

Logică pentru informatică - note de curs

Universitatea Alexandru Ioan Cuza, Iași
Facultatea de Informatică
Anul universitar 2023-2024

Ștefan Ciobâcă
Andrei Arusoaie
Rodica Condurache
Cristian Masalagiu

Cuprins

| | | |
|----------|--|----------|
| 1 | Introducere | 5 |
| 2 | Logica propozițională informală | 7 |
| 2.1 | Propoziții | 7 |
| 2.2 | Propoziții atomice | 8 |
| 2.3 | Conjunții | 8 |
| 2.4 | Disjunții | 9 |
| 2.5 | Implicații | 9 |
| 2.6 | Negațiile | 11 |
| 2.7 | Echivalențe | 12 |
| 2.8 | Conectorii logici | 12 |
| 2.9 | Ambiguități în limba română | 12 |
| 2.10 | Fișă de exerciții | 13 |

Capitolul 1

Introducere

Dacă aritmetica este știința care studiază numerele și operațiile cu numere, logica este știința în care obiectul studiului este reprezentat de *propoziții* și de operații cu propoziții.

De exemplu, dacă în aritmetică observăm că suma a două numere pare este un număr par, în logică am putea observa că disjuncția a două propoziții adevărate este o propoziție adevărată.

Logica se găsește la intersecția filosofiei, matematicii și informaticii și a cunoscut cea mai mare dezvoltare începând cu anii 1950, datorită aplicațiilor numeroase în Informatică.

În acest curs, vom studia la nivel introductiv *logica propozițională* și *logica de ordinul I*.

Logica propozițională este extrem de simplă, dar conceptele pe care le studiem, metodele pe care le învățăm și problemele pe care le întâlnim în logica propozițională se pot generaliza la alte logici mai complexe. De asemenea, logica propozițională corespunde în mod fidel organizării interne la nivel abstract a calculatoarelor, în sensul în care circuitele electronice se pot modela ca formule din logica propozițională. Logica propozițională are o teorie bogată și interesantă din punct de vedere matematic (exemple: teorema de compactitate, teorema de interpolare a lui Craig). *Problema satisfiabilității* pentru logica propozițională are multe aplicații în informatică. Este deosebit de importantă atât din punct de vedere teoretic (fiind problema canonică NP-completă) cât și practic (cu aplicații în verificarea programelor, în verificarea circuitelor, în optimizare combinatorială ș.a.).

Logica de ordinul I este o extensie a logicii propoziționale și are de asemenea aplicații numeroase în informatică, dar și în matematică. De exemplu, toată matematica pe care ați învățat-o în gimnaziu/liceu se bazează pe o așa numită teorie din logica de ordinul I numită **ZFC** (teoria **Zermelo–Fraenkel** a mulțimilor, împreună cu axioma alegerii – Axiom of **C**hoice). În Infor-

matică, aplicații ale logicii de ordinul I apar în domeniul complexității descriptive, în baze de date relaționale, în verificarea automată a hardware-ului și software-ului, ș.a. De asemenea, multe alte logici (de exemplu, logicile de ordin superior) au aplicații în teoria limbajelor de programare, în fundamentele matematicii, teoria tipurilor etc.

Capitolul 2

Logica propozițională informală

Logica propozițională este logica propozițiilor, conectate între ele prin *conectori logici* cum ar fi *sau*, *și* și *non*. În acest capitol, vom trece prin bazele logicii propoziționale.

2.1 Propoziții

O *propoziție* este o afirmație care este sau adevărată, sau falsă. Iată câteva exemple de propoziții:

1. *Port o cămașă albastră;*
2. *Tu deții un laptop și o tabletă, dar nu un telefon inteligent;*
3. $2 + 2 = 4$ (*Doi și cu doi fac patru*);
4. $1 + 1 = 1$ (*Unu plus unu este 1*);
5. $1 + 1 \neq 1$ (*Unu cu unu nu fac 1*);
6. *Dacă $1 + 1 = 1$, atunci Pământul este plat;*
7. *Toate numerele naturale sunt întregi;*
8. *Toate numere raționale sunt întregi.*

Iată câteva exemple de expresii care nu sunt propoziții:

1. *Roșu și negru* (nu este o afirmație);

2. π (nu este o afirmație);
3. *Plouă?* (întrebare, nu afirmație);
4. *Pleacă!* (exclamație, nu afirmație);
5. $x > 7$ (aici avem un predicat care depinde de x ; după ce fixăm o valoare pentru x , obținem o propoziție);
6. *Această afirmație este falsă.* (deși este o afirmație, nu este propoziție, deoarece nu este sau adevărată sau falsă: dacă ar fi adevărată, atunci ar fi și falsă și invers).

Câteodată nu este foarte clar dacă o afirmație este propoziție cu adevărat, sau nu este foarte clară valoarea ei de adevăr. De exemplu, suntem de acord că *zăpada este albă* în general, dar la fel de bine se poate susține și contrariul: de exemplu, există zăpadă neagră (pe stradă în țările subdezvoltate în timpul iernii), astfel încât valoarea de adevăr a afirmației *zăpada este albă* este pusă în discuție. Faptul că o afirmație este propoziție sau nu este mai mult o problemă de logică filosofică.

2.2 Propoziții atomice

Unele propoziții sunt atomice, în sensul în care nu pot fi descompuse în propoziții mai mici:

1. *Port o cămașă albastră;*
2. *Tu deții un laptop;*
3. $2 + 2 = 4$ (*Doi și cu doi fac patru*).

2.3 Conjunții

Unele propoziții sunt compuse din altele mai mici. De exemplu, propoziția *afară plouă și eu sunt supărat* este compusă din *afară plouă* și din *sunt supărat*, legate între ele prin *și*. Dacă două propoziții, φ și respectiv ψ , sunt legate printr-un *și*, propoziția rezultată, φ și ψ , se numește o *conjunție* (*conjunția lui φ și ψ*).

O conjuncție este adevărată dacă ambele părți componente sunt adevărate. De exemplu, propoziția *afară plouă și eu sunt supărat* este adevărată dacă atât propoziția *afară plouă* cât și propoziția *sunt supărat* sunt adevărate. În particular, din moment ce nu sunt supărat, această conjuncție este falsă.

O conjuncție nu conține neapărat cuvântul *și* în mod explicit. De exemplu, propoziția *afară plouă, dar eu am o umbrelă* este de asemenea o conjuncție, iar părțile ei componente sunt *afară plouă* și *eu am o umbrelă*. Aceste propoziții sunt legate prin conjuncția adversativă *dar*.

Exercițiul 1. *Găsiți părțile componente ale conjuncției mă joc acasă și învăț la școală.*

Exercițiul 2. *Dați un exemplu de o conjuncție falsă și un exemplu de o conjuncție adevărată.*

2.4 Disjuncții

Disjuncțiile sunt propoziții legate între ele prin *sau*. De exemplu, *afară plouă sau sunt supărat* este o disjuncție a propozițiilor *afară plouă* și *sunt supărat*.

Exercițiul 3. *Găsiți părțile componente ale disjuncției Voi cumpăra un laptop sau o tabletă. Atenție! Cele două părți componente trebuie să fie propoziții (anumite cuvinte din cele două părți componente pot să fie implicite și în consecință să nu apară în text).*

O disjuncție este adevărată dacă cel puțin una din părțile sale componente este adevărată. De exemplu, disjuncția $7 > 8$ sau $8 > 7$ este adevărată, deoarece $8 > 7$ este adevărată.

Acest înțeles al disjuncțiilor se numește *sau inclusiv* și este standard în matematică. Câteodată cuvântul *sau* este folosit în limbaj natural în sensul de *sau exclusiv*. De exemplu, în propoziția *albul sau negrul câștigă într-un joc de go*, cuvântul *sau* are înțeles de *sau exclusiv*. Înțelesul este că sau albul câștigă, sau negrul, dar nu amândoi simultan (este exclusă opțiunea să fie ambele adevărate în același timp).

În continuare, prin disjuncție vom înțelege *sau inclusiv* (interpretarea standard în matematică).

Exercițiul 4. *Dați un exemplu de o disjuncție falsă și un exemplu de o disjuncție adevărată.*

Exercițiul 5. *Când este disjuncția φ sau ψ falsă (în funcție de valorile lui φ și ψ)?*

Exercițiul 6. *Putem reprezenta sau exclusiv utilizând sau inclusiv?*

2.5 Implicații

Implicațiile sunt propoziții de forma *dacă φ atunci ψ* . Propoziția φ se numește *antecedent* al implicației, iar propoziția ψ se numește *consecvent* (sau *concluzie*) al implicației.

Un exemplu de implicație este *dacă trec la Logică, dau o petrecere*. Antecedentul este *trec la Logică*, iar concluzia este *dau o petrecere*. Când este o implicație adevărată/falsă? O implicație este falsă dacă și numai dacă antecedentul este adevărat, dar consecventul este fals. Să presupunem că trec la Logică și că totuși nu dau o petrecere. Atunci implicația *dacă trec la Logică, dau o petrecere*, în ansamblul său, este falsă (antecedentul este adevărat, dar consecventul fals).

Înțelesul unei implicații merită o discuție mai amănunțită, deoarece poate fi contraintuitiv. Implicațiile, așa cum apar în matematică, pot fi diferite de implicațiile pe care le folosim în viața de zi cu zi. În viața de zi cu zi, când spunem *dacă trec la logică, dau o petrecere*, înțelegem că avem o legătura de cauzalitate între faptul de a trece la Logică și faptul de a da o petrecere. Alte exemple de astfel de legătură de cauzalitate: *dacă am bani, cumpăr o mașină* sau *dacă mă ajuți, te ajut*. În limbajul de zi cu zi, nu ne-am gândi niciodată să conectăm două propoziții printr-o implicație dacă cele două propoziții nu au legătură de cauzalitate între ele. De exemplu, propoziția *dacă pământul este rotund, atunci $2 + 2 = 4$* nu ar avea sens (deși este adevărată).

Implicația folosită în matematică se numește *implicație materială*. Valoarea de adevăr a unei implicații depinde doar de valorile de adevăr ale părților componente (antecedentul și consecventul), nu și de legătura de cauzalitate dintre ele. Acest înțeles al implicației materiale nu corespunde tot timpul cu înțelesul din limbajul natural (e.g., limba română), dar practica arată că este singurul înțeles rezonabil în matematică (și informatică).

În particular, atât propoziția *dacă pământul este plat, atunci $2+2=5$* , cât și propoziția *dacă pământul este plat, atunci $2 + 2 = 4$* sunt adevărate, deoarece antecedentul este fals.

Exercițiul 7. *Care sunt valorile de adevăr ale propozițiilor dacă $2 + 2 = 4$, atunci Pământul este plat și dacă $2 + 2 = 5$, atunci Pământul este plat?*

Valoarea de adevăr a implicației *dacă φ , atunci ψ* depinde doar de valorile de adevăr ale antecedentului, φ , și consecventului, ψ , și este prezentată în următorul tabel de adevăr:

| φ | ψ | dacă φ , atunci ψ |
|-----------|----------|--------------------------------|
| fals | fals | adevărat |
| fals | adevărat | adevărat |
| adevărat | fals | fals |
| adevărat | adevărat | adevărat |

Următorul exemplu arată că tabelul de adevăr de mai sus este singura interpretare rezonabilă a implicației. Sunteți cu siguranță de acord că orice număr natural este număr întreg. Altfel spus, propoziția *pentru orice număr x , dacă x este număr natural, atunci x este număr întreg* este adevărată. În

particular veți fi de acord că propoziția este adevărată în cazurile particulare $x = -10$, $x = 10$ și $x = 1.2$ (din moment ce este vorba despre *orice număr* x).

Obținem cazurile particulare *dacă* -10 *este număr natural, atunci* -10 *este număr întreg, dacă* 10 *este număr natural, atunci* 10 *este număr întreg și dacă* 1.2 *este număr natural, atunci* 1.2 *este număr întreg.*, care trebuie toate să fie adevărate. Aceste cazuri particulare exemplifică rândurile 2, 4 și 1 ale tabelului de adevăr de mai sus (de obicei, studenții nu au încredere în rândul 2). Cât despre a treia linie, o propoziție de forma *dacă* φ , *atunci* ψ , unde φ este adevărată, dar ψ este falsă, nu poate fi decât falsă. Altfel, ar trebui să acceptăm ca fiind adevărate propoziții cum ar fi *Dacă* $2 + 2 = 4$, *atunci* $2 + 2 = 5$. (antecedentul, $2 + 2 = 4$, este adevărat, consecventul, $2 + 2 = 5$, este fals).

Unele implicații pot fi relativ dificil de identificat. De exemplu, în propoziția *trec la Logică doar dacă învăț*, antecedentul este (împotriva aparențelor) *trec la Logică*, iar consecventul este *învăț*. Atenție! Propoziția de mai sus nu are același înțeles cu *dacă învăț, trec la Logică*.

Atenție! În propozițiile de forma *trec la Logică doar dacă învăț* sau *trec la Logică numai dacă învăț*, antecedentul este *trec la Logică*, iar consecventul este *învăț*. Aceste două propoziții nu au același înțeles cu propoziția *dacă învăț, atunci trec la Logică*.

Implicațiile în limba română pot câteodată să nu folosească șablonul *dacă ... atunci ...*. De exemplu, sensul cel mai rezonabil al propoziției *trec la Logică sau renunț la facultate* (aparent o disjuncție), este că *dacă nu trec la Logică, renunț la facultate* (implicație). Din fericire, cele două propoziții sunt echivalente, într-un sens pe care îl vom studia în cursurile următoare.

2.6 Negațiile

O propoziție de forma *nu este adevărat că* φ (sau pur și simplu *nu* φ) se numește *negația* lui φ . De exemplu, *nu plouă* este negația propoziției *plouă*. Valoarea de adevăr a negației unei propoziții φ este opusul valorii de adevăr a propoziției φ . În momentul în care scriu acest text, propoziția *plouă* este falsă, și deci propoziția *nu plouă* este adevărată.

Exercițiul 8. *Dați un exemplu de o propoziție falsă care folosește atât o negație, cât și o conjuncție.*

Exercițiul 9. *În Exercițiul 6 ne întrebam dacă e posibil să reprezentăm sau exclusiv utilizând sau inclusiv. Dacă utilizăm și conjuncții și negații este posibilă această reprezentare?*

2.7 Echivalențe

O propoziție de forma φ *dacă și numai dacă* ψ se numește *echivalență* sau *dublă implicație*. O astfel de propoziție, în ansamblul său, este adevărată dacă φ și ψ au aceeași valoare de adevăr (ambele false sau ambele adevărate).

De exemplu, în momentul în care scriu acest text, propoziția *plouă dacă și numai dacă ninge* este adevărată. De ce? Deoarece atât propoziția *plouă* cât și propoziția *ninge* sunt false.

Exercițiul 10. *Care este valoarea de adevăr a propoziției* Numărul 7 este impar *dacă și numai dacă* 7 este număr prim?

O echivalență este, din punct de vedere semantic, conjuncția a două implicații: φ *dacă și numai dacă* ψ transmite aceeași informație cu

$$\underbrace{\varphi \text{ dacă } \psi}_{\text{implicația inversă}} \quad \text{și} \quad \underbrace{\varphi \text{ numai dacă } \psi}_{\text{implicația directă}}.$$

Propoziția φ *dacă* ψ este aceeași cu *dacă* ψ , *atunci* φ (doar că are altă topică). Propoziția φ *numai dacă* ψ are același înțeles cu φ *doar dacă* ψ și cu *dacă* φ , *atunci* ψ , după cum am discutat în secțiunea referitoare la implicații.

2.8 Conectorii logici

Cuvintele/expresiile *și*, *sau*, *dacă-atunci*, *doar dacă*, *non*, *dacă-și-numai-dacă* (și altele similare) sunt numite *conectori logici*, deoarece pot fi folosite pentru a conecta propoziții mai mici pentru a obține propoziții mai mari.

Atenție! O propoziție este *atomică* în logica propozițională dacă nu poate fi despărțită în propoziții mai mici separate de conectorii logici discutați mai sus. De exemplu, propoziția *orice număr natural este și număr întreg* este o propoziție atomică (în logica propozițională).

Aceeași propoziție nu mai este neapărat atomică într-o altă logică mai bogată. De exemplu, în logica de ordinul I (pe care o vom studia în partea a doua a cursului), avem doi conectori suplimentari numiți *cuantificatori*. În logica de ordinul I, propoziția *orice număr natural este și număr întreg* nu este atomică.

2.9 Ambiguități în limba română

Am prezentat mai sus limbajul logicii propoziționale: propoziții atomice conectate prin *și*, *sau*, *non* etc. Până în acest moment, am folosit limba română.

Totuși, limba română (și orice alt limbaj natural) nu este potrivită pentru scopul nostru din cauza *ambiguităților*.

Iată exemple de propoziții ambigue:

1. *Ion și Maria sunt căsătoriți* (înțelesul 1: între ei; înțelesul 2: căsătoriți, dar posibil cu alte persoane);
2. *Văd negru* (înțeles 1: sunt supărat; înțeles 2: mă simt rău; înțeles 3: nu este lumină în jur etc.);
3. *Trimit mesajul lui Ion* (înțeles 1: mesajul este al lui Ion și eu îl trimit, nu se știe unde; înțeles 2: am un mesaj și îl trimit către Ion);
4. *Nu vorbesc și mănânc* (înțeles 1: neg faptul că și vorbesc și mănânc; înțeles 2: nu vorbesc, dar mănânc).

Astfel de ambiguități sunt cel puțin neplăcute dacă scopul nostru este să determinăm valoarea de adevăr a unei propoziții (dacă nici măcar nu suntem siguri ce înseamnă propoziția). Pentru peste 2000 de ani, logica a lucrat cu limbaj natural. Nevoia de a introduce un limbaj formal, simbolic, fără ambiguități, a apărut în secolele XVIII - XIX, odată cu dezvoltarea logicii matematice. În logica simbolică/formală, pe care urmează să o studiem, vom lucra cu un limbaj artificial, numit limbaj formal, care este proiectat de o asemenea manieră încât să nu conțină nicio ambiguitate.

În fapt, primul limbaj formal pe care îl vom studia va fi *limbajul formal al logicii propoziționale* (pe scurt, *logica propozițională*).

În cele de mai sus, am observat care sunt dezavantajele și eventualele capcane ale logicii informale. În domeniul programării calculatoarelor, toate cerințele sunt exprimate via limbaj natural. Specificațiile unui produs software sunt de regulă transmise sub această formă. Este foarte important pentru cei care dezvoltă propriu-zis produsul software să identifice posibilele lacune și ambiguități din specificații pentru a preveni viitoare comportamente nedorite ale produsului. Unul din scopurile studierii logicii în domeniul informaticii este să dezvolte abilitatea programatorilor de a gândi sistematic și de a formula clar specificațiile unui produs.

2.10 Fișă de exerciții

Exercițiul 11. *Stabiliți care dintre următoarele expresii sunt propoziții:*

1. Tu ai un laptop.
2. Zăpada este albă.
3. Zăpada nu este albă.

4. Tatăl meu merge la serviciu și eu merg la școală.
5. Afară plouă, dar eu am umbrelă.
6. Mâine va ploua sau nu va ploua.
7. Dacă obțin notă de trecere la logică, voi sărbători.
8. $2 + 2 = 4$. (Doi plus doi egal cu 4.)
9. Roșu și Negru.
10. π .
11. Plouă?
12. Hai la pescuit!
13. x este mai mare decât 7.
14. Această afirmație este falsă.

Exercițiul 12. Pentru toate propozițiile identificate, stabiliți dacă sunt propoziții atomice sau compuse, iar dacă sunt compuse, stabiliți dacă sunt conjuncții, disjuncții, implicații, negații, echivalente.

Exercițiul 13. Stabiliți dacă propozițiile de mai jos sunt propoziții atomice sau compuse, iar dacă sunt compuse, stabiliți tipul acestora (conjuncții, disjuncții, implicații, negații, echivalente). Pentru fiecare propoziție compusă, discutați care sunt valorile de adevăr în funcție de valorile de adevăr ale componentelor.

1. Am mâncat atât de mult, încât mi-a fost rău.
2. Nu am rochie, nici pantofi.
3. Ma întorc acasă sau la amicul meu.
4. Merg afară dacă nu plouă.
5. Mă duc la el doar dacă nu mă ascultă.
6. Dacă nu merg la pescuit atunci soarele nu este rotund.
7. Dacă soarele nu este rotund atunci merg la pescuit.

Exercițiul 14. Reformulați exemplele de propoziții din Secțiunea 2.9 astfel încât ambiguitățile să fie evitate. Puteți să alegeți oricare înțeles.