri necesare rutării.

Când un pachet ajunge la un ruter, acesta:

1. citește antetul pentru a afla adresa de destinație;
2. consultă o tabelă de rutare pentru a decide pe ce legătură să trimită mai departe pachetul;

3. îl transmite către următorul ruter din rețea, pe calea cea mai potrivită.

Acest proces se repetă până când pachetul ajunge la gazda destinatară, unde toate pachetele sunt reasamblate în ordinea corectă.

Stocare și redirecționare (Store-and-Forward Transmission)

Comutarea de pachete folosește principiul stocare–redirecționare (store-and-forward). Asta înseamnă că fiecare ruter trebuie să primească întregul pachet înainte de a-l retransmite mai departe.

De exemplu, dacă un pachet are 1.000 de octeți și legătura dintre rutere are o viteză de 1 Mbps, va dura 8 milisecunde doar pentru transmiterea pachetului către următorul ruter.
Abia după ce pachetul a fost complet primit, ruterul îl poate trimite mai departe.

Această întârziere se adaugă la fiecare „salt” (hop) prin care trece pachetul, ceea ce explică de ce conexiunile pe distanțe mari (cu multe rutere intermediare) pot avea latențe mai mari.

Cozi și întârzieri (Queuing and Delay)

Ruterele au benzi limitate de ieșire, iar dacă pachetele sosesc mai repede decât pot fi transmise, ele trebuie păstrate într-o coadă.
Dacă această coadă devine plină, pachetele noi sunt eliminate (dropped) – fenomen cunoscut drept pierdere de pachete (packet loss).

Acesta este unul dintre motivele pentru care Internetul nu garantează un timp fix de livrare.

Pachetele pot întârzia (queueing delay) sau chiar se pot pierde în timpul transmiterii, caz în care protocoalele de transport (precum TCP) se ocupă de retransmiterea lor.

Avantajele comutării de pachete

1. Eficiență ridicată în utilizarea resurselor
   Spre deosebire de comutarea de circuite, unde o linie întreagă este rezervată pentru o singură conexiune, în comutarea de pachete lățimea de bandă este partajată dinamic între mai mulți utilizatori.
   Atunci când un utilizator nu transmite date, alții pot folosi aceleași resurse.
2. Scalabilitate
   Internetul poate susține milioane de conexiuni simultane fără a fi nevoie de rezervări dedicate de resurse.
3. Robustețe
   Dacă o legătură se defectează, pachetele pot fi redirecționate automat pe alte rute, fără a întrerupe conexiunea.

Dezavantaje

Principalul dezavantaj al comutării de pachete este imprevizibilitatea: timpul total de livrare (latența) și pierderile de pachete variază în funcție de congestie.
De aceea, aplicațiile sensibile la întârziere – precum vocea sau video în timp real – necesită mecanisme suplimentare (de exemplu, bufferizare, protocoale de transport adaptiv, rețele cu QoS – Quality of Service).

1.3.2 Comutarea de circuite (Circuit Switching)

Pentru a înțelege mai bine importanța comutării de pachete, este util să comparăm acest model cu comutarea de circuite (circuit switching), folosită tradițional în rețelele telefonice.

În comutarea de circuite, înainte de începerea comunicației, se stabilește o cale dedicată (circuit) între sursă și destinație.
Această cale rămâne rezervată exclusiv pentru cele două părți pe toată durata conversației.

De exemplu, într-un apel telefonic clasic, sistemul alocă un canal de 64 Kbps doar pentru acel apel, chiar dacă interlocutorii nu vorbesc în permanență.

Etapele unei conexiuni cu comutare de circuite

1. Stabilirea conexiunii – rețeaua alocă resursele necesare (canale, frecvențe, sloturi de timp).
2. Transmisia datelor – datele circulă pe calea rezervată, fără întârzieri cauzate de cozi.
3. Eliberarea conexiunii – după terminarea apelului, resursele sunt eliberate și pot fi folosite de alte conexiuni.

Multiplexarea circuitelor

Pentru a permite utilizarea eficientă a infrastructurii, sistemele de comutare de circuite folosesc tehnici de multiplexare:

- FDM (Frequency Division Multiplexing) – banda de frecvență este împărțită în canale separate, fiecare utilizator având propriul interval de frecvență.
- TDM (Time Division Multiplexing) – timpul este împărțit în sloturi discrete, iar fiecare utilizator primește un slot recurent.

În ambele cazuri, resursa (frecvență sau timp) este rezervată pentru utilizator pe întreaga durată a sesiunii.

Compararea comutării de pachete și de circuite

Caracteristică	Comutare de circuite	Comutare de pachete
Resurse	Rezervate permanent pentru fiecare conexiune	Partajate dinamic între utilizatori
Eficiență	Scăzută (resursele pot rămâne nefolosite)	Ridicată (resursele sunt folosite doar când există date)
Întârziere	Constantă, predictibilă	Variabilă, dependentă de congestie
Fiabilitate	Ridicată pentru conexiuni stabile	Pot apărea pierderi și întârzieri
Scalabilitate	Limitată	Foarte ridicată
Exemplu tipic	Rețelele telefonice clasice	Internetul modern

Internetul adoptă modelul comutării de pachete tocmai pentru că oferă flexibilitate, costuri reduse și scalabilitate uriașă.

1.3.3 Rutarea (Routing) și dirijarea pachetelor

Rutarea reprezintă procesul prin care un pachet este direcționat de la sursă la destinație prin rețea.
Fiecare ruter are o tabelă de rutare care conține informații despre destinațiile posibile și calea optimă către ele.

Ruterele comunică între ele prin protocoale de rutare – precum OSPF (Open Shortest Path First), BGP (Border Gateway Protocol) sau RIP – pentru a actualiza și sincroniza aceste tabele.

Rutarea în interiorul și între rețele (intra/inter-domain routing)

Internetul global este format din mii de sisteme autonome (AS – Autonomous Systems). Fiecare AS aparține unei organizații (ISP, universitate, companie) și își administrează propriile rutere interne.

- Rutarea intra-domain (interior): se face în interiorul unui singur AS, folosind protocoale precum OSPF sau IS-IS.
- Rutarea inter-domain (exterior): se face între AS-uri, folosind BGP.

BGP este „lipiciul" care ține Internetul global unit, permițând ruterele marilor operatori să anunțe ce adrese pot livra și pe ce rute.

Rutarea dinamică și adaptarea la congestie

Spre deosebire de rețelele cu circuite fixe, Internetul se bazează pe rutare dinamică: dacă o legătură se defectează sau devine congestionată, pachetele pot fi redirecționate automat prin alte rute.
Aceasta oferă o reziliență extraordinară – chiar dacă o parte a rețelei cade, restul continuă să funcționeze.

Congestia și controlul fluxului

Atunci când prea multe pachete concurează pentru aceleași resurse, apare congestia rețelei.
Ea duce la creșterea întârzierilor și pierderi de pachete.
Protocoalele de transport, cum ar fi TCP, includ mecanisme sofisticate de control al fluxului și control al congestiei pentru a ajusta viteza de trimitere în funcție de capacitatea rețelei.

1.3.4 Infrastructura globală: Internetul ca rețea de rețele

Internetul global este o rețea ierarhică de rețele interconectate.
În vârf se află ISP-urile de nivel 1 (Tier-1) – operatori internaționali care dețin rețele de fibră optică continentale și submarine.
Acestea se interconectează între ele direct, fără plată reciprocă (prin peering).

Sub ele se află:

- ISP-uri regionale (Tier-2) – care cumpără conectivitate de la Tier-1;
- ISP-uri locale (Tier-3) – care deservesc clienții finali (case, firme).

Acest model ierarhic asigură scalabilitatea și interconectivitatea globală a Internetului.

De exemplu, când trimiți un e-mail din România către Japonia, pachetele tale pot traversa zeci de rețele, rutere și cabluri submarine, dar datorită standardizării protocoalelor IP, comunicarea rămâne fluidă și interoperabilă.

💡 Următoarea parte (paginile 30–40) va acoperi Secțiunea 1.4 – Întârziere, pierderi și debit (Delay, Loss, and Throughput in Packet-Switched Networks) — adică analiza detaliată a timpilor de transmisie, cozi, congestie și performanță efectivă.

1.4 Întârziere, pierderi și debit în rețelele cu comutare de pachete

Până acum am văzut că datele trimise prin Internet sunt împărțite în pachete, care traversează o succesiune de rutere și legături până la destinație.
Dar această călătorie nu este instantanee: fiecare pachet întâmpină o serie de întârzieri în drumul său, iar unele pot fi chiar pierdute dacă rețeaua este congestionată.

Pentru a înțelege performanța unei rețele, trebuie să analizăm în detaliu timpul total de întârziere (end-to-end delay) și debitul efectiv (throughput).

1.4.1 Tipuri de întârzieri într-un ruter

Să considerăm un ruter generic care primește un pachet pe o legătură de intrare și îl transmite mai departe pe o legătură de ieșire.
Pe parcursul acestui proces, pachetul poate experimenta patru tipuri principale de întârziere:

1. Întârzierea de procesare (processing delay)
2. Întârzierea de coadă (queuing delay)
3. Întârzierea de transmisie (transmission delay)
4. Întârzierea de propagare (propagation delay)

Acestea se adună, formând întârzierea totală în acel ruter.

---

1. Întârzierea de procesare

Aceasta este durata necesară ruterului pentru a examina antetul pachetului și a decide unde trebuie trimis mai departe.
Include și verificarea erorilor din pachet.
De obicei, aceste operațiuni durează doar câteva microsecunde sau chiar nanosecunde, în funcție de performanța echipamentului.

---

2. Întârzierea de coadă

Dacă mai multe pachete ajung la același ruter într-un interval scurt, ele trebuie puse într-o coadă de așteptare pentru transmisie.
Durata de așteptare a unui pachet depinde de:

- cât de aglomerată este coada în momentul sosirii;

- rata de transmisie a legăturii;
- dimensiunea medie a pachetelor.

Când coada este aproape plină, pachetele noi pot fi aruncate (pierderi de pachete). Acest fenomen apare frecvent în perioadele de congestie a rețelei.

---

3. Întârzierea de transmisie

Aceasta reprezintă timpul necesar pentru a „împinge" toate biții unui pachet pe fir. Se calculează prin formula:

$$d_{trans} = \frac{L}{R}$$

unde:

- L= dimensiunea pachetului (în biți)
- R= viteza de transmisie a legăturii (în biți pe secundă)

De exemplu, un pachet de 1.000 octeți (8.000 biți) transmis pe o legătură de 1 Mbps are o întârziere de transmisie de 8 milisecunde.

---

4. Întârzierea de propagare

După ce pachetul a fost transmis pe legătură, el se propagă prin mediu (cupru, fibră, aer). Viteza de propagare depinde de tipul de mediu, dar este de obicei între 2×10^8 m/s și 3×10^8 m/s (aproximativ viteza luminii).

Dacă lungimea legăturii este $d$metri, iar viteza de propagare este s, atunci:

$$d_{prop} = \frac{d}{s}$$

De exemplu, pentru o legătură de 3.000 km (3×10^6 m) prin fibră optică (2×10^8 m/s), întârzierea de propagare este de 15 milisecunde.

Întârzierea totală într-un ruter

Întârzierea totală la nivel de ruter este:

$$d_{nodal} = d_{proc} + d_{queue} + d_{trans} + d_{prop}$$

Iar pentru o cale completă de la sursă la destinație (care traversează mai multe rutere), întârzierea end-to-end este suma întârzierilor tuturor rutelor intermediare.

1.4.2 Analiza întârzierilor de coadă și a pierderilor

Întârzierile de coadă sunt cele mai variabile și adesea dominante în rețelele congestionate. Pentru a le înțelege, putem folosi o analogie: coada de la un ghișeu bancar.
Dacă clienții (pachetele) sosesc mai repede decât pot fi deserviți, coada crește.

Dacă rata de sosire $a$depășește rata de transmitere R/L, coada va crește indefinit – o situație de congestie cronică.
În realitate, cozile au o capacitate finită, deci pachetele suplimentare sunt pur și simplu eliminate.

Modelul de trafic

Fluxul de pachete în rețea este adesea modelat ca un proces stocastic:

- sosirile pot fi neregulate;
- dimensiunile pachetelor diferă;
- unele fluxuri (precum streamingul) sunt constante, altele (precum navigarea web) sunt explozive.

Din această cauză, întârzierile de coadă pot varia de la milisecunde la secunde, în funcție de starea rețelei.

Efectul congestiei

Când o legătură este suprasolicitată:

- pachetele în așteptare ocupă memoria rutere-lor;
- se formează cozi mari;
- unele pachete sunt pierdute;
- protocoalele de transport (TCP) reacționează reducând viteza de trimitere.

Acesta este motivul pentru care, în perioadele de vârf, Internetul pare „încet” – nu pentru că se strică ceva, ci pentru că apar întârzieri și retransmisii cauzate de congestie.

1.4.3 Măsurarea performanței: debitul (Throughput)

Debitul (throughput) este cantitatea efectivă de date transmise cu succes de la sursă la destinație într-un anumit interval de timp.
Se exprimă în biți pe secundă (bps).

Dacă trimiți un fișier de 100 MB și transferul durează 200 de secunde, debitul mediu este:

$$\text{Throughput} = \frac{100 \times 8 \text{ megabiți}}{200 \text{ s}} = 4 \text{ Mbps}$$

Debitul instantaneu vs. debitul mediu

- Debitul instantaneu variază în timp, în funcție de congestie și de protocolul de transport.
- Debitul mediu este o valoare agregată pe durata totală a transferului.

Protocoale precum TCP ajustează dinamic viteza de transmisie pentru a se adapta condițiilor rețelei, astfel încât debitul să fie cât mai stabil.

Factorul limitativ (Bottleneck Link)

Într-o cale formată din mai multe legături, debitul total este limitat de cea mai lentă legătură.
Aceasta se numește gâtul de sticlă (bottleneck link).

De exemplu:

- dacă o conexiune locală are 100 Mbps, dar legătura ISP-ului este de 10 Mbps, debitul total nu va depăși 10 Mbps;
- dacă serverul de la destinație este aglomerat, viteza efectivă va fi redusă chiar dacă legăturile sunt rapide.

Analogia cu un lanț

Performanța totală a unei conexiuni este ca rezistența unui lanț:
ea este determinată de cea mai slabă verigă.

De aceea, furnizorii de Internet și administratorii de rețele optimizează constant gâturile de sticlă (backbone, peering, centre de date etc.) pentru a crește viteza generală.

1.4.4 Exemple numerice de întârzieri și debit

Să analizăm un exemplu simplu:
Două gazde, A și B, sunt conectate printr-un singur ruter intermediar.
Fiecare legătură are 1 Mbps, iar distanța totală este de 5.000 km.
Un fișier de 1 MB trebuie transmis de la A la B.

- Întârzierea de transmisie: $\frac{8\times10^6 \text{ biți}}{10^6 \text{ bps}} = 8$ s
- Întârzierea de propagare (pentru 5.000 km): $\frac{5\times10^6}{2\times10^8} = 0.025$ s
- Întârzierea totală minimă ≈ 8.025 s (fără cozi, fără pierderi).

Dacă însă rețeaua este congestionată, întârzierile pot crește semnificativ.

Exemplu de rețea paralelă

Dacă aceeași transmisie ar trece prin două legături de 1 Mbps în paralel (în load balancing), debitul s-ar dubla teoretic, reducând timpul total la aproximativ 4 s.
În practică, performanța este puțin mai mică, din cauza sincronizării și retransmiterilor.

1.4.5 Rezumatul secțiunii

- Pachetele întâmpină patru tipuri de întârzieri: procesare, coadă, transmisie, propagare.
- Congestia provoacă întârzieri mari și pierderi de pachete.
- Debitul total este limitat de cea mai lentă legătură de pe traseu.

- Protocoalele de transport (ex. TCP) încearcă să echilibreze viteza de trimitere cu capacitatea rețelei.

Înțelegerea acestor concepte este esențială pentru analiza performanței rețelelor și pentru proiectarea aplicațiilor eficiente.

1.5 Structura protocoalelor Internetului și modelele de stratificare (Protocol Layers and Their Service Models)

Internetul este un sistem extrem de complex, format din milioane de componente hardware și software interconectate.
Pentru a face posibilă funcționarea coerentă a unui asemenea ecosistem, proiectanții rețelelor au adoptat un model stratificat (layered architecture).
Această abordare împarte sistemul în niveluri logice, fiecare responsabil pentru un set clar de funcții.

Prin stratificare, complexitatea globală a rețelei este divizată în probleme mai simple, care pot fi proiectate, testate și actualizate independent.

1.5.1 Motivația pentru modelul stratificat

Fiecare strat oferă servicii stratului superior, ascunzând detaliile interne de implementare. De exemplu:

- stratul de transport oferă aplicațiilor posibilitatea de a trimite date, fără ca acestea să știe cum sunt rutate pachetele;
- stratul de rețea se ocupă de dirijarea pachetelor, fără să cunoască detalii despre aplicațiile care le folosesc.

Avantajele acestei structuri sunt evidente:

- Modularitate: schimbările într-un strat nu afectează celelalte, atâta timp cât interfața (API-ul) rămâne aceeași.
- Claritate: fiecare strat are o funcție bine definită.
- Interoperabilitate: implementări diferite pot colabora, dacă respectă același set de reguli.
- Ușurință în mentenanță și dezvoltare.

1.5.2 Modelele de stratificare: OSI și TCP/IP

De-a lungul timpului, au apărut două modele majore de stratificare:

1. Modelul OSI (Open Systems Interconnection) – format din 7 straturi;
2. Modelul TCP/IP – cel efectiv folosit în Internet, format din 5 straturi principale.

A. Modelul OSI – 7 straturi

Modelul OSI, dezvoltat de ISO în anii ’80, împarte comunicația în următoarele niveluri:

1. Aplicație (Application Layer) – oferă servicii directe utilizatorului (HTTP, SMTP, DNS).
2. Prezentare (Presentation Layer) – se ocupă de conversia datelor, criptare și compresie.
3. Sesiune (Session Layer) – gestionează sesiunile de comunicare.
4. Transport (Transport Layer) – asigură transferul fiabil al datelor (TCP, UDP).
5. Rețea (Network Layer) – se ocupă de rutare și adresare (IP).
6. Legătură de date (Data Link Layer) – gestionează trimiterea pachetelor pe o legătură fizică.
7. Fizic (Physical Layer) – definește mediul fizic (cabluri, semnale, codificare).

Deși modelul OSI este mai detaliat, în practică Internetul folosește un model simplificat – modelul TCP/IP.

B. Modelul TCP/IP – 5 straturi

1. Aplicație (Application Layer)
    - Conține protocoalele pentru aplicațiile utilizatorului: HTTP, SMTP, FTP, DNS, RTP etc.
    - Gestionează logica serviciilor web, e-mail, streaming etc.
2. Transport (Transport Layer)
    - Asigură transportul logic între aplicațiile gazdelor.
    - Cele mai importante protocoale sunt:
        - TCP (Transmission Control Protocol) – fiabil, orientat pe conexiune;
        - UDP (User Datagram Protocol) – mai rapid, dar fără confirmări.
3. Rețea (Network Layer)
    - Definirea rutelor și adreselor IP; protocolul de bază: Internet Protocol (IP).
    - Include și ICMP (pentru diagnostic) și protocoalele de rutare.
4. Legătură de date (Data Link Layer)
    - Trimiterea pachetelor între noduri adiacente, de exemplu prin Ethernet sau Wi-Fi.
    - Se ocupă de detectarea erorilor și controlul accesului la mediu.
5. Fizic (Physical Layer)
    - Definește modul concret de transmitere a biților: semnale, conectori, frecvențe, tensiuni, etc.

Fluxul datelor prin straturi

Când o aplicație (de exemplu un browser) trimite un mesaj, datele „coboară” prin aceste straturi:

- fiecare strat adaugă informații proprii (anteturi, trailere);
- la destinație, straturile inverse „decojesc” datele, prelucrându-le în sens invers.

Acest proces este numit încapsulare (encapsulation).

De exemplu:

1. Strat aplicație → generează mesajul HTTP;
2. Strat transport → adaugă antet TCP;
3. Strat rețea → adaugă antet IP;
4. Strat legătură → adaugă antet și trailer Ethernet;
5. Strat fizic → transmite biții efectivi.

La destinație, procesul se inversează, iar aplicația primește exact mesajul original.

1.5.3 Protocoalele Internetului în practică

Iată câteva protocoale cheie și straturile lor:

Strat	Protocoale principale	Exemple de utilizare
Aplicație	HTTP, HTTPS, FTP, SMTP, DNS, RTP	Web, e-mail, streaming
Transport	TCP, UDP	Controlul fluxului, fiabilitate, sesiuni
Rețea	IP, ICMP, BGP, OSPF	Rutare și adresare
Legătură de date	Ethernet, Wi-Fi, PPP, DOCSIS	Transmisia între noduri
Fizic	Cupru, fibră, radio	Mediul fizic de transport

Aceste protocoale lucrează împreună pentru a oferi transparență între aplicații: browserul tău nu trebuie să știe ce tip de cablu, router sau sistem de operare există între tine și serverul web – doar să respecte regulile TCP/IP.

1.5.4 Standardizarea și evoluția protocoalelor

Protocoalele Internetului sunt publice și deschise.
Oricine poate consulta documentele RFC (Request for Comments) emise de IETF (Internet

Engineering Task Force).
Acest proces deschis a fost unul dintre motivele succesului Internetului – inovația nu este controlată de o singură companie sau guvern, ci de o comunitate globală.

De exemplu:

- RFC 791 descrie protocolul IP;
- RFC 793 descrie TCP;
- RFC 2616 (înlocuit de RFC 7230–7235) descrie HTTP/1.1.

Noile tehnologii (cum ar fi HTTP/3, QUIC, IPv6) sunt dezvoltate în același mod – transparent, colaborativ și compatibil cu versiunile anterioare.

1.5.5 Sinteza finală a Capitolului 1

În acest prim capitol am construit o imagine de ansamblu asupra Internetului:

- Internetul este o rețea de rețele care conectează miliarde de dispozitive.
- Comunicarea se realizează prin pachete trimise între sisteme terminale, conectate prin rutere și legături.
- Marginea rețelei cuprinde aplicațiile și utilizatorii; nucleul – infrastructura de transport.
- Comutarea de pachete oferă eficiență și scalabilitate, dar aduce provocări legate de întârzieri și congestie.
- Protocoalele Internetului sunt organizate pe straturi – fiecare cu un rol clar – și sunt standardizate public prin IETF.

În capitolul următor, vom pătrunde în stratul Aplicație (Application Layer), pentru a înțelege în detaliu cum funcționează aplicațiile de rețea: web, e-mail, DNS și multe altele.