

Memòria

Adopció de RISC-V com a arquitectura de referència: Una oportunitat per a l'actualització de continguts de l'assignatura Estructura de computadors (EC) del Grau en Enginyeria Informàtica (GEI) de la Facultat d'informàtica de Barcelona (FIB)

Projecte presentat per optar al Postgrau en Ensenyament Universitari en Ciències, Tecnologia, Enginyeria i Matemàtiques (STEM), Títol per la Fundació Politècnica de Catalunya

per **Roger Baig Viñas**

Barcelona, 18 de juny de 2026

Tutor/a: Agustín Fernández Jiménez
Col·laborador: Pedro José Martínez Ferrer
Agraïments: David López Álvarez

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC)

Taula de continguts

Resum 3

Abstract 5

1 Introducció 6
- 1.1 Context . . . 6
  - 1.1.1 L'eix d'arquitectura de computadors en el pla d'estudis FIB-GEI . . . 6
  - 1.1.2 L'assignatura Estructura de computadors (EC) — abans i després d'aquest projecte 7
- 1.2 Descripció de les necessitats, oportunitats o problemàtiques detectades . . . 10
  - 1.2.1 Necessitat: Actualització de l'arquitectura de referència . . . 10
  - 1.2.2 Oportunitat 1: Migració de l'arquitectura de referència . . . 10
  - 1.2.3 Oportunitat 2: Revisió i harmonització dels continguts . . . 10
  - 1.2.4 Oportunitat 3: Format obert, accessibilitat i processament automatitzat . . . 11
  - 1.2.5 Oportunitat 4: Enfortiment de la cohesió de l'equip docent . . . 11
- 1.3 Motivació personal i justificació de la temàtica escollida . . . 11
- 1.4 Relació amb la pràctica docent i el context institucional . . . 12
- 1.5 Marc teòric i conceptual: referències actuals i rellevants . . . 12
- 1.6 Revisió d'experiències o pràctiques similars . . . 12
- 1.7 Connexió amb el context del sistema educatiu català . . . 13
- 1.8 Definició de l'objectiu general i dels objectius específics del treball . . . 13

2 Metodologia 13
- 2.1 Enfocament metodològic i estratègies utilitzades . . . 13
  - 2.1.1 Etapa de producció . . . 14
  - 2.1.2 Etapa d'explotació . . . 18
- 2.2 Descripció de la innovació docent dissenyada . . . 18
  - 2.2.1 Innovació 1: Adopció de RISC-V com a arquitectura de referència . . . 19
  - 2.2.2 Innovació 2: Reestructuració pedagògica del temari . . . 19
  - 2.2.3 Innovació 3: Sistema de qualitat i harmonització terminològica . . . 19
  - 2.2.4 Innovació 4: Format obert, accessibilitat i processament automatitzat . . . 19
  - 2.2.5 Innovació 5: Recursos d'aprenentatge actiu . . . 20
- 2.3 Recollida de dades: instruments i població d'estudi . . . 21
- 2.4 Consideracions ètiques . . . 21

3 Resultats 22
- 3.1 Volum, abast i estat dels materials produïts . . . 22
- 3.2 Redisseny del contingut . . . 22
  - 3.2.1 Apunts . . . 22
  - 3.2.2 Problemaris i solucionaris . . . 25
  - 3.2.3 Laboratoris . . . 26
  - 3.2.4 Materials transversals . . . 26
- 3.3 Qualitat i harmonització . . . 26
- 3.4 Integració i accessibilitat . . . 27
- 3.5 Característiques diferencials del corpus . . . 29
- 3.6 Comparativa planificació–realitat . . . 29

4 Discussió, conclusions i altres propostes 30
- 4.1 Contrast dels resultats amb el marc teòric i estudis previs . . . 30
- 4.2 Valoració crítica del procés, obstacles i aprenentatges . . . 31

4.3 Propostes de millora o línies de continuïtat del projecte . . . 31
4.4 Connexions possibles amb altres àmbits o temàtiques educatives . . . 32

5 Bibliografia **33**

Annex 1: Reflexions sobre l'impacte de la IA generativa en la docència **34**
A1.1 La premissa que ho canvia tot . . . 34
A1.2 Com hem de fer front a l'ús de la IA a l'aula? . . . 34
A1.3 L'avaluació, l'element que ho ha de canviar tot . . . 35
A1.4 Som els professors necessaris? . . . 35
A1.5 L'atenció als estudiants excel · lents . . . 36
A1.6 El futur de la programació . . . 36
A1.7 On pot arribar la IA? . . . 36
A1.8 Bibliografia . . . 37

Llicència i programari **37**
5.1 Llicència . . . 37
5.2 Programari . . . 37

Resum

L'assignatura Estructura de computadors (EC) del Grau en Enginyeria Informàtica de la FIB-UPC emprava MIPS com a arquitectura de referència des dels seus orígens. La pèrdua de rellevància industrial d'aquesta ISA i la consolidació de RISC-V com a estàndard obert de facto —adoptat per la Unió Europea i pels autors dels principals llibres de text del camp— han motivat la migració integral dels materials docents escrits de l'assignatura.

L'objectiu ha estat revisar i actualitzar tot el corpus escrit (apunts de teoria, problemes, solucionaris i pràctiques de laboratori) substituint MIPS per RISC-V, i transformar simultàniament el format dels materials de PDF tancat a Quarto Markdown allotjat en un repositori de GitLab de la UPC. La metodologia s'estructura en dues etapes seqüencials: l'Etapa de producció, que comprèn el disseny del sistema, la generació del corpus i la seva revisió —primer individual i després col · legiada amb tot l'equip docent—, i l'Etapa d'explotació, de naturalesa iterativa per quadrimestres, que incorpora el *feedback* de l'aula i produeix els materials de suport a la docència. Dins de l'Etapa de producció, la producció assistida per IA generativa mitjançant Claude ha estat el factor determinant d'acceleració, multiplicant la velocitat i la cobertura respecte a les previsions inicials.

Els resultats superen les previsions inicials: s'ha completat el 100% del corpus de l'assignatura —teoria, problemes, solucionaris i laboratoris— i la Revisió Externa és en curs, amb protocol, calendari i grups de treball establerts. Un element diferencial del projecte és l'adopció sistemàtica del concepte de *Definition of Done* (DoD), adaptat del marc Scrum, per garantir la qualitat de cada fase: criteris binaris verificables per a la producció de cada unitat docent (DoD-UP), per a la revisió individual de conjunt (DoD-CC) i per a la revisió col · legiada (DoD-UR). Aquesta ortogonalitat en la definició de les unitats de treball —amb granularitats deliberadament diferents a cada fase— permet un escrutini minuciós i una uniformització de criteris que cobreix els tres eixos del projecte: la transició de la ISA (OE1), la transformació del format (OE2) i l'establiment del sistema de qualitat (OE3), i que fa el procés replicable i auditable.

El projecte demostra que la combinació d'un format obert i estructurat, la supervisió experta de la IA generativa i una metodologia àgil multiplica la capacitat de producció docent de qualitat —36 fitxers i

més de 100 figures SVG en els terminis previstos—, i ofereix un model exportable a altres assignatures STEAM.

Paraules clau: RISC-V, estructura de computadors, arquitectura de computadors, Quarto Markdown, metodologia àgil, aprenentatge assistit per intel · ligència artificial.

Lloc web: https://loi.pc.ac.upc.edu/ec

Repositori de materials: https://gitlab.upc.edu/ec (Cal tenir l'UPClink actiu per accedir-hi)

Abstract

The Computer Organization (EC) course in the Computer Engineering degree at FIB-UPC had used MIPS as its reference architecture since its inception. The declining industrial relevance of this ISA and the consolidation of RISC-V as an open, de facto standard — adopted by the European Union and by the authors of the leading textbooks in the field — motivated the comprehensive migration of the course's written teaching materials.

The goal was to revise and update the entire written corpus (lecture notes, problem sets, solution manuals and lab materials) replacing MIPS with RISC-V, while simultaneously transforming the material format from closed PDF to Quarto Markdown hosted in a UPC GitLab repository. The methodology is structured in two sequential stages: the Production Stage, encompassing system design, corpus generation and its revision — first individually and then collegially with the full teaching team —, and the Exploitation Stage, iterative by semester, which incorporates classroom feedback and produces teaching support materials. Within the Production Stage, AI-assisted production using Claude was the decisive acceleration factor, multiplying speed and coverage beyond initial projections.

The results exceed initial expectations: 100% of the course corpus has been completed — lecture notes, problem sets, solution manuals and lab materials — and the External Review is under way, with protocol, schedule and working groups established. A distinctive feature of the project is the systematic adoption of the *Definition of Done* (DoD) concept, adapted from the Scrum framework, to ensure quality at each phase: verifiable binary criteria for the production of each teaching unit (DoD-UP), for the individual full-corpus review (DoD-CC) and for the collegial review (DoD-UR). This orthogonality in the definition of work units — with deliberately different granularities at each phase — enables thorough scrutiny and criterion standardisation across the three project axes: ISA transition (OE1), format transformation (OE2) and quality system establishment (OE3), making the process replicable and auditable.

The project demonstrates that combining an open, structured format, expert supervision of generative AI and an agile methodology multiplies the capacity for quality teaching material production — 36 files and over 100 SVG figures within the planned schedule — and offers an exportable model for other STEAM subjects.

Keywords: RISC-V, computer organization, computer architecture, Quarto Markdown, agile methodology, AI-assisted learning.

Website: https://loi.pc.ac.upc.edu/ec

Repository: https://gitlab.upc.edu/ec (requires UPClink VPN)

1 Introducció

1.1 Context

1.1.1 L'eix d'arquitectura de computadors en el pla d'estudis FIB-GEI

L'assignatura d'Estructura de computadors (EC), de la qual soc coordinador des del segon quadrimestre (Q2) del curs 2024-25, és una assignatura del segon quadrimestre de la fase inicial (FI) del Grau en enginyeria informàtica (GEI) de la Facultat d'informàtica de Barcelona (FIB) de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC). Pel que fa a l'itinerari de l'estudiantat, tot i que el pla d'estudis del GEI no estableix requisits per a les assignatures de la FI, un gruix significatiu de continguts d'EC tenen els fonaments en continguts de l'assignatura de primer quadrimestre **Introducció als computadors** (**IC**). Superada la fase inicial, **Estructura de computadors** (**EC**) és requisit d'Interfícies de Computadors (CI) i Sistemes operatius (SO), totes dues de tercer quadrimestre, i **Arquitectura de computadors** (**AC**), de quart quadrimestre.

A **IC** els estudiants, sense necessitat de cap coneixement previ de circuits digitals, arriben a **comprendre en detall el disseny** d'un **computador teòric senzill** format per un processador que consta d'unes 3.000 portes lògiques i uns 100 biestables, una memòria principal i un subsistema d'entrada/sortida amb un teclat i una impressora. S'estudien les bases dels circuits digitals combinacionals i seqüencials, es construeixen processadors formats per una unitat de procés i una unitat de control ambdues específiques per a la resolució d'un sol problema i s'arriba al processador de l'ordinador fent generals la unitat de procés i la de control, creant un llenguatge màquina de 25 instruccions que serveix per a executar qualsevol programa que poguéssim escriure en un llenguatge d'alt nivell.

A **EC**, partint de la base del disseny de computadors senzills après a IC, els estudiants fan el salt cap a l'estudi d'un microprocessador real i d'ús industrial. L'assignatura aprofundeix en l'arquitectura del computador analitzant els conceptes fonamentals d'**ISA** (*Instruction Set Architecture*) i **ABI** (*Application Binary Interface*), entenent com es defineix la frontera entre el programari i el maquinari. Al llarg del curs, s'estudia en detall el funcionament d'un subconjunt representatiu del repertori d'instruccions d'un microprocessador: **MIPS** abans d'aquest projecte, **RISC-V** després d'aquest projecte. Aquest coneixement es **posa en pràctica** mitjançant la traducció de **programes curts** i fragments de codi de llenguatge C a llenguatge d'assemblador, de manera que l'estudiant comprèn com les estructures d'alt nivell es converteixen en instruccions reals. A més, s'introdueix la jerarquia de memòria amb l'estudi de la memòria cau, analitzant com la localitat de referència millora el rendiment global del sistema. Finalment, s'aborda la robustesa del sistema mitjançant la gestió d'excepcions i interrupcions, aprenent com el processador reacciona davant d'esdeveniments inesperats o peticions del sistema operatiu per garantir una execució controlada i segura.

A **AC**, els estudiants s'endinsen en l'estudi de computadors d'alt rendiment mitjançant l'estudi de la segmentació (*pipelining*). A través de l'arquitectura **x86**, s'analitza com dividir l'execució de les instruccions en etapes per augmentar el paral · lelisme a nivell d'instrucció, identificant i resolent els riscos estructurals, de dades i de control que sorgeixen en el flux de dades. Aquesta anàlisi es complementa amb l'estudi de la jerarquia de memòria avançada, on s'aprofundeix en el disseny i l'impacte de les memòries cau en el rendiment del sistema, així com en la gestió de la memòria virtual per garantir la protecció i l'eficiència en l'accés a les dades.

Així doncs, l'itinerari formatiu compost per IC, EC i AC, totes elles impartides pel Departament d'arquitectura de computadors (DAC), constitueix el tronc central de l'eix d'arquitectura del GEI de la FIB (Figura 1). Aquesta seqüència representa l'itinerari tradicional i consolidat en els plans d'estudis d'informàtica a nivell internacional, ja que permet una evolució pedagògica natural: després de comprendre la lògica digital amb un processador teòric a IC, el pas per **EC** utilitzant una arquitectura

RISC (*Reduced Instruction Set Computer*) és fonamental; el seu joc d'instruccions reduït i altament regular actua com el pas intermedi ideal, permetent a l'estudiant dominar els conceptes d'execució i traducció sense la complexitat del maquinari real. Finalment, a **AC** es culmina l'aprenentatge amb el model **CISC** (*Complex Instruction Set Computer*), on s'estudien arquitectures com x86 que, tot i la seva riquesa i heterogeneïtat d'instruccions, s'aborden amb èxit gràcies a la base sòlida adquirida prèviament.

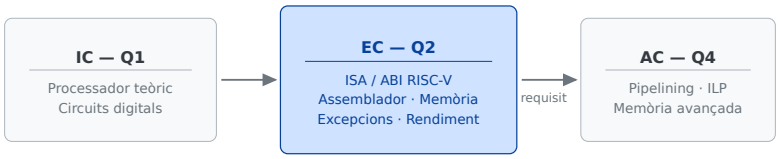


Figura 1: L'eix d'arquitectura de computadors del GEI (FIB-UPC). EC és el nexe central entre la lògica digital d'IC i el disseny d'alt rendiment d'AC.

1.1.2 L'assignatura Estructura de computadors (EC) — abans i després d'aquest projecte

1.1.2.1 Objectiu general

Fer que l'estudiant comprengui la frontera entre el programari i el maquinari i els mecanismes que regeixen el rendiment i la robustesa del sistema a través de l'estudi del funcionament intern d'un processador industrial de tipus RISC.

1.1.2.2 Resultats d'aprenentatge específics

Els resultats d'aprenentatge específics (RA) que es detallen a continuació són el producte directe de les decisions pedagògiques preses durant l'execució d'aquest projecte. La seva formulació segueix la taxonomia de Bloom en la seva versió revisada (Anderson & Krathwohl, 2001; Bloom et al., 1956), que classifica els objectius d'aprenentatge en sis nivells cognitius ascendents. Els RA de l'assignatura EC cobreixen deliberadament els quatre primers nivells —recordar, comprendre, aplicar i analitzar—, amb èmfasi especial en l'aplicació i l'anàlisi, que són els nivells propis d'una assignatura de segon curs d'enginyeria.

RA1. Anàlisi del rendiment i l'arquitectura

- Identificar els diferents nivells d'abstracció d'un computador i la seva descripció jeràrquica.
- Avaluar el rendiment i el consum de potència d'un sistema computacional aplicant mesures estàndard i la Llei d'Amdahl per determinar l'impacte de les millores en el maquinari.

RA2. Domini de la frontera Programari-Maquinari (ISA/ABI)

- Relacionar la representació de dades bàsiques (naturals, enters i caràcters) i complexes (punters, vectors, matrius i cadenes de caràcters) amb la seva implementació física en memòria.
- Traduir fragments de codi de llenguatge d'alt nivell (C) a llenguatge d'assemblador RISC-V, fent ús correcte de les estructures de control, les subrutines i les convencions de l'ABI.

RA3. Aritmètica del computador

- Explicar el funcionament dels algorismes de l'aritmètica d'enters (suma, resta, multiplicació i divisió) i la representació en coma flotant sota l'estàndard IEEE 754.

RA4. Optimització de la jerarquia de memòria

- Analitzar el comportament de la memòria cau i la memòria virtual per optimitzar el rendiment del sistema basant-se en els principis de localitat espacial i temporal.
- Dissenyar esquemes bàsics de mapatge i associativitat, i calcular mètriques de fallada de memòria per avaluar-ne l'eficiència.

RA5. Robustesa i gestió d'esdeveniments

- Comprendre el suport del maquinari per a la gestió d'excepcions i interrupcions, identificant com el processador reacciona davant de fallades de sistema (com les de la TLB) o crides al sistema operatiu (*syscalls*).

1.1.2.3 Seqüenciació temàtica i programació temporal

L'estructura dels continguts resultant de la revisió feta en aquest projecte és la següent.

La Taula 1 mostra la seqüenciació temàtica i temporal per a un quadrimestre de 13 setmanes resultant de la revisió i migració feta en aquest projecte. Aquesta seqüenciació ha estat dissenyada per construir progressivament els resultats d'aprenentatge específics (RA) de manera lògica i pedagògica, assegurant que els estudiants adquireixin les competències necessàries en cada etapa abans de passar a la següent.

Taula 1: Seqüenciació temàtica i temporal per a un quadrimestre de 13 setmanes

Set.	Tema	Contingut
1	1 Introducció	Descripció jeràrquica del computador Codificació de naturals i enters
2	2 Instruccions i tipus de dades bàsics	Introducció a la ISA de RISC-V. Formats d'instrucció. Variables, memòria, operands, punters, vectors i cadenes.
3	3 Traducció de programes	Operacions lògiques i desplaçaments. Sentències *if* i bucles. Subrutines. Compilació, assemblatge, enllaçat i càrrega.
4	4 Aritmètica entera i matrius	Suma, resta, multiplicació i divisió d'enters. Sobreeiximent. Matrius. Optimitzacions de bucle.
5	5 Coma flotant	Representació IEEE 754. Operacions en coma flotant. Coma flotant a RISC-V.
6	6 Rendiment i potència	Mesures de rendiment. Llei d'Amdahl. Potència i escalat de Dennard.
7	7 Memòria cau	Jerarquia de memòria. Polítiques d'emplaçament, reemplaçament i escriptura. Rendiment. Tipologia de fallades. Memòries cau multinivell
8	8 Memòria virtual	Paginació. Taula de pàgines. Fallada de pàgina. TLB.
9	9 Excepcions i interrupcions.	Registres CSR. Flux maquinari en detectar una excepció. Rutina de servei. Crides al sistema. Interrupcions. Fallada de TLB.

En l'elaboració dels materials s'ha parat una atenció especial a no emprar mai conceptes, terminologia o notació que no s'hagin introduït prèviament.

1.1.2.4 Relació entre resultats d'aprenentatge i seqüenciació temàtica

Temes 1 i 6: Alimenten el RA1 (Rendiment i arquitectura).

Temes 2, 3, 4 i 5: Construeixen el RA2 (Assemblador i traducció) i el RA3 (Aritmètica).

Temes 7 i 8: Construeixen el RA4 (Jerarquia de memòria).

Tema 9: Finalitza amb el RA5 (Excepcions i interrupcions).

1.1.2.5 Metodologia docent

Les classes de teoria combinen la part magistral, on el professor exposa, explica i exemplifica els conceptes objectiu de l'assignatura, amb la discussió amb l'alumnat sobre les alternatives i avantatges/inconvenients dels aspectes que convé debatre.

Les classes de problemes es realitzen de tres maneres: resolució directa del professor amb comentaris dels alumnes; resolució individual per part dels alumnes; i resolució cooperativa. En els dos darrers casos, el professor proporciona la retroalimentació necessària per corregir les parts incorrectes.

Les classes de laboratori segueixen una dinàmica similar a la de problemes, però la resolució d'exercicis es fa únicament en parelles i utilitzant eines que permeten la verificació semiautomàtica de les solucions. Els exercicis del laboratori s'avaluen de manera continuada per estimular el treball regular.

1.1.2.6 Materials docents

- Apunts de teoria
- Problemes i solucionaris
- Quadern de pràctiques de laboratori
- Compendi de referència RISC-V
- Webs: Guia docent (FIB), El Racó (campus virtual, FIB) i web de l'assignatura (DAC).

Els materials, originalment en format PDF sense fonts editables, han estat migrats íntegrament a format Quarto Markdown (`.qmd`) i es troben disponibles en un repositori de GitLab de la UPC, amb sortida en HTML i PDF des d'un únic punt d'entrada.

1.1.2.7 Avaluació

L'assignatura s'avalua mitjançant una fórmula ponderada que combina les proves escrites i el laboratori. El model d'avaluació és un element de context previ al projecte i no és objecte de modificació en aquesta migració, tot i que la reflexió sobre el seu futur s'aborda a l'Annex.

Nota numèrica: $0{,}20 \cdot \max\{\text{EP},\text{EF}\} + 0{,}60 \cdot \text{EF} + 0{,}20 \cdot (0{,}85 \cdot \text{EL} + 0{,}15 \cdot \text{AC})$

- EP: nota de l'examen parcial
- EF: nota de l'examen final
- EL: nota de l'examen de laboratori
- AC: nota de l'avaluació continuada de laboratori

Reavaluació: sí, cada quadrimestre.[1]

[1] La reavaluació al GEI de la FIB és un mecanisme extraordinari perquè els estudiants amb una nota final d'entre 3,5 i 4,9 puguin aprovar una assignatura suspesa. Aquest procés inclou una preparació prèvia obligatòria consistent en sis sessions de repàs de dues hores cadascuna i assistència obligatòria, dissenyades específicament per resoldre dubtes i reforçar els conceptes clau de la matèria. Un cop finalitzat aquest bloc de dotze hores de formació intensiva, l'estudiant realitza un examen final on la qualificació màxima que es pot obtenir i que constarà a l'expedient acadèmic és un 5 (Apte).

1.2 Descripció de les necessitats, oportunitats o problemàtiques detectades

1.2.1 Necessitat: Actualització de l'arquitectura de referència

L'arquitectura **MIPS** (Microprocessor without Interlocked Pipeline Stages) va revolucionar la computació en introduir el concepte de *pipeline* sense bloquejos, una innovació radical que delegava la gestió dels conflictes de dades al compilador en lloc del maquinari. Aquesta simplicitat es traduïa en un cicle d'instrucció únic, instruccions de longitud fixa de 32 bits i una estricta estructura *Load/Store*. En conjunt, MIPS va demostrar que un maquinari simplificat, en mans d'un programari intel · ligent, era la clau per a la potència computacional moderna.

Tot i la seva importància històrica, **MIPS ha quedat obsoleta** com a **arquitectura de referència** per a l'ensenyament de l'estructura de computadors. El seu desenvolupament pràctic es va aturar fa més d'una dècada, i el seu ecosistema d'eines i recursos educatius està estancat. A més, MIPS no reflecteix les tendències actuals de la indústria ni les necessitats de recerca en àrees com la seguretat, els sistemes embeguts o la computació d'alt rendiment.

1.2.2 Oportunitat 1: Migració de l'arquitectura de referència

RISC-V és un projecte d'ISA obert i lliure d'ús, sorgit de la Universitat de Califòrnia, Berkeley. Va ser ideat per alguns dels mateixos enginyers que van ser pioners en l'arquitectura MIPS, i es beneficia de més de quaranta anys d'experiència en el disseny d'arquitectures RISC. La seva llicència permissiva el distingeix d'altres arquitectures propietàries: qualsevol empresa o individu pot dissenyar, fabricar i vendre xips sense pagar drets de llicència. A més, RISC-V ha estat adoptada com a arquitectura de referència estratègica per diverses institucions i governs, incloent-hi la Unió Europea, que la veu com una eina clau per impulsar la sobirania tecnològica.

Des del punt de vista docent, RISC-V presenta avantatges clars sobre MIPS. L'ISA base (RV32I) conté menys de 50 instruccions, la qual cosa facilita la comprensió inicial dels conceptes fonamentals. A partir d'aquesta base minimalista, es poden afegir extensions de manera modular (multiplicació i divisió, coma flotant, operacions atòmiques, etc.), cosa que permet estructurar el curs de manera progressiva. A diferència de MIPS, RISC-V ha estat dissenyada des de zero tenint en compte les necessitats de la recerca i la docència modernes, evitant decisions de disseny heretades que generaven confusió als estudiants. Finalment, l'ecosistema obert d'eines —compiladors, simuladors, implementacions en maquinari— és accessible sense barreres legals ni de cost.

Així doncs, la migració de MIPS a RISC-V a EC no és només una actualització de continguts, sinó una decisió estratègica que alinea la formació dels futurs enginyers informàtics amb les tendències actuals i futures de la indústria i l'acadèmia.

1.2.3 Oportunitat 2: Revisió i harmonització dels continguts

S'aprofita l'actualització de la ISA per dur a terme una revisió exhaustiva de tot el material docent. L'objectiu principal és no només adaptar els exemples i la sintaxi al nou ISA, sinó també harmonitzar i millorar la qualitat general dels recursos. Aquesta revisió inclou els apunts de teoria, les llistes de problemes, els solucionaris, el quadern de laboratori i un nou compendi de referència RISC-V que substitueix completament l'anterior compendi MIPS.

Una decisió transversal d'aquesta revisió ha estat la redacció de tots els materials en **català normatiu**, amb un ús rigorós i consistent de la terminologia tècnica. La manca de recursos de referència en català per a l'arquitectura RISC-V va fer necessari elaborar un recull terminològic propi, documentat a

`contrib.qmd`, que estableix els equivalents catalans dels termes tècnics més habituals del camp. Aquest recull, fruit de les decisions preses durant la migració i validat per l'equip docent durant la Revisió Externa, té valor per a la comunitat docent més enllà d'EC: qualsevol assignatura del mateix àmbit pot adoptar-lo com a referència o punt de partida.

1.2.4 Oportunitat 3: Format obert, accessibilitat i processament automatitzat

Separar els continguts de les metadades de presentació i estructurar-los jeràrquicament i de manera sistemàtica els fa molt més accessibles tant a les persones com a les màquines. S'aprofita l'actualització per dissociar i curar els continguts, que és on resideix realment el valor.

L'ús sistemàtic d'un llenguatge de marcatge jeràrquic com **Markdown** té, comparat amb el format PDF actual dels materials, dos avantatges clau: l'**accessibilitat universal** (les tecnologies assistives com els lectors de pantalla poden navegar el contingut de manera fluida) i la **integració de la IA** (els models de llenguatge interpreten amb més precisió els documents ben estructurats, cosa que facilita la generació de resums, exercicis personalitzats i anàlisi de dades d'aprenentatge).

Quarto és la plataforma de publicació científica i tècnica de codi obert triada per a aquest projecte. Un únic fitxer `.qmd` es pot renderitzar a múltiples formats d'alta qualitat (HTML, PDF, Word) i el sistema compleix els criteris d'accessibilitat de l'estàndard WCAG 2.1 del W3C. La integració amb **GitLab** permet el control de versions i la col · laboració asíncrona entre el professorat, i garanteix que tots els materials estiguin sempre harmonitzats.

1.2.5 Oportunitat 4: Enfortiment de la cohesió de l'equip docent

L'equip docent d'EC és divers tant pel que fa a anys d'experiència docent com pels grups de recerca i les àrees d'interès. Actualment està format per 10 professors, 2 dels quals a temps parcial i 4 professors lectors, dos d'ells incorporats el curs 2025-26.

La diversitat en la trajectòria docent ofereix un espai de transferència de bones pràctiques i d'alineació pedagògica. Els professors novells poden adquirir estratègies i recursos dels docents sènior, mentre que aquests darrers tenen l'oportunitat d'aprendre a aprofitar noves eines (com les basades en IA) i mètodes pedagògics innovadors. La metodologia de treball en grup, que combina sessions de videotrucada puntuals i treball asíncron a través del repositori compartit, enforteix la cohesió de l'equip i potencia la cultura de col · laboració.

1.3 Motivació personal i justificació de la temàtica escollida

Des de la perspectiva del professor, la migració a RISC-V obre l'accés a un ecosistema de **recursos educatius moderns**. L'ecosistema RISC-V ha crescut exponencialment, amb simuladors avançats (com RARS), plaques de desenvolupament assequibles, com la Raspberry Pi Pico 2, amb doble nucli RP2350 RISC-V, per uns 5 EUR, que obre la porta a pràctiques amb maquinari real i les darreres edicions dels llibres de referència de Patterson i Hennessy, que utilitzen RISC-V com a arquitectura principal.

A més, la naturalesa oberta de l'arquitectura obre la porta a **projectes de recerca i innovació** molt més rellevants. Permet als estudiants i investigadors experimentar amb noves idees en disseny de processadors, seguretat, compiladors o sistemes operatius sense les restriccions d'un ISA propietari.

1.4 Relació amb la pràctica docent i el context institucional

La migració té implicacions directes tant en la praxi docent diària com en el posicionament estratègic de la institució. Des del punt de vista de la pràctica docent, s'abandonen eines de simulació com MARS o SPIM —estancades en el seu desenvolupament— per adoptar simuladors moderns com RARS, en desenvolupament actiu per part d'una comunitat global.

En el pla institucional, adoptar RISC-V és una decisió estratègica que transcendeix una sola assignatura. Posiciona el programa acadèmic a l'avantguarda, alineant-lo amb les iniciatives de sobirania tecnològica promogudes per governs i consorcis internacionals (com l'*European Processor Initiative*). A més, l'adopció d'una plataforma oberta fomenta un ecosistema d'innovació dins de la mateixa universitat i facilita projectes de final de grau, màsters i tesis doctorals sense les barreres de la propietat intel · lectual.

1.5 Marc teòric i conceptual: referències actuals i rellevants

El marc teòric principal per a la docència de RISC-V es troba en els llibres de text que han establert l'estàndard de facto en l'ensenyament de l'arquitectura de computadors durant dècades. Les edicions més recents d'aquestes obres han adoptat RISC-V com a eix central, la qual cosa representa l'aval acadèmic més significatiu per a la migració.

Patterson i Hennessy (2021) presenten en la segona edició de *Computer Organization and Design RISC-V Edition* l'obra de referència fonamental per a qualsevol curs introductori d'estructura o arquitectura de computadors. El fet que els seus autors, pioners de MIPS, hagin reescrit completament el llibre al voltant de RISC-V és la declaració més clara del canvi de paradigma. En la mateixa línia, Hennessy i Patterson (2022) consoliden en la sisena edició de *Computer Architecture: A Quantitative Approach* RISC-V com a arquitectura vàlida per a la computació d'altes prestacions.

A nivell d'especificació tècnica, Waterman i Asanović (eds., 2019) mantenen *The RISC-V Instruction Set Manual* com el document fundacional que defineix amb precisió l'ISA base i les extensions estàndard. RISC-V International publica a més un conjunt d'especificacions ratificades que cobreixen l'arquitectura privilegiada, la gestió d'interrupcions i la depuració, essencials per a projectes avançats.

A nivell pràctic, Patterson i Waterman (2017) ofereixen en *The RISC-V Reader* una guia concisa de 180 pàgines que sintetitza conceptes arquitectònics complexos en un manual directe, amb 75 «punts clau de disseny» que expliquen la lògica de RISC-V en contrast amb arquitectures anteriors. Winans (2022) completa el panorama amb *RISC-V assembly language programming*, una introducció de codi obert per a principiants allotjada a GitHub, que prioritza la configuració d'entorns reals i l'aplicació pràctica.

1.6 Revisió d'experiències o pràctiques similars

La transició de MIPS a RISC-V en l'àmbit acadèmic ha estat liderada per les mateixes institucions que van originar ambdues arquitectures. La Universitat de Califòrnia, Berkeley, bressol de RISC-V, ha estat la pionera: el seu curs CS 61C (*Great Ideas in Computer Architecture*) ha abandonat completament MIPS per adoptar RISC-V. El fet que Patterson i Hennessy hagin publicat les noves edicions del seu llibre canònic exclusivament amb RISC-V és el principal motor del canvi a escala global.

En l'escena internacional, la Universitat Cornell ha migrat la seva assignatura CS 3410 (*Computer System Organization and Programming*) a RISC-V de 64 bits, contribuint activament a l'ecosistema amb el seu propi intèrpret en línia i fent ús de simuladors visuals i interactius com Venus. A Europa, centres com l'ETH Zürich mostren un compromís profund amb RISC-V, especialment en recerca i cursos avançats on els estudiants aprenen a estendre l'ISA base amb instruccions personalitzades.

1.7 Connexió amb el context del sistema educatiu català

A Catalunya, la transició està en marxa i és objecte de debat i planificació activa. La FIB-UPC, un referent en enginyeria informàtica, ha formalitzat propostes d'innovació docent per executar aquesta mateixa migració en assignatures com EC. Les propostes justifiquen el canvi per l'obsolescència industrial de MIPS i l'alineament estratègic amb RISC-V, considerant-lo clau per a la sobirania tecnològica i per dotar els estudiants de competències rellevants. L'experiència a la UPC se centra a substituir els simuladors clàssics de MIPS per eines modernes com RARS, que manté una interfície familiar però adaptada al nou ISA. Aquesta adopció progressiva, impulsada per la creació de la Xarxa-RISC-V a nivell de recerca dins de la mateixa universitat, assegura una transició coherent que s'estén des de la docència bàsica fins a la investigació de frontera.

1.8 Definició de l'objectiu general i dels objectius específics del treball

L'**Objectiu general** d'aquest treball és l'actualització integral dels materials docents escrits de l'assignatura Estructura de Computadors (EC) del GEI a la FIB, substituint l'arquitectura MIPS per RISC-V com a nou referent d'aprenentatge.

Per assolir aquest objectiu general, es defineixen els objectius específics (OE) següents:

OE1. Transició de l'arquitectura de referència (ISA) Migrar el corpus teòric i pràctic de l'assignatura (apunts, problemes i laboratoris) de l'arquitectura MIPS a RISC-V, assegurant la correcta aplicació de l'especificació de l'ISA i de l'ABI, i incorporant continguts nous sense equivalent en el material MIPS original.

OE2. Transformació digital i accessibilitat Implementar un canvi de paradigma en el format dels materials, passant de formats tancats (PDF) a formats oberts i lleugers que facilitin el control de versions, garantint l'accessibilitat WCAG 2.1 i habilitant la navegació no lineal entre teoria, problemes i laboratoris, i facilitant la interacció amb eines d'aprenentatge basades en LLM.

OE3. Harmonització, esmenes i sistema de qualitat Realitzar una revisió crítica de tots els continguts per unificar el lèxic tècnic, corregir inconsistències acumulades i alinear el discurs docent amb els estàndards actuals de la indústria i la recerca, tot aprofitant l'expertesa dels professors de l'assignatura vinculats al Barcelona Supercomputing Center (BSC), i establir un sistema de qualitat documentat (`contrib.qmd`, `sigles.qmd`, DoD-UP/CC/UR) que faci el corpus auditable i replicable.

2 Metodologia

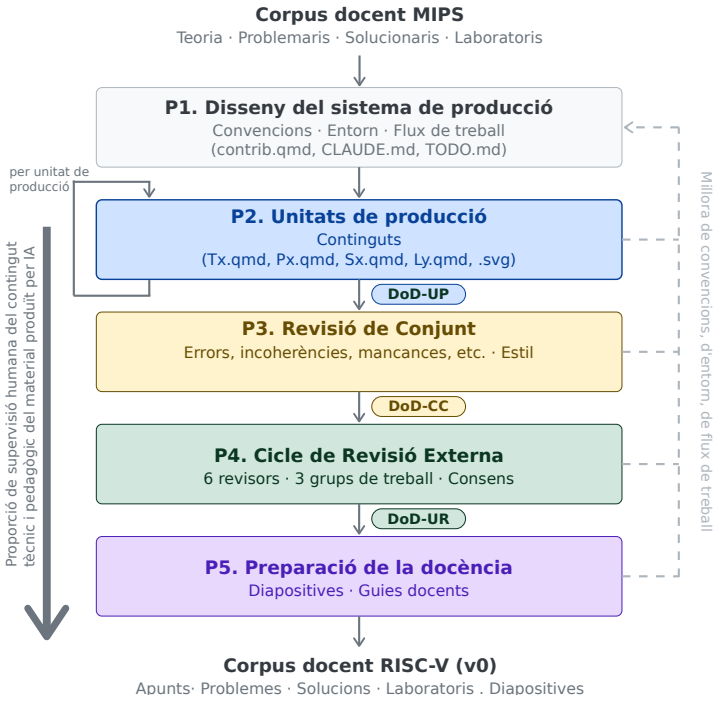
2.1 Enfocament metodològic i estratègies utilitzades

El projecte s'estructura en dues etapes seqüencials amb objectius i actors diferenciats. L'**Etapa de producció** comprèn les fases de disseny, producció, integració, revisió de conjunt i revisió externa; té com a entrada el corpus de materials MIPS (teoria, problemaris, solucionaris i laboratoris) i com a producte el corpus RISC-V en la seva versió inicial (v0). L'**Etapa d'explotació**, de naturalesa iterativa per quadrimestres, pren el corpus v0 com a punt de partida i el consolida progressivament a través de cicles de preparació docent i revisió; a cada iteració, el *feedback* de l'aula retroalimenta la fase de revisió externa i n'incrementa la versió (v1, v2, …). Aquesta divisió permet tancar formalment el cicle de producció abans del primer desplegament i garanteix que la millora contínua s'incorpora de manera sistemàtica un cop els materials estan en ús.

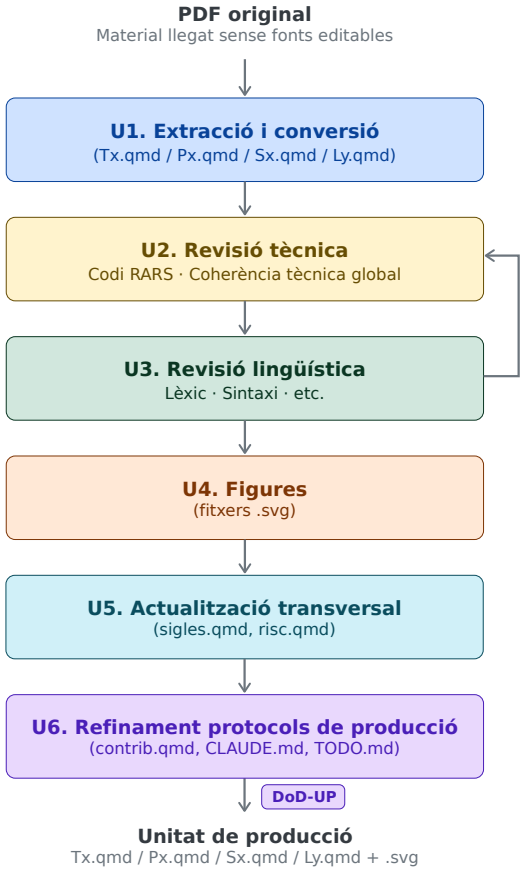
2.1.1 Etapa de producció

L'execució del projecte s'ha basat en un enfocament de gestió àgil de projectes (*agile*), adaptant elements del marc Scrum (Schwaber & Sutherland, 2020) a la creació de continguts educatius. Aquesta tria respon a la necessitat de gestionar una migració complexa de materials llegats (*legacy*) en un entorn de col · laboració docent on el temps disponible és fragmentat i variable.

Tal com mostra la Figura 2, l'estratègia central ha estat la **migració iterativa i incremental**: en lloc d'abordar la totalitat del temari com un bloc monolític, s'ha treballat per unitats temàtiques funcionals, cadascuna seguint un cicle de producció que integra la IA generativa com a eina d'acceleració.



(a) **Fases de l'Etapa de producció**. La fletxa de l'esquerra indica el grau de supervisió humana del contingut tècnic i pedagògic: és mínima a P2 (Unitats de producció) i màxima a P4 (Cicle de Revisió Externa).



(b) **Cicle de producció de cada unitat de producció**. Les fases U2 i U3 s'alternen iterativament fins a satisfer la DoD-UP. La fase U6 capitalitza l'aprenentatge acumulat per a les unitats següents.

Figura 2: **Etapa de producció en conjunt**. L'esquema de l'esquerra (Figura 2a) mostra les cinc fases macro del projecte i el grau creixent de supervisió humana al llarg del procés. L'esquema de la dreta (Figura 2b) desplega el cicle intern de cada unitat de producció (P2): les sis etapes que van des de l'extracció del material original fins al refinament dels protocols, amb la iteració U2–U3 com a mecanisme de qualitat central.

La decisió d'adoptar eines d'IA generativa va ser determinant per a l'assoliment dels resultats. Inicialment es va explorar NotebookLM (Google, 2024), disponible al Google Workspace de la UPC, per a l'extracció de continguts dels PDF originals, la qual cosa va permetre validar la viabilitat de l'enfocament. Tot i que la seva orientació cap a la consulta de documents el feien útil per a una primera aproximació, el punt d'inflexió real del projecte va arribar amb l'adopció de Claude (Claude 2025)

com a eina principal. La capacitat de mantenir el context complet del projecte —convencions d'estil, decisions prèvies, estructura dels materials— en una sola sessió de treball va eliminar la fragmentació i va permetre una producció de molt més alta qualitat. La velocitat de producció va augmentar de manera espectacular i la cobertura va superar amb escreix les previsions inicials. El pla inicial preveia acabar únicament la teoria per al lliurament final; finalment s'ha generat tot el material docent, s'ha formatat, s'ha fet una primera Revisió de Conjunt, i ja s'ha començat a fer la Revisió Externa, amb la revisió dels T2 i T3, que són el pinyol de l'assignatura, molt avançada.

Un segon factor d'acceleració va ser l'efecte d'aprenentatge acumulat al llarg del projecte: a mesura que avançava la migració, el coneixement sobre les convencions, les decisions de contingut i les particularitats de cada tema s'anava consolidant al repositori (fitxers `contrib.qmd`, `CLAUDE.md`), de manera que cada tema nou s'abordava amb un context més ric i produïa resultats de millor qualitat en menys iteracions.

El procés s'ha estructurat en cinc fases seqüencials, cadascuna amb un objectiu i un grau d'implicació de l'equip docent diferenciats. La Figura 2a mostra l'estructura de l'Etapa de producció; la Figura 2b detalla el cicle de producció de cada unitat de producció individual. El plantejament de partida va ser que el professor responsable de la migració assumís íntegrament les fases individuals —P1 (Disseny del sistema de producció), P2 (Unitats de producció) i P3 (Revisió de Conjunt)— de manera que la resta de l'equip docent pogués concentrar el seu temps en la fase col · legiada P4 (Cicle de Revisió Externa), on l'aportació disciplinar és més valuosa. Aquesta divisió del treball ha permès prendre les decisions de contingut i format de manera orgànica i coherent, i ha estat la condició que ha fet possible assolir el 100% del material en els terminis previstos. Les fases P3 i P4 han tingut com a objectiu consolidar la qualitat del corpus abans del desplegament: la Revisió de Conjunt (P3) per detectar i corregir errors i incoherències de manera individual, i el Cicle de Revisió Externa (P4) per validar els continguts col · legiadament amb tot l'equip docent.

El concepte de *Definition of Done* (DoD) prové del marc Scrum (Schwaber & Sutherland, 2020) i ha estat adoptat i sistematitzat en la gestió de fluxos de producció iteratius per Poppendieck i Poppendieck (2003). En el context d'aquest projecte s'ha definit una DoD específica per a cada fase que implica producció o validació de contingut. La Taula 2 en resumeix l'estructura:

Taula 2: Estructura de les tres *Definitions of Done* del projecte. L'ortogonalitat entre les unitats de treball de cada fase —amb granularitats diferents— permet un escrutini adaptat a l'objectiu de cadascuna.

DoD	Fase	Unitat de treball	Nom de la unitat de treball	Naturalesa dels criteris
UP	Producció	Tema / Problemari / Solucionari / Sessió	Unitat de producció	Binaris individuals
CC	Revisió de Conjunt	Corpus sencer	-	Binaris globals
UR	Revisió Externa	Tema + Problemari + Solucionari / Sessió	Unitat de revisió (externa)	Binaris col · legiats

2.1.1.1 Fase P1: Disseny del sistema de producció

Molta d'aquesta feina l'he fet en paral · lel a la fase P2, de manera orgànica al llarg del projecte.

2.1.1.1.1 Productes

- Establiment de l'eina d'IA generativa (NotebookLM, primer, i Claude, després).
- Definició de les convencions d'estil i format (a fitxer `contrib.qmd`).
- Definició de l'estructura i organització dels materials (a `_quarto.yml`).

- Definició del flux de treball i les fases de producció (Cicle de producció, Revisió de conjunt i Revisió externa).
- Entorn de producció: repositori de GitLab, estructura de fitxers, plantilla de fitxers `.qmd`, etc.

Durant la resta de fases, he fet revisió constant d'aquests productes per integrar-hi l'aprenentatge adquirit a mesura que avançava el projecte, seguint sistemàticament el procediment d'esmenar primer els protocols i plantilles, aplicar-los al cas d'ús que n'havia motivat el canvi i, finalment, actualitzar els documents ja produïts.

2.1.1.2 Fase P2: Unitats de producció

L'ordre d'execució ha estat:

1. Tota la teoria
2. Tots els problemes i solucionaris
3. Tots els laboratoris

2.1.1.2.1 Productes

- 9 fitxers `Tx.qmd`, essent `x` el número de tema.
- 9 fitxers `PE_Tx.qmd`.
- 9 fitxers `PS_Tx.qmd`.
- 6 fitxers `Ly.qmd`, essent `y` el número de sessió.

Cada fitxer `.qmd` constitueix una **unitat de producció** independent: s'aborda de manera seqüencial i, un cop tancada, no es torna a reobrir llevat de decisions de la Revisió de Conjunt.

- **Grau de supervisió humana del contingut tècnic i pedagògic**: Bàsic.

2.1.1.2.2 Cicle de producció unitària

El cicle de producció de cada unitat de producció (Figura 2b) està format per les fases següents, que s'executen de manera seqüencial:

U1. Extracció i conversió assistida per IA Secció a secció, a partir del PDF original.
U2. Revisió tècnica Verificació de la correcció de tot el codi assemblador RISC-V al simulador RARS i revisió de la coherència tècnica global del tema.
U3. Revisió lingüística Harmonització del lèxic i l'estil segons les convencions de `contrib.qmd`. Les fases U2 i U3 s'alternen iterativament fins a satisfer la DoD-UP.
U4. Figures Generació de les figures SVG en versió *light* i *dark*.
U5. Actualització transversal Incorporació de les sigles noves al glossari (`sigles.qmd`) i actualització d'altres materials afectats (`riscv.qmd`).
U6. Refinament dels protocols de producció Actualització de `contrib.qmd`, `CLAUDE.md` i `TODO.md` amb les decisions i aprenentatges del tema, per capitalitzar-los en les unitats següents.

Definition of Done d'Unitat de Producció (DoD-UP)

Una unitat de producció de P2 es considera acabada quan compleix tots els criteris següents, agrupats en tres categories:

Qualitat tècnica

- Tot el codi assemblador RISC-V s'executa sense errors al simulador RARS.
- S'han eliminat totes les referències a l'arquitectura MIPS.
- Les figures SVG estan generades en versió *light* i *dark* i integrades correctament al `.qmd`.

Qualitat editorial

- El contingut textual és complet i correctament formatat en Quarto Markdown.
- El lèxic i l'estil estan harmonitzats segons les convencions de `contrib.qmd`.
- El glossari de sigles (`sigles.qmd`) ha estat actualitzat amb les sigles noves del tema.

Integritat estructural

- El document és funcional dins de l'estructura del repositori GitLab (renderitza correctament en HTML i PDF).

2.1.1.3 Fase P3: Revisió de conjunt

- Detecció i esmena, quan no s'hagi de fer col · legiadament, d'errors, d'incoherències i d'oportunitats de millora tant tècniques com lingüístiques i pedagògiques.
- Figures, enllaços, harmonització d'estil, etc.
- Documentació de les decisions que s'han de prendre col · legiadament.
- **Grau de supervisió humana del contingut tècnic i pedagògic**: Moderat.

Definition of Done de Corpus Complet (DoD-CC)

La DoD-CC s'aplica al corpus sencer (no tema per tema) i verifica la coherència global del conjunt:

- Tots els fitxers `.qmd` han superat la DoD-UP.
- No hi ha inconsistències terminològiques o d'estil *entre* fitxers (lèxic, nomenclatura de registres, convencions de format).
- Totes les figures SVG segueixen la mateixa paleta de colors i convencions visuals documentades a `contrib.qmd`.
- El glossari `sigles.qmd` cobreix totes les sigles que apareixen al corpus.
- Tots els enllaços interns i referències creuades entre fitxers són funcionals.
- Les decisions pendents de consens col · legiat estan documentades com a *issues* oberts a GitLab.

2.1.1.4 Fase P4: Cicle de revisió externa

- El meu rol com a coordinador de la revisió: facilitació de la creació dels grups de treball (GTs), assignació de temes als GT, recopilació i sistematització dels comentaris. Definició dels procediments d'esmena i de presa de decisions; GitLab: protocol per a *issues*, *merge requests*, etc.
- Revisors externs: 6, comptant-m'hi jo. Cada revisor s'encarregarà de revisar un o més temes, segons la seva experiència i disponibilitat. La revisió es fa de manera col · laborativa, amb sessions de videotrucada per discutir els comentaris i arribar a consensos quan sigui necessari.
- **Grau de supervisió humana del contingut tècnic i pedagògic**: Alt.

Definition of Done d'Unitat de Revisió (DoD-UR)

La **unitat de revisió** de P4 és diferent de la unitat de producció de P2: per a cada tema `x`, la unitat de revisió és el conjunt `{Tx.qmd, PE_Tx.qmd, PS_Tx.qmd}`, que es revisa conjuntament per garantir la coherència entre teoria, problemes i solucionari. Cada sessió de laboratori `Lx.qmd` es revisa com a unitat independent. Aquesta ortogonalitat entre les unitats de producció i les unitats de revisió és una decisió de disseny deliberada: permet que la fase P2 avanci tema a tema amb independència, mentre que la fase P4 avalua la coherència del conjunt teoria-problemes-solucionari com una unitat indivisible.

Una unitat de revisió de P4 es considera aprovada quan:

- Ha estat revisada per almenys un membre de l'equip docent extern al professor responsable de la migració.
- El codi assemblador ha estat verificat per un segon revisor.
- Tots els *issues* de GitLab oberts durant la revisió han estat resolts o tancats com a decisió de consens documentada.
- No hi ha inconsistències terminològiques respecte a les unitats de revisió ja aprovades.
- El tema ha estat aprovat mitjançant *merge request* amb almenys una aprovació explícita a GitLab.

2.1.1.5 Fase P5: Preparació de la docència

- Revisió individual dels dos professors que faran la primera docència de l'assignatura al Q1 del curs 2026-27.
- Per a la meva docència al Q1 del curs 2026-27 generaré diapositives que estaran disponibles públicament.
- **Grau de supervisió humana del contingut tècnic i pedagògic**: Màxim.

2.1.2 Etapa d'explotació

L'Etapa d'explotació és de naturalesa iterativa: s'executa per quadrimestres i té com a entrada el corpus RISC-V (v0) produït durant l'Etapa de producció (Figura 3). Cada iteració consta de dues fases. La **Fase E1 (Disseny del sistema d'explotació)** estableix les convencions, l'entorn i el flux de treball per al quadrimestre en curs, actualitzant els fitxers de referència `contrib.qmd`, `CLAUDE.md` i `TODO.md`. La **Fase E2 (Preparació docent)** produeix els materials de suport a la docència: principalment les diapositives de classe (`Dx.qmd` i fitxers `.svg` associats), que no formen part del corpus v0 i es generen per primera vegada en la primera iteració d'explotació. El *feedback* recollit durant el quadrimestre —errors detectats, exercicis ambigus, propostes de millora— s'incorpora en una nova iteració de revisió externa i incrementa la versió del corpus (v1, v2, …). Aquesta arquitectura garanteix que els materials millorin de manera sistemàtica i traçable amb cada cicle d'ús real a l'aula.

2.2 Descripció de la innovació docent dissenyada

La innovació docent dissenyada s'articula en cinc eixos, cadascun adreçant una dimensió diferent de la millora del corpus:

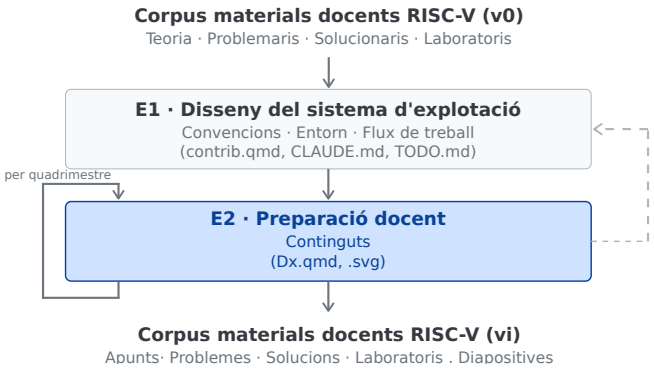


Figura 3: Fases de l'Etapa d'explotació. Cada iteració correspon a un quadrimestre d'ús a l'aula. La fase E2 produeix les diapositives de classe (`Dx.qmd`), no incloses al corpus v0. El *feedback* de l'aula incrementa la versió del corpus a cada cicle.

2.2.1 Innovació 1: Adopció de RISC-V com a arquitectura de referència

L'adopció de RISC-V no és només un canvi d'arquitectura, sinó una aposta per un estàndard obert i modular. El nou programa se centra en la claredat pedagògica que ofereix aquesta ISA: elimina conceptes heretats de MIPS que generaven confusió (com els *branch delay slots* o els registres de multiplicació especials `HI`/`LO`) i introdueix la modularitat com a principi estructurador del curs, presentant primer la base RV32I i afegint progressivament les extensions M (multiplicació/divisió) i F (coma flotant).

2.2.2 Innovació 2: Reestructuració pedagògica del temari

S'ha aprofitat la migració per reordenar continguts que en l'estructura original eren inconnexos o excessivament densos. La justificació pedagògica i les taules de correspondència detallades es troben a la § 3.2.

2.2.3 Innovació 3: Sistema de qualitat i harmonització terminològica

La migració ha estat l'ocasió per establir un sistema de qualitat documentat que no existia en cap forma en el material original. El sistema consta de tres artefactes complementaris: `contrib.qmd`, que recull les convencions d'estil, format, paleta SVG i decisions per tema; `sigles.qmd`, que centralitza totes les sigles de l'assignatura i s'actualitza incrementalment durant la producció; i el sistema de DoDs, que estableix criteris binaris verificables per garantir la qualitat de cada fase. Paral · lelament, s'ha dut a terme una harmonització terminològica exhaustiva en català normatiu, amb decisions documentades a `contrib.qmd` que constitueixen un recurs de referència per a la comunitat docent més àmplia.

2.2.4 Innovació 4: Format obert, accessibilitat i processament automatitzat

La transició a Quarto Markdown permet que els materials siguin llegibles tant per humans com per màquines, seguint el paradigma *Docs-as-Code*. L'ús de GitLab com a repositori centralitzat facilita el control de versions i la sincronització entre el professorat. La renderització del projecte Quarto a HTML permet establir un **punt d'entrada únic**: una URL que dona accés a tot el material en HTML (navegable, *responsive* i accessible WCAG 2.1) i un únic fitxer PDF descarregable. La llegibilitat per màquines habilita la interacció amb eines d'aprenentatge basades en LLM, que poden generar resums, exercicis personalitzats i anàlisi de dades d'aprenentatge a partir del corpus estructurat.

2.2.5 Innovació 5: Recursos d'aprenentatge actiu

Els materials incorporen un sistema de senyalització visual i recursos de pràctica que reforcen l'aprenentatge actiu en dues dimensions complementàries.

Els materials fan servir cinc tipus de *callouts* —blocs visuals diferenciats— amb funcions pedagògiques ben delimitades:

- **RISC-V**: documentació tècnica de la ISA o l'ABI directament aplicable. Separa els aspectes normatius de l'especificació de l'exposició didàctica del professor, evitant que l'estudiant confongui el «per què» amb el «com és».
- **EC**: conveni específic de l'assignatura. Marca les decisions que no deriven de l'especificació RISC-V sinó dels acords internals del curs (convencions de nomenament, simplificacions pedagògiques, restriccions de l'avaluació).
- **Exemple**: il · lustracions aplicades dels conceptes. Permeten seguir la prosa expositiva sense interrompre el fil argumental.
- **Essencial**: contingut indispensable que l'estudiant ha de dominar per poder progressar. Actua com a senyal explícit de prioritat en un temari dens.
- **Aprofundiment**: contingut opcional, no avaluable. Explicacions avançades, connexions amb recerca activa, punts d'entrada per a l'estudiant que vulgui explorar per la seva banda.

El *callout* d'**Aprofundiment** respon a una necessitat pedagògica real i sistemàticament poc atesa: la bretxa entre el disseny curricular orientat al perfil mitjà i les necessitats dels estudiants amb capacitat i motivació superiors. A EC, el Centre de Formació Interdisciplinària Superior (CFIS) aporta cada any un grup d'estudiants que arriben al curs amb una base sòlida i una curiositat genuïna per la matèria, però que sovint perden l'estímul intel · lectual a mesura que el curs avança —precisament perquè el material no ofereix res més enllà del mínim exigible. El *callout* d'Aprofundiment no és un recurs per als que van sobrats: és el reconeixement que un bon material docent ha de tenir horitzons oberts, no un sostre baix.

La decisió d'usar negretes de manera estratègica —marcant termes tècnics en la seva primera aparició i els conceptes clau de cada paràgraf— completa el sistema de senyalització visual. En un context on l'estudiant cada vegada consumeix més contingut en pantalla i en mode de lectura no lineal (cercant, saltant, rellegint punts concrets), el ressaltat explícit és una eina de navegació, no un ornament tipogràfic.

Pel que fa als recursos de pràctica, el projecte incorpora una **pràctica voluntària, assistida amb IA, sobre vectorització RISC-V**, desenvolupada pel col · laborador Pedro José Martínez Ferrer com a part del seu PFP del Màster STEAM, disponible a https://github.com/estructura-de-computadors/. Utilitza el producte escalar de vectors i la multiplicació de matrius com a cas d'estudi per a la vectorització amb RISC-V, i fa interaccionar l'alumne amb agents d'IA que actuen com a tutors personalitzats al llarg de tota la pràctica.

Les cinc innovacions responen de manera natural a les oportunitats identificades a la § 1: la Innovació 1 materialitza l'Oportunitat 1 (migració de l'ISA); la Innovació 2 dona resposta a l'Oportunitat 2 (revisió i harmonització del temari); la Innovació 3 i la Innovació 4 cobreixen conjuntament l'Oportunitat 3 (format obert, accessibilitat i processament automatitzat); i la Innovació 5 emergeix del procés com a extensió natural sense correspondència directa amb cap oportunitat prèviament declarada. L'Oportunitat 4 (enfortiment de la cohesió de l'equip docent) és transversal a totes les innovacions i es materialitza especialment a través del sistema de qualitat (Innovació 3) i del repositori compartit (Innovació 4).

2.3 Recollida de dades: instruments i població d'estudi

Atès que el projecte es troba en la Fase de Revisió Externa (P4), la recollida de dades s'ha estructurat en dues fases temporals amb objectius diferenciats.

Fase actual (P3–P4, fins al lliurament): La recollida se centra en la validació experta i el control de qualitat del procés, més que en l'avaluació directa de l'estudiantat.

Població d'estudi: El grup de treball està format pel professorat de l'assignatura d'EC i membres de l'eix d'arquitectura del Departament d'Arquitectura de Computadors (DAC), incloent-hi investigadors vinculats al Barcelona Supercomputing Center (BSC).

Instruments de recollida (P3–P4):

- ***Definitions of Done* (DoD-UP, DoD-CC i DoD-UR)**: Sistema de criteris de tancament per fase (vegeu § 2.1). Actuen com a instrument de verificació formal en cada fase del procés.
- **Sessions de coordinació**: Videotrucades puntuals i treball asíncron a través del repositori GitLab, on les *pull requests* i els *commits* documenten les decisions de contingut.
- **Registres de traçabilitat (logs de IA)**: Documentació del procés de conversió assistida per IA per avaluar l'eficiència de l'eina i la necessitat de supervisió humana.

Fase prospectiva (Implementació, Q1 2026-27): La primera validació amb estudiants reals tindrà lloc al primer quadrimestre del curs 2026-27, en 2 grups de teoria i 3 o 4 grups de laboratori. Els instruments previstos són:

- **Seguiment del rendiment acadèmic**: Comparativa de les taxes de superació als exàmens, amb focus en els temes que presenten històricament les dificultats més altes (T7 Memòria cau i T9 Excepcions i interrupcions), contrastant amb els resultats dels cursos anteriors amb materials MIPS.
- **Enquesta de satisfacció**: Qüestionari focalitzat en la claredat i la usabilitat dels materials en format web (navegació, accessibilitat, mode fosc/clar, funcionalitat del cercador integrat).
- **Registre d'incidències**: Recollida sistemàtica d'errors de codi no detectats a la validació prèvia i de formulacions d'exercicis ambigues, reportats pels professors durant les sessions de laboratori.

2.4 Consideracions ètiques

Tot i que en aquesta fase el treball no inclou experimentació directa amb dades personals dels estudiants, s'han tingut en compte les dimensions ètiques següents:

1. **Ús responsable de la IA**: La utilització de la IA en l'elaboració dels materials s'ha regit pel principi de la supervisió humana crítica. S'ha vetllat per evitar l'acceptació d'«al · lucinacions» tècniques que poguessin perjudicar la qualitat de l'aprenentatge.
2. **Accessibilitat i sostenibilitat**: L'elecció del format Markdown respon a un compromís ètic amb l'accessibilitat digital i el manteniment futur per part de la comunitat docent.
3. **Transparència**: Els estudiants han estat informats de l'ús d'eines d'IA en la creació del material i han rebut pautes per a un ús ètic i pedagògic d'aquestes eines en el seu procés d'estudi.

3 Resultats

3.1 Volum, abast i estat dels materials produïts

La migració ha assolit el **100% del material total** de l'assignatura. La revisió externa ha començat: protocol, calendari i grups de treball estan establerts. La Taula 3 en detalla el volum per categoria.

Taula 3: **Volum de materials produïts** per categoria. *En revisió externa*: contingut complet, codi validat a RARS i lèxic harmonitzat; en revisió col · legiada. *En procés*: contingut parcialment migrat, pendent de completar. *Actiu*: document de referència transversal en actualització contínua.

Categoria	Fitxers .qmd	Estat a 18 de juny
Teoria (T1–T9)	9	En revisió externa
Laboratori (L1–L6)	6	En revisió externa
Enunciats de problemes (PE_T1–T9)	9	En revisió externa
Solucionaris (PS_T1–T9)	9	En revisió externa
Materials transversals (riscv, sigles, contrib)	3	Actius
Total	**36**	

A aquests fitxers s'afegeixen més de cent figures SVG (cadascuna en versió *light* i *dark*, ~208 fitxers en total), que abasten diagrames de formats d'instrucció, mapes de l'espai de memòria, esquemes de polítiques de memòria cau i diagrames de flux per a la gestió d'excepcions. Les figures han estat generades íntegrament en SVG, abandonant Mermaid per limitacions de qualitat— seguint una paleta de colors i convencions documentades a `contrib.qmd`. El format SVG garanteix renderització d'alta qualitat tant en pantalla com en impressió, i és compatible amb les tecnologies assistives. S'espera que els processos de revisió pendents en generin algunes més.

3.2 Redisseny del contingut

La migració ha estat l'ocasió per reordenar continguts que en l'assignatura original eren inconnexos o excessivament densos. Els canvis estructurals més rellevants respecte a l'organització original de l'assignatura són els següents:

- El Tema 1 original, que agrupava la introducció conceptual i els continguts de rendiment i potència, temes força inconnexos, s'ha dividit en dos temes independents: el nou T1 manté la introducció al computador i la codificació de dades, mentre que el nou T6 recull els continguts de rendiment i potència, com avantsala del tema dedicat a la millora del rendiment d'una de les parts funcionals bàsiques dels microprocessadors, la memòria cau (T7).
- L'aritmètica entera —que en l'estructura original formava part del T5 juntament amb la coma flotant i se'n feia un tractament indirecte de les instruccions— s'ha reallotjat al T4, i el T5 nou queda dedicat exclusivament a la coma flotant. Aquesta separació redueix la càrrega cognitiva de cada tema i clarifica la frontera conceptual entre els dos tipus d'aritmètica.

3.2.1 Apunts

La migració de la teoria ha requerit la reescriptura íntegra dels temes relacionats amb l'ISA (T2, T3, T4, T5 i T9), on la diferència entre MIPS i RISC-V és més profunda. Els temes de jerarquia de memòria (T7 i T8) han requerit menys reescriptura de base però s'han ampliat amb continguts nous rellevants per al context tecnològic actual (GPUs, sistemes multicore, taules de pàgines multinivell).

La Taula 4 mostra la correspondència entre els temes originals (MIPS) i els nous (RISC-V), organitzada per categoria. La Taula 5 detalla els continguts nous que s'han introduït a RISC-V sense equivalent previ a MIPS.

Taula 4: **Teoria**. Equivalència entre temes i continguts dels materials antics (MIPS) i els nous (RISC-V).

Material RISC-V (nou)	Equivalent MIPS (original)	Observacions
T1. Introducció		
T1.1. La gestió de la complexitat: Capes i interfícies	T1 §1. Descripció jeràrquica	Reorganitzat i ampliat
T1.2. El cicle de vida del programa	T1 §1. Descripció jeràrquica	Segregat com a secció independent
T1.3. El model de Von Neumann	T1 §1. Descripció jeràrquica	Segregat com a secció independent
T1.4. Codificació de naturals en base 2	T2 §5. Repàs de naturals	Avançat a T1; integrat al flux conceptual
T1.5. Codificació d'enters en base 2	T2 §6. Repàs d'enters	Avançat a T1; integrat al flux conceptual
T2. Instruccions i tipus de dades bàsics		
T2.1. Introducció a l'ISA de RISC-V	T2 §1. Introducció a la MIPS ISA	Reescrit íntegrament per a RISC-V
T2.2. Format de les instruccions RV32I	T2 §8. Format de les instruccions MIPS	Reescrit íntegrament per a RISC-V
T2.3. Estructura d'un programa en assemblador	T2 §3. (implícit)	Formalitzat com a secció independent
T2.4. Variables escalars	T2 §3. Variables	Reorganitzat
T2.5. La memòria	T2 §2. La memòria	—
T2.6. Operands i modes d'adreçament	T2 §4. Operands	Ampliat amb modes d'adreçament
T2.7. Punters	T2 §11. Punters	—
T2.8. Vectors	T2 §9. Vectors	—
T2.9. Caràcters i cadenes de caràcters	T2 §10. Cadenes de caràcters	Ampliat amb caràcters
T3. Traducció de programes		
T3.1. Desplaçaments de bits	T3 §1. Desplaçaments de bits	—
T3.2. Operacions lògiques bit a bit	T3 §2. Operacions lògiques bit a bit	—
T3.3. Comparacions i operacions booleanes	T3 §3. Comparacions i operacions booleanes	—
T3.4. Salts	T3 §4. Salts	Reescrit per a RISC-V (eliminat *branch delay slot*)
T3.5. Revisió dels modes d'adreçament	—	Nou: consolidació didàctica sense equivalent MIPS
T3.6. Sentències alternatives: if-then-else i switch	T3 §5. Sentències alternatives	—
T3.7. Sentències iteratives: while, for i do-while	T3 §6. Sentències iteratives	—
T3.8. Estructura de la memòria	T3 §8. Estructura de la memòria	—
T3.9. Subrutines	T3 §7. Subrutines	Reescrit per a ABI RISC-V
T3.10. Compilació, assemblatge, enllaçat i càrrega	T3 §9. Compilació, muntatge i càrrega	Ampliat amb GCC/Clang toolchain
T4. Aritmètica entera i matrius		
T4.1. Suma, resta i canvi de signe	T5 §1. Overflow de suma i resta	Avançat de T5 a T4
T4.2. Sobreeiximent en suma i resta d'enters	T5 §1. Overflow de suma i resta	Avançat de T5 a T4

Material RISC-V (nou)	Equivalent MIPS (original)	Observacions
T4.3. Multiplicació entera	T5 §2. Multiplicació entera; T4 §1. mult/mflo/mfhi	Fusionat i reescrit per a RV32IM
T4.4. Matrius	T4 §2. Matrius	—
T4.5. Optimitzacions de bucle	T4 §3–4. Accés seqüencial i recorreguts	Ampliat i formalitzat
T4.6. Divisió entera	T5 §3. Divisió entera	Avançat de T5 a T4
T5. Coma flotant		
T5.1. Representació en coma flotant	T5 §4. Representació CF	—
T5.2. Operacions en coma flotant	T5 §5–6. Suma i multiplicació CF	—
T5.3. Coma flotant a RISC-V (RV32F)	T5 §7. La coma flotant en MIPS	Reescrit íntegrament per a RV32F
T6. Rendiment i potència		
T6.1. Rendiment	T1 §2. Rendiment i potència	Segregat de T1 com a tema independent
T6.2. Llei d'Amdahl	T1 §3. Llei d'Amdahl	Segregat de T1
T6.3. Potència	T1 §4. Mesures de dissipació	Segregat de T1; ampliat amb escalat de Dennard
T7. Memòria cau		
T7.1. La jerarquia de memòria	T6 §1. Introducció	Ampliat amb context GPU i IA
T7.2. La memòria cau	T6 §2. Disseny bàsic	—
T7.3. Política d'emplaçament	T6 §3. Correspondència directa	Ampliat amb associativitat
T7.4. Política de reemplaçament	T6 §6. Associativitat	Reorganitzat
T7.5. Política d'escriptura	T6 §4. Polítiques d'escriptura	—
T7.6. Rendiment	T6 §5. Mesures de rendiment	—
T7.7. Tipologia de les fallades	T6 §8. Tipologia de les fallades	—
T7.8. Memòries cau multinivell	T6 §7. Caches multinivell	—
T8. Memòria virtual		
T8.1. Introducció	T7 §1. Introducció	—
T8.2. Paginació	T7 §2. Funcionament de la MV	Reorganitzat i ampliat
T8.3. La taula de pàgines	T7 §2. Funcionament de la MV	Segregat; ampliat amb taules multinivell
T8.4. Fallada de pàgina	T7 §3. Fallada de pàgina	—
T8.5. Traducció ràpida: el TLB	T7 §4. Traducció ràpida amb TLB	Ampliat amb *TLB shootdown* multicore
T9. Excepcions i interrupcions		
T9.1. Excepcions i interrupcions	T8 §1–4. Introducció, CP0, accions HW/SW	Reescrit íntegrament per a CSR RISC-V
T9.2. Crides al sistema	T8 §6. Crides al sistema	Reescrit per a `ecall` RISC-V
T9.3. Entrada/Sortida	T8 §7. Interrupcions	Ampliat

Taula 5: **Contingut nou sense equivalent MIPS.** Continguts nous incorporats sense equivalent als materials originals MIPS.

Contingut nou	Ubicació	Justificació pedagògica
RISC-V GNU Compiler Toolchain	T2	Eina estàndard de l'ecosistema; absència total a MIPS
Extensions M i F (modularitat)	T2	Modularitat de RISC-V vs. integració de MIPS
GPUs i memòria en l'era de la IA	T7	Context tecnològic actual; motivació per a l'estudi de la jerarquia de memòria
Taules de pàgines multinivell	T8	Sistemes operatius moderns; prerequisit implícit per a SO
Modes de privilegi M/S/U	T9	Arquitectura de privilegis RISC-V; absència conceptual a MIPS

3.2.2 Problemaris i solucionaris

A més de la migració i revisió dels exercicis existents, s'han incorporat 23 exercicis nous que cobreixen continguts sense equivalent al material MIPS: la modularitat de RISC-V (extensions M i F), les eines de l'ecosistema obert (GNU Compiler Toolchain), els modes de privilegi i, per primera vegada a EC, exercicis sobre excepcions i interrupcions amb fonamentació operativa suficient per ser avaluables.

Els solucionaris cobreixen T1–T9 amb criteris diferenciats per la naturalesa de cada bloc. T1, per la seva brevetat (dos exercicis), té el solucionari elaborat però pendent d'integrar al repositori en el format de `PS_T1.qmd`. Per als temes restants:

- **T2–T5** (traducció C → assemblador): la densitat de raonament pas a pas és el nucli de l'aprenentatge i el solucionari és l'instrument principal d'autoavaluació. Els exercicis nous d'aquests temes —sense referent previ a MIPS— fan el solucionari imprescindible. T3 (salts i subrutines) i T5 (coma flotant) concentren les taxes d'errors més altes de l'assignatura.
- **T6** (Rendiment i potència): tema atòmic amb exercicis íntegrament numèrics; el criteri de selecció i ordenació és dificultat creixent a partir de la fórmula base.
- **T7** (Memòria cau) i **T8** (Memòria virtual): els estudiants aborden aquests continguts per primer cop. Els exercicis són bastant mecànics un cop assimilat el procediment; el solucionari actua com a model de referència per autoavaluar-se, ordenat per dificultat creixent.
- **T9** (Excepcions i interrupcions): és una novetat respecte als materials MIPS originals, on aquest tema no tenia problemes. L'adopció de RISC-V —amb els registres CSR, els modes de privilegi i el mecanisme `ecall`— ha permès formular exercicis nous sobre continguts que ara sí que tenen prou base operativa per ser avaluables.

El conjunt de la migració del corpus i la incorporació dels 23 exercicis nous dóna per assolit l'OE1.

La Taula 6 mostra la distribució dels exercicis nous per tema, amb una breu descripció del seu contingut.

Taula 6: **Problemes i solucions noves.** Exercicis nous afegits al problemari.

Tema	Solució	Cobertura
T2	Sí	*Little-endian*, ordre de bytes
T2	Sí	Bucles sobre vectors (init, suma, còpia inversa)
T2	Sí	Cerca en vector, retorn -1
T2	Sí	Aritmètica de punters sobre `short`
T2	Sí	Funció `longitud` amb `'\0'`
T2	Sí	Còpia de string
T3	Sí	`switch` amb salts encadenats i *jump table*
T3	Sí	Compilació separada, símbols externs, `auipc`
T4	Sí	Optimització #2: condició al final
T4	Sí	Optimització #3: eliminació variable d'inducció
T5	Sí	`flw`/`fsw`, `flt.s`
T5	Sí	`fcvt.w.s`, `fcvt.s.w`, truncament vs. arrodoniment
T6	Sí	Amdahl bàsic, límit teòric
T6	Sí	Amdahl amb tres components simultanis
T6	Sí	Amdahl invers: quin % de CF cal per a speedup 10×
T7	Sí	*Cold-start*, conflicte, capacitat amb seqüències concretes
T7	Sí	Conflictes entre dos vectors, efecte de l'adreça base
T8	Sí	Taula de pàgines de dos nivells, mida, avantatge
T8	Sí	Bit de protecció W, excepcions de protecció
T8	Sí	Integració TLB+cau, VIPT, condició antialiàsing
T9	Sí	`mepc`, `mtvec` direct/vectored, ajust +4 per `ecall`
T9	Sí	Fallada de TLB com a excepció, gestió RSE

Tema	Solució	Cobertura
T9	Sí	Interrupcions E/S, `MIE`/`MEIE`, RSE de teclat

3.2.3 Laboratoris

Es manté l'estructura de sis sessions de laboratori. Pel que fa als continguts, la reorganització de la teoria ha comportat el canvi de sessió d'algunes parts de les pràctiques de MIPS, i s'ha aprofitat el fet de treballar amb dos arxius de C simultàniament a la sessió de coma flotant (L5) per afegir el tractament de la compilació separada.

La Taula 7 mostra la correspondència entre les sessions originals (MIPS) i les noves (RISC-V), amb una breu descripció de les diferències.

Taula 7: **Laboratori.** El canvi més visible al laboratori és la substitució de MARS per RARS com a simulador de referència.

Sessió RISC-V (nova)	Equivalent MIPS (original)	Observacions
L1. Introducció al simulador RARS	S0. Introducció (MARS)	Eina substituïda: MARS → RARS
L2. Assemblador RISC-V i tipus bàsics	S1. Assemblador MIPS i tipus bàsics	Reescrit íntegrament per a RISC-V
L3. Traducció de programes	S2. Traducció de programes	Reescrit íntegrament per a RISC-V
L4. Matrius i subrutines	S3. Tipus de dades estructurats	Ampliat amb subrutines
L5. Coma flotant i compilació separada	S4. Codificació en coma flotant	Ampliat amb compilació separada
L6. Memòria cau	S5. Memòria cau	Reescrit; ampliat amb *loop tiling*

3.2.4 Materials transversals

Un resultat destacat del projecte és la creació d'una infraestructura de qualitat que fa el corpus auditable i editable per qualsevol membre de l'equip docent, independentment de qui hagi produït cada part. Aquests tres materials no existien en cap forma en el material original.

Taula 8: **Materials transversals.**

Material	Descripció
`riscv.qmd` — Compendi de referència RISC-V	Taules de referència ràpida de l'ISA, l'ABI i les extensions; substitueix el compendi MIPS i l'amplifica
`sigles.qmd` — Glossari de sigles	Llistat unificat de totes les sigles de l'assignatura, actualitzat incrementalment durant la migració
`contrib.qmd` — Convencions i normes d'estil	Guia d'estil: format, lèxic, paleta SVG i decisions per tema; garanteix la coherència del corpus a llarg termini

3.3 Qualitat i harmonització

Un dels resultats més significatius del projecte, i que supera l'abast estrictament tècnic de la migració, és l'establiment d'un **sistema de qualitat documentat** per als materials de l'assignatura. Aquest sistema es concreta en tres artefactes:

- `contrib.qmd`: Document de convencions i normes d'estil que recull el sistema de *callouts* i prefixos d'etiquetes, les normes d'estil (veu, puntuació, negretes, anglicismes, sigles), els criteris de format (taules, figures SVG, blocs de codi), les substitucions terminològiques obligatòries, la paleta de colors SVG i les decisions específiques per tema. Conté, a més, el **recull terminològic RISC-V en català** elaborat durant la migració: la primera referència sistemàtica d'equivalències entre la terminologia tècnica anglesa del camp i el català normatiu, disponible per a qualsevol assignatura de l'àmbit.
- `sigles.qmd`: Glossari de sigles de l'assignatura, actualitzat incrementalment durant la migració de cada tema.
- ***Definition of Done* (DoD-UP, DoD-CC i DoD-UR)**: Sistema de criteris de tancament per fase, descrit a la § 2.1. Garanteix que cada unitat de producció i cada unitat de revisió compleix els estàndards de qualitat abans de passar a la fase següent.

El sistema de DoDs ha tingut un impacte concret sobre la qualitat del corpus. La llista de verificació del DoD-UP ha detectat, entre d'altres, inconsistències en la nomenclatura dels registres RISC-V entre temes i errors subtils de validació a RARS que haurien passat desapercebuts en una revisió lineal. El DoD-UR ha operat, a més, com a mecanisme de transferència de coneixement dins l'equip: les anotacions als *merge requests* de GitLab constitueixen un registre de les decisions pedagògiques preses col · legialment, consultable per qualsevol membre de l'equip —present o futur.

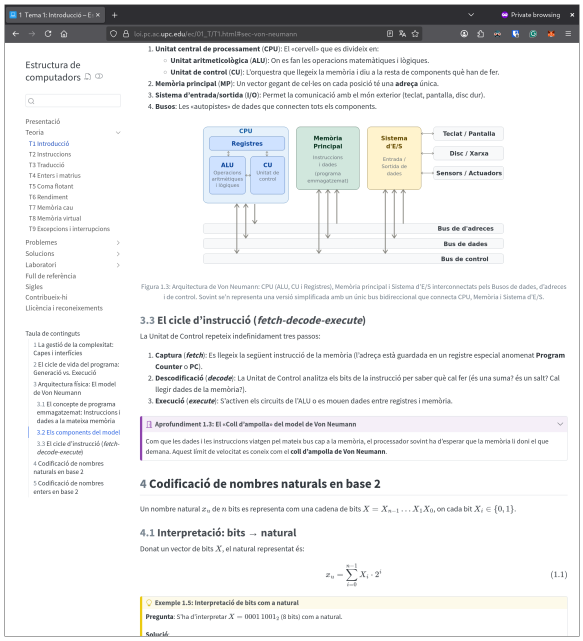
Aquests tres artefactes, que reflecteixen l'ortogonalitat del sistema de qualitat respecte al cicle de producció, donen per assolit l'OE3.

3.4 Integració i accessibilitat

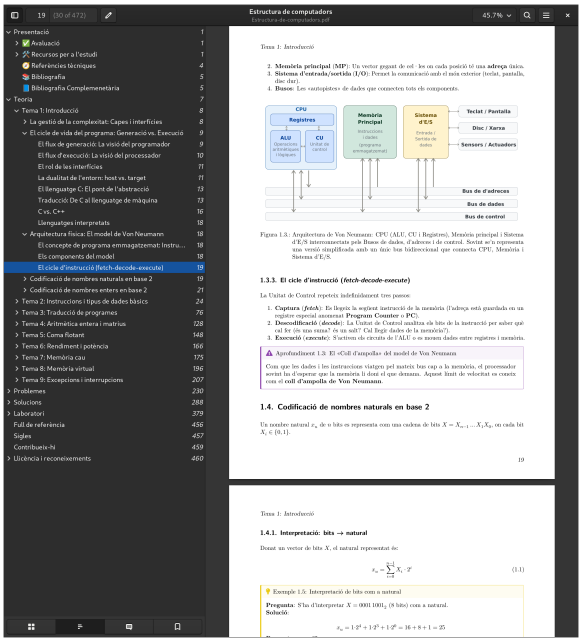
El resultat final del projecte no és un conjunt de fitxers dispersos, sinó un **ecosistema de materials cohesionat** amb les característiques següents:

- **Punt d'entrada únic**: Una URL dona accés a tots els materials en HTML, i un botó permet descarregar el PDF complet de tot el llibre. La Figura 4 il · lustra el mateix fragment de contingut renderitzat en tots dos formats.
- **Accessibilitat WCAG 2.1**: Marcatge HTML5 semàntic, mode fosc/clar respectant la configuració del sistema de l'usuari, disseny *responsive* i codi amb ressaltat accessible (*a11y*).
- **Navegació no lineal amb referències creuades**: Cada secció del material conté enllaços directes cap a les seccions de teoria o laboratori relacionades. Un estudiant consultant L3 pot accedir directament als apartats de T3 que aplica; un estudiant consultant T3 pot navegar als exercicis corresponents de PE_T3 i a la correcció de PS_T3. Aquesta interconnexió sistemàtica, impossible en el format PDF original, transforma els materials d'un recurs lineal en un sistema de consulta ràpida.
- **Validació sistemàtica a RARS**: Tot el codi assemblador del corpus —teoria, exercicis i solucionaris— ha estat verificat manualment al simulador RARS. Això garanteix que cap exemple ni exercici falla en l'entorn de laboratori dels estudiants.
- **Repositori públic i reutilitzable**: Tot el material font és accessible i reutilitzable per la comunitat docent. Qualsevol equip docent amb una assignatura anàloga pot fer un *fork* del repositori i adaptar-lo al seu context sense partir de zero. El `README.md` del repositori inclou instruccions detallades per a la reproducció del procés de renderització.

El conjunt d'aquestes característiques dóna per assolit l'OE2.



(a) **Format HTML** (Mozilla Firefox). La barra de navegació lateral inclou el nom de l'assignatura, les icones de descàrrega en PDF i de commutació de mode clar/fosc, un camp de cerca, i el contingut desplegable fins a nivell de tema. A la part inferior de la barra, la taula de continguts del tema actiu (fins a nivell de secció) amb ressaltat de la secció en curs. Totes les entrades són clicable. El contingut principal mostra text amb negretes estratègiques, llistes, figures SVG, *callouts* i referències creuades actives. Al principi de cada pàgina, hi ha un botó que mostra el codi Markdown de la pàgina.



(b) **Format PDF** (GNU Evince). El mateix contingut renderitzat per LuaLaTeX. La barra lateral del visor mostra l'índex del document; el contingut principal preserva la tipografia, la numeració automàtica de figures i seccions, i els *callouts* amb el mateix sistema de colors.

Figura 4: El mateix fragment del corpus en format HTML (esquerra, Figura 4a) i PDF (dreta, Figura 4b). Tots dos s'obtenen des d'una única font en Quarto Markdown sense cap modificació manual.

3.5 Característiques diferencials del corpus

La Taula 9 recull les característiques que distingeixen el corpus produït d'un material docent convencional en format PDF, organitzades per l'àmbit d'impacte principal.

Taula 9: **Característiques diferencials del corpus** produït respecte als materials originals en format PDF.

Característica	Impacte pedagògic i institucional
Autocontingut	No s'utilitza cap terme, nomenclatura o concepte que no hagi estat introduït de manera explícita prèviament
Català normatiu + recull terminològic RISC-V	Accessibilitat lingüística per a l'estudiantat; primera referència sistemàtica de terminologia RISC-V en català, reutilitzable per altres assignatures de l'àmbit
Format obert (Quarto Markdown)	Llegible per humans i màquines; HTML accessible (WCAG 2.1), mode fosc/clar, *responsive*; PDF d'alta qualitat des d'una sola font
Navegació no lineal amb referències creuades	Teoria, problemes, solucionaris i laboratoris interconnectats; facilita la consulta ràpida i l'estudi no lineal en pantalla
Sistema de senyalització visual	Cinc tipus de *callouts* + negretes estratègiques: priorització del contingut i navegació adaptada al consum en pantalla
Validació sistemàtica a RARS	Tot el codi assemblador verificat al simulador; zero-error garantit en l'entorn de laboratori
Repositori públic i reutilitzable	Qualsevol equip docent pot fer un *fork* i adaptar el corpus; model de manteniment col · laboratiu via GitLab
Sistema de DoDs (DoD-UP, DoD-CC i DoD-UR)	Procés de producció i revisió auditable, traçable i replicable per a projectes similars

3.6 Comparativa planificació–realitat

La Taula 10 contrasta la planificació prevista al lliurament intermedi (març 2026) amb el que s'ha assolit efectivament.

Taula 10: Comparativa entre la planificació inicial i els resultats assolits.

Fita	Previst (lliurament intermedi)	Assolit (lliurament final)
M1 (Març)	T1, T2; setup del repositori	T1, T2 + estructura completa del projecte i sistema de convencions
M2 (Abril)	T3, T4, T5	T3, T4, T5 + solucionaris PS_T2–T5
M3 (Maig)	T9 (Excepcions i interrupcions) + Laboratoris	T6, T7, T8, T9 + L1–L6 complets + solucionaris PS_T6–T9
M4 (Juny)	Tancament i memòria	PE_T1–T9 complets + 23 exercicis nous + PS_T1 + materials transversals + memòria

La diferència entre el previst i l'assolit és directament atribuïble a l'adopció de Claude com a eina principal de producció, descrita a la § 2.1: la capacitat de mantenir el context complet del projecte en una sola sessió va multiplicar la capacitat de producció i va permetre cobrir en els terminis previstos un volum de material molt superior al planificat. La contribució de Claude es va concentrar en les tasques de transformació sistemàtica: conversió de format, harmonització lèxica i adaptació del codi assemblador a RISC-V. Les tasques de judici pedagògic —disseny dels exercicis nous, decisions terminològiques i validació de tot el material generat— van recaure íntegrament sobre el professor. Aquesta divisió entre producció assistida per IA i validació humana experta és el model que el projecte proposa com a exportable a altres contextos de producció de materials docents.

4 Discussió, conclusions i altres propostes

Aquest projecte no és un estudi experimental en el sentit clàssic: no hi ha grup de control, no hi ha mesura d'impacte sobre l'estudiantat anterior al lliurament, i les dades quantitatives de rendiment acadèmic seran disponibles només a partir del Q1 2026-27. Reconèixer-ho explícitament no és una limitació que calgui disculpar sinó una caracterització precisa del tipus d'intervenció: un projecte d'innovació docent d'envergadura real, amb un producte tangible, verificable i desplegable. El rigor no rau aquí en el disseny experimental sinó en la solidesa de l'argumentació pedagògica, la traçabilitat del procés de producció, la qualitat dels instruments de validació interns (DoD-UP, DoD-CC i DoD-UR) i la coherència entre els objectius declarats i els resultats assolits. Tots quatre criteris estan documentats al llarg d'aquesta memòria. L'**objectiu general** —l'actualització integral dels materials docents de MIPS a RISC-V— s'ha assolit al 100% en l'Etapa de producció, i els tres objectius específics han quedat tancats a la § 3: **OE1** amb la migració completa del corpus i la incorporació d'una vintena exercicis nous, **OE2** amb la transformació a format obert i accessible, i **OE3** amb l'establiment del sistema de qualitat documentat.

4.1 Contrast dels resultats amb el marc teòric i estudis previs

Els resultats descrits a la § 3 confirmen les premisses del marc teòric establert a la § 1.5 i els antecedents identificats a la § 1.6. La validació acadèmica més clara prové del propi camp disciplinar: la decisió de Patterson i Hennessy (2021) de reescriure íntegrament el seu llibre de referència al voltant de RISC-V és el gest que millor avala el canvi de paradigma. Que els pioners d'una arquitectura l'abandonin per adoptar-ne una d'oberta no és una anècdota circumstancial: és la prova que RISC-V representa l'estàndard emergent per a la docència de l'arquitectura de computadors en la dècada de 2020. Les migracions documentades a Berkeley (CS 61C) i Cornell (CS 3410), descrites a la § 1.6, confirmen que la tendència és global i sistemàtica, i que la FIB-UPC no és pionera aïllada sinó participant ben posicionada en un moviment acadèmic de fons.

En l'àmbit metodològic, l'experiència d'aquest projecte valida l'ús de l'enfocament àgil (Schwaber & Sutherland, 2020) per a la producció iterativa de materials educatius tècnics. La comparativa pla→realitat de la § 3.6 mostra que la divisió del corpus en unitats temàtiques funcionals va permetre absorbir la variabilitat inherent al projecte —decisions terminològiques retroactives, addició d'exercicis sense equivalent en el material original, evolució del sistema de convencions— sense comprometre el calendari global. Un model de planificació seqüencial hauria estat molt menys resilient davant d'aquests ajustos.

L'aportació diferencial d'aquest projecte, més enllà de la migració pròpiament dita, és triple: l'adopció de formats oberts i llegibles per màquines com a principi estructurador dels materials; l'establiment d'un sistema de qualitat documentat (sistema de DoDs, `contrib.qmd`, `sigles.qmd`) que fa el corpus auditable i editable per qualsevol membre de l'equip docent; i la documentació del procés de producció assistit per IA, que ofereix un model replicable per a equips sense recursos de producció professional.

El fet d'assolir el 100% del conjunt del material (teoria, problemes, solucionari) quan el pla inicial preveia tancar únicament la teoria al lliurament final supera significativament les previsions. Això suggereix que l'ús d'eines IA redueix radicalment les estimacions convencionals de cost i temps per a la producció de materials docents tècnics, amb implicacions rellevants per a la planificació de projectes de millora docent.

4.2 Valoració crítica del procés, obstacles i aprenentatges

El procés ha estat ric en aprenentatges tant sobre el contingut tècnic de la migració com sobre l'ús de la IA com a eina de producció educativa.

Obstacles identificats

El primer obstacle va ser la naturalesa dels materials de partida: documents PDF sense fonts editables, resultat de convertir presentacions de diapositives elaborades anys enrere. Cap eina de processament de text pot importar-los directament sense una fase de transcripció i reestructuració prèvies. En la fase inicial d'exploració, aquest pas va consumir un temps desproporcionat i va limitar la velocitat de producció.

El segon obstacle, de caràcter tècnic, va ser la validació del codi assemblador. Les eines d'IA generativa produeixen codi RISC-V sintàcticament plausible però no necessàriament correcte: errors subtils en les convencions de l'ABI, en l'ordre dels operands o en l'ús de les pseudoinstruccions passen desapercebuts en una lectura ràpida però fallen en execució al simulador. Cada exemple de codi dels apunts de teoria i cada exercici dels solucionaris ha requerit verificació manual a RARS. Aquest pas no és automatitzable i no ha de ser-ho: és precisament el punt on l'expertesa disciplinar del professor resulta imprescindible.

El tercer obstacle va ser la gestió de la coherència terminològica i d'estil en un corpus de 36 fitxers. Qualsevol decisió de format o lèxic adoptada al T2 té implicacions al T3, al T4 i en endavant. Mantenir la consistència en un corpus d'aquesta escala requereix un sistema de convencions documentat, accessible i consultat sistemàticament durant la producció: aquest és l'origen de `contrib.qmd`.

El pivot NotebookLM → Claude

El pivot de NotebookLM a Claude —descrit a la § 2.1— va ser l'accelerador decisiu: mentre el primer requeria fragmentar el projecte en *notebooks* independents —impedint la propagació de decisions entre temes, amb velocitat moderada i supervisió humana intensiva—, Claude va eliminar aquesta fragmentació mantenint el context complet del projecte en una sola sessió i permetent avançar un tema sencer per sessió de treball.

El rol del professor com a director tècnic

La integració de la IA no va reduir el rol del professor: el va transformar. El docent va passar de ser l'escriptor principal dels materials a ser el *director tècnic* del procés: definint les convencions d'estil, prenent les decisions pedagògiques clau (quins conceptes aprofundir, quins exemples prioritzar, quina progressió didàctica seguir), validant cada fragment de codi al simulador RARS i revisant la precisió tècnica del contingut. La IA accelera la producció; la intel · ligència pedagògica continua residint en el docent. Aquesta distinció és una conclusió central del projecte amb implicacions directes per a la formació del professorat universitari en l'era de la IA generativa.

4.3 Propostes de millora o línies de continuïtat del projecte

Implantació a l'aula (Q1 2026-27)

La primera validació real dels materials migrats tindrà lloc al primer quadrimestre del curs 2026-27 (setembre de 2026), en 2 grups de teoria i 3 o 4 grups de laboratori. Els instruments de recollida de dades previstos —seguiment del rendiment acadèmic, enquesta de satisfacció i registre d'incidències— estan descrits a la secció de Metodologia (§ 2.3). L'experiència dels estudiants amb els nous materials proporcionarà el *feedback* necessari per a una primera iteració de millora.

Completar el cicle de revisió externa

La Revisió externa (P4), en curs en el moment del lliurament d'aquesta memòria, és la fase que tancarà formalment el cicle de producció. Els grups de treball establerts estan revisant els materials per temes, amb sessions de videotrucada per als punts que requereixen consens. S'espera que la P4 estigui completada abans del desplegament al Q1 2026-27.

Extensió a l'eix d'arquitectura: IC i AC

A mitjà termini, la coherència horitzontal de l'eix d'arquitectura del GEI (IC → EC → AC, descrita a la § 1.1.1) aconsella estendre el model a les assignatures veïnes. IC podria beneficiar-se de la migració a format obert per facilitar la sincronització conceptual amb EC. AC, que utilitza x86 com a arquitectura de referència per a l'estudi del *pipelining*, podria incorporar RISC-V com a pont pedagògic entre EC i els conceptes avançats de segmentació, aprofitant la continuïtat de l'ISA que l'estudiant ja domina en sortir d'EC. Aquesta extensió enforteix la coherència vertical del pla d'estudis i optimitza el temps d'aula dedicat a la introducció d'arquitectures noves.

Manteniment col · laboratiu i comunitat docent

El repositori públic a GitLab és la infraestructura que habilita un model de manteniment sostenible més enllà d'un sol professor. Altres membres de l'equip docent d'EC, o de departaments amb assignatures anàlogues a d'altres universitats, poden contribuir directament al repositori, reportar errors, proposar millores o afegir exercicis nous. Mantenir viu aquest ecosistema —amb revisions periòdiques del sistema de DoDs, actualitzacions derivades de noves versions de l'especificació RISC-V i incorporació del *feedback* dels estudiants— constitueix el cicle de millora contínua que garanteix la vigència dels materials a llarg termini.

4.4 Connexions possibles amb altres àmbits o temàtiques educatives

El model com a pràctica exportable a assignatures STEAM

L'arquitectura metodològica d'aquest projecte —gestió àgil, producció assistida per IA, format *Docs-as-Code* i repositori compartit— no és específica ni de l'arquitectura de computadors ni de l'enginyeria informàtica. Qualsevol assignatura STEAM amb un corpus de materials tècnics susceptible d'actualització pot aplicar el mateix model. Els ingredients essencials en són quatre: un format de marcatge pla (Markdown, LaTeX, reStructuredText) que separi el contingut de la presentació i el faci processable per eines automàtiques; un repositori de control de versions que garanteixi la traçabilitat i la sincronització entre l'equip docent; la IA generativa com a accelerador de producció amb supervisió humana explícitament definida; i un sistema de convencions documentat que mantingui la coherència del corpus a mesura que creix. Assignatures com Física, Matemàtiques o Electrònica comparteixen el repte de mantenir materials tècnics actualitzats amb equips reduïts i temps fragmentat. El cost d'entrada d'aquest model és baix: totes les eines emprades (Quarto, GitLab, RARS) són de codi obert o d'accés gratuït.

El paradigma *Docs-as-Code* en l'àmbit educatiu

El paradigma *Docs-as-Code* —tractar la documentació amb les mateixes eines i pràctiques que el codi font— és una pràctica consolidada en la indústria del programari que aquest projecte trasllada explícitament a la docència universitària. L'aplicació educativa aporta beneficis directes: control de versions del contingut docent, revisió col · laborativa entre iguals (anàloga al *code review*), detecció automàtica d'errors de format i desplegament automàtic dels materials actualitzats. A més, per als estudiants d'enginyeria informàtica, accedir a materials allotjats en un repositori GitLab, renderitzats amb Quarto i compatibles amb les tecnologies assistives representa en si mateix un aprenentatge implícit sobre les bones pràctiques de la indústria, alineat amb els objectius formatius del grau.

Implicacions per a la formació del professorat universitari en IA

L'experiència d'aquest projecte permet formular una conclusió amb implicacions directes per a la missió de l'ICE: la formació del professorat universitari en l'ús de la IA ha d'anar més enllà de l'adopció puntual d'eines individuals. El que resulta estratègic és una alfabetització en la *gestió de projectes assistits per IA*: com definir convencions de treball que la IA pugui seguir amb consistència, com estructurar les tasques per maximitzar l'efectivitat de la col · laboració humà-màquina, i com establir mecanismes de validació adequats al context disciplinar de cada assignatura. El professor que domina aquesta competència pot multiplicar la seva capacitat de producció docent de qualitat sense comprometre el rigor. Promoure i difondre aquest model és, per tant, una tasca estratègica per a les institucions que, com l'ICE de la UPC, lideren la innovació pedagògica a la universitat.

5 Bibliografia

Anderson, L. W., & Krathwohl, D. R. (Eds.). (2001). *A taxonomy for learning, teaching, and assessing: A revision of Bloom's taxonomy of educational objectives*. Longman.

Anthropic. (2025). Claude (Claude Sonnet 4.6) [Large language model]. https://www.anthropic.com

Bloom, B. S., Engelhart, M. D., Furst, E. J., Hill, W. H., & Krathwohl, D. R. (1956). *Taxonomy of educational objectives: The classification of educational goals. Handbook I: Cognitive domain*. David McKay.

Google. (2024). NotebookLM [Artificial intelligence research tool]. https://notebooklm.google.com

Hennessy, J. L., & Patterson, D. A. (2022). *Computer architecture: A quantitative approach* (6th ed.). Morgan Kaufmann.

Poppendieck, M., & Poppendieck, T. (2003). *Lean software development: An agile toolkit*. Addison-Wesley.

Patterson, D. A., & Hennessy, J. L. (2021). *Computer organization and design RISC-V edition: The hardware software interface* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.

Patterson, D., & Waterman, A. (2017). *The RISC-V reader: An open architecture atlas*. Strawberry Canyon LLC. http://riscvbook.com/

RISC-V International. (2020–present). *Official RISC-V specifications*. https://riscv.org/specifications/ratified/

Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum guide: The definitive guide to Scrum: The rules of the game*. Scrum.org. https://scrumguides.org/docs/scrumguide/v2020/2020-Scrum-Guide-US.pdf

Waterman, A., & Asanović, K. (Eds.). (2019). *The RISC-V instruction set manual, volume I: Unprivileged ISA*. RISC-V International. https://docs.riscv.org/reference/isa/unpriv/unpriv-index.html

Winans, J. (2022). *RISC-V assembly language programming*. Northern Illinois University. https://github.com/johnwinans/rvalp

World Wide Web Consortium. (2018). *Web content accessibility guidelines (WCAG) 2.1*. https://www.w3.org/TR/WCAG21/

Annex 1: Reflexions sobre l'impacte de la IA generativa en la docència

Aquest annex recull reflexions personals fruit de l'experiència d'haver passat, en el transcurs d'aquest projecte, d'un ús pràcticament nul de la IA generativa a un ús intensiu i diari. No pretén ser una revisió sistemàtica de la literatura sinó un testimoni de primera mà d'un professor d'enginyeria que ha viscut la transició des de dins.

A1.1 La premissa que ho canvia tot

La IA generativa ha vingut per quedar-se i transformarà pràcticament tots els sectors, inclòs l'ensenyament universitari. No és una predicció: ja està passant. Qualsevol estratègia docent que parteixi de la prohibició com a resposta principal és una estratègia condemnada al fracàs, per la mateixa raó que ho hauria estat prohibir les calculadores als anys setanta o Internet als noranta. La pregunta pertinent no és «permetem o prohibim?» sinó «com incorporem la IA de manera que afavoreixi l'aprenentatge real?» Selwyn (2023) ho articula clarament: el debat públic oscil · la entre el pànic i l'entusiasme acrítics, i cap dels dos extrems és útil pedagògicament.

L'experiència d'aquest projecte m'ha convertit en un ferm partidari de la IA com a eina de treball. He atacat camps que havia defugit sistemàticament —JavaScript, Git, l'automatització del flux de publicació— perquè la barrera d'entrada s'ha reduït fins a un punt en què l'únic obstacle real és el criteri sobre *què* cal fer, no el coneixement de *com* fer-ho tècnicament. La qualitat del treball ha augmentat, el temps invertit s'ha reduït i, paradoxalment, la comprensió dels mecanismes subjacents ha millorat: quan una IA et genera codi que funciona però que no entens, la supervisió crítica que t'exigeixes a tu mateix és un accelerador d'aprenentatge molt eficient.

A1.2 Com hem de fer front a l'ús de la IA a l'aula?

La resposta no pot ser binària ni estàtica, perquè les capacitats i les necessitats de l'estudiant evolucionen al llarg de l'itinerari formatiu. La meva proposta, basada en l'experiència docent a EC (Q2 del grau) i a les assignatures optatives Future Internet Networks (FINE) i Decentralized Systems (DS) del màster de recerca Master in Innovation and Research in Informatics (MIRI), és la següent:

Primers quadrimestres del grau: fonamentar el pensament crític. En les etapes inicials, l'ús de la IA s'hauria de limitar a l'estudi i la preparació, no a la resolució d'exercicis avaluables. La raó no és moral sinó pedagògica: un estudiant que no ha après a estructurar un problema no pot supervisar críticament una solució generada per una IA. Usar la IA sense aquesta base és equivalent a copiar sense entendre; el resultat és un aprenentatge superficial que no supera cap acte d'avaluació que requereixi un mínim de raonament o elaboració intel · lectual. En aquest estadi, l'activitat docent entorn a la IA ha de focalitzar-se en guiar l'estudiant en l'ús crític de les eines disponibles. La velocitat a la qual evoluciona l'ecosistema requereix el reciclatge constant del professorat.

Quadrimestres finals del grau: normalitzar l'ús com una eina més. A les assignatures pràctiques dels darrers quadrimestres, el control de les IA *assistives* s'ha de tractar exactament igual que un compilador, un depurador o un editor de text avançat: una eina que el professional usarà durant tota la seva carrera i que, per tant, en la fase d'estudiant ha d'aprendre a usar bé. Mollick i Mollick (2023) proposen set enfocaments concrets per integrar la IA als treballs dels estudiants preservant l'aprenentatge real; la clau és dissenyar tasques on la IA sigui un amplificador de capacitat, no un substitut del raonament.

Màster: ús massiu per maximitzar la productivitat. A nivell de màster, la producció assistida per IA hauria de ser la norma. L'objectiu és que l'estudiant pugui focalitzar tota la seva atenció en

la contribució original, alliberant-se de la feina mecànica de producció. La OCDE (2023) identifica precisament aquest escenari —IA com a amplificador de la capacitat experta— com el cas d'ús amb l'impacte positiu més gran en educació superior. El consum crític, la capacitat de relacionar conceptes complexos i la síntesi esdevenen, com mai abans, competències vertebradores de la tasca docent.

A1.3 L'avaluació, l'element que ho ha de canviar tot

La transformació metodològica no és sostenible si no va acompanyada d'una transformació de l'avaluació. Els formats actuals, dissenyats en un món sense IA generativa, han quedat obsolets en molts casos.

Als **quadrimestres inicials**, la resposta és clara: tornar als exàmens de paper, llapis i, com a màxim, calculadora bàsica. No és un retrocés; és reconèixer que l'examen presencial sense eines és l'únic instrument que mesura el que realment volem mesurar en aquesta etapa: si l'estudiant ha internalitzat els conceptes.

Als **quadrimestres finals i màster**, els treballs, projectes i memòries ja no poden ser l'únic recurs d'avaluació. Un document produït amb IA de qualitat és indistingible, en aparença, d'un document elaborat amb esforç genuí. La solució no és la detecció —les eines de detecció actuals no són fiables i mai ho seran prou— sinó el retorn a formats d'avaluació que no es poden delegar: l'examen oral. En una de les meves assignatures de màster del curs vinent ja el recuperem. L'examen oral no detecta si l'estudiant ha usat IA: directament fa irrellevant la pregunta, perquè l'estudiant ha de demostrar davant del professor que entén el que ha lliurat.

A1.4 Som els professors necessaris?

La pregunta és incòmoda però legítima. Ja ara, un estudiant amb criteri pot aprendre d'un tema tècnic interaccionant directament amb un LLM amb més eficiència que en una classe magistral estàndard: pot fer preguntes al seu ritme, aprofundir on li interessa, repetir les explicacions que no ha entès i generar exemples personalitzats al seu context. Si la funció del professor es redueix a la transmissió d'informació, efectivament en tornem prescindibles.

Hi ha una ironia profunda en tot això que val la pena assenyalar. Les mateixes eines que amenacen de fer prescindible el professor són les que estan forçant una revisió dels models d'avaluació cap a formes menys escalables però pedagògicament molt més riques: l'examen oral, el seguiment individualitzat, la conversa sobre el procés. No perquè ho hàgim decidit per convicció pedagògica, tot i que les raons hi són, sinó perquè detectar si un estudiant ha fet servir IA per resoldre un exercici és, en molts casos, impossible sense parlar-hi. La IA, paradoxalment, ens empeny cap a un contacte alumne-professor més intens i més continu: no només a través dels exàmens orals, sinó a través d'una avaluació que ha de ser necessàriament més processual, més dialogada i més humana. Dit d'una altra manera: la tecnologia que semblava que havia de reduir la necessitat del professor és la que millor argumenta per la seva irreductibilitat, almenys en els primers compassos d'aquesta revolució.

Però la funció del professor mai ha estat només transmetre informació. El que no pot fer —encara— un LLM és tenir criteri sobre *què* és important en un camp, detectar que un estudiant ha entès malament un concepte fonamental i intervenir en el moment precís, establir la connexió entre el que s'aprèn a l'aula i el que realment es fa a la indústria, i generar l'entorn de treball rigorós que prepara per al món professional. El professor deixa de ser el dipositari del coneixement i passa a ser el garant de la qualitat del procés d'aprenentatge i el referent de l'estudiantat en l'oceà de la informació. És un canvi de rol profund, no una desaparició.

Aquest canvi de rol té una implicació directa sobre una pregunta que sovint s'amaga darrere del debat sobre la IA generativa: la de la qualitat intrínseca del contingut que produeix. En el cas d'aquests

apunts, on un percentatge significatiu del text inicial ha estat generat per Claude i posteriorment revisat, la resposta és empírica: el contingut tècnic és correcte —verificat instrucció per instrucció al simulador RARS—, el lèxic és consistent i el nivell d'explicació és adequat al perfil de l'estudiant. La IA no ha «inventat» física ni matemàtica; ha organitzat, explicat i formatat coneixement que existia als materials originals i a la seva base d'entrenament. El valor dels apunts no el dona l'origen del text sinó la qualitat de la supervisió humana que l'ha validat. Dit d'una altra manera: el percentatge de text sintètic és irrellevant si el procés de revisió és rigorós. I és precisament per garantir aquest rigor que existeixen les DoD-UP, DoD-CC i DoD-UR.

A1.5 L'atenció als estudiants excel · lents

Hi ha una qüestió que el discurs pedagògic dominant prefereix no tractar: en l'esforç per no deixar ningú enrere, hem acabat posant un sostre als qui van davant. Any rere any, EC acull estudiants amb una base tècnica molt per sobre de la mitjana; el ritme estàndard del curs no els ofereix cap horitzó més enllà del mínim exigible, i les seves notes rarament reflecteixen el que serien capaços de fer.

El *callout* d'Aprofundiment dels nous materials és una resposta modesta però concreta a aquesta bretxa: indica a l'estudiant que hi ha més, que el tema té profunditat, i que pot explorar-la pel seu compte si vol. Amb la IA disponible com a tutor personalitzat il · limitat, aquest tipus d'indicació adquireix una dimensió nova: ja no cal esperar que el professor tingui temps per a una tutoria individual. L'estudiant que vol aprofundir ara té accés immediat a un interlocutor que el pot acompanyar fins on vulgui arribar.

A1.6 El futur de la programació

Una pregunta que planeja sobre tot l'ecosistema informàtic, i que ningú respon amb convicció: si un LLM pot generar codi funcional per a la majoria de tasques de programació estàndard, *quin és el valor diferencial d'un programador humà?*

L'ofici de programador tal com l'hem conegut —escriure codi línia a línia per implementar especificacions donades— ha canviat irreversiblement. Però potser la pregunta està mal formulada. El que ha desaparegut és la barrera d'entrada a la producció de codi; el que no ha desaparegut és la necessitat de criteri sobre *quin* codi cal escriure, *per a quin* problema, *amb quines* restriccions i *amb quins* compromisos. Un *full-stack* que sap usar bé la IA multiplica la seva capacitat de producció per un factor difícil de quantificar. Un programador especialitzat en un domini complex —seguretat, compiladors, sistemes en temps real— continua tenint un avantatge diferencial que la IA no pot replicar fàcilment perquè requereix un context molt específic que no es pot capturar en un *prompt*.

No tinc la resposta definitiva, i desconfio de qui diu que la té. El que sí sembla clar és que l'habilitat de col · laborar eficientment amb eines IA —saber formular el problema, supervisar la solució i integrar-la en un sistema complex— és ja una competència fonamental que hauria d'estar al nucli del currículum d'enginyeria informàtica. Com a responsables de les generacions futures, tenim la responsabilitat de decidir si ens n'adonem ara o quan ja sigui massa tard.

A1.7 On pot arribar la IA?

No ho sé. I aquesta resposta em sembla la més honesta i la més útil. El que sí que sé, per experiència directa, és que la distància entre «no la faig servir pràcticament» i «la faig servir intensivament cada dia» ha transformat la meva pràctica professional d'una manera que hauria considerat improbable fa quatre dies. Si aquesta és la magnitud del canvi individual en un horitzó tan curt, projectar-la a escala

institucional és un exercici que hauria de mantenir el col · lectiu docent en un estat d'alerta activa, no de resistència passiva.

A1.8 Bibliografia

Mollick, E., & Mollick, L. (2023). *Assigning AI: Seven approaches for students, with prompts.* The Wharton School, University of Pennsylvania. https://doi.org/10.2139/ssrn.4475995

OCDE. (2023). *Generative AI and the future of education.* OECD Publishing. https://doi.org/10.1787/5b5d2df8-en

Selwyn, N. (2023). *Generative AI and the future of education: Panic and possibility.* Polity Press.

Llicència i programari

5.1 Llicència



© 2026, Fernando Agraz, Adrià Armejach, Roger Baig, Octavio Castillo, Josep-llorenç Cruz, Agustín Fernández, Pedro José Martínez, Miquel Morató, Rubèn Tous.

Creative Commons Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

5.2 Programari

Aquesta obra s'ha elaborat exclusivament amb eines de programari lliure, essent les més rellevants:

- Quarto — sistema de publicació científica i tècnica.
- LaTeX — sistema de composició tipogràfica.
- MathML — llenguatge de marcatge matemàtic.
- Inkscape — editor de gràfics vectorials.
- Firefox — navegador web.
- Evince — visualitzador de documents.
- GNU/Linux Debian — sistema operatiu.