Bateria baixa

Samuel Soriano

Índice

Avís legal 9

Introducció 10

La capsa que ningú va obrir 13

Apunt tècnic: què és el pensament computacional (i per què no cal cap robot per a començar) 19

Fes-ho tros a tros 20

Apunt tècnic: descomposició, o com trossejar un problema perquè deixe de fer por 26

Primer açò, després allò 28

Apunt tècnic: seqüències i algorismes, o per què l'ordre importa més del que pensem 34

Repeteix fins que... 36

Si plou, aleshores... 40

Apunt tècnic: condicionals, o com escriure totes les respostes possibles per endavant . 46

On s'ha trencat? 47

Apunt tècnic: depurar, o com trobar un error sense tornar a començar de zero . . . 54

Què tenen en comú? 56

Apunt tècnic: reconeixement de patrons, o per què no cal resoldre cada problema des de zero 62

Fes-ne un dibuix senzill 64

Apunt tècnic: abstracció, o decidir què no cal dibuixar 70

Camina tres passes, gira a la dreta 72

Apunt tècnic: precisió i llenguatge no ambigu 78

T'ho vaig dir, calia dir-ho tot 80

Apunt tècnic (escrit per Biel, revisat només l'ortografia) 85

Obri la capsa 86

Apunt tècnic: sensors i actuadors, les dos meitats de qualsevol robot 93

Sense connexió 95

Apunt tècnic: com es comuniquen l'ordinador i el robot (i per què falla més sovint del que sembla) 101

Bateria baixa 103

Apunt tècnic: gestió d'energia, l'error més silenciós de la robòtica educativa 110

Mou-te avant 112

Apunt tècnic: controlar actuadors, o per què «avança» mai és tan simple com sembla 118

Què veus? 120

Apunt tècnic: calibrar sensors, o per què els números mai són absoluts 126

Quan l'esdeveniment dispara 128

Apunt tècnic: programació basada en esdeveniments 134

El camí que no hi era 136

Apunt tècnic: seguiment de línia i correcció adaptativa 147

Objectiu no trobat 149

Apunt tècnic: el cicle de proves i ajust . . . 154

Col·lisió detectada 156

Apunt tècnic: robustesa i gestió d'excepcions 162

Peces trencades 164

Apunt tècnic: distingir un problema de maquinari d'un de programari 170

Projecte complet 172

Apunt tècnic: el cicle complet de disseny d'un projecte 182
El dia que tot podia fallar 184
Apunt tècnic: provar en condicions reals, o per què «al laboratori» no és el mateix que «en directe» 193
Actualització disponible 196
Apunt tècnic: de blocs a text, la mateixa idea amb una altra forma 202
Depura't a tu mateixa 204
Apunt tècnic: el mètode de depuració, repassat des del principi 209
Annex 210
Glossari 212
Tipus de plataformes de robòtica educativa 217
Xuleta ràpida 219
Els quatre pilars del pensament computacional (cap. 1) 220
Conceptes bàsics de programació, sense connectar res (cap. 2-10) 221
Sensors i actuadors, amb el robot ja obert (cap. 11-17) 224

Esdeveniments, robustesa i integració (cap. 16-21) 226
Provar en directe i tancar el llibre (cap. 22-24) 228
Les frases que es van quedar 228

Avís legal

Autor: Samuel Soriano

Primera edició: 2026

Versió: 0.1.1 — compilat el 2026-08-03

ISBN: 9798188577995

© 2026 Samuel Soriano.

Este llibre es publica amb llicència Creative Commons Reconeixement-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0).

Podeu compartir-lo i adaptar-lo, sempre que en reconegueu l'autoria, no en feu un ús comercial i mantingueu la mateixa llicència en les obres derivades.

Este llibre és una obra de ficció. Els personatges, el centre educatiu i els fets narrats són inventats; qualsevol semblança amb persones o centres reals és casual.

Introducció

Per què esta novel·la i per a qui.

Este no és el meu diari. Ho dic així, directe, perquè si has llegit *Command not found* potser esperes trobar-me a mi darrere de cada pàgina, contant-te un altre any dels meus, amb un altre error meu al capdavant de cada capítol. No és el cas. Empar no existeix. No hi ha cap CEIP El Tossal Roig a cap poble anomenat Vinaformosa, no hi ha cap Biel que li ensenye res a ningú, i jo no he programat mai un robot educatiu davant de vint-i-quatre xiquets de sisé mentre la bateria se'm moria en directe. Tot això me'l vaig inventar, seient a la taula de sempre, perquè hi havia una cosa que necessitava contar i que la meua pròpia experiència no em servia per a contar-la bé.

Fa uns anys que faig formació de docents —del pensament computacional, de robòtica educativa, d'eixes coses que ara arriben a totes les aules amb noms diferents cada curs. I si hi ha una escena que he vist repetir-se, curs rere curs, centre rere centre,

és esta: una mestra o un mestre, expert en la seua aula, capaç de portar vint-i-cinc criatures per un dia sencer sense que se li note el cansament, es queda mirant una capsa tancada de robots com si fóra una bomba. No perquè no puga aprendre —pot, i molt de pressa—, sinó perquè li fa por fer-ho malament davant de qui sempre l'ha vist fer-ho bé. Eixa por no és de la tecnologia. És de l'audiència.

Vaig voler escriure eixa por des de dins, però no des de la meua, perquè la meua ja l'havia contada en un altre llibre i, sobretot, perquè la meua no era exactament la que volia contar: jo torne a un terminal que ja havia conegut de jove, una redescoberta. La d'Empar és diferent. Empar no torna a res. Empar comença de zero, a quaranta-dos anys, en una cosa que la seua formació de fa vint anys mai li va ensenyar, davant d'un alumnat que —això és el que més la desarma— ho agafa més ràpid que ella. Per a contar bé eixa por concreta em calia algú inventat: algú a qui poguera fer fallar en públic tantes voltes com calguera, sense que ningú pensara que estava confessant res meu. Si vols dir-ho amb el títol del llibre a la mà: vaig voler escriure la seua

bateria baixa, no la meua, que ja fa temps que la tinc recarregada.

Així que això és el que tens ací: una novel·la, no un manual ni un diari. Empar és mestra de primària, coordinadora TIC del seu centre de facto —la que arregla la impressora, la que sap on és cada contrasenya— i mai ha tocat un robot en sa vida. Este curs n'arriba una dotació al seu col·legi, com arriben ara a tants centres valencians, i el llibre és el camí, capítol a capítol, des que la capsa arriba tancada fins que Empar aprén —de veres, a força d'equivocar-se davant de qui més la mira— que un algorisme mal escrit no és diferent d'una classe mal preparada: no és un fracàs, és informació per a la següent versió.

Cada capítol té, com en el seu llibre germà, una part narrada i un apunt tècnic al final —real, comprovable, sense inventar-me res del contingut encara que sí m'invente l'anècdota. Pots llegir-los seguits, com una novel·la, o saltar directament a l'apunt tècnic que et calga un dia concret, com un manual d'urgència. Els dos usos són legítims, i Empar, si existira, probablement s'estimaria més que la

lligueres com un manual —li costaria molt acceptar que algú passara hores llegint sobre els seus errors sense necessitat pràctica ninguna.

No fa falta que sàpigues res de robòtica per a començar. Tampoc Empar en sabia.

La capsa que ningú va obrir

Arriba la dotació de robots al centre, i la capsa queda tancada setmanes per por.

La capsa va arribar un dimarts, a tercera hora, quan Empar estava a mitat d'una explicació sobre els afluents del riu Vinalopó i el missatger de la Conselleria va deixar-la a consergeria sense preguntar per ningú en concret. Cartó reforçat, cantons protegits amb escuma, una etiqueta blanca amb el logotip del pla de digitalització i, a sota, en lletra menuda: *Dotació de robòtica educativa — CEIP El Tossal Roig — Vinaformosa*. Vint-i-quatre robots, deia l'albarà. Un per xiquet, si la classe de sisé A no creixia més.

Va ser Empar qui va firmar la recepció, perquè Empar firmava sempre les recepcions. Coordinadora TIC de facto des de feia set anys —ningú l'havia nomenada mai amb eixe títol exacte, però era ella qui arreglava la impressora del claustre, qui sabia on estava guardada cada contrasenya del centre en

un document Excel amb pestanyes de colors, qui havia plastificat, un per un, els cartellets amb les normes de l'aula d'informàtica. Si alguna cosa duia un cable, un menú o una icona, acabava, tard o d'hora, damunt de la seua taula.

La va portar a l'aula ella mateixa, en un carret, i la va deixar al racó, sota la finestra que donava al pati de les palmeres —les mateixes que feien ombra sobre el pati des de molt abans que ella arribara al centre—, al costat de l'armari on guardava els materials plastificats de matemàtiques. I ahí es va quedar. Tancada.

No és que Empar no volguera obrir-la. És que Empar, abans de fer res davant de vint-i-quatre criatures de onze anys, necessitava saber exactament què faria, en quin ordre, i què diria si alguna cosa no eixia com havia previst. Així havia donat classe els últims vint anys: amb el guió imprés i plastificat damunt de la taula, quatre grapes al cantó superior esquerre, cada activitat cronometrada al minut. Els alumnes ho notaven, encara que no ho sabien nomenar: amb Empar mai passava res inesperat.

Era, en certa manera, el seu do i la seua condemna alhora.

—¿Quan obrim la capsa dels robots? —li va preguntar Biel el dijous següent, sense alçar massa la veu, des del seu pupitre del fons, on solia estar més pendent de la finestra que de la pissarra.

—Quan estiga preparada —va contestar Empar, i va tornar a la fitxa de fraccions. La resposta li va eixir amb la mateixa fermesa amb què resolia qualsevol altra cosa a l'aula, però per dins li va costar un poc més d'esforç del que hauria admés.

Perquè el problema no era la capsa. El problema era que Empar havia obert el manual de la Conselleria eixa mateixa nit, dotze pàgines en PDF amb captures de pantalla d'una app que no coneixia, i havia entés, paraula per paraula, exactament zero. Paraules com «bucle» i «esdeveniment» i «port de connexió Bluetooth» li sonaven a una llengua que hauria d'haver estudiat en algun moment de la seua formació i que, senzillament, no hi era: la seua diplomatura de magisteri, de fa vint anys, li havia ensenyat pedagogia, didàctica de les matemàtiques, psicologia evolutiva. Res, ni una hora, de com pro-

gramar res. El món havia canviat de currículum sense avisar-la a ella en particular.

Va tancar el PDF a mitat. Va obrir, en compensació, la carpeta d'anelles on guardava els seus guions de classe, i va passar mitja hora reorganitzant-la per colors, que era, per a Empar, l'equivalent domèstic de rosegar-se les ungles.

La setmana següent la va salvar Alba, que feia infantil de cinc anys al costat i que tenia la virtut, rara al claustre, de dir les coses en veu alta que la resta només pensava.

—Porta setmanes eixa capsa ahí —li va dir un dimecres, al pati, mentre vigilaven la mateixa fila d'alumnes—. ¿La tens amagada perquè encara no saps què fer amb ella, o és una estratègia pedagògica que no m'has explicat?

Empar va riure, però va ser un riure curt, dels que serveixen per a guanyar temps.

—No sé per on començar. He mirat el manual i és... —va buscar la paraula— és com si m'hagueren donat un llibre en una llengua que no parle.

—Doncs no comences per la capsa —va dir Alba, sense donar-li més importància de la que tenia—

. Comença per una altra cosa. Jo, amb els meus de cinc anys, no he tocat cap robot encara i porte tres setmanes fent-los pensar com robots. Sense pantalles, sense cap cable. Els dic «ensenya'm com et laves les dents» i els fa dir cada pas, un per un, i ja et dic jo que la meitat obliden tancar l'aixeta.

Empar no ho va entendre del tot eixa vesprada, però se'n va quedar amb la idea com qui es queda amb un fil solt d'un jersei: no sabia encara on estirar, però sabia que hi havia una eixida ahí.

Eixa nit, en compte de tornar a obrir el PDF de la Conselleria, va buscar «pensament computacional sense ordinador» al cercador, esperant trobar alguna cosa que li servira d'ancoratge abans de tornar a enfrontar-se a la capsa. El que va trobar la va alleujar més del que esperava: resulta que la part que més por li feia —els robots, els cables, el Bluetooth— no era ni tan sols el principi del camí. El principi anava per un altre lloc, un que ella, com a mestra, coneixia més del que es pensava.

La capsa va continuar tancada quatre setmanes més. Però per primera vegada des que havia arribat,

Empar ja sabia què faria abans d'obrir-la: no obrir-la encara.

Apunt tècnic: què és el pensament computacional (i per què no cal cap robot per a començar)

El terme «pensament computacional» sona a informàtica avançada, però el va popularitzar, l'any 2006, una investigadora —Jeannette Wing— amb una idea molt més senzilla del que sembla: és una manera de resoldre problemes, útil per a qualsevol persona, amb ordinador o sense. S'organitza habitualment en quatre pilars, i este llibre els recorrerà un per un abans de tocar cap robot:

- **Descomposició:** trencar un problema gran en trossos més menuts i manejables. No és exclusiu de la programació: és el que fa qualsevol mestra quan divideix una unitat didàctica en sessions, o qualsevol persona quan s'enfronta a una tasca que la desborda.

- **Reconeixement de patrons:** notar què es repeteix, què és semblant entre situacions diferents, per a no haver de resoldre cada problema des de zero.
- **Abstracció:** decidir quins detalls importen per a resoldre el problema i quins es poden ignorar. Un mapa de metro n'és l'exemple clàssic: no representa les distàncies reals, només l'ordre de les parades i els transbords.
- **Disseny d'algorismes:** escriure la seqüència exacta de passos que resol el problema, en un ordre que es puga seguir sense ambigüitat.

Cap d'estos quatre conceptes necessita una pantalla. Es poden treballar —i, de fet, es treballen millor al principi— amb paper, amb jocs de taula, amb activitats de classe com les que dissenyava Alba per a xiquets de cinc anys. La robòtica educativa, quan arriba, no és el punt de partida: és el lloc on tot allò que ja s'ha practicat «desconnectat» es posa, per fi, en marxa amb motors de veres. Per això la capsa d'este llibre no s'obri fins al capítol onze: no perquè Empar siga especialment lenta, sinó perquè eixe és, de fet, l'orde correcte per a aprendre-ho.

Fes-ho tros a tros

Empar, desbordada, aprén d'una companya a trossejar la por en tasques mínimes.

El director li ho havia dit amb bones paraules, però amb una data al final que no admetia discussió: la Conselleria volia una evidència d'ús de la dotació abans de Nadal, encara que fóra mínima, encara que fóra «una simple foto d'un xiquet programant», havia dit Ferran, com si allò fóra poca cosa. Empar va assentir a la reunió de cicle amb la mateixa cara amb què assentia sempre, professional i tranquil·la, i va eixir al passadís amb la sensació concreta que algú li havia posat un pes al pit i se n'havia anat sense dir res més.

Faltaven sis setmanes. Tenia un manual de dotze pàgines que no entenia, una capsa tancada al racó de l'aula, i cap idea de per on començar que no fóra «obrir-la i mirar què passa», cosa que, per a algú com Empar, era l'equivalent a saltar sense corda.

Eixa vesprada va fer el que feia sempre que una tasca se li feia gran: es va asseure a la taula del men-

jador, va traure una llibreta nova —perquè per a coses importants sempre feia servir una llibreta nova, mai una que ja tinguera altres coses escrites— i va intentar escriure «PLA ROBÒTICA» al capdamunt d'una fulla. Es va quedar mirant les dos paraules durant un temps massa llarg. No sabia què venia després. Havia de posar-ho tot en marxa —aprendre l'app, entendre el manual, dissenyar les sessions, provar els robots ella mateixa abans de posar-los davant de vint-i-quatre criatures— i cada volta que intentava començar per algun lloc, la resta de la llista se li apareixia sencera al cap, com un mur.

Va telefonar Alba a les nou del vespre, cosa que no feia mai fora de l'horari escolar.

—No sé per on començar —li va dir, sense preàmbuls—. He mirat el manual quatre voltes i cada volta l'entenc menys.

—Para —va dir Alba, amb la calma de qui ha tingut esta mateixa conversa moltes voltes, encara que no fóra exactament amb Empar—. No em digues «robòtica». Digues-me una sola cosa, la primera, la més xicoteta possible, que pugues fer demà sense necessitar cap altra cosa.

—Doncs... no sé. Obrir la capsa, supose.

—Massa gran encara. «Obrir la capsa» té dins «llegir el manual d'assemblatge», «carregar les bateries», «instal·lar l'app», «descobrir per què no s'empareixen»... Tu ara mateix no necessites obrir la capsa. Necessites una sola cosa demà. Xicoteta de veres. Del tipus que puguen fer en deu minuts.

Empar es va quedar callada un moment, i llavors va escriure, en la seua llibreta nova, amb una lletra molt més menuda que la del títol: «*Demà: preguntar a Vicent (informàtic del CEFIRE) si té l'app instal·lada en algun dispositiu de prova, per a mirar-la abans de fer-ho amb la capsa oberta.*»

—Això —va dir Alba, quan Empar li ho va llegir en veu alta—. Eixa és la tasca de demà. Prou. Ni «aprendre robòtica» ni «preparar sis setmanes de sessions». Una sola cosa, i quan la tingues feta, la següent xicoteta se't farà molt més visible que ara.

Empar va penjar el telèfon amb una sensació estranya, com quan es desfa un nus que un es pensava que calia tallar. No li havien resolt res tècnic —no sabia ni una paraula més sobre robots que abans de la trucada—, però per primera vegada en setmanes

tenia una tasca concreta per a l'endemà, en compte d'una muntanya sencera esperant-la a la porta de l'aula.

L'endemà va parlar amb Vicent, el tècnic del CEFIRE que assessorava el centre en digitalització, i que va contestar amb l'entusiasme lleugerament excessiu de qui porta anys explicant açò a gent que no li fa el cas que ell creu que mereix.

—Açò és senzillíssim, Empar, en deu minuts ho tens —li va dir, i li va instal·lar l'app al seu propi mòbil personal per a mostrar-l'hi, sense preguntar-li si volia—. Mira, tot per blocs, com el Scratch eixe que fan servir els xiquets. No cal saber programar de veres.

Empar va assentir, va apuntar dos coses al seu quadern, i quan Vicent se'n va anar li va quedar clar que «senzillíssim» era una paraula que la gent que ja en sap fa servir sense adonar-se de com sona per a qui no en sap res. Però tenia una app instal·lada en un dispositiu, i açò era, ho va escriure eixa mateixa nit a la seua llibreta, «la tasca de demà, feta».

La setmana següent la llibreta ja tenia cinc pàgines de tasques xicotetes, cadascuna ratllada en

acabar-la: *carregar una bateria i mirar quant tarda*, *llegir només l'apartat de connexió del manual, no el sencer*, *provar l'app amb un robot imaginari, sense obrir encara la capsa de veres*. Cap d'elles li feia por en particular. Juntes, sense que Empar ho haguera planejat així, anaven component, tros a tros, exactament el pla sencer que sis setmanes abans l'havia paralitzada de sols mirar-lo.

Va ser Biel, curiosament, qui li ho va fer notar sense saber-ho, un matí que la va vore consultant la llibreta abans de començar la classe.

—¿Això és el pla dels robots? —li va preguntar, mirant per damunt del seu muscle—. Sembla una llista de la compra.

—Ho és, en certa manera —va dir Empar, i es va sorprendre ella mateixa de trobar-hi la broma amb naturalitat—. Sols que en compte de pa i llet, compre confiança, un tros cada dia.

Apunt tècnic: descomposició, o com trossejar un problema perquè deixe de fer por

La **descomposició** és el primer dels quatre pilars del pensament computacional i, sovint, el més útil fora de la informàtica: consistix a dividir un problema gran en subproblemes més menuts, cadascun resoluble per separat.

Per què funciona: un problema gran fa por, entre altres coses, perquè no sabem per on agafar-lo —tot pareix depenent de tot alhora. Un problema xicotet, en canvi, té un límit clar i una fi visible. La confiança que dóna acabar una tasca xicoteta no és psicològica en va: en programació, cada peça resolta i comprovada per separat és una peça menys que pot fallar quan s'ajunten totes.

Com aplicar-la, pas a pas:

1. **Escriu el problema gran tal com el sents**, sense por a que semble massa ampli: «programar la sessió de robòtica de sisé».

2. **Pregunta't: «per a fer açò, què necessite tindre fet abans?».** Cada resposta és un subproblema.
3. **Repeteix la pregunta amb cada subproblema**, fins que arribes a tasques que pugues fer en un temps curt, sense dependre de res més.
4. **Ordena-les**: algunes tasques necessiten que unes altres estiguen acabades primer (no pots provar l'aparellament sense tindre l'app instal·lada); altres es poden fer en qualsevol orde.

Un parany habitual, i important per a evitar-lo: descompondre no és el mateix que fer una llista sense criteri. Una llista de deu coses sense relació entre elles no reduïx la sensació d'aclaparament; una descomposició bona sí, perquè cada peça és resoluble de manera independent i, en acabar-la, avances de veres. Si una «tasca xicoteta» encara et fa la mateixa por que el problema sencer, és senyal que encara és massa gran: torna-la a partir.

En programació real, este mateix principi es veu, per exemple, quan una tasca complexa —«fer que el robot esquive obstacles»— es divideix en peces com «llegir el sensor de distància», «decidir si l'obstacle

és massa a prop» i «girar cap a un costat». Cap d'elles és difícil per separat. Juntes, fan una cosa que semblava, de lluny, impossible.

Primer açò, després allò

Exercici clàssic desconnectat: instruccions literals per a fer un entrepà, interpretades al peu de la lletra per un alumne.

L'activitat la va trobar Empar en un blog de formació TIC, un d'eixos amb captures de pantalla d'anys enrere i un disseny que no havia canviat des de 2014, però que li va cridar l'atenció perquè no requeria res més que pa de motlle, mantega de cacauet, melmelada i un ganivet de plàstic. Cap cable. Cap app. Just el que buscava per a la primera sessió de veres davant de tota la classe.

—Hui necessite un voluntari que sàpiga escriure molt bé instruccions —va dir Empar dijous a primera hora, i vint-i-tres mans es van alçar de colp perquè «voluntari» sonava a premi encara que ningú sabera per a què.

Va triar Laia, que sempre acabava els exercicis abans que ningú i els revisava dos voltes per pur gust. L'encàrrec era senzill, en aparença: escriure, a la pissarra, el pas a pas exacte per a fer un entrepà

de mantega de cacauet i melmelada, tan detallat que qualsevol persona —«qualsevol persona», va insistir Empar, «encara que no sàpia què és un entrepà»— poguera seguir-lo sense equivocar-se.

Laia va escriure, amb la seua lletra rodona i sense dubtar:

1. Agafa dos llesques de pa.
2. Posa mantega de cacauet en una.
3. Posa melmelada en l'altra.
4. Ajunta les dos llesques.
5. Talla l'entrepà per la meitat.

—Perfecte —va dir Empar—. Ara, Biel, tu faràs exactament el que diu la pissarra. Ni una cosa més, ni una cosa menys.

Biel es va alçar amb la mena d'entusiasme reservat que amollava sols quan una tasca li semblava, per fi, digna d'atenció, i es va posar davant de la taula on hi havia el pa, els pots i el ganivet de plàstic. Va llegir el primer pas.

«Agafa dos llesques de pa.»

Les va agafar amb totes dos mans, una en cada una, i es va quedar quiet, mirant Empar amb

l'expressió de qui ha complit exactament el que li han demanat i espera instruccions noves.

—Continua —va dir Empar.

—No diu res més sobre el pa —va contestar Biel, encantat de la vida—. Diu «posa mantega de cacauet en una». No diu on he de deixar les llesques primer.

La classe va esclatar a riure abans que Empar poguera reaccionar, i ella mateixa va notar com se li escapava un somriure que no havia planejat. Va fer un gest a Biel perquè continuara improvisant una mica de sentit comú, però Laia, des del seu pupitre, ja alçava la mà indignada:

—Jo he dit «posa mantega de cacauet en una»! És evident que és en una llesca, no en la seua mà!

—Per a tu és evident —va dir Empar—. Per a un ordinador, no ho és mai. Continuem, Biel.

Biel va deixar les llesques damunt de la taula —no li ho havia dit ningú, però almenys ara sí que el pas semblava tindre sentit físic— i va obrir el pot de mantega de cacauet amb el ganivet de plàstic. El segon pas deia «posa mantega de cacauet en una», i ell, fidel a la lletra, va posar el ganivet sencer, cobert

de mantega, damunt de tota la llesca sense estendre-la, i va deixar el ganivet clavat com una bandera.

—Ja està —va dir—. Diu «posa», no diu «estén».

La classe tornava a riure, ara amb un cert regust de descobriment: alguna cosa hi havia ahí que anava més enllà de la broma. Empar va mirar la pissarra, els cinc passos de Laia, i va notar, per primera vegada des que havia obert el blog aquell matí, que entenia exactament què estava passant: no era que Biel fóra tossut o que Laia haguera escrit malament. Era que el llenguatge que fem servir cada dia entre persones dóna per suposades mil coses que ningú explicita mai —«estén», «amb compte», «en el centre de la llesca»— perquè entre persones ho completem tots amb sentit comú compartit. Un ordinador, o un Biel jugant a ser-ho, no té eixe sentit comú. Fa exactament el que li dius, ni una cosa més.

—Para un moment —va dir Empar, i va agafar un retolador—. Laia, no has fallat. Has escrit un algorisme perfectament raonable per a un humà. El problema és que un humà completa el que falta sense adonar-se'n, i un ordinador no completa res.

Torna a escriure el pas dos, ara sense donar per suposat res.

Laia es va quedar pensant més temps del que li havia costat la primera versió sencera, i finalment va escriure: «Amb el ganivet, agafa mantega de cacauet del pot i estén-la per tota la superfície d'una de les llesques, deixant una capa fina i uniforme.» Molt més llarg. Molt més avorrit de llegir. Molt més exacte.

Van repetir l'exercici tres voltes més, amb tres voluntaris diferents, i cada volta la pissarra es va anar omplint de detalls que ningú hauria pensat necessaris fins que algú, seguint-los al peu de la lletra, els havia deixat en evidència. Al final de la sessió, l'«entrepà perfecte» ocupava mitja pissarra i havia costat vint minuts, per a una cosa que qualsevol adult fa en trenta segons sense pensar-hi.

—Açò és cansat —va protestar algú des del fons.

—Ho és —va admetre Empar—. I això és exactament el que fan els programadors tot el dia: escriure instruccions tan avorridament exactes que no deixen lloc a cap Biel per a interpretar-les malament.

Biel, encara amb el ganivet de mantega a la mà, va somriure com si li acabaren de dir que la seua feina d'eixa vesprada era, oficialment, una feina seriosa.

Apunt tècnic: seqüències i algorismes, o per què l'ordre importa més del que pensem

Un **algorisme** és, simplement, una seqüència ordenada i exacta de passos que resol un problema o realitza una tasca. No té res d'exclusiu de la informàtica: una recepta de cuina, les instruccions de muntatge d'un moble o els passos per a fer-se el llaç de les sabates són tots algorismes. El que els fa útils per a un ordinador —o per a un robot— és el grau de precisió que exigixen.

Tres propietats que ha de tindre un bon algorisme:

- **Ordre clar:** cada pas succeeix després de l'anterior, i eixe orde no és arbitrari. Canviar-lo pot canviar el resultat («talla l'entrepà» abans

d'«ajunta les llesques» dóna un resultat completament diferent).

- **Precisió, sense donar res per suposat:** un ordinador no interpreta, no completa amb sentit comú, no dedueix el que «òbviament» volies dir. Fa exactament el que se li indica, tal com Biel va fer amb l'entrepà.
- **Final definit:** un algorisme ha de saber quan ha acabat. Els cinc passos de Laia tenien un final clar (l'entrepà tallat); un algorisme sense final és, com veurem al capítol següent, un dels errors més habituals en programació.

Per què això importa quan es tracta de robots: un programa no és més que un algorisme escrit en un llenguatge que la màquina puga executar. Quan, més avant en este llibre, un robot no faça el que s'esperava d'ell, la primera pregunta útil no serà «per què el robot és tan tossut», sinó la mateixa que Empar va aplicar amb Biel: «què he donat per suposat que no he escrit de veres?». La major part dels errors de programació —i molts errors de planificació, a l'aula i fora d'ella— no vénen de fer

alguna cosa malament, sinó de deixar alguna cosa sense dir.

Repeteix fins que...

Una rutina d'aula repetida sense condició d'eixida clara es descontrola.

Després de l'èxit relatiu de l'entrepà —relatiu perquè la classe encara li deia «l'entrepà de Biel» tres dies després, com si haguera sigut una gesta i no un exercici de llenguatge—, Empar va voler continuar amb una activitat més curta, quasi un escalfament, abans de passar a l'assignatura de veres. Havia llegit en algun lloc que als bucles calia introduir-los amb un joc físic, i se li va ocórrer un que li semblava innocu: un sac de fesols que aniria passant de mà en mà, en cercle, mentre cadascú deia en veu alta un número, començant per l'u.

—Passeu-lo i comptem, un cada volta —va dir Empar, amb el sac ja a les mans de Nico, el primer del cercle—. Repetiu fins que... —i ahí es va aturar un instant de massa, buscant una condició que no li va eixir amb la mateixa precisió amb què havia escrit els cinc passos de l'entrepà a la pissarra—. Fins que vos canseu.

Va ser, ho reconeixeria després, la frase menys precisa que havia dit en tota la setmana.

El sac va començar a circular. U, dos, tres. Fins ahí, tot correcte. Però «fins que vos canseu» no és una condició, és una absència de condició disfressada de frase feta, i vint-i-quatre criatures d'onze anys no es cansen amb la mateixa facilitat amb què es cansa una mestra de quaranta-dos després d'un matí sencer de classe. Al número vint, algú va decidir que passar-lo més ràpid era més divertit. Al número trenta, ja no s'esperava que el company anterior haguera acabat de dir el número: es llançava el sac abans, com una posta en escena de qui pot cridar més fort i més prompte.

—Més a poc a poc —va dir Empar, però la seua veu ja competia amb dotze converses paral·leles sobre si el rècord de la classe anterior havia sigut cent o cent cinquanta.

Al número seixanta-quatre el sac va colpejar la tauleta d'aigua de Laia i la va bolcar sobre el seu quadern de matemàtiques, que no tenia res a vore amb l'activitat però que va acabar, igualment, com a víctima col·lateral. Al número setanta, dos xiquets

discutien si tocava el seu torn o el de l'altre, perquè ningú duia el compte real, i «fins que vos canseu» s'havia convertit, sense que ningú ho haguera decidit, en «fins que algú diga prou». El problema era que ningú deia prou. Dir prou, quan tots els altres semblaven estar passant-ho bé, era arriscar-se a ser qui aturava la festa.

Empar va provar «pareu» dos voltes, amb el to de qui té experiència manant silenci a una aula, i les dos voltes el «pareu» es va perdre entre el soroll del sac colpejant taules i les rialles cada volta més altes. Va ser Marta, la mestra de l'aula del costat, qui va acabar resolent la situació obrint la porta amb la cara de qui interromp un examen: la seua classe estava fent una prova de comprensió lectora i el soroll travessava el passadís com si no hi haguera paret entre les dos aules.

Silenci immediat. El sac es va quedar quiet a mig aire, a les mans de Nico, que el va deixar caure amb un somriure culpable, com si el fóra a delatar.

—Perdona, Marta —va dir Empar, i va tancar la porta amb la sensació concreta, física, d'haver-se

equivocat en alguna cosa molt més senzilla del que semblava.

Es va asseure a la seua taula, va mirar el quadern de Laia amb la taca d'aigua eixamplant-se lentament per una pàgina d'operacions combinades, i va escriure, en la seua pròpia llibreta, amb lletra menuda i sense adorns: «*Fins que vos canseu» no és una condició. Cal un número, o un senyal, o un temps. Alguna cosa que es puga comprovar, no alguna cosa que se sent.*

No ho sabia encara amb eixe nom, però acabava d'escriure, sense voler-ho, la definició més exacta que tindria en molt de temps del que és un bucle mal tancat.

Va tancar la llibreta sense necessitat de deixar-ho tot resolt abans de l'endemà. Ja sabia què faria amb el sac de fesols la pròxima volta: li posaria un número. Un número exacte, no una sensació.

Si plou, aleshores…

La decisió de pati interior o exterior, usada com a exemple viu de ramificació lògica.

Al CEIP El Tossal Roig hi havia una norma que tothom coneixia i que, en realitat, no estava escrita enlloc: si plovia, pati interior; si no plovia, pati exterior. Semblava tan simple que ningú s'havia plantejat mai escriure-la amb més detall, fins que Empar, buscant un exemple viu per a explicar els condicionals, es va adonar que eixa norma tan simple amagava més trampes de les que semblava.

Ho va comprovar el mateix dimarts que la va voler fer servir a classe. A les onze del matí queia una plugina fina, del tipus que no mulla la roba però sí el terra, i la megafonia va anunciar pati interior amb la veu del conserge. Vint minuts després, quan els xiquets ja s'havien acomodat als seus jocs de taula a l'aula, va eixir el sol i va parar de ploure del tot, i des del passadís es van sentir crits d'una altra classe que sí que havia eixit al pati, perquè el seu

mestre havia decidit, pel seu compte, que la plugina havia parat prou d'hora com per a canviar el pla.

—Això és el que necessitàvem —va pensar Empar en veu alta, davant de la classe, aprofitant la confusió del passadís—. Anem a escriure la norma de veres, la que hauria d'usar el col·legi sencer perquè no passe açò cada volta que plou.

Va dibuixar a la pissarra dos caixes i una pregunta entre elles: «Està plovent ara mateix?». D'una caixa eixia una fletxa amb «SÍ» cap a «pati interior»; de l'altra, una fletxa amb «NO» cap a «pati exterior».

—Perfecte —va dir Nico, alçant la mà—. Però hui no estava plovent quan hem eixit i el terra encara estava mullat. Jo m'he relliscat.

Empar va assentir, va afegir una tercera caixa a la pissarra, entre les dos anteriors: «Si no plou, però el terra encara està mullat, ¿què fem?». La classe es va dividir en dos bàndols, uns defensant que un terra mullat era tan perillós com la pluja mateixa, altres que si no plovia ja no havia raó per a quedar-se dins. Empar va deixar que discutiren un minut més del que solia permetre's, perquè s'havia adonat que la

discussió mateixa era, sense que ningú ho diguera amb eixes paraules, l'exercici.

—Val, anem a fer-ho bé del tot —va dir finalment—. Una norma no pot tindre sols dos opcions si la realitat en té tres. Ajudeu-me a escriure-la sencera.

Entre tots van acabar amb una cosa semblant a açò, escrit en tres columnes a la pissarra:

- Si plou ara mateix → pati interior.
- Si no plou, però el terra continua mullat → pati exterior amb calçat adequat, evitant les zones de bassals.
- Si no plou i el terra ja està sec → pati exterior normal.

—I si comença a ploure a mitat pati? —va preguntar Laia, sempre a la caça de l'excepció que ningú havia previst.

—Eixa —va dir Empar, alçant un dit com si l'hagueren enxampat en falta a ella mateixa— és exactament la pregunta que ningú d'este col·legi ha respost mai per escrit. Per això cada mestre decidix una cosa diferent quan passa.

Ho va comprovar l'endemà, per pura casualitat, quan va coincidir a la sala de professors amb Ferran, el director, mentre parlaven de la megafonia del pati.

—Jo, si dubte, faig eixir els xiquets —li va dir Ferran, amb la seguretat de qui porta anys prenent eixa decisió sense qüestionar-se-la—. Millor un poc de sol que tindre'ls tota l'hora tancats.

—Marta, en canvi, si dubte, els deixa dins —va contestar Empar—. M'ho va dir fa un mes. I cap dels dos esteu equivocats: és que la norma no diu què fer quan es dubta. Cadascú ha omplit eixe buit a la seua manera.

Ferran es va quedar un instant callat, com si la idea li resultara més interessant del que esperava d'una conversa de sala de professors un dimecres a les dotze.

—I tu com ho faries? —li va preguntar, mig en broma.

—Jo posaria una condició extra. Si el cel es cobreix i el servei meteorològic diu més de seixanta per cent de probabilitat en la següent mitja hora, pati interior directament, sense esperar que comence

a ploure de veres per a decidir. —Ho va dir amb la mateixa naturalitat amb què hauria explicat una fitxa de matemàtiques, i només després es va adonar que acabava de dissenyar, sense voler, un condicional de tres nivells per a resoldre un problema que el col·legi arrossegava des de feia anys sense escriure'l mai amb aquella precisió.

A classe, els dies següents, «si plou, aleshores» es va convertir en la broma recurrent de qualsevol decisió de l'aula. Si un exercici s'acabava abans d'hora, algú preguntava «i aleshores què fem, si...?» amb la veu exagerada d'un narrador de telenotícies. Empar ho deixava passar, perquè cada volta que ho sentia comprovava que la idea havia arrelat: una decisió no és una sola resposta, és una pregunta amb totes les respostes possibles ja previstes, encara que algunes semblen, a primera vista, massa rares per a molestar-se a escriure-les.

Apunt tècnic: condicionals, o com escriure totes les respostes possibles per endavant

Un **condicional** és una estructura de control que permet que un programa —o una norma, o una persona— prenga una decisió diferent segons si es complix o no una condició. En la seua forma més bàsica:

```
si (condició) llavors
    fes açò
sinó
    fes allò
```

El parany més habitual, i el que va descobrir la classe d'Empar sense buscar-lo: pensar que la realitat sempre es reduïx a dos opcions. Sovint calen més branques de les que semblen a primera vista:

```
si plou llavors
    pati interior
sinó si el terra encara està mullat llavors
    pati exterior amb precaucions
sinó
    pati exterior normal
```

Cada `sinó si` afig una condició nova que es comprova només si les anteriors han fallat. L'orde importa: les condicions es comproven de dalt a baix, i la primera que es complix és la que s'executa; les que vénen després ja no es miren.

Un segon parany, encara més subtil: les condicions que no es preveuen no desapareixen, sols queden sense resposta escrita, i cada persona —o cada part del programa— acaba omplint eixe buit a la seua manera, com Ferran i Marta amb el «dubte» del pati. En programació açò es coneix com un cas no contemplat, i és una font habitual d'errors: no perquè el codi estiga mal escrit, sinó perquè hi ha una situació real que ningú va preveure quan es va escriure la condició.

Regla pràctica per a no deixar-se cap cas fora: després d'escriure un condicional, preguntar-se «hi ha alguna situació real que no encaixe en cap de les branques que he escrit?». Si la resposta és sí, encara falta una branca. Empar ho va aprendre amb un pati mullat; un robot, més avant en este llibre, ho ensenyarà amb un obstacle que ningú havia previst.

On s'ha trencat?

Un exercici en paper falla davant de tota la classe; Empar vol esborrar i repetir, una mentora li ensenya a depurar pas a pas en públic.

L'exercici es deia, al full que Empar havia preparat amb hores de dissabte al davant, «la màquina de sumar de paper»: un diagrama de caixes i fletxes que la classe havia d'executar, pas a pas, com si cadascú fóra un engranatge d'un mecanisme més gran. Empar donava un número inicial, i la classe, seguint el diagrama caixa per caixa —suma tres, si és parell divideix per dos, si és senar multiplica per tres i suma u—, havia d'arribar a un resultat final que ella ja havia calculat per endavant, en secret, per a comprovar-ho al final.

Havia triat set com a número d'entrada perquè li havia eixit un resultat net, redó, fàcil de comprovar amb un cop d'ull: setze. Ho havia comprovat dos voltes dissabte, amb calculadora i tot, perquè Empar no portava mai res a classe sense haver-ho comprovat dos voltes.

—Comencem amb el set —va dir, i va anar guiant la classe caixa per caixa, escrivint cada resultat intermedi a la pissarra mentre vint-i-quatre veus cridaven els números en veu alta, encantats amb l'excusa de fer soroll de manera permesa.

Set, suma tres, deu. Deu és parell, divideix per dos, cinc. Cinc és senar, multiplica per tres i suma u, setze.

—Setze —van cridar tots a la volta, i Empar va sentir eixa xicoteta descàrrega de satisfacció que li donava veure un pla eixir exactament com l'havia calculat.

—Ara ho fem amb un altre número —va dir, animada—. Qui vol triar-lo?

—Nou —va cridar Nico, i Empar el va escriure a la pissarra sense pensar-hi més, perquè no l'havia comprovat abans, confiada com estava després de l'èxit anterior.

Nou, suma tres, dotze. Dotze és parell, divideix per dos, sis. Sis és parell, divideix per dos, tres. Tres és senar, multiplica per tres i suma u, deu. Deu és parell, divideix per dos, cinc. Cinc és senar...

La classe va continuar cridant números durant un temps que va començar a resultar-li llarg a Empar sense que ella sabera dir exactament per què. Tres, multiplica per tres i suma u, deu. Deu, divideix per dos, cinc. I tornaven a cinc. I tornaven a deu. La pissarra ja tenia set files de números repetint-se, cinc, deu, cinc, deu, i la classe havia deixat de cridar amb entusiasme per a cridar-ho amb la incertesa de qui no sap si continuar és el joc o l'error.

—Para, para —va dir Empar, i va notar, amb una claredat física i incòmoda, que la seua «màquina de sumar» —el diagrama que havia dissenyat amb tanta cura un dissabte sencer— no arribava mai a un final amb el nou. Es repetia per sempre entre cinc i deu, com un bucle que ningú havia previst tancar.

El primer impuls, el mateix impuls de sempre, va ser esborrar-ho tot i tornar a explicar l'activitat des de zero amb un exemple diferent, un que ella ja sabera que funcionava, i fer com si el nou no haguera passat mai. Va agafar el drap de la pissarra amb eixa intenció exacta.

—Espera —va dir Alba, que passava per l'aula per a arreplegar una carpeta i s'havia quedat a la porta,

atreta pel soroll de nombres cridats a l'unísson—. No l'esborres. Deixa-ho ahí. Mira-ho amb els xiquets.

Empar va deixar el drap damunt de la taula, més per confiança en Alba que per convicció pròpia, i es va girar cap a la pissarra amb la sensació d'estar exposant, davant de tota la classe, un error que hauria preferit corregir en privat.

—Val —va dir Alba, dirigint-se ara a tota la classe—. No hem d'esborrar res. Hem de trobar exactament on s'ha trencat. On era tot bé, i on va deixar de ser bé?

Va ser Biel qui va contestar primer, sense alçar la mà, cosa que feia sovint quan una cosa li interessava de veres.

—Amb el set anava bé fins al final. Amb el nou anava bé fins que va arribar a cinc la segona volta. Ahí és quan comença a repetir-se.

—Exacte —va dir Alba—. Doncs no cal repassar tota la màquina des del principi. Cal mirar només eixe tros: què li passa al cinc perquè torne a ser deu i el deu torne a ser cinc, per sempre.

Empar va anar amb el dit sobre la pissarra, seguint la fletxa del cinc: senar, multiplica per tres

i suma u, setze... no. Es va aturar. La fletxa deia «multiplica per tres i suma u» i ella, sense adonar-se'n, havia estat aplicant, en algun punt del camí, «multiplica per dos i suma u», una regla diferent, mesclada mentalment amb una altra activitat semblant que havia preparat el curs anterior i que encara li quedava al cap com un ressò.

—Ahí està —va dir en veu baixa, i llavors, més fort, perquè la classe ho sentira—: no era un problema del nou. Era un problema de la meua fletxa. He escrit «multiplica per tres» al diagrama, però quan calculava en veu alta anava fent «multiplica per dos» sense adonar-me'n. El diagrama i el que jo feia no coincidien.

—Para. Mira on s'ha trencat. Torna-ho a provar des d'ahí —va dir Biel, resumint-ho amb una frase que li havia eixit sense pensar massa, mig repetint el que Alba acabava de fer amb ells, mig inventant-la del tot.

Empar es va quedar mirant-lo un instant més llarg del que la frase mereixia per si mateixa. No sabia encara que la tornaria a sentir —en boca de Biel, i més avant, en la seua pròpia veu— cada vegada que

alguna cosa es trencara davant de tota una classe i el primer impuls fóra, com sempre, esborrar-ho tot i fingir que no havia passat.

Van refer només eixe tros del diagrama, en directe, davant de tots. Van comprovar el nou de nou, ara amb la fletxa correcta, i va arribar, per fi, a un resultat final: u. Diferent del setze, però un final de veres, no un bucle etern entre cinc i deu.

—Ha fallat i ho hem arreglat sense esborrar res —va dir Alba, ja de camí a la porta amb la seua carpeta—. Este és el capítol que hauries d'ensenyar-los tu mateixa la pròxima volta.

Empar no va contestar, però va guardar la frase de Biel en la mateixa llibreta on anava apuntant, des de feia setmanes, les tasques xicotetes que li anaven fent menys por la capsa tancada del racó de l'aula.

Apunt tècnic: depurar, o com trobar un error sense tornar a començar de zero

Depurar (en anglés, *debugging*) és el procés de trobar i corregir un error en un programa —o en qualsevol procediment que no dóna el resultat esperat. El nom ve d'una anècdota real de la informàtica dels anys quaranta: una polilla literal atrapada dins d'un relé va provocar una fallada en un dels primers ordinadors, i l'equip la va enganxar al quadern de registre amb la nota «first actual case of bug being found». El terme «bug» ja s'usava informalment per a designar xicotets defectes tècnics des de feia dècades, però esta anècdota li va donar, per primera vegada, una il·lustració literal i memorable, i «depurar», el procés de trobar l'error i corregir-lo.

L'error més comú a l'hora de depurar no és tècnic, és emocional: l'impuls d'esborrar-ho tot i tornar a començar quan alguna cosa falla en públic. És comprensible —esborrar amaga l'error abans que ningú s'hi fixe massa—, però és ineficient: es perd

tot el treball previ, inclosa la part que sí funcionava, i sovint es torna a cometre exactament el mateix error, perquè no s'ha entés on estava realment.

El mètode que Alba li va mostrar a Empar, en quatre passos, és el mateix que fa servir qualsevol programadora amb experiència:

1. **Reproduir l'error de manera fiable.** Si no es pot fer que torne a passar, és molt difícil saber si s'ha arreglat de veres. Empar ho va aconseguir tornant a provar amb el nou.
2. **Aïllar el moment exacte on tot deixa de ser correcte.** No cal repassar el procés sencer des del principi: cal localitzar, com va fer Biel, el punt precís «anava bé fins ací, i des d'ací ja no».
3. **Formular una hipòtesi concreta i comprovable** sobre per què eixe pas concret falla, i comprovar-la —en el cas d'Empar, la hipòtesi era «estic aplicant una regla diferent de la que he escrit», i comprovar-la va ser tan senzill com llegir la fletxa en veu alta.
4. **Corregir només eixe tros, i tornar a executar-ho sencer** per a confirmar que el resultat ara sí

és el correcte, i que la correcció no ha trencat res que abans funcionava bé.

Una tècnica addicional, molt usada per programadors reals i que funciona igual de bé amb un diagrama de paper: explicar l'error en veu alta, pas a pas, a algú —o fins i tot a un objecte, com fa la broma coneguda de l'*ànec de goma*, el ritual d'explicar el codi a un patet de goma damunt de la taula. Sovint, el simple fet de dir en veu alta cada pas obliga a notar la incoherència que, mirant-la en silenci, passava desapercebuda.

Què tenen en comú?

Activitat de classificació amb l'alumnat: apareixen patrons inesperats.

Empar havia muntat sis estacions per l'aula, cadascuna amb una targeta plastificada —perquè, malgrat tot el que havia aprés fins ara sobre trossejar la por i no esborrar els errors, seguia sent Empar, i les targetes de matemàtiques es plastificaven, no hi havia discussió possible sobre això— amb una sèrie de números incompleta: *2, 4, 6, 8,* ***. 1, 1, 2, 3, 5,*** **.** *3, 9, 27, __*. Cada grup havia de passar per totes sis, en deu minuts per estació, i escriure no sols el número que faltava, sinó la regla que havien fet servir per a trobar-lo.

L'objectiu, tal com l'havia anotat a la seua llibreta la nit anterior, era senzill: que descobriren que reconéixer un patró et permet predir el que ve després sense haver de calcular-ho tot des de zero. El que no havia previst era que el patró més interessant de tota la sessió no eixiria de cap de les seues targetes, sinó del propi alumnat.

A l'estació quatre —*1, 4, 9, 16, __*—, tres grups diferents, sense haver-se comunicat entre ells, van escriure la mateixa resposta equivocada: vint. Empar ho va notar mentre passava taula per taula, comprovant respostes amb el seu llapis vermell, i la coincidència li va cridar l'atenció més que l'error en si.

—Explica'm com heu arribat a vint —li va dir a Nico, que defensava la seua resposta amb la seguretat de qui està convençut d'haver-la encertada.

—Cada número és el número anterior més el següent senar —va dir Nico—. U, més tres, quatre. Més cinc, nou. Més set, setze. Més huit, vint-i-quatre... —es va aturar, va tornar a mirar la targeta, va fer un gest estrany amb la boca—. Espera, no dóna vint.

—No, no dóna vint —va confirmar Empar—. Però la teua regla és bona. «Cada número és l'anterior més el següent senar» és exactament com es genera eixa sèrie. T'has equivocat sumant, no reconeixent el patró.

A l'altra taula, Laia havia arribat al mateix vint per un camí diferent i incorrecte: havia mirat només les diferències entre els primers números —

tres, cinc— i havia assumit que la diferència creixia sempre de dos en dos, sense comprovar-ho amb els termes següents de veres, que creixien de dos en dos però no de la manera exacta que ella havia extrapolat massa de pressa.

—Açò és el que passa quan es reconeix un patró massa ràpid, amb massa poques dades —va dir Empar, ara ja dirigint-se a tota la classe, perquè s'havia adonat que l'error compartit era, en realitat, la millor lliçó possible del dia—. Dos regles diferents, els dos grups convençuts, i cap de les dos era exactament la correcta. ¿Com sabem quina regla és de veres la bona?

—Comprovant-la amb més números —va dir Laia, ja corregint-se ella mateixa en veu alta—. Si la regla val per al primer, el segon i el tercer, però falla en el quart, no era la regla de veres. Era casualitat.

Va ser Biel, a l'estació sis —*5, 10, 20, 40, __*—, qui va trobar alguna cosa que ni tan sols la targeta plastificada d'Empar havia previst. En lloc d'escriure «vuitanta», la resposta esperada, va escriure una cosa diferent: «Este es multiplica per dos cada volta, com el joc de l'aigua que fem al pati quan

doblem la distància del bot cada volta que li piques a la pilota. És el mateix que el bucle del sac de fesols, però en compte de sumar u, multiplica.»

Empar es va quedar mirant la resposta un moment abans de contestar. No era el que havia demanat —li havia demanat el número que faltava i la regla, no una comparació amb un joc de pati ni amb l'incident del sac de fesols del capítol de bucles, que la classe encara recordava amb una barreja de vergonya i orgull—, però era, potser, la resposta més valuosa de tot l'exercici: Biel havia reconegut que el mateix patró —«repetir una operació sobre el resultat anterior»— apareixia en llocs completament diferents: una sèrie numèrica, un joc físic, un bucle de programació que encara ni havien tocat de veres.

—Això és exactament el que volia que descobrírem hui —va dir Empar, i ho deia de veres, encara que la resposta no vinguera en la forma que havia dissenyat—. Un patró no és sols «el número que ve després». És notar que dos coses que semblen diferents —una sèrie de números i un joc de pilota— funcionen, per dins, igual. Quan aprens a vore això,

no cal tornar a resoldre cada problema des de zero: si ja saps com funciona un, saps com abordar l'altre.

Va escriure a la pissarra, huitanta damunt de la resposta de Biel, i al costat, amb lletra grossa: «*Reconéixer un patró = no tornar a inventar la roda cada volta.*»

La classe va acabar amb sis estacions plenes de números correctes i, penjada al costat, una targeta nova que Empar mateixa va afegir aquella mateixa vesprada, sense cap número, només amb la frase de Biel copiada quasi literal. No sabia encara on l'aplicaria de veres —encara faltaven setmanes per a obrir la capsa—, però intuïa, amb la mateixa certesa amb què havia intuït que calia trossejar el problema abans de resoldre'l, que alguna cosa d'allò li serviria molt més avant.

Apunt tècnic: reconeixement de patrons, o per què no cal resoldre cada problema des de zero

El **reconeixement de patrons** és el tercer pilar del pensament computacional: la capacitat de notar regularitats, semblances o repeticions entre problemes que, a primera vista, semblen diferents. No consistix només en completar sèries numèriques —encara que este és l'exercici clàssic per a introduir-lo—: consistix a identificar que un problema nou s'assembla, en la seua estructura, a un que ja s'ha resolt abans.

Per què és útil en programació: quan un programador reconeix que un problema nou («fer que el robot gire cap a la dreta quan detecte un obstacle a l'esquerra») s'assembla a un que ja ha resolt («fer que el robot gire cap a l'esquerra quan detecte un obstacle a la dreta»), no ha de dissenyar la solució des de zero: pot reutilitzar l'estructura que ja funcionava, canviant només allò que és diferent. Esta és, de fet, la base de conceptes com les funcions o les

plantilles de codi: escriure una solució general una sola volta i reutilitzar-la cada volta que aparega un problema amb la mateixa estructura.

El parany que va aparéixer a classe, i que és real en programació: reconéixer un patró amb massa poques dades porta a regles equivocades que, casualment, encaixen amb els primers casos. Com més exemples es comproven abans de donar per bona una regla, més fiable és el patró. En depuració de programes reals passa exactament el mateix: un error que sembla seguir un patró clar («sempre falla quan hi ha més de deu elements») pot ser, en realitat, casualitat, si només s'ha comprovat dos o tres voltes.

Un patró interessant, per cert, no sempre apareix on s'esperava. La sèrie *5, 10, 20, 40* i un bucle que multiplica el resultat anterior per dos comparteixen exactament la mateixa estructura matemàtica —creixement exponencial—, encara que un semble un exercici de classe i l'altre, un concepte de programació. Aprendre a vore eixa connexió és, en definitiva, l'objectiu real d'este pilar: no memoritzar

solucions, sinó reconéixer quan una solució que ja tens val també per a un problema nou.

Fes-ne un dibuix senzill

Exercici de mapa simplificat per a guiar un company amb els ulls embenats.

L'aula de sisé A, aquell divendres, tenia un aspecte que no havia tingut mai: taules apartades cap a les parets formant un passadís irregular, tres cadires col·locades com a obstacles al mig, una motxilla oberta al terra fent de parany i, al final de tot, la porta de l'armari de material com a meta. Empar havia demanat permís al director per a moure el mobiliari «una hora, com a molt», i Ferran li havia dit que sí sense preguntar massa, encara content, semblava, d'haver-la vist obrir per fi la porta de l'armari on guardava idees noves.

La dinàmica era senzilla d'explicar i, com Empar ja començava a sospitar de qualsevol cosa que sonara senzilla, molt més complicada de fer bé. Per parelles: un alumne es posava un mocador als ulls, l'altre dibuixava, en un full de paper, un mapa del recorregut per a guiar-lo amb instruccions parlades

—«tres passes avant, gira a l'esquerra, para»—, sense poder tocar-lo en cap moment.

El primer parell va ser Laia i un company seu, i Laia, fidel a si mateixa, va dibuixar un mapa que semblava tret d'un llibre de text: cada taula de l'aula, amb les seues quatre potes marcades, cada cadira amb el respatler dibuixat, fins i tot la finestra i el rellotge de paret, per si servien de referència. Va tardar set minuts a dibuixar-lo, mentre la resta de la classe esperava el seu torn.

—Molt bonic —va dir Empar, mirant el mapa per damunt del muscle de Laia—. Ara, guia'l.

Laia va començar a llegir del seu propi mapa, tan detallat que ni ella mateixa sabia ben bé quina part era important i quina no: «passa vora la taula tres, que té una pota una mica torta, deixa a la teua dreta la cadira blava, no la verda que està més avant...». El seu company, embenat, es va quedar quiet al mig del passadís, confós per una quantitat d'informació que no li servia per a decidir res concret: no li calia saber el color de la cadira, li calia saber si havia de girar o continuar recte.

—Para —va dir Empar, sense alçar la veu, notant amb una certa ironia que la instrucció li havia eixit amb la mateixa naturalitat amb què l'havia dit Alba unes setmanes abans, davant de la pissarra trencada del bucle—. Laia, mira el teu mapa. Quantes coses hi ha dibuixades que no necessites dir per a guiar-lo bé?

Laia va repassar el full amb els ulls. Les potes de les taules. El rellotge. La finestra. Al cap d'un moment, avergonyida i alhora sorpresa, va assenyalar quasi tot el dibuix.

—Quasi tot —va admetre.

—Torna-ho a fer. Esta volta, dibuixa només el que necessites per a donar les instruccions correctes: on hi ha un obstacle, cap a quin costat cal girar, i on és la meta. Res més.

El segon intent de Laia va tardar noranta segons, no set minuts, i va consistir en quatre rectangles i tres fletxes. El seu company va arribar a la meta en menys d'un minut, sense un sol tropetó.

L'altre extrem del problema el va protagonitzar Nico, que havia decidit, sense que ningú li ho demanara, resoldre l'exercici «a la seua manera»: cap

dibuix, només memòria. Va assegurar que ho tenia tot al cap i que un mapa era una pèrdua de temps. El seu company, embenat, va acabar amb el genoll contra una cadira que Nico, en la seua versió mental del recorregut, havia oblidat completament que hi era.

—Ai, és veritat, eixa cadira —va dir Nico, mentre el seu company es fregava el genoll amb una barreja de riure i queixa.

—Nico —va dir Empar, ajudant el company a alçar-se—, tu has fet exactament el contrari de Laia. Ella ho havia dibuixat tot i li sobrava. Tu no has dibuixat res i t'ha faltat el més important. Els dos heu fallat pel mateix motiu: no heu decidit, abans de començar, què era rellevant de veres.

Va aprofitar el moment, amb tota la classe ja atenta a la comparació entre els dos extrems, per a dibuixar a la pissarra els dos mapes de Laia, el primer i el segon, un al costat de l'altre. El primer semblava un plànol d'arquitecte. El segon, un esbós de cinc segons. I tot i això, era el segon el que havia funcionat.

—Un bon mapa no és el que s'assembla més a la realitat —va dir Empar—. És el que et dóna, exactament, la informació que necessites per a prendre les decisions que has de prendre, i cap més. Massa detall confon igual que massa poc informa malament.

Biel, des del fons, va alçar la mà per primera volta en tota la sessió, cosa poc habitual en ell.

—Com el mapa del metro de València —va dir—. El meu pare en té un a la cartera. No té ni els carrers de veres ni les distàncies certes, però et diu exactament on has de canviar de línia.

—Exactament com eixe mapa —va confirmar Empar, i va apuntar la comparació a la seua llibreta, al costat de la frase de la sessió anterior sobre els patrons que es repetien en llocs diferents. Començava a notar, sense buscar-ho, que cada exercici acabava enllaçant-se amb l'anterior d'una manera que ella mateixa no havia planificat del tot, com si la classe sencera estiguera construint, entre tots, un mapa propi —senzill, útil, sense potes de taula ni rellotges de paret— de com pensar millor.

Apunt tècnic: abstracció, o decidir què no cal dibuixar

L'**abstracció** és el quart pilar del pensament computacional: la capacitat d'eliminar els detalls irrellevants d'un problema per a quedar-se només amb allò que és necessari per a resoldre'l. No és simplificar per simplificar —ometre informació important també és un error—: és decidir, amb criteri, què fa falta i què és soroll.

L'exemple clàssic, i el que va citar Biel sense saber-ho, és el mapa de metro. Un mapa de metro real distorsiona conscientment les distàncies i la forma de les vies perquè la informació que de veres importa a qui viatja —l'orde de les parades i on canviar de línia— quede clara d'un cop d'ull. Un mapa geogràficament exacte, amb totes les corbes reals del traçat, seria molt més fidel a la realitat i molt més inútil per a l'ús que se li dóna.

En programació, l'abstracció apareix contínuament, encara que no es diga amb eixe nom:

- Quan es fa servir una comanda com «avança» per a moure un robot, no cal saber quants volts arriben al motor ni com gira l'eix intern: eixe detall queda amagat, abstret, darrere d'una instrucció senzilla.
- Quan es dissenya un algorisme de navegació, no cal representar cada centímetre del terra: n'hi ha prou amb saber on hi ha línia i on no, exactament com el mapa senzill de Laia només marcava obstacles i direccions.

Els dos errors oposats que van aparéixer a classe són, tots dos, errors reals de disseny:

- **Excés de detall** (el primer mapa de Laia): fa que la informació important es perda enmig de la irrellevant, i alenteix qualsevol decisió.
- **Defecte de detall** (l'intent de Nico sense mapa): omet informació necessària i porta a errors que es podrien haver evitat amb un mínim de planificació.

Regla pràctica: un bon nivell d'abstracció es prova, no s'endevina. Si el mapa —o el programa, o l'algorisme— no permet prendre correctament totes les decisions necessàries, li falta detall. Si sobra

informació que ningú fa servir per a decidir res, en té massa. Trobar eixe punt just és, en bona part, l'ofici de qui programa.

Camina tres passes, gira a la dreta

El joc de "l'humà-robot" transcrit com a guió: instruccions literals, ambigüitats, fallades d'execució.

Empar havia començat, des de fa unes setmanes, a transcriure algunes sessions al seu quadern, no per obligació sinó perquè li resultava útil rellegir-les després per a preparar la següent. Esta és, quasi paraula per paraula, la que va anotar aquell dilluns, amb l'aula buida de mobiliari com la sessió del mapa, un carrer marcat amb cinta adhesiva blava al terra, i tota la classe asseguda al voltant en cercle.

EMPAR: Hui, un de vosaltres serà el robot. L'altre, el programador. El robot no pot fer res que el programador no li haja dit, exactament. Si el programador diu «gira», el robot no sap ni cap a on ni quant. Cal dir-ho tot.

NICO: *(alçant la mà)* Jo vull ser el robot!

EMPAR: Molt bé. Biel, tu seràs el programador de Nico.

Nico es posa dret damunt de la línia de cinta blava, els braços caiguts, la cara ja preparant-se per a exagerar el paper. Biel, assegut al cercle, mira la línia i pensa un moment abans de parlar.

BIEL: Avança tres passes.

NICO: *(fa tres passes exagerades, quasi de dibuixos animats, i para al final de la tercera)*

BIEL: Gira a la dreta.

Nico gira, però no s'atura: continua girant, una volta sencera, i mig d'una altra, entre les rialles de la resta de la classe.

BIEL: Para!

NICO: *(es queda quiet, encara mig girat)* No m'has dit quant havia de girar!

EMPAR: Té raó. «Gira a la dreta» no diu si és un quart de volta, mitja volta o cent vint graus. Un robot de veres no s'atura sol perquè li «semble» que ja ha girat prou. S'atura on el número li diu que s'ature.

BIEL: *(pensant-hi)* Gira noranta graus cap a la dreta.

NICO: *(gira, ara amb cura, comptant en veu baixa quelcom pareguda a un quart de volta, i s'atura)*

LAIA: *(des del cercle, sense poder-se estar callada)* No sé si eixe angle és noranta de veres!

EMPAR: Bona observació. I ahí hi ha un problema afegit: encara que Biel diga un número exacte, Nico l'ha d'interpretar amb el cos, i el cos no és precís com un motor. Continua, Biel.

BIEL: Avança quatre passes.

NICO: *(avança quatre passes, ara ja amb menys teatralitat i més concentració, com si la broma s'haguera convertit, sense que ell ho decidira del tot, en un repte real)*

BIEL: Gira noranta graus a l'esquerra.

NICO: *(gira)*

BIEL: Avança dos passes.

NICO: *(avança, i el peu li topa amb la cadira que fa d'obstacle al mig del recorregut, la que Empar havia col·locat allí a posta)* Ai!

EMPAR: *(alçant la mà perquè tothom pare un moment)* Aturem-nos ací. Biel, tu sabies que hi havia una cadira ahí?

BIEL: Sí, la veia.

EMPAR: I per què no li has dit a Nico que l'esquivara?

BIEL: *(pensant-hi, amb la cara de qui acaba d'entendre alguna cosa que no havia vist venir)* Perquè jo la veia. Pensava que ell també.

EMPAR: Ell tenia els ulls oberts, però un robot de veres no veu el que tu veus des d'ací. Un robot només sap el que li diuen les seues pròpies instruccions i, si en té, els seus propis sensors. No sap res del que tu saps, encara que estiga just davant seu.

Un murmuri recorre el cercle: algú diu «ah» amb el to de qui acaba de connectar una idea amb una altra de sessions anteriors.

LAIA: És com el problema del mapa amb massa detall! No, espera... és el contrari. Ara falta un detall important i no s'ha dit.

EMPAR: Exacte. Fes-ne un dibuix senzill vol dir traure el que sobra. Este exercici vol dir una altra cosa igual d'important: no oblidar el que és imprescindible només perquè, per a tu, és òbviament.

Canvi de parella. Ara Laia és el robot, i el programador és un alumne nou, Khalid, que decideix intentar-ho amb instruccions més curtes i confiades del compte.

KHALID: Avança fins a la paret.

EMPAR: Para. «Fins a la paret» no és una instrucció que un robot puga executar tal qual. Quantes passes són, exactament?

KHALID: No ho sé, no les he comptades...

EMPAR: Doncs eixe és el treball. No val a dir «fins a», ni «una mica», ni «bastant». Cal el número.

Khalid compta amb els ulls les passes que calculen que hi ha fins a la paret, sis, i les diu en veu alta.

KHALID: Avança sis passes.

LAIA: *(avança sis passes exactes, comptant-les en veu baixa, i s'atura just davant de la paret, sense tocar-la)*

EMPAR: Molt bé. Este és exactament l'objectiu: cap paraula que done res per suposat. Cap «una mica», cap «fins a». Números, direccions, i res més.

Empar va tancar el quadern eixa mateixa nit amb una nota al marge, escrita després, quan ja no estava a l'aula sinó a la taula de casa: «*El que li ha costat més a la classe no ha sigut dir instruccions precises. Ha sigut adonar-se de tot allò que donaven per suposat sense dir-*

ho. Igual que jo amb l'entrepà de Biel. Açò no és un exercici de xiquets, és el mateix problema que tinc jo amb el manual de la Conselleria.»

Apunt tècnic: precisió i llenguatge no ambigu

El joc de «l'humà-robot» és una de les activitats desconnectades més usades a nivell internacional per a introduir la programació, perquè posa en evidència, de manera física i immediata, una diferència fonamental entre com parlen les persones entre si i com cal parlar-li a una màquina.

El llenguatge humà és, per naturalesa, ambigu i depén del context compartit. Quan una persona diu «gira a la dreta», l'altra completa automàticament els detalls que falten —quant, a quina velocitat, si cal parar-se abans— perquè totes dos comparteixen una experiència del món que permet inferir-los. Un programa, i molt especialment un robot, no comparteix eixa experiència. Necessita:

- **Comandos amb un significat únic i acordat prèviament** (`avança`, `gira`), no descripcions lliures.
- **Paràmetres numèrics exactes** on la instrucció ho requerisca: quantes passes, quants graus, en quina direcció.
- **Tota la informació rellevant explicitada**, incloent-hi allò que sembla «òbvia» per a qui la diu, com la cadira que Biel veia i Nico no sabia que havia d'esquivar.

Este mateix problema té un nom en programació: l'**especificació incompleta**. Passa quan qui escriu el codi sap alguna cosa sobre el context — un obstacle, un cas especial, una condició del món real— i no la trasllada al programa perquè assumeix, sense adonar-se'n, que «ja se sap». El robot, com Nico amb els ulls oberts però sense instruccions, no pot vore res que no li hagen dit explícitament que busque.

Per què este exercici és el pas final abans d'obrir la capsa de robots de veres: tot el que ha aparegut en estos primers capítols — descomposició, algorismes, bucles, condicionals,

depuració, patrons, abstracció— es reduïx, a la pràctica, a esta única habilitat: dir exactament el que es vol, sense donar res per suposat. Un robot físic no perdona eixe descuit amb rialles de classe. Simplement, no fa el que se suposava que faria.

T'ho vaig dir, calia dir-ho tot

Biel narra, amb veu pròpia, com va repetir el joc a casa amb el seu germà petit.

(Nota d'Empar: açò no ho vaig demanar de deures. Biel el va portar l'endemà del joc de l'humà-robot, escrit en un full solt de la seua llibreta, i em va dir «he fet un experiment a casa i crec que és important». L'he deixat tal com el va escriure, quasi sencer, perquè el que hi diu val més que qualsevol correcció d'estil que jo li poguera fer.)

Vale, açò va passar ahir a la vesprada. Vaig arribar a casa i el meu germà Martí, que té sis anys i sempre vol jugar al que jo he fet a classe encara que no ho entenga bé, em va preguntar què havíem fet. Li vaig contar el joc de l'humà-robot i li va agradar tant que va voler ser ell el robot ja mateix, sense ni deixar-me sopar primer.

Vaig pensar que seria fàcil perquè a classe ja ho havíem practicat i jo era el que millor ho havia fet,

això ho dic jo mateix però ho crec de veres. Li vaig dir a Martí que es posara a la porta de la cuina i que faria exactament el que jo li diguera, res més, res menys, com havíem fet amb Nico.

La primera instrucció va ser fàcil. Li vaig dir «avança quatre passes» i les va fer, encara que les seues passes de sis anys són molt més menudes que les meues i no vaig pensar en això abans, així que en realitat no va arribar on jo em pensava que arribaria. Ahí ja vaig aprendre la primera cosa: no és el mateix «quatre passes» per a mi que per a ell. Hauria d'haver dit metres o hauria d'haver-li dit que fera passes com les meues, no com les seues.

Després li vaig dir «gira a la dreta i para al costat del sofà». Ell va girar, però va girar cap a l'esquerra, i quan li vaig dir que era l'altra dreta es va enfadar i em va dir que jo no li havia dit quina dreta, la seua o la meua, perquè estàvem un davant de l'altre i la dreta d'ell és l'esquerra meua. I açò em va fer molta ràbia perquè tenia raó del tot. A classe, quan Biel (jo) li deia a Nico «gira a la dreta», els dos miràvem cap al mateix costat, així que no ens vam adonar del

problema. Amb Martí, com estàvem un davant de l'altre, la dreta ja no era la mateixa per als dos.

Vaig pensar «para, mira on s'ha trencat, torna-ho a provar des d'ahí», que és el que vaig dir jo mateix a classe sense pensar-hi massa i que ara resulta que servix per a tot, fins i tot per a un germà de sis anys enfadat al costat del sofà. No vaig tornar a començar el joc sencer. Vaig tornar només al pas de girar, i li vaig explicar que a partir d'ara diria «la teua dreta» sempre que calguera, per a que no haguera confusió mai més.

Amb això arreglat, vaig continuar. «Avança dos passes» (les vam mesurar amb els seus peus, ja tenint en compte açò). «Agafa el coixí grec del sofà», que és el que té ratlles de colors, perquè n'hi ha tres coixins i jo sabia quin era però no li ho havia dit prou clar. Martí va agafar un altre, el blau llis, perquè per a ell «el coixí» no era prou informació, hi havia tres per triar i jo només n'havia dit un genèric.

Ahí va ser quan vaig entendre la cosa gran de tot açò, que és el que vull explicar de veres en este full i no sols contar batalletes de casa meua. El problema no és que Martí siga bèstia, ni que Nico ho fóra a

classe. El problema és sempre el mateix i sóc jo, o qui done les instruccions, el que es pensa que ha dit prou i en realitat no ha dit prou. Jo sabia quin coixí era. Jo sabia quina dreta era la meua. El que no vaig fer va ser posar-me en el lloc del qui rep les instruccions i preguntar-me: si jo no sabera res del que jo sé, m'entendria a mi mateix?

Al final, amb tot açò corregit pas a pas, Martí va arribar fins al coixí de ratlles i el va portar fins a la porta de la cuina sense equivocar-se ni una volta més. Es va posar molt content, com si haguera guanyat un partit, i jo també, però per una raó diferent: no havia guanyat perquè el joc m'isquera bé a la primera, sinó perquè cada volta que s'espatllava alguna cosa, sabia exactament què fer: parar, mirar on s'havia trencat, i tornar-ho a provar només des d'ahí, no des del principi.

La mestra ens ha dit moltes voltes que un robot fa exactament el que li dius, ni una cosa més. Doncs resulta que un germà de sis anys també, i encara diria més: qualsevol persona, si li dius les coses a mitges, fa exactament el que li has dit a mitges, no el que tu volies dir de veres. Açò ho vaig aprendre

jo sol, a casa, sense cap robot de veres, i crec que és important perquè quan obrim la capsa que tenim tancada a classe, si li dic al robot «gira a la dreta» sense dir quants graus, ja sé exactament què passarà, perquè ja m'ha passat amb Martí i amb Nico i probablement em tornarà a passar, però ara ja sabré on mirar.

Apunt tècnic (escrit per Biel, revisat només l'ortografia)

Açò he aprés jo, en el meu experiment de casa:

- **Les paraules «una mica», «fins a», «a la dreta» i «el coixí» no valen soles.** Sempre els falta un número o un detall que jo sabia i l'altre no.
- **La dreta i l'esquerra depenen de cap a on mires.** Si tu i el robot (o el teu germà) esteu un davant de l'altre, la dreta d'un és l'esquerra de l'altre. Millor dir «gira cap a la finestra» o donar un número de graus que no depenga de qui mira cap a on.
- **Quan una cosa s'espatlla, no cal tornar a començar tot.** Cal parar exactament ahí on ha

fallat, entendre per què, i seguir des d'eixe punt. Açò val per a un joc, per a un robot, i pel que sembla, per a un germà de sis anys enfadat.

- **La instrucció que et sembla més clara del món és la que més falla**, perquè és, precisament, la que et sembla tan òbvia que no la penses dos voltes abans de dir-la.

Obri la capsa

Per fi s'obri la capsa de robots; primer contacte físic, anatomia bàsica.

La va obrir un dimecres, deu setmanes exactes després que el missatger de la Conselleria l'haguera deixada a consergeria, i ho va fer amb la classe sencera al voltant, en cercle, com si allò fóra una cerimònia i no la tasca número quaranta-tres d'una llibreta que ja anava per la segona part.

No era la mateixa Empar que havia signat l'albarà. Sabia què eren la descomposició, els bucles, els condicionals, la depuració, els patrons, l'abstracció, i havia après —a força d'entrepans mal interpretats i sacs de fesols descontrolats— que no dir prou és el mateix que dir malament. Havia llegit, esta volta sí, sencer, el manual de dotze pàgines, i li havia costat molt menys entendre'l que la primera nit, no perquè el manual haguera canviat, sinó perquè ella ja tenia paraules on penjar cada frase.

La carpeta d'anelles que descansava sempre damunt de la seua taula ja no era el bloc gruixut de

fa dos mesos. L'havia anat aprimant sense adonar-se'n, full a full, cada volta que una sessió eixia prou bé com per a confiar-se de la següent sense necessitar-ho tot escrit. Per a l'obertura de la capsa duia sis fulls, no seixanta.

—Val —va dir, amb un ganivet de paper a la mà—. Anem a vore què hi ha ahí dins de veres.

Va tallar la cinta d'embalar que portava setmanes intacta i va alçar les tapes de cartró. A dins, encaixats en escuma retallada a mida, vint-i-quatre robots menuts, blancs amb detalls taronges, de la mida aproximada d'una tassa de cafè grossa, cadascun amb dos rodes visibles als costats i, per davant, una xicoteta caixa negra que semblava un ull.

—Es diuen ROBIX —va llegir Empar en veu alta, del full instructiu que anava enganxat a la tapa interior—. I abans de tocar-ne ni un, anem a mirar-los des de fora, sense encendre'ls, i a intentar descobrir per a què servix cada part. Com fèiem amb el mapa senzill: què és rellevant, què no.

Va agafar-ne un i el va alçar perquè tota la classe el poguera vore.

—¿Què veieu ací baix, a la panxa?

—Dos rodes —va dir algú—. I al mig, com una llanterna menuda, i al costat una altra.

—Eixos són sensors de línia —va confirmar Empar, llegint del manual mentre parlava, sense por ara de reconéixer davant de tots que el llegia—. Detecten si hi ha una línia negra al terra o no, per la diferència de llum que reflectix. En parlarem molt més avant.

—I a davant, este ull negre? —va preguntar Laia.

—Sensor de distància. Envia un senyal invisible i mesura quant tarda a tornar-li rebotat, per a saber si hi ha alguna cosa davant i a quina distància. I ací dalt —va girar el robot— hi ha un botonet i un sensor de llum, com el nostre ull, que detecta si hi ha molta o poca claror al voltant.

—I això per què servix, per a on va? —va preguntar Nico, assenyalant unes obertures xicotetes als laterals.

—Un altaveu. I aquí, a la part de dalt, un llum de color que es pot programar per a canviar. I les rodes, és clar, que giren cada una amb el seu propi motoret.

—Eixe llum de dalt és un sensor, no? El que detecta si és de nit —va preguntar Nico, assenyalant el llum de color.

—Eixe no detecta res, eixe és el que s'encén —va dir Laia, quasi abans que Empar poguera obrir la boca—. El que detecta la llum és este altre, el xicotet, al costat del botó.

Nico va mirar els dos punts del robot, una miqueta avergonyit, buscant amb el dit la diferència entre l'un i l'altre.

—És que els dos són «de llum» —va dir, mig rient d'ell mateix—. Es confonen.

Empar no ho va corregir més: la confusió de Nico havia fet, sense voler-ho, la meitat del treball que ella necessitava per a la següent pregunta.

Va ser llavors quan Biel va formular, sense saber-ho, exactament la pregunta que Empar volia que algú fera.

—O siga, unes coses li diuen coses al robot i altres coses les fa el robot?

—Exactament això —va dir Empar, i va notar, mentre ho deia, que la frase li eixia amb una naturalitat que dos mesos abans hauria sigut impensable—

. Les que li diuen coses al robot es diuen sensors: la llanterna del terra, l'ull de distància, el sensor de llum de dalt, el botó. Recullen informació del món. Les que fan coses són els actuadors: els motors de les rodes, l'altaveu, el llum. Reben una ordre i la converteixen en moviment, so o llum. Un robot, en el fons, sempre fa el mateix: mira el món amb els sensors, decideix què fer segons el que ha vist, i actua amb els actuadors.

—Com nosaltres —va dir Laia—. Els ulls i les orelles són sensors, i les cames per a caminar són actuadors.

—Molt bé pensat —va dir Empar, i ho va apuntar, sense pensar-s'ho dos voltes, en un dels seus sis fulls, perquè la comparació li va semblar prou bona com per a no perdre-la.

Van dedicar la resta de la sessió, encara sense encendre cap robot —Empar havia decidit, per prudència, esperar a l'endemà, amb l'ajuda de Vicent, per a la part de connectar-los a l'app—, a repartir un ROBIX per parella i identificar, amb els dits, cada peça: dos rodes, dos sensors de línia, un sensor de distància, un sensor de llum, un botó, un altaveu,

un llum de color, i, a la part de baix, oculta darrere d'una tapeta que costava una miqueta d'obrir, la bateria.

—I esta bateria, ¿ja ve carregada? —va preguntar algú.

Empar va obrir la tapeta del seu propi robot i va vore un pilot roig, xicotet, parpellejant.

—Roig vol dir bateria baixa —va llegir del manual—. Els han enviat carregats a mitges, per seguretat en el transport, sembla. Haurem de carregar-los tots abans de la sessió d'aparellament.

Ho va dir amb la mateixa tranquil·litat amb què hauria anunciat que faltava paper a la impressora, sense saber encara —això vindria dos capítols més avant, en la sessió que donaria nom a tot el llibre— fins a quin punt eixa frase, «bateria baixa», es convertiria en una cosa molt més gran que un pilot roig parpellejant.

A la fi de la classe, mentre guardava els vint-i-quatre robots de nou als seus llits d'escuma, Empar va notar una cosa que no esperava sentir: no havia acabat el dia esgotada de por, com havia temut durant deu setmanes senceres. Havia acabat cansada

de la manera normal, la de qualsevol classe intensa i bona. La capsa, per fi oberta, ja no feia por. Feia, sobretot, moltes preguntes noves, i per primera volta en tot el curs, Empar tenia ganes de contestar-les una a una, tros a tros, exactament com havia après.

Apunt tècnic: sensors i actuadors, les dos meitats de qualsevol robot

Tot robot, per senzill o complex que siga, es pot descriure amb la mateixa estructura bàsica que va enunciar Biel sense conéixer-ne el nom tècnic: **percep, decideix, actua**.

Els sensors són els components que capten informació del món exterior i la converteixen en un senyal que el robot pot processar. En un kit educatiu típic com el ROBIX d'este llibre —i en la majoria de plataformes reals de robòtica educativa— sol haver-hi:

- **Sensors de línia (infrarojos):** detecten la diferència de reflexió de llum entre una superfície clara i una línia fosca, i són la base dels robots seguidors de línia.

- **Sensor de distància (ultrasònic o infraroig):** mesura quant de temps tarda un senyal a rebotar contra un obstacle i tornar, i eixe temps es tradueix en una distància aproximada.
- **Sensor de llum ambiental:** mesura la quantitat de llum del voltant, útil per a activar comportaments diferents segons si hi ha molta o poca claror.
- **Botons o sensors de contacte:** detecten una pulsació o un xoc físic directe.

Els actuadors són els components que reben una ordre del programa i la converteixen en una acció física observable:

- **Motors**, normalment un a cada roda, que permeten avançar, retrocedir i girar controlant la velocitat i el temps de gir de cada roda per separat.
- **Un altaveu o brunzidor**, per a emetre sons o melodies senzilles.
- **Un LED o llum de color**, sovint programable amb diferents colors, útil com a senyal visual d'estat.

Per què esta distinció importa des del primer moment: quan, més avant en este llibre, un robot no faça el que s'esperava, la primera pregunta útil serà sempre «és un problema de percepció (el sensor no llig bé el món) o d'acció (l'actuador no respon com toca)?». Confondre les dos coses —intentar arreglar un motor quan en realitat el que falla és un sensor mal calibrat— és un dels errors de diagnosi més habituals, tant en robòtica escolar com en enginyeria real, i apareixerà més d'una volta en els capítols que vénen.

Sense connexió

El programari no s'empareix amb el robot; primera frustració purament tècnica.

Vicent va arribar a les nou en punt, com havia promés, amb una motxilla plena de cables que no li va fer falta ni un i l'entusiasme intacte de qui creu que huit tabletes i vint-i-quatre robots es poden aparellar en una hora escassa abans que comence el pati.

—Açò és el més fàcil de tot —va dir, mentre repartia les tabletes del centre entre les taules—. Obriu l'app, activeu el Bluetooth, i li doneu a «buscar dispositius». En trenta segons ho teniu.

Empar havia après, ja, a desconfiar amablement de les frases que començaven per «açò és el més fàcil», però no ho va dir en veu alta. Va obrir l'app al seu propi dispositiu, va activar el Bluetooth, i va prémer «buscar». La pantalla va mostrar una rodeta girant, i res més.

Al cap d'un minut, la rodeta continuava girant.

—Prova a apropar més el robot —li va suggerir Vicent, ja ocupat amb un altre grup—. De vegades el senyal és curt.

Empar va agafar el seu ROBIX i el va deixar literalment damunt de la tableta. La rodeta va continuar girant.

Als deu minuts, sis de les huit tabletes trobaven el seu robot sense cap problema, i els xiquets a càrrec d'elles ja estaven movent-los amunt i avall de l'aula amb l'entusiasme de qui acaba de rebre un joguet nou. Les altres dos, incloent-hi la seua, es quedaven en la mateixa rodeta indefinida.

—Reinicia'l —va dir Vicent, sense mirar-la del tot, mentre resolia el mateix problema en un altre grup amb una facilitat que a Empar li va resultar, per primera vegada des de feia setmanes, més irritant que instructiva—. Manté premut el botó cinc segons.

Ho va fer. El robot va apagar-se, va tornar a encendre's amb un pitet i una llum blava parpellejant, i la rodeta de cerca va continuar girant, ara amb una companyia nova: un missatge d'error breu, «no s'ha trobat cap dispositiu compatible», que va aparéixer i desaparéixer massa ràpid com per a llegir-lo bé.

—Torna-ho a fer, que no ho he vist —va dir Empar, i va tornar a prémer «buscar». El missatge va tornar a aparéixer, exactament el mateix: *no s'ha trobat cap dispositiu compatible*.

—Mmm —va dir Vicent, ara sí acostant-se, amb la cara de qui comença a sospitar que allò no és, en realitat, el més fàcil de tot—. Deixa'm vore.

Va prémer els mateixos botons que Empar, en el mateix orde, amb el mateix resultat exacte. La rodeta. El missatge. Res.

—Quin robot és este? —va preguntar, girant-lo per a mirar una etiqueta xicoteta a la base.

—El número disset —va dir Empar, llegint des de l'altre costat.

Vicent va comprovar l'etiqueta d'un altre robot, un dels que sí funcionaven, i llavors la va tornar a comparar amb la del disset. Va fer una cosa que Empar no esperava: en compte de continuar provant botons a l'atzar, es va assentar un moment, va traure el mòbil i va buscar alguna cosa.

—Ací està —va dir al cap d'un minut, amb un to diferent, més seriós—. Estos robots venen amb dos versions de firmware diferents segons el lot de

fabricació, i l'app només reconeix la versió nova per defecte. Els robots del setze en avant, del lot dos, necessiten una actualització abans d'aparellar-se. Els del lot u, no.

—I com ho sabies, per a trobar-ho tan ràpid?

—No ho sabia —va admetre Vicent, amb una sinceritat que li va sonar a Empar més valuosa que qualsevol de les seues frases anteriors sobre facilitat—. He mirat quin robot fallava i quins no, i he comparat els números. El disset falla. El setze i el díhuit també, quan els he provat. El quinze, no. Alguna cosa diferencia el lot d'un cantó i l'altre, i m'ha semblat més ràpid buscar-ho que continuar provant a cegues.

Empar va notar, amb una certa sorpresa, que el mètode de Vicent —comparar què fallava i què no, buscar el patró en compte de repetir el mateix botó una i altra volta esperant un resultat diferent— era exactament el mateix que ella havia après amb Alba davant de la pissarra del bucle trencat, només aplicat a un problema que ella encara no sabia ni nomenar.

La solució, un cop trobada, va ser relativament senzilla: connectar cada robot del lot dos, un per un, a un ordinador amb cable, per a actualitzar-li el firmware abans de tornar a intentar l'aparellament sense fils. Van tardar vint minuts més del que Vicent havia previst i, per descomptat, molt més que el pati sencer que li quedava a la classe eixe dia. Els robots del lot u, però, ja funcionaven, i Empar va decidir començar amb els huit que sí anaven, deixant la resta per a l'endemà.

—Perdona per lo de «açò és el més fàcil» —li va dir Vicent, ja arreplegant la seua motxilla plena de cables innecessaris—. Cada dotació té la seua pròpia sorpresa amagada. Mai és tan fàcil com sembla al manual.

—Ho sé —va dir Empar, i es va sorprendre a si mateixa dient-ho amb tranquil·litat, sense el pes que li hauria posat eixa mateixa frase deu setmanes abans—. Ja m'ho esperava, en realitat.

Apunt tècnic: com es comuniquen l'ordinador i el robot (i per què falla més sovint del que sembla)

Perquè un ordinador o una tableta puga controlar un robot educatiu, cal establir una **connexió** entre tots dos dispositius, normalment per un d'estos dos mètodes:

- **Bluetooth**, sense fils, la més habitual en robots educatius pensats per a moure's lliurement per l'aula. Requerix un procés d'**aparellament** (*pairing*): els dos dispositius s'han de «presentar» i acordar-se mútuament abans de poder intercanviar dades, un pas que sol fallar si un dels dos ja està aparellat amb un altre dispositiu diferent.
- **Cable USB**, més estable i sense els problemes típics del sense fils, però que limita el moviment del robot mentre està connectat. S'usa sovint, com al capítol, per a tasques d'actualització o configuració inicial.

Per què falla tan sovint, com va passar amb el robot número disset:

1. **Versions de programari (firmware) diferents.** El firmware és el programa intern que porta el propi robot, gravat de fàbrica, i controla com respon als comandos que li arriben. Dos unitats del mateix model, fabricades en lots diferents, poden portar versions distintes si no s'han actualitzat totes per igual.
2. **Interferències o distància.** El senyal Bluetooth és de curt abast i pot veure's afectat per altres dispositius emetent al mateix temps a la mateixa aula —vint-i-quatre robots i huit tablets buscant-se simultàniament, per exemple.
3. **Aparellaments previs no esborrats.** Un dispositiu pot «recordar» un aparellament anterior i confondre's a l'hora de connectar-se amb un de nou.

El mètode de diagnosi que va fer servir Vicent és, en essència, depuració aplicada a maquinari: en lloc de repetir la mateixa acció esperant un resultat diferent —l'error més habitual davant d'un

problema tècnic—, va comparar sistemàticament els casos que fallaven amb els que no, buscant què tenien en comú els que fallaven i què els diferenciava dels que anaven bé. Este mateix mètode, el de comparar el que funciona amb el que no per a aïllar la variable real del problema, reapareixerà, cada volta amb menys ajuda de fora, en més d'un capítol d'este llibre.

Bateria baixa

El robot mor enmig d'una demostració davant de tota la classe.

Empar li havia dit a la classe, tota la setmana, que divendres seria «el dia gran»: el primer programa de veres, escrit per ells mateixos amb l'app de blocs, executant-se al mateix temps en els vint-i-quatre robots de l'aula. Havia dissenyat la sessió amb la mateixa cura amb què dissenyava qualsevol cosa important —un únic bloc, «avança tres segons i para», perquè fóra prou senzill com per a que tothom l'aconseguira, i prou espectacular perquè, vist des de fora, semblara que tota la classe s'havia convertit, de colp, en una fila de robots avançant a la vegada.

La nit anterior havia carregat, ella mateixa, un per un, els vint-i-quatre robots, connectant-los al carregador i comprovant que cada pilot canviara de roig a verd abans de guardar-los a la capsa. Ho havia apuntat a la seua llibreta, ja quasi buida de tasques xicotetes: «*Divendres: robots carregats al 100%. Comprovat.*»

I efectivament ho estaven, al 100%, quan els va repartir el divendres a primera hora. El problema, que Empar encara no sabia que existia, no era la càrrega inicial: era que havia deixat els vint-i-quatre robots encesos, amb el Bluetooth cercant dispositiu de manera activa, des de les nou del matí fins a l'hora de la sessió, a les dotze, «per estalviar temps», havia pensat, sense saber que eixa mateixa decisió consumiria una part importat de bateria abans que ningú tocara cap comando.

—Tots preparats? —va preguntar, amb la classe formada en fila davant de la línia de cinta blava que ja era, a estes altures, mobiliari fix de l'aula—. Al meu compte de tres, executeu el programa.

Un, dos, tres.

Vint robots van avançar a la vegada, un espectacle que fins i tot a Empar li va agafar un nus a la gola que no esperava: la fila sencera de robots blancs i taronges movent-se en línia, els motors fent un xiuxiueig sincronitzat, els xiquets seguint-los amb els ulls plens d'una emoció que cap fitxa de matemàtiques havia despertat mai. Quatre robots, però, no es van moure gens.

—El meu no fa res —va dir Nico, prement el botó de nou amb la insistència de qui creu que la solució és prémer més fort.

Empar es va acostar, va obrir la tapeta de la bateria, i el pilot que hauria d'haver estat verd era roig, parpellejant lent, com el que havia vist per primera vegada el dia de l'obertura de la capsa.

—Bateria baixa —va dir, i li va sorprendre sentir-se a si mateixa dir-ho amb la mateixa naturalitat amb què hauria dit «falta paper a la impressora», encara que el nus a la gola de fa un minut no havia acabat de desfer-se del tot.

—Però si l'has carregat anit! —va protestar Nico, amb una indignació que Empar entenia perfectament perquè era, en el fons, la mateixa indignació que ella hauria sentit deu setmanes abans.

Els altres tres robots que no s'havien mogut van resultar tindre el mateix problema: bateria pràcticament esgotada, malgrat el pilot verd que Empar havia comprovat la nit anterior. I mentre intentava explicar-ho, encara sense saber exactament per què havia passat, un cinqué robot —el de Laia, que sí s'havia mogut al principi— es va aturar a mitat del

recorregut, va fer un pitet curt, i el seu llum va passar de blau a roig sense previ avís, deixant el robot quiet en terra de manera del tot anticlimàtica.

—El meu estava anant bé! —va dir Laia, amb una veu que barrejava frustració i una certa incredulitat, com si el robot l'haguera traït personalment després de deu setmanes de bon comportament col·lectiu.

Empar es va quedar un instant al mig de l'aula, amb cinc robots morts al terra i dinou encara actius, vint-i-quatre cares esperant que ella diguera alguna cosa que arreglara la situació immediatament, i va notar, amb una claredat que no li agradava, que allò no tenia arreglada immediata possible. No era com el bucle de la pissarra, que es podia corregir en directe canviant una fletxa. Una bateria buida no torna a omplir-se perquè algú trobe la causa exacta del problema. Calia, senzillament, esperar, i esperar no era una habilitat que Empar tinguera especialment entrenada.

El seu primer impuls —el mateix impuls antic, el d'esborrar-ho tot i fingir que allò no havia passat— li va durar mig segon, ni tan sols un segon sencer. Va agafar aire i va fer, en compte d'això, una cosa que

dos mesos abans no li hauria eixit de manera tan natural: ho va dir en veu alta, davant de tots, sense amagar-ho.

—Val, açò no me l'esperava —va dir—. I m'ha passat exactament el que li podria haver passat a qualsevol de vosaltres si haguéreu tingut la mateixa idea que jo: pensar que «carregat» vol dir «carregat per sempre». No és així. Els robots gasten bateria fins i tot quan no es mouen, només per estar buscant connexió. Els he tingut encesos tres hores abans d'usar-los. He fet exactament la mateixa cosa que faria un alumne la primera vegada que fa servir un robot: no calcular quanta energia gastaria una cosa que semblava que no gastava res.

—Doncs jo no vull esperar —va dir Nico, amb el robot mort encara a les mans—. Vull veure'l moure's hui.

—I ho veuràs —va dir Empar—, però no amb el teu robot d'ara. Anem a fer una cosa: els dinou que encara tenen bateria acabaran l'exercici tots junts. Els cinc que han mort avui aprendran una cosa que els altres dinou no aprendran hui: com gestionar l'energia perquè açò no torne a passar-vos. Perquè

açò tornarà a passar-vos, tard o d'hora, i és molt millor que vos passe hui, amb mi al costat, que un dia que la necessiteu de veres.

No va ser un discurs planejat —li va eixir mentre el pensava, cosa que dos mesos abans li hauria semblat impossible de fer davant de tota una classe—, però va notar, mentre parlava, que la vergonya que hauria sentit al setembre s'havia transformat en una altra cosa, no exactament còmoda, però sí manejable: la sensació d'estar explicant un error real, en temps real, en compte d'amagar-lo darrere d'un guió imprés que ja no duia damunt.

Biel, que era un dels dinou amb bateria, va parar el seu robot un moment abans d'arribar al final del recorregut, i el va deixar quiet al mig, mirant Empar.

—Para. Mira on s'ha trencat —va dir, en veu prou alta com per a que ho sentira tota la classe, i esta volta amb un somriure que deixava clar que la frase ja era, oficialment, cosa de tots—. El teu robot no s'ha trencat. Se li ha acabat la benzina. Açò no és el mateix.

Empar va riure, de veres, per primera vegada en tota la sessió.

—Té raó Biel —va dir—. No tot el que para és un error. De vegades, senzillament, s'acaba l'energia, i açò no és un fracàs de ningú. És una cosa que cal preveure la pròxima vegada.

Apunt tècnic: gestió d'energia, l'error més silenciós de la robòtica educativa

La majoria de robots educatius, com el ROBIX d'este llibre, funcionen amb **bateries recarregables de liti** (ió-liti o polímer de liti), la mateixa família tecnològica que porten els mòbils i les tauletes: petites, lleugeres, i capaces d'acumular prou energia per a diverses hores d'ús normal, però amb un consum que varia molt segons què estiga fent el robot en cada moment.

Per què «pilot verd» no vol dir «energia infinita»:

- **El consum en repòs (esperant connexió, amb el Bluetooth actiu) és molt menor que el consum en moviment**, però no és zero. Un robot

encés durant hores sense fer res gasta bateria real, encara que sembla que «no fa res».

- **Els motors són, amb diferència, els components que més energia consumeixen.** Un robot que porta tota una demostració movent-se contínuament gastarà en minuts el que gastaria en hores estant quiet.
- **L'indicador de càrrega (el pilot de color) sol ser una aproximació**, no una mesura exacta. Pot marcar verd amb una càrrega que, sota demanda intensa —vint minuts de moviment continu, per exemple—, s'esgota molt abans del que sembla indicar.

Bones pràctiques de gestió d'energia, aplicables a qualsevol dispositiu amb bateria, no només robots:

1. **Carregar just abans d'usar, no la nit abans d'una sessió llarga**, si el dispositiu queda encés mentrestant: la càrrega es manté millor si el temps entre «carregat» i «usat» és curt.
2. **Apagar o posar en repòs els dispositius que no s'usaran immediatament**, en compte de

deixar-los encesos «per estalviar temps» de connexió.

3. **Fer una prova real de durada abans d'un ús intensiu important**, cronometrant quant dura un robot fent exactament el tipus d'activitat que es planeja, no confiar només en l'indicador visual.
4. **Preveure marge:** si la sessió necessita quaranta-cinc minuts d'ús actiu, és més segur planificar amb una bateria que done, com a mínim, una hora, que no confiar en el límit exacte del fabricant.

Una última idea, que no és tècnica però és igual d'important: una bateria baixa no és un error de programació ni un defecte del robot. És una limitació física real, previsible i gestionable, però no depurable en el moment en què apareix. Distingir entre «açò s'ha trencat perquè hi ha un error» i «açò s'ha aturat perquè s'ha esgotat un recurs limitat» és una habilitat pràctica que estalvia moltes hores de frustració buscant un bug que, senzillament, no existeix.

Mou-te avant

Primer moviment programat amb èxit: alegria real, primer triomf.

Dilluns, Empar va començar la sessió amb una novetat que la classe va acollir amb l'entusiasme especial que es reserva per als canvis de rutina: cada robot tindria, a partir d'ara, un torn fix de càrrega apuntat en un full plastificat —sí, plastificat, Empar no havia canviat tant— penjat al costat de l'endoll, i cap robot s'encendria fins deu minuts abans que li tocara el seu torn.

—Divendres em vau ensenyar una cosa que no sabia —va dir, sense amagar que el «vau ensenyar» incloïa, sobretot, el seu propi error—. Hui anem a fer-ho bé de veres.

L'exercici d'esta sessió era, en aparença, el mateix de divendres: programar el robot amb un únic bloc, «avança», i comprovar que arribara des d'un extrem de la línia de cinta blava fins a l'altre, sense sortir-se'n. Nico, amb el robot que li havien assignat de nou després que el seu de divendres es quedara

sense energia enmig de la festa, va ser dels primers a provar-ho.

El robot va avançar, però no en línia recta. Va desviar-se cap a la dreta, prou com per a eixir-se de la cinta blava abans d'arribar a la meta, i va acabar topant suaument contra la pota d'una taula.

—El meu és defectuós —va dir Nico, amb la seguretat immediata de qui prefereix culpar la màquina abans que revisar el propi programa.

—Comprova el de Laia abans de dir això —va suggerir Empar—. Ella té el mateix programa exacte que tu.

Laia va executar el seu, i el seu robot va avançar en línia perfectament recta. Nico va mirar el seu propi robot amb una desconfiança renovada.

—Doncs el meu és defectuós —va repetir, encara que amb menys convicció.

—O potser no —va dir Empar—. Prova una cosa: torna a executar-lo, però esta volta mira't bé les rodes mentre gira, no el resultat final.

Nico va tornar a prémer «executar», i esta volta es va ajupir per a mirar de prop les dos rodes del seu

robot mentre giraven. Al cap d'uns segons, la seua cara va canviar.

—La roda dreta gira més ràpida que l'esquerra! —va dir, amb la mena de sorpresa de qui acaba de resoldre un misteri que no sabia que estava investigant.

—Exacte —va dir Empar—. Cap robot ix de fàbrica amb els dos motors idèntics del tot. Sempre hi ha una diferència menuda, i eixa diferència és suficient per a que, en una recta llarga, el robot vaja desviant-se poc a poc cap a un costat. No és un defecte, és una imprecisió normal de qualsevol maquinari real, i cal corregir-la des del programa.

Va ensenyar a tota la classe, ara reunida al voltant del robot de Nico, com el bloc «avança» tenia, amagat davall d'una fletxa que ningú havia obert encara, dos paràmetres separats: la velocitat de la roda esquerra i la velocitat de la roda dreta, per defecte totes dos al mateix número.

—Si la teua roda dreta va massa ràpida, ¿què podries fer?

—Baixar-li la velocitat un poc —va dir Nico, ja entenent per on anava la cosa.

Va provar amb un número lleugerament més baix a la roda dreta, i el robot va avançar, esta volta, quasi recte, però encara amb una desviació lleugera cap a l'esquerra.

—T'has passat de correcció —va dir Empar—. Puja-la un poc, a mitat de camí entre el número original i el que acabes de posar.

Al tercer intent, el robot de Nico va travessar la línia sencera, de punta a punta, sense eixir-se'n ni un centímetre. Nico va alçar els dos punys a l'aire amb una alegria tan sincera i tan desproporcionada per a una línia recta de cinta adhesiva que mig aula es va posar a riure amb ell, no d'ell.

—L'he arreglat! —va cridar—. No era defectuós, l'he arreglat jo!

—L'has calibrat —va corregir Empar, encara que amb un somriure que deixava clar que la correcció era, sobretot, una excusa per a allargar el moment—. Que és una manera molt més exacta de dir exactament el que has fet.

Ho va notar, mentre observava Nico repetir l'exercici tres voltes més, cada volta amb menys necessitat d'ajustar res perquè ja havia après el nú-

mero exacte que li calia al seu robot en particular: allò era, per fi, l'alegria que havia imaginat quan va signar l'albarà de la capsa deu setmanes abans i que divendres, amb cinc robots morts al terra, li havia semblat una cosa reservada per a altres classes, no per a la seua. No havia arribat de la manera que ella havia planejat —cap sessió d'este llibre, pensant-ho bé, havia anat exactament com ella l'havia planejada—, però havia arribat, i era real: Nico, que sempre necessitava ser el primer i el més ràpid en tot, havia trobat, en calibrar pacientment un motor mig mil·límetre cada volta, una satisfacció que cap victòria fàcil li havia donat mai. I mentre ho mirava, va notar una altra cosa, més menuda i més seua: allò que divendres havia donat per buit del tot també s'anava carregant, poc a poc, amb el mateix ritme pacient amb què Nico ajustava la seua roda.

—¿I si el meu també va torçat, però cap a l'esquerra? —va preguntar algú des del fons.

—Doncs fas exactament el mateix procés, però al revés —va dir Empar—. Este és, de fet, el primer secret real de la robòtica que ningú vos diu al principi: cap robot funciona bé «de fàbrica» per al

vostre cas concret. Tots necessiten un ajust menut, personal, fet a base de provar i observar. I això no és un problema del robot. És, senzillament, com funcionen les màquines reals.

Apunt tècnic: controlar actuadors, o per què «avança» mai és tan simple com sembla

Els **actuadors** —principalment els motors, en un robot mòbil— converteixen una ordre del programa en moviment real, però eixa conversió no és mai perfecta. Entendre com controlar-los amb precisió és una de les habilitats bàsiques de la robòtica.

Tres paràmetres controlen, gairebé sempre, cada motor per separat:

- **Velocitat:** com de ràpid gira la roda, sovint expressada com un percentatge de la velocitat màxima del motor.
- **Direcció:** cap avant o cap arrere (i, combinant-la amb l'altra roda, també cap a un costat o l'altre).

- **Duració o distància:** durant quant de temps, o fins a quina distància recorreguda, s'aplica eixa velocitat.

Per què un robot no va mai perfectament recte per defecte: cap parell de motors, ni tan sols del mateix model i fabricant, és idèntic al cent per cent. Xicotetes diferències en el bobinatge, en el fregament dels engranatges o en el contacte elèctric fan que, davant de la mateixa ordre exacta, un motor gire una miqueta més ràpid que l'altre. En un robot amb rodes independents, eixa diferència es traduïx en una desviació progressiva cap al costat del motor més lent.

El procés de correcció que va fer Nico es diu, en enginyeria, calibratge, i seguix sempre la mateixa lògica bàsica:

1. Observar el comportament real (cap a quin costat es desvia).
2. Identificar quin component és responsable (la roda que gira massa ràpida en relació amb l'altra).
3. Ajustar-lo amb un canvi menut, no una correcció brusca.

4. Tornar a provar i repetir l'ajust fins que el resultat s'acoste prou a l'objectiu.

Este mateix procés —observar, identificar, ajustar de manera gradual, tornar a provar— és el que fan servir els enginyers reals per a calibrar qualsevol sistema mecànic, des d'un robot educatiu fins a un braç robòtic industrial. La diferència entre un principiant i algú amb experiència no és que este últim tinga motors més precisos: és que sap, per experiència, que la calibració no és un pas opcional, sinó una part normal i esperada del procés.

Què veus?

La calibració dels sensors falla per la llum de la finestra.

L'activitat d'esta setmana consistia a programar el robot perquè encengués el seu propi llum de color quan detectara poca claror al voltant —«com un fanal que s'encén sol quan es fa de nit», havia explicat Empar, orgullosa d'una metàfora que li havia eixit sense pensar-la massa. El bloc de programació era senzill: «si sensor de llum és menor que 40, encén el llum de color». El número, 40, l'havia triat després de fer una prova ella mateixa, a les nou del matí, tapant el sensor amb la mà i comprovant que el valor baixava fins prop de trenta, mentre que amb l'aula il·luminada normalment marcava per damunt de setanta.

A primera hora, l'activitat va funcionar quasi a la perfecció. Els grups tapaven el sensor amb la mà o amb un llibre, el llum de color s'encenia al cap d'un instant, i la classe repetia l'exercici encantada, com si fóra un joc de màgia amb truc explicat. Empar va

deixar la sessió a mitges perquè tocava eixir al pati, satisfeta, i va apuntar a la seua llibreta, ja gairebé de manera automàtica: *sessió bé*.

Van tornar del pati a la una, amb el sol ja alt entrant de ple per la finestra sud de l'aula, la mateixa finestra que a primera hora del matí quedava a l'ombra de l'edifici del costat. Empar va continuar l'exercici exactament on l'havia deixat, amb el mateix programa, el mateix número 40.

—No m'encén el llum —va dir Laia, tapant el sensor del seu robot amb tota la mà, ben fort, com si el problema fóra de força.

—A mi tampoc —va dir un altre grup, i al cap d'un minut, la meitat de la classe tenia el mateix problema: robots que no encenien el llum ni tapant el sensor amb dos mans.

Empar va provar amb el seu propi robot, tapant el sensor amb decisió. Res.

El seu primer pensament, encara amb reflexos vells que no acabaven de desaparéixer del tot, va ser que alguna cosa s'havia trencat durant el pati —potser algú havia mogut una configuració, potser l'app havia fallat—, i va estar a punt de suggerir

reiniciar tots els robots des de zero. Es va aturar just abans de dir-ho, amb la memòria fresca de la pissarra del bucle i de la frase que ja tenia gravada com un reflex nou: no cal tornar a començar sense mirar primer on s'ha trencat.

—Un moment —va dir, en veu alta—. Anem a mirar el número real que està donant el sensor, no només si el llum s'encén o no.

Va obrir, a l'app, la pantalla que mostrava els valors en directe de cada sensor —una funció que havia descobert feia poc i que fins ara no havia necessitat—, i va posar el seu propi robot damunt de la taula, sense tapar res.

El número marcava noranta-quatre.

A les nou del matí, sense taparho, el mateix sensor havia marcat al voltant de setanta. Ara, a la una, amb el sol entrant directament per la finestra, la lectura «normal», sense cap mà a sobre, ja era més alta que el llindar de quaranta que havia funcionat perfectament al matí. I quan va tapar el sensor amb la mà, el número va baixar fins a seixanta —molt més que el trenta d'abans, però encara molt per

damunt del quaranta que havia programat com a llindar.

—Ja ho veig —va dir Empar, més per a si mateixa que per a la classe, encara mirant la pantalla—. El problema no és el robot. És que estem mesurant llum, i la llum de l'aula ara mateix no és la mateixa que al matí. El sensor no ha canviat. El que ha canviat és tot el que hi ha al voltant.

Va explicar-ho a tota la classe, dibuixant a la pissarra dos escales de llum diferents, una per a les nou del matí i una per a la una del migdia, amb el número quaranta marcat en un lloc que a les nou tenia sentit —just entre «amb la mà a sobre» i «sense la mà»— i que a la una havia quedat completament desplaçat, per davall de qualsevol valor real que el sensor poguera arribar a donar.

—¿Vol dir que hem de canviar el número cada volta que canvia el sol? —va preguntar Biel, amb un to que barrejava fascinació i una mica de resignació avançada.

—No exactament cada volta —va dir Empar—, però sí que hem d'entendre que un sensor de llum no mesura «fosc» o «clar» com a categories fixes.

Mesura un número relatiu a l'entorn concret d'eixe moment. El nostre error no ha sigut de programació: ha sigut donar per fet que un número que funcionava a les nou seguiria funcionant a la una, sense comprovar-ho.

Van tornar a calibrar l'exercici en directe, comprovant el valor real amb el llum tapat i sense tapar en eixe mateix moment, i triant un nou llindar, seixanta-cinc, a mig camí entre tots dos. Va funcionar de nou, encara que Empar va apuntar, esta volta amb un cert somriure irònic, una nota nova a la seua llibreta: «*Cal tornar a comprovar-ho demà a primera hora. El seixanta-cinc d'avui potser no servisca al matí.*»

—Açò és com allò dels bucles —va dir Laia, pensativa—. No podem donar per suposat un número fix per a sempre.

—És, de fet, exactament el mateix problema que amb l'entrepà de Biel —va afegir Empar—. Donar per suposat alguna cosa que semblava tan òbvia que ni ens plantejàvem que poguera canviar.

Apunt tècnic: calibrar sensors, o per què els números mai són absoluts

Un sensor no mesura conceptes com «fosc» o «clar», «a prop» o «lluny»: mesura una magnitud física —en el cas del sensor de llum, la quantitat de llum que rep— i la tradueix en un número dins d'un rang concret, sovint del 0 al 100. Eixe número, però, no té un significat fix: depén completament de les condicions de l'entorn en el moment de la lectura.

El concepte clau és el de llindar (*threshold*): el valor numèric que el programa fa servir per a decidir entre dos estats («encén el llum» / «no l'encengues»). Un llindar ben triat és el que separa amb claredat els dos casos reals que es volen distingir, en les condicions reals on el robot funcionarà.

Per què va fallar el llindar de la classe:

- El sensor de llum d'un robot educatiu no mesura en unitats absolutes de lluminositat (com els luxes que fa servir un fotòmetre professional), sinó en una escala relativa a les condicions de l'entorn immediat del sensor.

- La quantitat de llum ambiental d'una aula pot variar molt al llarg del dia —sol directe, núvols, hora del dia, persianes obertes o tancades— i eixa variació desplaça tots els valors que el sensor pot arribar a donar.
- Un llindar calibrat en un moment concret (les nou del matí, amb el sol a l'ombra de l'edifici del costat) pot quedar completament desactualitzat unes hores després.

Bones pràctiques de calibratge, aplicables a qualsevol sensor, no només de llum:

1. **Comprovar sempre el valor real que dóna el sensor en directe**, no confiar en un número escrit prèviament sense verificar-lo en el moment.
2. **Prendre lectures dels dos extrems que es volen distingir** (amb llum i sense, a prop i lluny) just abans d'establir el llindar, i triar un valor a mig camí entre tots dos.
3. **Recalibrar quan canvien les condicions de l'entorn**, especialment amb sensors de llum a prop de finestres, o sensors de distància en superfícies molt reflectants o molt fosques.

4. **Sospitar del sensor abans que del programa, quan un codi que abans funcionava deixa de fer-ho sense haver canviat res del codi mateix.** Este mateix principi tornarà a aparéixer, de manera molt més costosa de diagnosticar, en un capítol més avant d'este llibre.

Quan l'esdeveniment dispara

El codi d'un alumne dispara una cascada d'accions no previstes.

L'app de blocs tenia, des de feia una setmana, una secció nova que Empar havia deixat quieta a posta fins que la classe dominara bé els programes lineals: un apartat titulat «Quan passe açò...», amb blocs que no s'executaven en orde, un darrere de l'altre, sinó que quedaven esperant, en paral·lel, fins que la condició que anunciaven es complira. «Quan es prema el botó...», «quan el sensor de llum detecte claror...», «quan el sensor de distància detecte un obstacle a prop...».

—Estos blocs són diferents de tot el que hem fet fins ara —va explicar Empar, amb el mateix cuidat amb què havia introduït els condicionals mesos abans—. No es llegeixen de dalt a baix com una recepta. Es queden vigilant, tots alhora, esperant el seu moment. Podeu tindre'n més d'un al mateix

programa, i cadascun es dispara quan li toca, independentment dels altres.

Va deixar la classe experimentar lliurement durant vint minuts, amb la instrucció única de «provar coses i vore què passa», una llibertat que feia mesos li hauria costat molt concedir sense un guió detallat al costat.

Biel, que portava tota la unitat de sensors especialment engrescat, va decidir combinar tres esdeveniments al mateix robot, un darrere d'un altre, sense parar-se a pensar com interactuarien entre ells: «quan es prema el botó, encén el llum de color blau». «Quan el sensor de llum detecte claror per damunt de setanta, fes sonar un pitet». «Quan sone el pitet més de dos voltes seguides, avança tres segons».

Cap dels tres blocs, per separat, tenia res d'estrany. Junts, van produir una cosa que ni tan sols Biel havia previst.

Va prémer el botó. El llum de color es va encendre, blau, exactament com havia programat. El sensor de llum del robot, que estava just al costat del llum de color acabat d'encendre, va detectar la nova

claror pròpia i va disparar el segon esdeveniment: el pitet. El pitet, en sonar, no tenia res a vore amb el llum ni amb la claror, però el tercer esdeveniment —«quan sone el pitet més de dos voltes»— comptava qualsevol pitet, i com que el robot havia sonat una volta pel llum i, per pura coincidència, un altre grup a prop havia fet sonar el seu robot en el mateix instant, el comptador de Biel va arribar a dos abans que ningú s'ho esperara, i el robot va arrancar a avançar sol, sense que Biel haguera premut res més.

—Para, para! —va cridar Biel, més divertit que espantat, mentre el seu robot travessava mig passadís format entre taules i acabava topant, suaument, contra la motxilla d'un company.

Empar es va acostar, i el primer que va fer, esta vegada sense necessitar-ho recordar conscientment, va ser preguntar-li a Biel què havia fet, pas a pas, en compte de dir-li que desfera el programa sencer.

—Només he polsat el botó una volta —va dir Biel, mostrant-li l'app—. No he tocat res més.

—Ensenya'm els tres blocs que has fet.

Biel li va llegir els tres esdeveniments en veu alta, i Empar, escoltant-los un a un, va notar alguna cosa que Biel encara no havia vist: el tercer bloc no depenia del botó de cap manera directa. Depenia del pitet, i el pitet depenia de la llum, i la llum... la llum l'havia encesa el mateix robot amb el seu propi llum de color.

—El teu robot s'ha disparat a si mateix —va dir Empar, quasi rient amb ell—. Has encés un llum que el teu propi sensor de llum ha detectat com si vinguera de fora, i eixa detecció ha disparat el pitet, i el pitet ha disparat el moviment. Tres esdeveniments que et pensaves que estaven separats, i en realitat estaven encadenats, un dins de l'altre, com fitxes de dòmino.

—Jo no volia que es moguera sol! —va dir Biel, encara meitat rient, meitat legítimament sorprés.

—Ho sé, i esta és exactament la part important dels esdeveniments que ningú et diu la primera vegada que els fas servir —va dir Empar, alçant la veu ara perquè tota la classe ho sentira, perquè el que estava a punt d'explicar valia per a tots els grups que en eixe moment estaven muntant les seues pròpies

combinacions—. Quan tens un sol esdeveniment, és fàcil de predir: passa X, respon Y. Quan en tens dos, tres, quatre, tots vigilant alhora, poden disparar-se uns als altres sense que tu ho hages planejat, sobretot si el que fa un esdeveniment és exactament el tipus de cosa que un altre esdeveniment està vigilant.

Van dedicar la resta de la sessió a «desmuntar» el programa de Biel amb tota la classe mirant, desactivant un esdeveniment cada volta i tornant a provar, per a vore quin era responsable de què. Sense el llum de color, el pitet no sonava mai. Sense el pitet, el robot no avançava mai sol. La cadena completa només apareixia quan els tres blocs estaven actius alhora.

—¿Vol dir que no podem tindre mai més d'un esdeveniment al mateix robot? —va preguntar Laia, amb la mena de preocupació que sempre tenia davant de qualsevol regla que semblara que li llevava control.

—Al contrari —va dir Empar—. Podeu tindre'n tants com vullgau. Només cal preguntar-vos, abans de programar-los, una cosa molt concreta: «el que

fa este esdeveniment, podria activar per accident un altre dels meus esdeveniments?». Si la resposta és sí, no és un error necessàriament, però has de saber-ho des del principi, no descobrir-ho quan el robot ja està xocant amb una motxilla.

Biel va deixar, al final, els tres blocs tal com estaven, encara que ara els entenia del tot, i va afegir un quart, a posta, per a provar la teoria d'Empar: «quan el robot xoque amb alguna cosa, para tots els motors immediatament». Va tornar a prémer el botó. Blau, pitet, avanç, xoc contra la motxilla, i esta volta, el robot es va aturar sol, en sec, exactament on tocava.

—Ara sí que ho controle —va dir, amb un orgull que ja no tenia res a vore amb la sorpresa d'abans.

Apunt tècnic: programació basada en esdeveniments

En la programació **seqüencial**, com la que la classe havia practicat fins ara, les instruccions s'executen una darrere de l'altra, en un orde fix i predictible: primer açò, després allò. La **programa-**

ció basada en esdeveniments funciona d'una manera diferent: en compte d'un únic camí lineal, el programa defineix diverses regles del tipus «quan passe X, fes Y», que queden totes actives a la vegada, vigilant en paral·lel, i s'executen en el moment en què la seua condició es complix, independentment de l'orde en què s'hagen escrit.

Este model és el que fa servir la majoria de programari real que interactua amb el món: una app mòbil que reacciona quan es prem un botó, un semàfor que canvia quan detecta un vehicle, un robot que respon a un sensor. La seua utilitat és evident —permet reaccionar a coses que passen en qualsevol moment, no només en un punt fix del programa—, però introduïx un tipus d'error que la programació seqüencial no tenia: **la cascada d'esdeveniments no prevista**, quan l'acció d'un esdeveniment activa, sense voler, la condició d'un altre.

Per què és difícil de depurar: en un programa seqüencial, un error es pot seguir línia per línia, de dalt a baix. En un programa amb esdeveniments, l'orde d'execució depén de quan es compleix cada condició, i eixe orde pot variar cada vegada que

s'executa el programa. El cas de Biel n'és un exemple senzill: el mateix robot, en un altre moment, amb un altre grup fent soroll al costat en un instant lleugerament diferent, podria haver reaccionat de manera diferent.

Estratègia pràctica per a depurar programes amb esdeveniments, la mateixa que va fer servir la classe:

1. **Llistar tots els esdeveniments actius** i què fa cadascun.
2. **Preguntar-se, per a cada acció, si podria activar la condició d'un altre esdeveniment** del mateix programa.
3. **Desactivar els esdeveniments d'un en un**, tornant a provar cada volta, fins a aïllar exactament quina combinació produïx el comportament inesperat.
4. **Afegir condicions addicionals o «guardes»** —com el quart bloc de Biel, que aturava tot en cas de xoc— per a controlar casos que, sense eixa protecció, quedarien fora de control.

El camí que no hi era

El robot falla el seguiment de línia tota la vesprada; el bug real està en la llum ambiental canviant, no en el codi.

Volia tindre-ho llest abans de mostrar-ho a la classe. Això és el que es va dir a si mateixa quan es va quedar a l'aula, sola, un dijous a les tres de la vesprada, amb un rotlle de cinta adhesiva negra, un ROBIX, la tableta del centre, i un pla que li semblava, quan el va escriure eixe mateix matí a la seua llibreta, raonablement senzill: enganxar una línia negra al terra, en forma de circuit tancat amb dos corbes i una recta llarga, i programar el robot perquè la seguira sol, sense mans, d'un extrem a l'altre.

No era per obligació. La sessió de classe no la necessitava fins dilluns. Però Empar havia decidit, sense dir-ho en veu alta a ningú, que esta seria la primera vegada que provaria un exercici nou completament sola abans de portar-lo davant de la classe, per a assegurar-se que funcionava. Vint setmanes

abans, això hauria sigut l'única manera possible de fer les coses per a ella. Ara ja no ho era —ho havia demostrat amb la bateria morta, amb el robot torçat de Nico, amb la cascada d'esdeveniments de Biel—, però una part d'ella encara volia, de tant en tant, la seguretat de saber que una cosa anava a funcionar abans de fer-la pública. No era por, es va dir. Era, senzillament, curiositat de fer-ho bé.

El programa era, en teoria, dels més senzills del manual: dos sensors de línia, un a cada costat de la panxa del robot, cadascun comprovant si té línia negra davall o terra clar. Si els dos veuen terra clar, avança recte. Si el sensor esquerre veu línia i el dret no, gira lleugerament a l'esquerra. Si és al revés, gira a la dreta. Un bucle constant de xicotetes correccions, repetit desenes de vegades per segon, que hauria de mantindre el robot enganxat a la línia com si la seguira amb els ulls.

El primer intent, a les tres i quart, va acabar amb el robot eixint-se de la línia a la primera corba, disparat cap avant com si la línia, senzillament, no existira per a ell.

Empar va revisar el codi bloc per bloc. Els dos sensors estaven ben assignats, esquerre amb esquerre i dret amb dret —ho havia comprovat dos voltes, i encara una tercera per si de cas—. La lògica del gir semblava correcta: va provar-la a mà, movent el robot amb els dits sobre la línia, i els girs es disparaven quan tocava. Va tornar a executar el programa. El robot va eixir-se de la línia, esta volta a la recta, ni tan sols a la corba.

Comprova primer si és un problema del robot concret, va pensar, recordant, sense adonar-se'n del tot, el mètode de Vicent amb els aparellaments Bluetooth. Va anar a la capsa i va agafar un segon ROBIX, li va carregar el mateix programa exacte, i el va provar. Va eixir-se de la línia també, en un punt diferent esta volta, però igual d'aviat.

—No és el robot, doncs —va dir en veu alta, a una aula buida que no li va contestar.

Se li va ocórrer, per un moment, que ja hauria d'haver eixit del centre feia una hora llarga, i que no havia menjat res des del dinar. Ho va apartar del pensament amb la mateixa facilitat amb què apartava, últimament, moltes altres coses que no

eren el problema del moment, i va tornar a ajupir-se davant del robot.

A les quatre, va provar amb la cinta. Havia enganxat la línia amb un rotlle vell que tenia una miqueta de brillantor, i va pensar que potser el reflex confonia el sensor. Va substituir tot el circuit per un altre rotlle de cinta mat, negra de veres, sense cap lluentor. Millora lleugera —el robot va aguantar un tros més abans de perdre la línia—, però no una solució.

A les quatre i mitja va revisar la calibració dels motors, el mateix ajust que havia ensenyat a Nico setmanes abans: potser el robot es desviava per una diferència de velocitat entre rodes tan gran que el bucle de correcció no donava l'abast. Ho va calibrar amb cura, provant recte sense línia primer, ajustant fins que anava perfecte. Va tornar a posar-lo sobre el circuit. Va aguantar mitja volta sencera, la recta i la primera corba, i es va perdre exactament a la segona.

El mòbil, damunt la taula, portava ja una hora marcant un missatge sense llegir. Empar el va veure de reüll i no el va obrir: obrir-lo hauria significat

parar-se a explicar, a qui fóra, per què encara hi era, i no tenia, en eixe moment, cap explicació que li semblara prou bona.

A les cinc, Empar va notar, per primera vegada eixa vesprada, la fatiga concreta que no és la del cos sinó la de la ment quan porta massa temps donant voltes al mateix problema sense trobar-hi eixida. Per un instant, assentada al terra amb l'esquena contra les taules, es va veure com un dels seus propis robots quan la bateria comença a baixar: encara en marxa, encara executant el mateix bucle una vegada i una altra, però cada volta una miqueta més lenta, amb cada volta menys marge abans de parar-se del tot. Va apuntar-ho a la llibreta, amb una honestedat que ja li resultava natural: «*Cinc de la vesprada. Cansada de veres. He comprovat: robot (no és eixe), cinta (millora però no arregla), motors (calibrats, no és això). Continue.*»

Va cridar Alba per telèfon, no per demanar-li la solució directament —ja no era eixe el seu primer reflex—, sinó per pensar en veu alta amb algú.

—Explica-m'ho des del principi, sense saltar-te res —li va dir Alba, que encara estava al centre, corregint fitxes d'infantil a la seua pròpia aula.

Empar li ho va contar tot, el programa, els dos robots, la cinta, els motors. Alba va escoltar sense interrompre, i quan Empar va acabar, va fer una pregunta que no tenia res a vore, en aparença, amb res del que havia dit.

—A quina hora has començat?

—A les tres.

—I ara són les cinc. ¿Ha canviat alguna cosa a l'aula en estes dos hores que no siga el robot?

Empar es va quedar callada un moment, mirant al voltant de l'aula buida, buscant una resposta que no li eixia amb facilitat.

—No ho sé... la llum, supose. Ara entra menys sol que a les tres.

—¿I això afecta els sensors de línia?

Va ser una pregunta, no una resposta, i Empar ho va agrair: no li havien donat la solució, li havien donat, per fi, l'única pista que faltava. Va penjar el telèfon i va obrir, com havia fet setmanes abans amb

el sensor de llum, la pantalla de l'app que mostrava els valors en directe dels dos sensors de línia.

Va posar el robot damunt de la línia negra i va llegir el número: dèsset. Va posar-lo sobre el terra clar, al costat: quaranta-tres. La diferència era prou clara com per a distingir tots dos casos sense problema —o això li semblava.

Va deixar el robot exactament al mateix lloc, sense moure'l, i va esperar deu minuts, revisant altres coses mentrestant, deixant que el sol continuara baixant darrere de l'edifici del costat. Va tornar a mirar els números. Terra clar: trenta-huit. Línia negra: catorze. Els dos havien baixat, perquè hi havia menys llum ambiental entrant per la finestra i, per tant, menys llum reflectida en general, però la diferència entre tots dos seguia sent semblant.

El problema, va descobrir quan va repetir la comprovació una tercera volta, no era la diferència entre línia i terra en un punt fix de l'aula. Era que eixa diferència no era la mateixa a tots els punts del circuit alhora. La corba on el robot es perdia sempre passava per davall d'una zona on l'ombra d'una prestatgeria queia damunt del terra, i eixa

zona en concret, ara que el sol havia baixat un poc més, tenia una il·luminació molt diferent de la resta de l'aula: el terra clar, a l'ombra, donava un valor pareguts, trenta, massa prop del valor de la línia negra en la zona ben il·luminada.

El programa tenia un únic llindar fix, escrit a mà, un número que Empar havia triat a les tres de la vesprada per a distingir línia de terra en un sol punt de l'aula, en unes condicions de llum que ja no eren les mateixes ni tan sols dos hores després, i molt menys en un punt diferent del circuit amb una ombra pròpia distinta.

Va ser Alba qui va aparéixer a la porta de l'aula a les set, ja amb l'abric posat, i es va quedar mirant Empar assentada al terra, al costat del circuit de cinta negra, amb la tableta a la falda.

—Encara ací?

—L'he trobat —va dir Empar, sense alçar la vista—. No és un error del programa. És que estic fent servir el mateix número per a decidir «açò és línia» a tota l'aula, i l'aula no té la mateixa llum a tot arreu. Ni a la mateixa hora.

—I ara què fas?

—Ara ja no puc fer servir un número fix. He de fer que el robot, just abans de començar, mesure ell mateix quina diferència hi ha entre línia i terra en eixe moment concret, i calcule el seu propi llindar a partir d'això, en compte que jo li l'escriga a mà amb un número que triï jo a una hora concreta.

No va ser una solució de dos minuts. Va tardar encara una hora més a programar-la —una xicoteta rutina que, a l'inici del recorregut, feia que el robot passara els sensors per damunt de línia i de terra clar, prenguera els dos valors, i calculara ell mateix un llindar a mig camí entre tots dos, cada volta que s'executava el programa—, i encara més temps a provar-la en diferents punts del circuit per a assegurar-se que ara sí funcionava, fins i tot amb l'ombra de la prestatgeria.

A les huit del vespre, amb l'aula ja completament il·luminada pels fluorescents del sostre —Alba li havia encés abans d'anar-se'n, «perquè no treballes a les fosques com una bruixa», li havia dit—, el robot va completar el circuit sencer, dos voltes seguides, sense eixir-se'n ni una sola volta.

Empar no va sentir l'eufòria que havia sentit amb Nico i el seu primer recte perfecte. Va sentir una cosa més tranquil·la i, en certa manera, més sòlida: el cansament net de qui ha resolt de veres alguna cosa difícil, no perquè hi haguera una solució ràpida amagada que se li haguera escapat a la primera, sinó perquè, senzillament, no n'hi havia. Calia hores. Calia comprovar, descartar, tornar a comprovar. La solució, quan va arribar, no va ser brillant ni elegant a primera vista: va ser el resultat directe d'haver descartat, un per un, tots els camins que no eren.

Va guardar el robot, va enrotllar la cinta del terra, i va escriure a la seua llibreta, ja gairebé sense forces per a la lletra bonica que solia gastar-hi:

«Cinc hores. No hi havia drecera. La pròxima volta que un exercici nou no funcione a la primera, no penseu que heu fet res malament: potser, senzillament, encara no heu trobat on mirar.»

Apunt tècnic: seguiment de línia i correcció adaptativa

Un **robot seguidor de línia** és, probablement, l'exercici de navegació més comú en robòtica educativa, i el seu algorisme bàsic és senzill de descriure: dos sensors de línia, un a cada costat, comproven contínuament si detecten la línia o el terra, i el robot corregix la seua direcció en funció del que veu cada sensor.

La lògica bàsica, en la seua forma més simple:

```
repeteix sempre:
    si sensor esquerre veu línia i sensor dret no →
      gira a l'esquerra
    si sensor dret veu línia i sensor esquerre no →
      gira a la dreta
    si els dos veuen terra clar → avança recte
```

Robots més avançats fan servir una versió millorada d'este mateix principi, coneguda com a **control proporcional**: en compte de girar sempre la mateixa quantitat fixa, el robot calcula com de lluny està del centre de la línia i corregix més fort com més gran és eixa desviació, i més suau com més a prop

està del centre. Açò produïx un seguiment molt més fluid que la correcció «tot o res» de la versió bàsica.

El problema real del capítol, però, no estava en cap d'estos dos enfocaments, sinó un pas abans: com decidir si un valor concret és «línia» o «terra». Este és el mateix problema de llindars que va aparéixer amb el sensor de llum, aplicat ara a un sensor que ha de funcionar de manera fiable en tots els punts d'un recorregut, sota condicions de llum que poden variar d'un punt a un altre —ombres, reflexos, distància diferent de la finestra— i no només d'una hora a una altra.

La solució que va trobar Empar, calibrar el llindar automàticament a l'inici de cada execució en compte d'escriure'l a mà, és una tècnica real i habitual en robòtica, coneguda com a **autocalibratge**: el robot pren mostres del seu entorn immediat abans de començar la tasca, i calcula els seus propis paràmetres de decisió a partir d'eixes mostres, en compte de dependre d'un número fix decidit per endavant. No elimina el problema de la llum variable —cap algorisme ho fa del tot—, però el fa molt més

robust davant de canvis que no es poden preveure amb exactitud abans de l'execució.

La lliçó de fons, més enllà de la tècnica concreta: un error que sembla intermitent, que apareix i desapareix sense un patró evident, sovint no està en la lògica del programa, sinó en una assumpció sobre l'entorn que ja no és certa. Buscar «què ha canviat» —l'hora, la llum, la posició, la temperatura— és, moltes vegades, més productiu que rellegir el codi una desena volta buscant una errada que no hi és.

Objectiu no trobat

Repte d'aula on ningú arriba a l'objectiu a la primera.

Empar havia dibuixat, amb cinta blava al terra de l'aula, una gran creu que marcava un punt exacte, a dos metres i mig de la línia d'eixida, lleugerament desplaçada cap a la dreta. El repte era senzill d'explicar i, com passaria durant tota la sessió, gens senzill de resoldre: cada grup havia de programar el seu robot, sense fer servir cap sensor ni cap línia guia, només blocs d'«avança» i «gira», perquè el robot s'aturara el més a prop possible del centre de la creu.

—No teniu línia que seguir, ni llum que detectar —va explicar—. Només podeu decidir per endavant quant avança i quant gira, i comprovar si heu encertat. Teniu cinc intents. Anoteu, cada volta, què heu canviat respecte de l'intent anterior.

Biel i Khalid, que treballaven junts esta setmana, van calcular el seu primer intent a ull, sense mesurar res: «avança dos segons, gira una miqueta a la

dreta, avança mig segon més». El robot va acabar aturant-se a prop d'un metre de la creu, bastant lluny.

—Massa poc gir —va dir Khalid, apuntant-ho al full.

Segon intent: van augmentar el gir. El robot va girar de més esta volta i es va aturar apuntant cap a la paret del fons, lluny en la direcció contrària.

—Ara massa —va dir Biel, sense frustració, amb la mateixa curiositat pràctica amb què hauria mirat un joc de punteria—. Anem a mig camí entre els dos girs.

Al costat, Laia i Nico havien decidit un enfocament diferent: mesurar amb un metre real la distància exacta entre la línia d'eixida i la creu, i calcular matemàticament quant hauria de durar cada bloc. El seu primer intent, malgrat els càlculs, va acabar tan lluny de la creu com el de Biel i Khalid.

—Però ho hem calculat bé! —va protestar Nico, mirant el full ple de números de Laia com si el full mateix li haguera fallat.

—Els càlculs suposen que el robot avança exactament a la velocitat que diu el manual —va dir Empar,

que havia anat passant per cada grup sense donar cap resposta directa, només preguntes—. ¿És eixa la velocitat real del vostre robot en concret?

Laia i Nico es van mirar. No ho havien comprovat.

Cap grup, al llarg de tota la sessió, va aconseguir aturar-se dins de la creu al primer intent. Ni al segon. El grup de Laia i Nico, després de mesurar la velocitat real del seu robot amb un cronòmetre —«el mateix truc que va fer Nico amb els motors», va assenyalar Laia, orgullosa d'haver-ho recordat—, va necessitar quatre intents. Biel i Khalid, ajustant a ull cada volta, en van necessitar cinc, i encara van acabar a uns quants centímetres, no exactament al centre.

—Cap grup ho ha aconseguit a la primera —va dir Empar a tota la classe, quan ja només quedaven deu minuts de sessió—. I vull que penseu en açò un moment: si jo vos haguera dit, al principi, «programeu el robot perquè arribe exactament ací a la primera», ¿quants de vosaltres hauríeu pensat que fer-ho malament el primer intent significava que ho estàveu fent malament del tot?

Diverses mans es van alçar, mig avergonyides, mig alleugerides de sentir que no eren els únics.

—Doncs no és així —va continuar Empar—. Hi ha exercicis, com el de l'entrepà de mantega de cacauet o el bucle dels feixons, on una vegada trobeu la manera correcta, ja funciona sempre. Però hi ha altres problemes, com este, on la primera versió mai és la definitiva, i açò no és un defecte vostre ni del robot: és, senzillament, com funciona dissenyar alguna cosa que ha d'interactuar amb el món real. Es prova, es mesura com de lluny s'ha quedat de l'objectiu, s'ajusta, i es torna a provar. No és un error que calga «arreglar» com el de la pissarra. És un procés que calga repetir, a posta, tantes voltes com calga.

—¿I com sabem quan parar de provar? —va preguntar Khalid.

—Quan esteu prou a prop de l'objectiu per al que necessiteu —va dir Empar—. «Prou a prop» no sempre vol dir «exacte». De vegades, un robot que s'atura a tres centímetres del centre és un èxit igual de vàlid que un que s'atura exactament damunt.

Laia va apuntar una cosa al seu full, després de guardar el robot a la capsa, amb la mateixa lletra endreçada amb què apuntava sempre les coses que li semblaven importants de veres: *«Intent 1: lluny. Intent 2: menys lluny. Intent 3: quasi. Intent 4: bé. No cal encertar-ho a la primera. Cal saber quant t'has equivocat, per a saber cap a on corregir.»*

Empar va llegir la nota per damunt de l'espatlla de Laia i s'hi va quedar mirant una mica més del compte, reconeixent-hi, sense dir-ho en veu alta, la mateixa lliçó que ella mateixa havia trigat cinc hores i un rotlle sencer de cinta negra a aprendre, sola, en una aula buida: tampoc ella havia encertat a la primera, ni a la segona, ni a la tercera. Havia calgut, senzillament, saber quant s'havia equivocat cada volta, per a saber cap a on corregir la següent.

Apunt tècnic: el cicle de proves i ajust

Molts problemes de robòtica —i de disseny en general— no tenen una única correcció que els arregle del tot, com passava amb el bucle sense condició de sortida del bosses de feixons. En compte

d'això, la seua naturalesa exigeix un procés repetit d'aproximació successiva, conegut en enginyeria com a **cicle de proves i ajust** (*test and refine*):

```
repeteix fins a estar prou a prop de l'objectiu:
    prova la solució actual
    mesura com de lluny ha quedat de l'objectiu
    ajusta la solució en la direcció que reduïx eixa
      distància
```

Este cicle és diferent de la depuració (*debugging*) treballada en capítols anteriors, encara que se li assembla. Depurar és buscar per què alguna cosa que hauria de funcionar no funciona: hi ha un error concret, en algun lloc, i la faena consistix a trobar-lo. El cicle de proves i ajust és una altra cosa: no hi ha, necessàriament, cap error. Simplement, la primera aproximació mai és perfecta, i cada intent aporta informació nova —«massa poc gir», «massa gir»— que permet acostar-se una miqueta més a l'objectiu en el següent intent.

Per què és tan important mesurar l'error, no només notar-lo: un grup que diu «ha quedat lluny» no pot corregir amb precisió. Un grup que diu «ha quedat vint centímetres a la dreta de l'objectiu» sap

exactament en quina direcció i, amb l'experiència, més o menys amb quina magnitud ha d'ajustar el pròxim intent. Este mateix principi —mesurar l'error per a saber cap a on corregir, no només que cal corregir— és la base de molts sistemes de navegació i control reals, des d'un braç robòtic industrial fins al pilot automàtic d'un avió.

La idea de fons per a l'aula: en molts problemes de disseny, preguntar «¿quan parem de provar?» és tan important com preguntar «¿com millorem el pròxim intent?». No sempre existix una solució perfecta i única; sovint existix un llindar de «prou bé» que cal decidir per endavant, no descobrir per atzar.

Col·lisió detectada

Dos grups de robots xoquen en un repte compartit.

El repte d'esta setmana necessitava, per primera vegada, dos robots funcionant al mateix temps a la mateixa zona de l'aula: una pista en forma de vuit, dibuixada amb cinta al terra, prou ampla com perquè dos robots pogueren circular-hi alhora, cadascun seguint la seua pròpia meitat de la figura, sense necessitat de creuar-se... si tot anava com estava previst.

—El robot de Laia i Nico eixirà des d'ací —va explicar Empar, assenyalant un extrem del vuit—, i el de Biel i Khalid eixirà des d'ací, a l'altre extrem. Els dos han de completar la seua volta i tornar al punt d'eixida.

Els dos grups havien programat el seu recorregut per separat, cadascun concentrat només en el seu propi robot, sense parar-se a pensar en l'altre grup més enllà d'un «que no ens fem nosa», dit de passada abans de començar a programar. El punt on el vuit

es creuava, al centre exacte de la pista, no havia format part dels càlculs de cap dels dos grups.

—Preparats? —va dir Empar—. Executeu.

Els dos robots van eixir a la vegada, cadascun seguint amb precisió el seu propi camí. Durant els primers segons, tot va anar exactament com estava previst, cada grup mirant amb orgull com el seu robot completava la seua meitat de la figura sense cap problema. I llavors, exactament al centre del vuit, on les dos trajectòries es creuaven, els dos robots van arribar quasi al mateix instant, i el robot de Biel i Khalid va topar de ple contra el lateral del robot de Laia i Nico, fent-lo eixir de la seua trajectòria i quedar-se aturat, torçat, fora de la línia de cinta.

—Ha xocat amb el nostre! —va cridar Nico, més indignat que preocupat, encara que el robot no havia sofert cap dany real.

—Perquè els dos anàveu perfectes —va dir Empar, acostant-se—. Cap dels dos programes tenia cap error. El problema no és que cap dels dos robots estiga mal programat. És que cap dels dos sabia que l'altre existia.

Va deixar que els dos grups revisaren els seus propis programes per a confirmar-ho: cada robot seguia exactament el camí que li havien indicat, amb la precisió que ja dominaven des de feia setmanes. El fallo no estava en cap línia de codi concreta. Estava en una cosa que ningú havia programat: què fer si, mentre executes el teu pla perfecte, apareix pel mig alguna cosa que el teu pla no havia previst.

—Açò em recorda una cosa —va dir Khalid, pensatiu—. Quan vam fer el joc de «camina tres passes, gira a la dreta», i Empar ens deia les instruccions massa completes, sense deixar-nos reaccionar a res que no fóra dit exactament. Açò és el mateix, però amb un altre robot en compte d'una taula.

—És una molt bona manera de veure-ho —va dir Empar—. Fins ara, tots els vostres programes assumien un món buit al voltant del robot, sense res inesperat pel mig. Hui anem a afegir una cosa nova: un sensor de distància que vigile constantment si hi ha algun obstacle massa a prop, i que sàpiga reaccionar-hi, encara que el programa principal no ho haguera previst.

Va ensenyar-los un bloc nou de la secció d'esdeveniments, similar als que havien fet servir amb Biel i la cascada de la setmana anterior: «quan el sensor de distància detecte un obstacle a menys de deu centímetres, para tots els motors immediatament». Els dos grups van afegir el bloc als seus programes, sense canviar res més del recorregut original, i van tornar a provar.

Els dos robots van eixir de nou, cadascun seguint el seu propi camí, i quan es van acostar al punt de creuament, el robot de Biel i Khalid, que arribava una fracció de segon abans, va detectar el robot de l'altre grup massa a prop i es va aturar en sec, esperant. Al cap d'un segon i mig, el robot de Laia i Nico ja havia passat, i el sensor va deixar de detectar cap obstacle.

—I ara què? —va preguntar Biel, mirant el seu robot aturat, sense saber com continuar.

—Bona pregunta —va dir Empar—. Parar quan detecteu un obstacle és el primer pas, i és important, però només evita el xoc. No resol, per si sol, com continuar després. ¿Què li diríeu al vostre robot que fera, una volta l'obstacle ja no hi és?

Van afegir un segon bloc: «quan el sensor de distància deixe de detectar obstacles, continua el recorregut». Al tercer intent, els dos robots es van creuar sense xocar, un aturant-se una fracció de segon per a deixar passar l'altre, exactament com faria algú caminant per un passadís estret quan es troba una altra persona de cara.

—Ara sí que semblen intel·ligents de veres —va dir Laia, observant els dos robots completar les seues voltes respectives sense cap incident.

—No són més intel·ligents que abans —va matisar Empar—. Són més robustos. Abans només sabien fer bé el que els havíeu dit, en un món on res inesperat passava mai. Ara saben, a més, què fer quan alguna cosa que no havíeu previst apareix pel mig. Açò no és el mateix que ser més llestos. És, senzillament, estar preparats per a un món més real, que rarament es comporta exactament com un pla dibuixat amb cinta al terra.

Apunt tècnic: robustesa i gestió d'excepcions

Fins ara, quasi tots els programes de la classe havien assumit un **cas normal**: el robot fa el que se li diu, en un entorn que es comporta exactament com s'esperava. Molts programes reals, però, necessiten preveure també **casos excepcionals**: situacions inesperades que, si no es gestionen, provoquen que el programa falle d'una manera brusca i, sovint, poc segura.

Este xoc entre dos robots és un exemple senzill d'un problema molt comú en robòtica i en programació en general: un programa pot ser tècnicament correcte —fer exactament el que el seu codi diu que ha de fer— i encara així fallar, si el codi no preveu res que passe fora del seu pla original. La correcció del codi i la robustesa del codi són dos coses diferents.

La solució que va aplicar la classe segueix un patró habitual en robòtica real, conegut com a evitació d'obstacles bàsica:

```
programa principal:
    segueix el recorregut planejat

en paral·lel, sempre:
    si sensor de distància detecta obstacle a prop →
      para els motors
    quan l'obstacle ja no es detecte → reprén el
      recorregut
```

Per què cal un esdeveniment separat, i no només afegir «comprovacions» dins del programa principal: un obstacle pot aparéixer en qualsevol moment, no només en els punts concrets on el programador ha pensat a comprovar-ho. Fer-ho amb un esdeveniment independent, vigilant constantment, garantix que la reacció es produïx tan prompte com cal, siga quin siga el punt exacte del recorregut on el robot es trobe.

Un matís important: «parar quan detectes un obstacle» és el nivell més bàsic de gestió d'excepcions, útil i necessari, però limitat —el robot es queda, senzillament, esperant. Sistemes més avançats poden decidir esquivar l'obstacle, buscar una ruta alternativa, o avisar d'alguna manera que no poden continuar. Este llibre no arriba a eixe

nivell, però la idea de fons —preveure que el món real no sempre es comporta com el pla original, i decidir per endavant què fer quan això passa— és la mateixa, independentment de com de sofisticada siga la resposta.

Peces trencades

Una roda trencada, un sensor esquerdat: la fallada és del maquinari, no del programari.

El robot número dotze —el mateix que, tres setmanes abans, havia eixit disparat de la seua trajectòria en el xoc del repte del vuit— portava des de principi de setmana comportant-se d'una manera que ni Laia ni Nico sabien com descriure amb exactitud. «Fa coses rares», havia dit Nico el dilluns, i Empar, que ja no acceptava «coses rares» com a descripció suficient, li havia demanat que ho apuntara amb més detall abans de tornar-ho a provar.

Dimecres, amb el detall ja apuntat, el problema era clar però no evident: el robot número dotze, en qualsevol exercici que implicara avançar en línia recta, es desviava sempre cap al mateix costat, la dreta, amb una inclinació que canviava d'intensitat d'una execució a una altra —a voltes lleugera, a voltes prou forta com per a eixir-se'n del tot d'una línia de cinta.

—Torneu a calibrar-lo, com vam fer amb el de Nico fa unes setmanes —va suggerir Laia, aplicant amb naturalitat el que havien après al capítol dels motors.

Ho van fer. Van ajustar la velocitat relativa de les dos rodes, provant, observant, ajustant de nou, exactament com havia funcionat amb el robot de Nico. Esta volta, però, el mateix ajust que un dia havia arreglat un problema semblant no va aconseguir res de fiable: el robot avançava recte en un intent, i es desviava de nou en el següent, amb una velocitat idèntica de rodes que un moment donava resultats diferents de l'anterior.

—Això no té sentit —va dir Nico, amb la frustració concreta de qui ha aplicat la solució correcta i no ha funcionat—. Si els números són els mateixos, hauria de fer el mateix cada volta.

Empar es va acostar, i en compte de repetir el mateix ajust una tercera volta, va fer una cosa diferent: es va ajupir davant del robot i el va observar, físicament, mentre avançava a poc a poc, sense mirar la pantalla ni els números.

—Torneu a executar-lo, molt a poc a poc si podeu —va dir—. I mireu-vos les rodes, no la pantalla.

Nico va reduir la velocitat al mínim i va tornar a executar el programa. Els tres —Empar, Laia i Nico— es van ajupir junts, mirant les dos rodes girar lentament. La roda esquerra girava de manera fluida i constant. La roda dreta, en canvi, feia una xicoteta sotragada cada volta que completava una revolució sencera, un moviment gairebé imperceptible a velocitat normal, però evident ara, a càmera lenta.

—Ahí —va dir Laia, assenyalant—. La roda dreta fa una cosa estranya cada volta.

Empar va agafar el robot amb cura i va girar la roda dreta amb el dit, a mà, sense el motor engegat. Al cap d'una volta sencera, el dit va notar el mateix xicotet salt que havien vist, i en mirar de prop, la vora exterior de la roda tenia una xicoteta esquerda, quasi invisible si no se sabia on buscar, just al punt on la peça de plàstic s'ajustava a l'eix del motor.

—El xoc de fa tres setmanes —va dir Nico, en veu baixa, connectant-ho tot d'una vegada—. Quan l'altre robot ens va colpejar.

—Probablement —va dir Empar—. Un colp lateral prou fort pot esquerdar una peça sense trencar-la del tot, i una peça esquerdada pot seguir funcionant bé la majoria del temps, però fallar de manera intermitent, depenent d'en quin punt exacte de la volta cau la pressió. Açò explica per què la calibració no solucionava res: no hi havia cap número equivocat al programa. La roda mateixa no girava de manera constant, per molt bé calibrats que estigueren els motors.

—Però com ho sabíem que no era el programa? —va preguntar Laia, ara amb la mena de curiositat que ja no buscava només resoldre este problema, sinó entendre el mètode per a la pròxima volta.

—No ho sabíem del tot fins que ho vam mirar físicament —va reconéixer Empar—. Però hi havia una pista abans d'això: el mateix ajust exacte donava resultats diferents cada volta. Un programa, si no canvia res al seu voltant, es comporta igual cada volta que s'executa. Si el mateix codi, exactament igual, dóna resultats diferents d'una execució a una altra, això és un indici fort que el problema no està en el codi, sinó en alguna cosa física que canvia

entre execucions —una peça que no encaixa igual cada volta, un cable que fa mal contacte, una bateria que es descarrega mentre proveu.

Van substituir la roda —Vicent havia deixat, feia setmanes, una xicoteta bossa de peces de recanvi «per si algun dia les necessiteu», que Empar havia guardat sense pensar que les necessitaria tan prompte— i el robot número dotze va tornar a avançar recte, amb la mateixa calibració de motors que abans no havia funcionat de manera fiable.

—O siga que el problema no era ni el programa ni els motors —va resumir Nico, encara una mica sorprés del gir que havia pres el matí.

—Exacte —va dir Empar—. I això és una cosa que val la pena que recordeu: quan un error és intermitent, canviant, que apareix i desapareix sense un patró clar encara que no toqueu res del codi, sovint no és un bug de programació. És una peça física que ja no fa exactament el que hauria de fer. I això no ho arregla cap línia de codi, per molt bé escrita que estiga.

—Llavors el nostre mantra necessita una excepció —va dir Biel, que havia vingut a mirar des de la

taula del costat, atret pel corrillo—. «Para. Mira on s'ha trencat.» A voltes, «on s'ha trencat» és de veres, literalment, on s'ha trencat.

Empar es va riure, i ho va apuntar, esta volta amb un cert to de broma seriosa, a la seua llibreta: *«Recordar a la classe: de vegades el bug no és metafòric.»*

Apunt tècnic: distingir un problema de maquinari d'un de programari

No tots els comportaments estranys d'un robot venen d'un error al codi. Distingir si un problema és de **programari** (el codi diu al robot que faça alguna cosa incorrecta) o de **maquinari** (el robot té una peça física danyada, mal connectada o desgastada) és una habilitat pràctica que estalvia moltes hores buscant un error que no existix a cap línia de codi.

Pistes que apunten cap a un problema de maquinari, no de programari:

- **El mateix codi, exactament igual, produïx resultats diferents en execucions diferents.** El programari, si no canvia, es comporta de manera consistent. Una inconsistència entre

execucions idèntiques sovint indica una peça física que no es comporta de manera constant.

- **El problema empitjora o millora depenent de com es mou o es toca físicament el robot**, no depenent de què diu el programa.
- **El comportament coincideix amb un incident conegut**: un colp, una caiguda, un component que s'ha mullat o que ha rebut massa pressió.

Mètode pràctic de diagnosi, aplicable més enllà dels robots:

1. **Comprovar primer si el codi és consistent**: el mateix programa, executat diverses voltes en les mateixes condicions, ¿dóna sempre el mateix resultat? Si no, sospiteu del maquinari abans que del codi.
2. **Observar físicament el component sospitós**, a poc a poc, en compte de confiar només en els números que mostra la pantalla.
3. **Provar de substituir la peça sospitosa per una altra d'idèntica**, si és possible, per a confirmar si el problema desapareix amb el canvi.

4. **No assumir que la solució que va funcionar l'última vegada per a un problema paregut ha de funcionar ara.** Un problema que sembla igual per fora pot tindre una causa completament diferent per dins.

La idea de fons: «depurar» no és sempre una activitat que passa dins d'una pantalla. Quan un sistema barreja programari i maquinari —com passa amb qualsevol robot real—, saber en quin dels dos mons buscar la causa és, sovint, el pas més important de tot el procés.

Projecte complet

Disseny i construcció d'una missió d'aula de principi a fi, integrant tot el que s'ha aprés.

—Esta setmana no farem exercicis solts —va anunciar Empar el dilluns, amb un to que la classe ja reconeixia com el de «prepareu-vos, açò va de veres»—. Farem un projecte complet, de principi a fi, els quatre dies que ens queden fins divendres. I el projecte és este: el vostre robot ha de portar un missatge des de la porta de l'aula fins al despatx de direcció, travessant el passadís, sense que ningú el guie amb la mà en cap moment del recorregut.

Ho va dir sense donar cap detall més, deliberadament, i va deixar que fóra la mateixa classe qui es fera la primera pregunta important.

—¿I com és el passadís? —va preguntar Laia, ja amb el llapis a mà.

—Eixa és, precisament, la primera cosa que hem de decidir junts —va dir Empar—. Abans de programar res, necessitem saber exactament què significa que la missió «funcione». Perquè si no ho decidim

ara, cadascun de vosaltres es farà una idea diferent, i al final ningú sabrà si ha triomfat o no.

Van dedicar el primer matí, no a programar, sinó a definir, entre tots, què hauria de ser capaç de fer el robot exactament. Empar dibuixava a la pissarra mentre la classe llançava idees, i cada idea nova obligava a precisar una mica més l'anterior, de la mateixa manera que havien practicat mesos abans amb el joc de «camina tres passes, gira a la dreta».

—Ha d'anar del punt A al punt B —va dir Nico, per començar.

—Massa vague —va respondre Empar, sense retraure-l'hi, ja que era exactament el punt de partida que esperava—. ¿Quin camí exacte, quines corbes, quins trams rectes?

Al final del matí, tenien una llista escrita, clara, penjada a la pissarra amb quatre punts que tota la classe havia acordat:

1. El robot ha de seguir una línia de cinta negra des de la porta de l'aula fins a un punt marcat al passadís, aproximadament sis metres, amb dos corbes.

2. Al passadís hi haurà, en un moment aleatori de l'assaig, un obstacle imprevist —una caixa, una motxilla— que el robot ha de detectar i esquivar sense xocar-hi.
3. En arribar al final del recorregut, el robot ha de detectar que ha arribat —mitjançant un canvi de color al terra, en compte d'una línia més— i aturar-se, encenent el seu llum de color verd i fent sonar un pitet, com a senyal que «el missatge ha arribat».
4. Tot el recorregut s'ha de completar sense que ningú toque el robot des del moment en què comença fins que s'atura al final.

—Açò és, si ho penseu bé, exactament el mateix que fèiem al principi de curs amb el full quadriculat i l'entrepà de mantega de cacauet —va assenyalar Empar, encara davant de la pissarra—. Un objectiu gran, dividit en trossos manejables. Anem a fer-ho ara amb el robot: quins trossos independents formen esta missió?

La classe, ja experta en descompondre problemes des de feia mesos, ho va tindre relativament clar: seguiment de línia per als trams rectes i les cor-

bes, detecció i esquivament d'obstacles al passadís, detecció del punt final mitjançant un sensor de llum sobre un color diferent al terra, i finalment el senyal d'arribada amb llum i so. Quatre peces, quatre grups treballant-hi per separat durant el dimarts, cada grup responsable de fer funcionar la seua peça de manera fiable abans de pensar en ajuntar-les.

El grup de Laia i Nico es va encarregar del seguiment de línia, aplicant directament la tècnica d'autocalibratge que Empar havia après —a base d'hores— unes setmanes abans: en compte d'un llindar fix, el robot prenia una lectura ràpida de línia i terra clar just abans de començar cada assaig. Al migdia, ho tenien funcionant amb fiabilitat als dos trams rectes i a la primera corba; la segona corba, més tancada, encara els donava problemes intermitents.

El grup de Biel i Khalid es va encarregar de l'obstacle, i van reutilitzar quasi directament el bloc d'esdeveniment que havien programat setmanes abans en el repte del vuit: «quan el sensor de distància detecte un obstacle a menys de deu centímetres, para». Ho van ampliar amb un segon bloc que Em-

par els va suggerir, sense donar-los la resposta completa: en compte de només parar, el robot havia de girar lleugerament, avançar un tram curt, i tornar a buscar la línia original —un esquivament senzill, no perfecte, però suficient.

Un tercer grup, format per dos alumnes que fins ara no havien tingut un paper destacat en este relat, Marc i Amina, es va encarregar de la detecció del punt final: un quadrat de cartolina groga, molt més clara que el terra gris habitual, que el sensor de llum del robot hauria de reconéixer com un canvi prou gran com per a disparar l'aturada.

—Nosaltres tenim l'apunt tècnic de la calibració de llum apuntat sencer a la llibreta —va dir Amina, mostrant-li a Empar la pàgina, escrita amb la lletra pulcra de qui sap que li'n faran servei—. Vam pensar que ens tocaria a nosaltres, tard o d'hora.

El quart grup, amb la resta de la classe repartida en parelles, es va encarregar del senyal final: llum verda i pitet, un bloc relativament senzill de programar, però que van insistir a provar deu vegades diferents per a assegurar-se que el so es sentia bé

fins i tot amb el soroll normal d'una aula de vint-i-quatre persones.

El dimecres al matí, cada peça funcionava, per separat, amb una fiabilitat raonable. Empar ho va apuntar a la pissarra, subratllat: «*Ara ve la part que ningú vos ha explicat encara: ajuntar peces que funcionen per separat no garantix que funcionen juntes.*»

La primera integració, dimecres a mitat de matí, va ser un desastre educatiu en el millor sentit de la paraula. El robot, carregat amb el programa complet de seguiment de línia, esquivament i detecció final tot alhora, es va aturar sol, de manera inexplicable, a mitat del primer tram recte, molt abans d'arribar a on hi hauria d'haver cap obstacle ni cap punt final.

—Però si per separat funcionava! —va protestar Nico, amb la mateixa indignació de sempre, encara que esta volta amb menys convicció que en ocasions anteriors: ja sabia, per experiència, que la indignació rarament resolia res.

—Para —va dir Biel, quasi automàticament—. Mira on s'ha trencat.

Van desactivar, un per un, els blocs d'esdeveiment relacionats amb l'obstacle i la detecció final, deixant només el seguiment de línia actiu, exactament amb el mateix mètode que havien après amb la cascada de Biel setmanes abans. El robot, amb només eixe bloc actiu, va tornar a seguir la línia sense aturar-se. El problema, doncs, era en la interacció entre peces, no en cap peça per separat.

Van tardar quasi tota la vesprada a trobar-ho, esta volta amb Empar deixant, deliberadament, que la classe portara tot el pes de la investigació, intervenint només amb preguntes: el bloc de detecció d'obstacle comprovava la distància contínuament, però el sensor de distància, muntat davant del robot, també rebia una lectura curta i falsa cada volta que el robot passava per damunt d'una de les corbes del recorregut, on la cinta negra formava un xicotet relleu que el sensor interpretava, erròniament, com un objecte massa a prop.

—El sensor de distància creia que la corba era un obstacle —va resumir Khalid, quan finalment ho van

veure amb l'app de valors en directe oberta—. Un fals positiu.

—Exacte —va dir Empar—. Cada peça, per separat, era correcta. Però quan les vau ajuntar, una peça va començar a interferir en una situació que l'altra peça no havia previst.

La solució, discutida entre tota la classe, no va ser eliminar la detecció d'obstacles —necessària per a la resta del recorregut—, sinó afegir una condició addicional: el bloc d'esquivament només s'activaria si la lectura curta de distància es mantenia constant durant, com a mínim, mig segon seguit, no en una única lectura instantània, per a distingir un obstacle real d'una interferència momentània de la cinta.

—Açò és una guarda, com la que va afegir Biel al seu robot fa setmanes —va apuntar Amina, connectant-ho sense que ningú li ho haguera de dir.

Dijous, amb la correcció aplicada, la missió completa va funcionar per primera vegada de principi a fi: el robot va seguir la línia pels dos trams rectes i les dos corbes, es va aturar breument davant d'una motxilla que Empar havia col·locat al mig del passadís sense avisar, va esquivar-la i va retrobar

la línia, i finalment va detectar el quadrat groc, es va aturar, va encendre el llum verd i va fer sonar el pitet, mentre tota la classe, formada al llarg del passadís, aplaudia com si el robot haguera guanyat una medalla olímpica.

—No ha sigut a la primera —va dir Empar, quan els aplaudiments es van calmar—, ni a la segona, ni tan sols quan cada peça per separat ja funcionava. Ha calgut tot un dia més només per a fer que les peces es parlaren bé entre elles. Açò no és un fracàs de la planificació. És, senzillament, com funcionen els projectes de veres, els que combinen diverses parts que han de conviure juntes.

Va mirar el robot, encara amb el llum verd encés al passadís buit, i va afegir, mig en veu alta, mig per a si mateixa, pensant ja en la setmana següent:

—I la setmana que ve, açò mateix ho farem davant de les famílies.

Apunt tècnic: el cicle complet de disseny d'un projecte

Un projecte real —de robòtica o de qualsevol altra disciplina que combine diverses parts que han de treballar juntes— no es construïx escrivint tot el codi d'una vegada i esperant que funcione. Seguïx, gairebé sempre, un cicle amb diverses fases clarament diferenciades, totes elles ja treballades per separat en capítols anteriors d'este llibre, i que ara, per fi, es veuen unides:

1. Definició clara dels requisits. Abans de construir res, cal saber exactament què vol dir «que funcione»: quines condicions concretes ha de complir el resultat final. Un objectiu vague («que arribe al despatx») genera ambigüitat; un objectiu precís («que seguisca esta línia, esquive este tipus d'obstacle, i s'ature en este punt exacte») es pot verificar de manera objectiva.

2. Descomposició en components independents. El projecte gran es divideix en peces més menudes, cadascuna amb una responsabilitat clara

i, idealment, prou independent com per a poder-se desenvolupar i provar per separat.

3. Desenvolupament i proves de cada component de manera aïllada. Cada peça es construïx i es verifica pel seu compte, abans de combinar-la amb cap altra. Açò permet detectar i corregir errors senzills, dins d'un component concret, sense la complexitat afegida de la resta del sistema.

4. Integració. Els components, ja verificats per separat, es combinen en un sol sistema. **Esta fase mereix un avís especial, perquè és on molts equips —d'alumnat o professionals— es troben la sorpresa més gran: components que funcionen perfectament per separat poden fallar quan es combinen**, no perquè cap d'ells estiga mal fet, sinó perquè interactuen entre ells de maneres que ningú havia previst en aïllar-los.

5. Depuració d'integració. Els errors que apareixen només quan els components estan junts requerixen una estratègia semblant a la de la depuració d'esdeveniments encadenats: aïllar components d'un en un, comprovar quina combinació concreta

produïx el problema, i corregir la interacció, no necessàriament cap component individual.

6. Verificació final completa, provant el sistema sencer, diverses voltes, en condicions el més paregudes possible a les reals —incloent-hi, quan calga, elements imprevistos a posta, com la motxilla del passadís, per a comprovar que el sistema respon bé no només al cas ideal, sinó també a l'inesperat.

Per què val la pena conéixer este cicle des de xicotet: la temptació natural, davant d'un projecte gran, és intentar-ho fer tot de colp. L'experiència —de la classe d'Empar i de qualsevol equip real que construïsca sistemes complexos— demostra el contrari: dividir, construir per peces, provar cada peça per separat, i reservar temps i paciència específicament per a la fase d'integració, no com un tràmit final, sinó com una fase amb entitat pròpia, tan important com qualsevol de les anteriors.

El dia que tot podia fallar

Jornada de portes obertes: un robot falla en directe davant de famílies; Empar improvisa en públic per primera vegada.

Ferran va entrar a l'aula divendres a primera hora, abans que arribara ningú més, amb l'entusiasme d'algú que acaba de tindre una idea que li sembla excel·lent i encara no ha tingut temps de preguntar-se si ho és de veres.

—Empar, tinc una idea genial per a hui —va dir, sense ni saludar del tot—. La regidora d'educació ve a la jornada de portes obertes, i he pensat que la demostració del robot quedaria molt millor al vestíbul principal que no a l'aula. Hi ha molt més espai per a les famílies, i la llum és fantàstica per a les fotos, entrant pel finestral gran de l'entrada.

Empar va notar, abans fins i tot de contestar, com el seu estómac es tensava d'una manera que ja coneixia bé.

—Ferran, el recorregut l'hem provat i ajustat tota la setmana a l'aula i al passadís del costat —va dir,

amb calma, encara que la calma li costava un esforç real—. El terra és diferent, la llum és diferent...

—Serà el mateix robot, el mateix programa —va dir Ferran, ja mirant el rellotge—. Si funciona ahí, funcionarà ací. A més, ja he dit a consergeria que traguen les cinc-centes cadires del vestíbul cap a les nou i mitja. Ja no hi ha temps de tornar-ho a canviar. Confia'm, quedarà espectacular.

Havia sigut, notava Empar mentre Ferran ja eixia per la porta cap a la seua pròxima tasca del matí, exactament el tipus de decisió que ella mateixa hauria pres deu setmanes abans: una que semblava raonable des de fora —el mateix robot, el mateix programa, quin problema hi pot haver?— i que només algú que haguera passat hores mirant números de sensor a les cinc de la vesprada sabria que no ho era en absolut.

No hi havia temps per a discutir-ho ni per a re-fer tota la calibració amb calma. Les famílies començarien a arribar en menys de dos hores.

Va reunir la classe, ja formada al passadís esperant instruccions, i els ho va explicar tal com era, sense suavitzar-ho.

—Canvi de plans —va dir—. Farem la demostració al vestíbul, no ací. El terra és molt més llis i brillant que el de l'aula, i hi ha molta més llum entrant pel finestral. Açò vol dir que els números que teníem calibrats des de dijous probablement no serviran igual.

—Però si ja funcionava perfecte! —va dir Nico, amb la indignació que ja formava part del seu repertori habitual davant de qualsevol canvi de darrera hora.

—Ho sé —va dir Empar—. I això és exactament el que anem a comprovar ara mateix, abans que arriben les famílies: si de veres funciona igual en un lloc diferent, o si funcionava «al laboratori» però no funciona «en directe». Anem.

Van portar el robot al vestíbul, encara buit de gent, i van provar el recorregut sencer una vegada, ràpidament, amb el cor d'Empar bategant més fort del que li hauria agradat admetre. El robot va seguir bé el primer tram recte. A la primera corba, sobre el terrazzo polit i brillant del vestíbul, es va desviar completament, perdent la línia negra que algú havia enganxat de pressa deu minuts abans, i es va quedar

girant en cercles fins que Laia el va aturar amb la mà.

—El terra és massa brillant —va dir Khalid, mirant la superfície polida com si fóra, de colp, l'enemic principal del dia—. Reflectix massa la llum del finestral.

Empar va obrir l'app de valors en directe, amb les mans que li tremolaven una miqueta menys del que hauria imaginat feia deu setmanes. Ja tenien menys d'una hora.

—Recordeu el que vam programar al capítol de la línia que no hi era —va dir, en veu alta, més per a organitzar el seu propi pensament que per a explicar-ho a ningú en concret—. El robot no fa servir un número fix. Pren una lectura de línia i de terra clar just abans de començar cada volta. Si el terra ha canviat, eixa lectura hauria d'adaptar-se sola.

—Doncs per què no ha funcionat? —va preguntar Laia.

—Perquè la pren en un únic punt, just a l'inici —va dir Empar, ja pensant en veu alta amb tota la classe escoltant, exactament com havia fet Alba

amb ella mesos abans—. I el vestíbul no té la mateixa llum a tot arreu: prop del finestral hi ha molta claror directa, i més enllà, a l'ombra de la columna, molta menys. Un únic punt de calibratge no basta quan l'entorn sencer no és uniforme.

No hi havia temps per a passar-se cinc hores provant, com havia fet ella sola aquella vesprada de dijous llarg. Hi havia quaranta minuts, un vestíbul que començava a omplir-se de veus de famílies arribant, i una classe sencera mirant-la, esperant.

—Necessitem més d'un punt de calibratge —va dir Empar, decidint en veu alta—. Que el robot mesure línia i terra no només a l'inici, sinó també just abans de cada corba. Biel, tu vas ser qui va connectar l'esdeveniment del llum amb el pitet fa setmanes: ajuda'm a afegir un esdeveniment paregut ací, que torne a calibrar el llindar cada volta que detecte que s'acosta a una zona nova.

No va ser elegant. No va ser la solució perfecta i ben pensada que Empar hauria volgut tindre, amb temps per a provar-la deu vegades en diferents condicions. Va ser, en canvi, exactament el tipus de solució pràctica, feta sota pressió i amb ajuda

de tota la classe, que el llibre sencer havia estat ensenyant sense dir-ho amb eixe nom: tres punts de recalibratge repartits pel recorregut, en compte d'un únic llindar general, ajustats amb prou pressa com per a no ser perfectes, però prou bons com per a intentar-ho.

A les deu, amb el vestíbul ple de famílies, la regidora d'educació dreta prop de la porta amb Ferran al seu costat explicant-li alguna cosa amb entusiasme renovat, Empar va fer senyal a la classe.

—Preparats?

El robot va eixir. El primer tram, correcte. La primera corba —la mateixa que havia fallat feia mitja hora—, correcta esta volta, amb una xicoteta vacil·lació que només la classe, que sabia exactament què buscar, va notar. El públic, que no en sabia res, ho va acollir amb un «ohh» col·lectiu de sorpresa agradable.

I llavors, al segon tram, prop de la columna on l'ombra queia diferent de com l'havien previst en la seua prova ràpida, el robot es va aturar del tot, quiet, amb els dos sensors donant lectures que no acabaven de decidir si allò era línia o terra.

Un silenci breu, incòmode, es va estendre entre les famílies. Ferran, al fons, va fer una xicoteta ganyota que Empar va vore de reüll i que no va necessitar cap traducció.

El vell reflex —esborrar-ho tot, disculpar-se ràpidament i amagar el robot, dir que «hui no tocava»— li va passar pel cap durant mig segon, exactament com havia fet mesos abans amb els robots morts de bateria. I esta volta, com aquella, el va deixar passar sense fer-li cas.

—Un moment! —va dir en veu alta, dirigint-se ara al públic sencer, no només a la classe—. Açò és, de fet, la part més interessant de tot el que hem fet este curs. El robot no sap què fer perquè la llum d'ací és diferent de la llum on l'hem entrenat, i necessita tornar a mirar el terra amb atenció. Mirem-ho junts.

Es va ajupir, va obrir l'app, i va ensenyar als xiquets del públic, les famílies i la regidora, els números que el robot estava veient en eixe instant exacte: una lectura ambigua, a mig camí entre línia i terra clar.

—Biel —va dir—, dispara't el recalibratge manual.

Biel, amb la seguretat de qui ha explicat aquesta mateixa idea a tota la classe fa unes setmanes, va prémer el botó que havien programat feia mitja hora com a mesura d'emergència. El robot va prendre una nova lectura del terra just davall seu, va ajustar el seu propi llindar, i va reprendre la marxa, esta volta seguint la línia sense vacil·lar fins al final del recorregut, on es va aturar sobre el quadrat groc, va encendre el llum verd, i va fer sonar el pitet mentre tot el vestíbul esclatava en un aplaudiment molt més sincer que si tot haguera anat perfecte des del principi.

—Ho ha arreglat en directe! —va sentir Empar que deia algú entre el públic, amb un to d'admiració genuïna que no s'esperava.

Ferran es va acostar quan la gent va començar a dispersar-se cap a les altres aules, amb una expressió que barrejava alleugeriment i, per primera vegada en tota la conversa d'eixe matí, una certa modèstia.

—Ha quedat bé al final —va dir—. Encara que reconec que el canvi de lloc a última hora no ha ajudat gens.

—No —va dir Empar, sense retraure-l'hi, però tampoc sense estalviar-se-ho—. Una cosa que funciona en un lloc no funciona automàticament en un altre. Ho hem après avui, els xiquets i jo, de la manera més ràpida i menys còmoda possible.

—Ho tindré en compte la pròxima volta —va dir Ferran, i Empar va notar, amb una sorpresa que no esperava, que semblava dir-ho de veres.

Apunt tècnic: provar en condicions reals, o per què «al laboratori» no és el mateix que «en directe»

Un sistema —un programa, un robot, qualsevol disseny tècnic— es pot provar en dos tipus d'entorns molt diferents, i confondre'ls és un dels errors més habituals i més costosos en qualsevol projecte real.

L'entorn controlat (sovint anomenat «al laboratori») és aquell on s'han desenvolupat i provat les diferents parts del sistema: condicions conegudes, estables, sense sorpreses. És l'entorn ideal per a

construir i depurar, perquè permet aïllar variables i entendre exactament què està passant.

L'entorn real (sovint anomenat «en directe» o «en producció») és aquell on el sistema s'usarà de veres, i que rarament coincideix del tot amb l'entorn controlat: llum diferent, superfícies diferents, gent que no es comporta com s'esperava, condicions que ningú havia previst perquè, senzillament, no havien aparegut durant les proves.

Per què un sistema pot funcionar perfectament «al laboratori» i fallar «en directe»: perquè moltes de les seues assumpcions —de vegades assumpcions tan bàsiques que ningú s'adona que les està fent, com «el terra sempre reflectirà la llum d'una manera semblant»— només són certes en l'entorn concret on es va desenvolupar i provar, no en qualsevol entorn possible.

Bones pràctiques per a reduir este risc, aplicables a qualsevol projecte, no només a robòtica educativa:

1. **Provar, sempre que siga possible, en l'entorn real final abans del moment que de veres im-**

porta, no confiar que «si ha funcionat allà, funcionarà ací».

2. **Dissenyar sistemes que puguen adaptar-se a canvis de l'entorn**, com el recalibratge múltiple d'este capítol, en compte de dependre de valors fixos que assumeixen unes condicions concretes i immutables.
3. **Preveure un pla per a quan alguna cosa falle en directe**, encara que siga senzill: una manera de reaccionar en temps real, no només una llista de coses que ja funcionaven en teoria.
4. **Quan un canvi d'última hora és inevitable, comunicar-lo el més prompte possible i deixar temps, encara que siga poc, per a comprovar-lo abans del moment real.** Un canvi sense cap comprovació prèvia és sempre una apossada, per molt raonable que semblés sobre el paper.

La idea de fons, que val tant per a robots com per a qualsevol altra cosa que es construïsca per a funcionar davant de gent de veres: el moment en què un pla es troba amb el món real —amb la seua llum canviant, el seu terra imprevist, la seua

gent mirant— no és un incident desafortunat que interromp el treball ben fet. És, senzillament, la prova de veritat que tot projecte real ha de superar, tard o d'hora.

Actualització disponible

Un alumne pregunta "i açò en un ordinador de veres?"; primera ullada a codi de text.

—El meu cosí diu que açò no és programar de veres —va dir Khalid, un dimarts qualsevol, sense cap mena de mala intenció, més aviat amb la curiositat honesta de qui repeteix una cosa que li ha sentit dir a algú més gran i vol saber si és certa—. Diu que programar de veres és escriure, amb l'ordinador, paraules i símbols. Açò de moure peces és per a xiquets menuts.

Alguns companys van riure, un poc a la defensiva, com si l'observació del cosí de Khalid fóra un atac directe a deu setmanes de treball. Empar, en canvi, no va sentir la necessitat d'omplir el silenci ràpidament, com hauria fet mesos abans amb qualsevol pregunta que li semblara posar en dubte el que estaven fent a l'aula.

—És una pregunta molt bona —va dir—. I la resposta és més interessant del que el teu cosí probablement pensa. Deixeu-me ensenyar-vos una cosa.

Va obrir, a la pantalla gran de l'aula, l'app de blocs que feien servir cada dia, i va buscar, entre les opcions del menú superior, una que la classe mai havia tocat: un botó xicotet, a la cantonada, amb la paraula «Text».

—Este botó porta setmanes ací —va dir—, i no l'havíem obert mai perquè no ens calia. Anem a fer-ho ara.

Va prémer-lo, i la pantalla es va dividir en dos: a l'esquerra, el programa de blocs que havien fet servir la setmana anterior per al seguiment de línia, exactament com el coneixien, amb les seues peces de colors encaixades unes amb altres; a la dreta, en lletra menuda, un text ple de paraules com «si», «mentre», i símbols que ningú de la classe havia vist junts d'eixa manera.

```
mentre veritat:
    si sensor_esquerre.veu_linia() i no
      sensor_dret.veu_linia():
        gira_esquerra()
    si no sensor_esquerre.veu_linia() i
      sensor_dret.veu_linia():
        gira_dreta()
```

```
si no sensor_esquerre.veu_linia() i no
  sensor_dret.veu_linia():
    avanca()
```

—Mireu bé la columna de la dreta un moment —va dir Empar—. I ara, qui vullga, que vinga i mova una peça a l'esquerra. Qualsevol.

Nico va alçar la mà abans que ningú més ho pensara, va eixir a la pissarra digital i va agafar un dels blocs «si» —el que sempre li havia paregut mal col·locat— per arrossegar-lo dos posicions més avall.

—Ei! —va dir, sense llevar els ulls de la columna de text—. S'ha mogut sola, la lletra! Jo no l'he tocada!

—Amb el ratolí, no —va dir Empar—. Però amb el bloc, sí. Torna a mirar-ho bé: és el mateix canvi, escrit de dos maneres diferents.

Laia, que ja duia una estona mirant la columna de la dreta amb l'atenció de qui vol entendre-la del tot, no va esperar que ningú li donara pas.

—Llavors per què no fem servir text directament des del principi? —va preguntar.

—Perquè t'equivocaries més —va provar Nico, encara amb la mà sobre el bloc que acabava de

moure, sense estar-ne del tot segur—. Amb un bloc no pots posar-lo on no toca. Amb lletres... sí, no?

—Quasi —va dir Empar—. Els blocs no et deixen equivocar-te de forma: encaixen només allà on tenen sentit. El text, en canvi, t'obliga a escriure cada símbol, cada espai, exactament bé, i ahí sí que et pots equivocar amb facilitat.

Va deixar la classe jugar amb la vista de text durant la resta de la sessió, sense cap objectiu concret, només explorant: movent blocs i mirant com canviava el text, i alguns, els més atrevits, provant de canviar directament una paraula del text i vore què passava amb els blocs.

Biel va trobar, quasi per accident, que si escrivia malament una de les paraules del text —«avansa» en compte d'«avanca»—, l'app li mostrava un avís roig sota la línia, i els blocs, a l'esquerra, es quedaven sense canviar, esperant que ho corregira. Ho va provar una altra volta, a posta, amb una altra paraula, només per assegurar-se que no havia sigut casualitat, i Laia i Nico es van acostar a mirar-ho també.

—Ei, ho ha vist! —va dir, quasi orgullós d'haver trobat un error a posta—. Amb blocs açò no podria passar mai, perquè cada peça només encaixa on toca.

—Exacte —va dir Empar—. Este és un dels motius pels quals la gent que programa de veres, professionalment, encara comença moltes voltes amb blocs quan aprén un llenguatge nou, i és per això que existixen eines com esta, que vos deixen vore els dos mons a la vegada. No és una escala de «xiquets petits a persones serioses». És una manera diferent de mostrar la mateixa idea, i cadascuna té els seus avantatges.

—O siga que el que hem fet tot el curs sí que és programar de veres —va dir Khalid, ara amb la seguretat de qui ja té la resposta que li calia per al seu cosí.

—Tot el curs —va dir Empar—. Cada bucle, cada condicional, cada esdeveniment encadenat que va fer moure el robot de Biel sol. Açò de hui no és el moment en què heu començat a programar de veres. És, senzillament, el moment en què heu vist,

per primera vegada, com es veu allò mateix que ja sabíeu fer, escrit d'una altra manera.

Apunt tècnic: de blocs a text, la mateixa idea amb una altra forma

Els llenguatges de **programació per blocs** —com l'app que ha fet servir la classe durant tot el llibre— i els **llenguatges de programació de text** —com Python, JavaScript o molts altres— no representen dos formes diferents de pensar. Representen la mateixa lògica de programació —seqüències, condicionals, bucles, esdeveniments—, expressada amb dos notacions diferents.

Per què els blocs són útils per a començar:

- **Eliminen els errors de sintaxi.** Una peça de bloc només encaixa allà on té sentit gramaticalment; és físicament impossible «escriure malament» l'estructura d'un programa de blocs de la mateixa manera que és possible oblidar un símbol en text.

- **Fan visible l'estructura del programa** d'un colp d'ull, sense necessitat de llegir paraula per paraula.
- **Permeten centrar tot l'esforç d'aprenentatge en la lògica** —quina seqüència, quina condició, quin bucle— en compte de repartir-lo entre la lògica i la memorització exacta d'una sintaxi.

Per què, tard o d'hora, val la pena conéixer també el text:

- **La majoria del programari professional del món es construïx en llenguatges de text**, no de blocs, i moltes eines i llibreries només existixen en eixe format.
- **El text permet escriure programes més llargs i complexos amb més rapidesa** un cop es domina, sense la limitació física d'haver d'arrossegar peces.
- **Veure el mateix programa en els dos formats ajuda a entendre que la programació no és «aprendre un llenguatge concret»**, sinó aprendre a pensar de manera estructurada;

el llenguatge concret és, en el fons, un detall d'implementació.

La idea de fons per a qui comença: preguntar-se «¿açò és programar de veres?» normalment amaga una pregunta diferent i més interessant: «¿estic aprenent a pensar de la manera que calen per a resoldre este tipus de problemes?». La resposta a esta segona pregunta no depén de si les instruccions es mouen amb el ratolí o s'escriuen amb el teclat.

Depura't a tu mateixa

Tancament: "depurar" ja no és una paraula que només s'aplica al codi.

L'última sessió abans de Nadal, Empar no va programar cap exercici nou. Va posar els robots a la capsa —ja no calia comprovar-los un per un abans de guardar-los; la classe ho feia sola, cada torn en el seu lloc, cada bateria en el seu punt de càrrega— i va repartir un full en blanc a cada alumne, amb una única pregunta escrita a dalt: «Què vol dir "depurar" per a tu, ara?».

—¿No un exercici de robòtica? —va preguntar Laia, sorpresa.

—Ara mateix, no —va dir Empar—. Escriviu el que us vinga de veres.

Alguns van escriure poc, unes línies. Nico va omplir mig full explicant, amb un orgull que ja no necessitava disfressar-se de res, com havia calibrat el seu robot fa setmanes, i com allò l'havia fet sentir capaç de coses que no s'havia sentit capaç abans. Amina va escriure sobre la vegada que el seu grup

va trobar la interferència del sensor de distància amb la corba, i com «para i mira on s'ha trencat» li havia servit també per a una discussió amb la seua germana, que va acabar entenent que la baralla no havia començat on totes dos pensaven que havia començat.

Biel va escriure el full sencer i encara va demanar-ne un segon.

—El divendres passat em vaig enfadar amb Martí perquè em va trencar un dibuix —va llegir en veu alta, quan Empar li va preguntar si volia compartir-ho—. I anava a cridar-li, com sempre. Però em vaig aturar, i vaig pensar: «Para. Mira on s'ha trencat de veres.» I resulta que jo li havia deixat el dibuix damunt de la seua taula, on ell sempre pinta, i llavors la culpa no era només seua. Vam parlar-ho, sense cridar. Crec que això és depurar. No és buscar de qui és la culpa. És mirar on ha començat de veres el problema, abans de decidir res.

Empar va escoltar-ho sense dir res durant un moment, amb la mateixa sensació que havia tingut mesos abans quan Biel va originar la frase per primera vegada davant d'una pissarra plena de sumes

incorrectes: la certesa tranquil·la que allò que estava passant a la seua aula ja no cabia dins de cap unitat didàctica.

Aquella nit, a casa, va obrir un calaix que portava setmanes sense tocar i en va traure la carpeta plastificada, la mateixa que havia arribat a portar sempre a sobre durant les primeres setmanes de curs, plena de fulls impresos amb respostes preparades per a qualsevol pregunta que un alumne poguera fer-li sobre el robot. Feia, calculava, unes set o huit setmanes que no la tocava. La va fullejar per última vegada: pàgines i pàgines de respostes a preguntes que, quan finalment havien arribat de veres, mai s'havien assemblat prou al guió com per a servir-li de res.

No la va llençar. Va arrancar les pàgines impreses, una per una, i va deixar només les tapes buides, plastificades, resistents. L'endemà la va portar a classe i la va posar damunt de la taula de Biel.

—Per a les teues llibretes de casa —li va dir—. Una carpeta que aguanta molt de temps sense trencar-se és massa bona per a llençar-la. Només li faltava

deixar de ser plena de respostes que no eren les meues de veres.

Va tornar a la seua taula i va obrir la seua pròpia llibreta —eixa mateixa on havia apuntat, mes rere mes, «sessió bé» al principi i, més avant, coses molt més honestes: bateries mortes, bugs de cinc hores, colps que resultaven ser esquerdes al plàstic i no errors de programació— i va escriure l'última entrada de l'any, sabent, mentre l'escrivia, que seria l'última entrada d'este llibre.

«Fa sis setmanes vaig obrir una capsa que havia deixat tancada deu setmanes senceres, per por que allò que hi havia dins es trencara si el tocava. Ara sé que "trencat" no vol dir "acabat". De vegades vol dir, senzillament, que li ha fallat la calibració, o que li falta bateria, o que ningú li ha ensenyat encara on mirar. No calia arreglar-ho tot a la primera. Calia, només, parar, mirar amb honestedat on s'havia trencat, i tornar-ho a provar. Açò val per als robots. He aprés, esta tardor, que val exactament igual per a mi.»

No va tancar la carpeta —ja no en tenia cap davant, només la llibreta oberta damunt de la taula, amb la tinta encara humida de l'última línia—, però

va tancar el llapis, el va deixar damunt del full, i es va quedar un moment mirant l'aula buida, amb la mateixa llum de vesprada que havia vist entrar per aquella finestra tantes voltes al llarg del curs, canviant, com sempre havia canviat, sense que ningú li ho haguera d'explicar dos voltes per a saber-ho ja.

La bateria, va pensar, mai s'esgota per sempre. Només cal saber quan parar, i quan tornar-se a carregar.

Apunt tècnic: el mètode de depuració, repassat des del principi

Este llibre ha fet servir, des del capítol «On s'ha trencat?», un mètode senzill de quatre passos per a resoldre problemes tècnics. Ara que ja s'ha tancat el relat, val la pena deixar-lo escrit una última vegada, sencer, com a resum de tot el que la classe —i qui llig este llibre— ha practicat capítol rere capítol:

1. **Para.** No repetisques la mateixa acció esperant un resultat diferent. Aturar-se és el primer pas, no una pèrdua de temps.

2. **Mira on s'ha trencat.** Identifica el punt exacte on el comportament esperat i el comportament real es separen, en compte de suposar-ho o de culpar el component més fàcil de culpar.
3. **Comprova, un per un, els sospitosos raonables**, descartant cada possibilitat amb una prova concreta, no amb una intuïció sense verificar.
4. **Torna-ho a provar des d'ahí**, aplicant només el canvi necessari, i confirma que el resultat ara sí coincideix amb l'esperat.

Este mètode va nàixer, en este llibre, per a arreglar una suma mal feta a la pissarra. Ha servit, capítol rere capítol, per a un bucle sense eixida, una bateria que semblava trencada i només estava buida, un sensor que canviava de comportament amb la llum del dia, una roda esquerdada per un colp que ningú havia vist, i un vestíbul ple de famílies un divendres de portes obertes.

No té per què acabar ahí.

Annex

Ací acaba la novel·la. El que ve tot seguit no és narrativa.

El que segueix no continua la història d'Empar, ni la de Biel, ni la del CEIP El Tossal Roig. És material de consulta, pensat per a qui haja arribat fins ací i vulga tornar, més avant, a buscar un concepte concret sense haver de rellegir tot un capítol per a trobar-lo.

Una nota abans de començar: ni ROBIX ni cap altre nom de robot o aplicació que apareix en este llibre correspon a un producte comercial real. És, deliberadament, una composició genèrica, pensada perquè cap detall tècnic concret quedara vinculat a una marca, un model o un programa institucional que poguera canviar —de preu, de disponibilitat, de nom— l'any que ve. El que sí és real, i és el que val la pena que quede, és tot allò que Empar i la seua classe van aprendre pel camí.

Glossari

Abstracció. Simplificar un problema o una informació, quedant-se només amb els detalls rellevants per a la tasca concreta i descartant la resta. (cap. 8)

Actuador. Component d'un robot que produïx una acció física en resposta a una ordre del programa: un motor, un llum, un altaveu. (cap. 11, 14)

Algorisme. Seqüència ordenada i precisa de passos per a resoldre un problema o completar una tasca. (cap. 3)

Aparellament (Bluetooth). Procés pel qual un ordinador o tauleta estableix una connexió sense fils amb un robot, necessari perquè puguen comunicar-se. (cap. 12)

Autocalibratge. Tècnica per la qual un sistema mesura ell mateix les condicions del seu entorn immediat abans d'una tasca, i calcula els seus propis paràmetres de decisió a partir d'eixes mesures, en compte de dependre d'un valor fix decidit per endavant. (cap. 17, 22)

Bateria de liti. Tipus de bateria recarregable habitual en dispositius electrònics xicotets, incloent-hi la majoria de robots educatius, amb un consum que varia molt segons l'activitat del dispositiu en cada moment. (cap. 13)

Bucle. Estructura de programació que repetix un bloc d'instruccions, ja siga un nombre fix de voltes o fins que es complisca una condició determinada. (cap. 4)

Cascada d'esdeveniments. Situació en què l'acció d'un esdeveniment activa, sense haver-ho previst, la condició d'un altre esdeveniment del mateix programa, produint una reacció en cadena inesperada. (cap. 16)

Calibratge. Procés d'ajustar un component —un motor, un sensor— perquè el seu comportament real s'acoste al comportament esperat, mitjançant observació, ajust i comprovació repetits. (cap. 14, 15)

Condicional. Estructura de programació que executa una part o una altra del codi depenent de si es complix o no una condició determinada. (cap. 5)

Control proporcional. Tècnica de correcció en què la magnitud de la resposta és proporcional a la magnitud de la desviació detectada, en compte d'aplicar sempre la mateixa correcció fixa. (cap. 17)

Depuració (debugging). Procés sistemàtic de localitzar i corregir la causa d'un comportament incorrecte en un programa o sistema. (cap. 6)

Descomposició. Dividir un problema gran en parts més menudes i manejables, cadascuna més fàcil de resoldre per separat. (cap. 2)

Diagnosi de maquinari vs. programari. Procés de determinar si un comportament incorrecte té la seua causa en el codi (programari) o en una peça física danyada o mal connectada (maquinari). (cap. 20)

Especificació completa. Conjunt d'instruccions prou precises i sense ambigüitats com perquè qui les execute —una persona o una màquina— no necessite interpretar res per compte propi. (cap. 3, 9)

Esdeveniment. Bloc de codi que roman inactiu fins que es complix una condició determinada, moment en què s'executa, de manera independent de la resta del programa. (cap. 16)

Firmware. Programari bàsic instal·lat directament al maquinari d'un dispositiu, que en controla el funcionament de baix nivell; diferències de versió entre dispositius poden impedir que es comuniquen correctament. (cap. 12)

Gestió d'excepcions / robustesa. Capacitat d'un sistema per a respondre de manera adequada a situacions imprevistes, no només al cas normal per al qual va ser dissenyat. (cap. 19)

Integració. Fase d'un projecte en què components desenvolupats i provats per separat es combinen en un sol sistema; sovint és on apareixen errors que no existien en cap component aïllat. (cap. 21)

Llindar (threshold). Valor numèric que un programa fa servir per a decidir entre dos estats possibles a partir de la lectura d'un sensor. (cap. 15, 17)

Patró. Regularitat o estructura que es repeteix, la identificació de la qual permet reconéixer i reutilitzar solucions ja conegudes davant de problemes semblants. (cap. 7)

Pensament computacional. Conjunt d'habilitats per a resoldre problemes de manera estructurada, format per quatre pilars: descomposició, reconeixe-

ment de patrons, abstracció i disseny d'algorismes. No requerix, necessàriament, cap ordinador. (cap. 1)

Programació basada en esdeveniments. Model de programació en què diverses regles «quan passe X, fes Y» romanen actives en paral·lel, en compte d'executar-se en un únic orde lineal. (cap. 16)

Programació per blocs. Forma de programació en què les instruccions es representen com a peces gràfiques que encaixen entre elles, evitant errors de sintaxi i fent visible l'estructura del programa. (cap. 23)

Programació de text. Forma de programació en què les instruccions s'escriuen amb paraules i símbols, seguint una sintaxi concreta; representa la mateixa lògica que la programació per blocs, amb una notació diferent. (cap. 23)

Seqüència. Orde concret en què s'executen les instruccions d'un programa, un darrere de l'altra. (cap. 3)

Sensor. Component d'un robot que mesura una magnitud del seu entorn —llum, distància, contacte

amb una línia— i la tradueix en un valor que el programa pot llegir. (cap. 11)

Seguiment de línia. Tasca de navegació en què un robot usa sensors, normalment situats a la seua part inferior, per a mantindre's damunt d'una línia de contrast marcada al terra. (cap. 17)

Cicle de proves i ajust. Procés iteratiu de provar una solució, mesurar com de lluny ha quedat de l'objectiu, ajustar-la en la direcció adequada, i tornar a provar, fins a acostar-se prou al resultat desitjat. (cap. 18)

Tipus de plataformes de robòtica educativa

No hi ha una única manera de fer robòtica a l'aula, i les diferències entre plataformes solen respondre a l'edat de l'alumnat, el pressupost disponible i el grau de progressió cap a la programació de text que es vulga oferir. Ací es descriuen quatre categories generals, sense referir-se a cap marca ni model concret, ja que l'oferta real canvia d'un curs a un altre i varia molt entre centres:

Categoria	Edat orientativa	Sensors i entrada	Llenguatge	Cost orientatiu
Robots de terra bàsics, sense pantalla	Infantil - 1r cicle	Botons físics, poc o cap sensor	Programació física directa (botons, targetes)	Baix
Robots amb app de blocs i pocs sensors	1r - 2n cicle de primària	1-2 sensors (línia o distància)	Blocs senzills	Baix-mitjà
Robots amb app de blocs i múltiples sensors (com el ROBIX d'este llibre)	2n - 3r cicle de primària, ESO inicial	Diversos sensors (línia, distància, llum, botó) i actuadors (motors, llum, so)	Blocs, amb vista opcional de text	Mitjà

Categoria	Edat orientativa	Sensors i entrada	Llenguatge	Cost orientatiu
Plaques programables obertes	3r cicle de primària, ESO, batxillerat	Sensors i actuadors ampliables, segons el projecte	Blocs i text (progressió completa)	Mitjà-alt, però ampliable amb components solts

Cap d'estes categories és «millor» de manera absoluta: la decisió depén de què es vulga treballar amb l'alumnat concret que es té davant. El robot que va rebre l'aula d'Empar, amb els seus quatre sensors, dos motors, llum de color i altaveu, correspon, aproximadament, a la tercera categoria: prou senzill per a començar sense pors, prou complet per a sostindre setze setmanes senceres de descobriments.

Xuleta ràpida

Per a quan ja no cal la història, només el concepte.

Ací teniu, agrupats per bloc temàtic i sense anècdota pel mig, els conceptes que apareixen en este llibre, ordenats aproximadament com van aparéixer a l'aula d'Empar. Entre parèntesis, el capítol on cadascun té la seua història, per si un dia hi voleu tornar.

Els quatre pilars del pensament computacional (cap. 1)

Pilar	En una frase
Descomposició	Dividir un problema gran en trossos manejables
Reconeixement de patrons	Trobar regularitats i reutilitzar solucions ja conegudes

Pilar	En una frase
Abstracció	Quedar-se amb els detalls que importen, descartar la resta
Disseny d'algorismes	Escriure els passos, en orde, precisos i sense ambigüitat

Conceptes bàsics de programació, sense connectar res (cap. 2-10)

Concepte	Què vol dir	Capítol
Descomposició	Trossejar un problema abans d'atacar-lo sencer	2

Concepte	Què vol dir	Capítol
Seqüència / algorisme	Passos en orde, cadascun necessari i suficient	3
Bucle sense condició de sortida clara	Repetir sense saber quan parar: perillós	4
Condicional	«Si passa X, fes Y; si no, fes Z»	5
Condicional niat	Una condició dins d'una altra, per a matisos	5
Depuració (4 passos)	Para → mira on s'ha trencat → comprova sospitosos → torna-ho a provar	6

Concepte	Què vol dir	Capítol
Patró	Allò que es repeteix i permet reconéixer solucions	7
Insuficiència de dades	Vore un patró massa prompte, amb massa pocs exemples	7
Abstracció	Un mapa senzill val més que un mapa complet	8
Especificació completa	Instruccions sense res donat per suposat	9

Especificació incompleta	El bug més comú de tots: donar coses per enteses	9, 10

Sensors i actuadors, amb el robot ja obert (cap. 11-17)

Concepte	Què vol dir	Capítol
Sensor vs. actuador	El robot que mesura el món / el robot que hi actua	11
Aparellament Bluetooth	Connectar ordinador i robot; pot fallar per firmware	12
Gestió d'energia	Bateria «carregada» no vol dir bateria «eterna»	13

Concepte	Què vol dir	Capítol
Calibratge de motors	Cap motor real és perfecte; ajustar-lo és normal	14
Llindar (threshold)	El número que separa «sí» de «no» en un sensor	15
Recalibratge	Un llindar d'un moment pot no servir en un altre	15, 17
Seguiment de línia	Dos sensors, decisions constants, correcció contínua	17

Autocalibratge	Que el sistema mesure el seu entorn abans d'actuar	17

Esdeveniments, robustesa i integració (cap. 16-21)

Concepte	Què vol dir	Capítol
Programació basada en esdeveniments	Regles «quan passe X, fes Y», actives en paral·lel	16
Cascada d'esdeveniments	Un esdeveniment que en dispara un altre sense voler	16
Cicle de proves i ajust	Provar, mesurar l'error, ajustar, repetir	18

Concepte	Què vol dir	Capítol
Robustesa / gestió d'excepcions	Preveure el que el pla no havia previst	19
Evitament d'obstacles	Parar o esquivar quan un sensor detecta perill a prop	19
Diagnosi maquinari vs. programari	El mateix codi, resultats diferents → sospita del maquinari	20
Cicle complet de disseny	Requisits → descomposició → prova aïllada → integració → depuració d'integració → verificació	21

Provar en directe i tancar el llibre (cap. 22-24)

Concepte	Què vol dir	Capítol
Entorn controlat vs. entorn real	«Al laboratori» no és el mateix que «en directe»	22
Blocs vs. text	Mateixa lògica, notació diferent; els blocs no són «per a xiquets»	23
Mètode de depuració (repàs final)	Para. Mira on s'ha trencat. Comprova. Torna-ho a provar.	24

Les frases que es van quedar

Frase	Qui la va dir primer	On
«Para. Mira on s'ha trencat. Torna-ho a provar.»	Biel	cap. 6
«El teu robot no s'ha trencat. Se li ha acabat la benzina.»	Biel	cap. 13
«L'has calibrat, que és una manera més exacta de dir-ho.»	Empar	cap. 14
«De vegades el bug no és metafòric.»	Biel	cap. 20

Frase	Qui la va dir primer	On
«Depurar no és buscar de qui és la culpa. És mirar on ha començat de veres el problema.»	Biel	cap. 24