

PROJECTES STEAM: APRENTENT PER ASSAIG I ERROR

Jordi Achón

Mestre d'educació secundària obligatòria i doctor en pedagogia. Col·laborador del CESIRE (Departament d'Ensenyament).
jordiachon@gmail.com

Resum: L'article és un resum de l'*Assaig de didàctica*, en el qual es proposa i es desenvolupa un model d'aprenentatge per assaig i error en entorns didàctics que aposten per la resolució de problemes i el treball per projectes STEAM (acrònim anglès de 'ciència, tecnologia, enginyeria, art i matemàtiques') per a l'educació secundària obligatòria (ESO). A fi d'aconseguir la necessària empatia cognitiva amb l'alumnat, es presenta la teoria de la psicologia cognitiva de les tres ments (autònoma, executiva i reflexiva), les quals s'identifiquen en produccions cognitives de l'alumnat. Al mateix temps, aquesta teoria ens proporciona un marc fètil per a interpretar els errors dels alumnes i per a esbrinar les principals heurístiques que s'engueguen en els processos cognitius dels aprenentatges. Amb aquest marc teòric, s'elabora un model didàctic per a l'aprenentatge per assaig i error amb el qual s'exemplifica una activitat curricular sobre el motor elèctric.

Paraules clau: STEAM, didàctica, de l'error al coneixement, aprenentatge basat en problemes, pensar i fer un motor elèctric.

THE STEAM PROJECTS: LEARNING BY TRIAL AND ERROR

Abstract: This paper provides a summary of the book *Assaig de didàctica* (Essay on didactics) (<http://hdl.handle.net/2117/179442>), which proposes and develops a trial and error learning model in didactic environments for problem solving and work on STEAM projects in secondary education. In order to achieve the necessary cognitive empathy with students, we present the cognitive psychology theory of the three minds (autonomous, executive and reflective), which are identified in students' cognitive productions. At the same time, this theory provides a fertile soil for interpreting the errors of students and for drawing out the principal heuristics involved in the cognitive processes of learning. With this theoretical framework, a didactic model is developed for trial and error learning and it is used to exemplify a curricular activity on the electric motor.

Keywords: STEAM, didactics, error to knowledge, problem-based learning, devising and making an electric motor.

Introducció

Per al sisè aniversari de la meva neta vaig regalar-li una joguina programable. Era una mena de marieta riallera d'un pam de llargada. Es desplaçava amb rodes i tenia un cos transparent, dissenyat per a mostrar-ne els components electrònics. Se la programava mitjançant uns botons situats a l'esquena. El repertori d'accions que podia fer era molt simple: avançar, retrocedir, girar a la dreta, girar a l'esquerra, pausa, esborrar memòria i executar. Com que la seva usabilitat era força reeixida, no li van caldre gaires explicacions per a manejar-la.

Poc després, quan ja l'havia remenada i marejada tant com va voler, li vaig proposar el repte de programar-la per recórrer un quadrat, figura que vaig dibuixar a terra amb un dit. Se l'il·luminà la cara i va començar a prémer ràpidament els botons. En executar el programa, la marieta va avançar en línia recta quatre vegades consecutives i després va girar cap a la dreta també quatre vegades consecutives, de manera que acabà el trajecte fent una volta sobre ella mateixa.

Quan va avançar per segona vegada i no va girar, a la meva neta ja li va aflorar a la cara una expressió entre la sorpresa i la contrarietat: la marieta no feia el que ella volia. Tot i que hi vaig insistir, va rebutjar un nou assaig i se'n va anar a fer una altra cosa.

L'algorisme que ella havia concebut era aquest: avança, avança, avança, avança, gira a la dreta, gira a la dreta, gira a la dreta, gira a la dreta. El va pensar en un sol instant, sens dubte, imaginant-se un quadrat i descomponent-lo (analitzant-lo) en parts elementals: quatre costats i quatre cantonades per girar.

L'endemà, una nena cofoia es va plantar davant meu amb la marieta a la mà i, sense badar boca, la va deixar a terra i va prémer el botó d'execució: la marieta va recórrer el quadrat imaginari, i, per bé que els sons de cada acció i les seves pampallugues eren les mateixes que el dia anterior, la tonada, no, ja que l'ordre en què es produí la successió de llums i sons no era el mateix que el dia anterior. Era la tonada de l'èxit. La nova temptativa havia reeixit: quatre vegades (avança i gira a la dreta).

Contràriament al que semblava, no havia pas renunciat al projecte, perquè havia assumit el repte derivat del primer fracàs i havia continuat pensant-hi una vegada assolit el petit trasbals emocional. És obvi que va identificar l'error en l'ordre de les accions d'avançar i girar, i les va reordenar per conferir un nou algorisme.

Aposto que ho feu a través d'una intuïció ràpida, en aquest cas, encertada. Aprenem dels errors i en traiem un profit cognitiu d'una manera implícita. És una capacitat cognitiva codificada al nostre ADN, però que es pot educar.

D'això va aquest article, de com conrear (llegiu-hi *didàctica*) la capacitat d'aprendre per assaig i error de l'alumnat en entorns didàctics pluridisciplinaris que aposten per la resolució de problemes i pel treball per projectes.

Tot plegat s'emmarca en la llarga tradició de la pedagogia activa, l'actualització de la qual també inspira els moviments contemporanis de l'educació STEAM (acrònim anglès de 'ciència, tecnologia, enginyeria, art i matemàtiques'), com el que impulsa el Departament d'Educació de la Generalitat de Catalunya.¹ I també cal esmentar el vesant educatiu del moviment «Fem-ho».²

Finalment, he d'esmentar que aquest article és un resum de la investigació-acció que he dut a terme a l'aula i també vull agrair a Iniciativa Digital Politècnica de la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) que la publicués amb el títol *Assaig de didàctica* (Achón, 2020).

La primera part de l'article, la més extensa, se centra en els fonaments teòrics d'un model didàctic per a l'aprenentatge per assaig i error, que són el resultat d'un bon grapat d'activitats experimentades de l'aula estant, que, per raons d'espai, no s'exposaran, per bé que les podeu trobar a l'*Assaig*. A la segona part, més breu, ja s'hi exposa una activitat didàctica elaborada amb aquest model.

Didàctica i empatia cognitiva

L'empatia és la facultat de comprendre els sentiments i les emocions de les altres persones. Si les comprens és perquè pots interpretar-les en els gestos i en les expressions d'altri, i això és possible perquè les coneixes i en tens experiència. L'actitud empàtica és considerada com un dels puntals de l'acció pedagògica.

El significat més comú de l'empatia fa referència a les emocions i prou se sap que aquestes tenen un paper determinant en els aprenentatges. No obstant això, en l'àmbit pedagògic, l'empatia també té una dimensió cognitiva o epistemològica. Vull dir que no tan sols necessites comprendre com i què senten els teus alumnes mentre aprenen, sinó que també has de comprendre com i què pensen.

De la mateixa manera que la punta de l'iceberg emocional són els gestos i les expressions de la cara, la punta de l'iceberg mental de les noies i els nois quan estan en

mode d'aprenentatge són les seves produccions intel·lectuals i materials. Tot allò que pensem durant la resolució d'un problema és fruit d'un procés cognitiu, el qual, avui dia, encara no és observable directament. Ara per ara, les imatges de l'activitat cerebral obtingudes per la neurotecnologia no manifesten com s'ho fa la ment/cervell per sumar dos més dos. Hi ha molt per a descobrir.

De manera que si volem comprendre com i què pensa un alumne concret mentre resol un determinat problema, no tenim cap altra alternativa que interpretar les seves produccions cognitives a partir de models epistemològics i psicològics. En aquest marc, comprendre com es produeixen els errors d'aprenentatge és una de les claus de les bones pràctiques docents. Tot un repte per a la didàctica, ja que, en la mesura que entens què balla al cap del teu alumnat mentre aprèn, podràs optimitzar l'estratègia docent.

Un dels paradigmes de la psicologia cognitiva contemporània (Stanovich, 2011; Kahneman, 2011; Gigerenzer, 2007) estableix que en la nostra ment operen dos sistemes cognitius quan som interpellats a resoldre un problema, a raonar, a prendre una decisió, a emetre un judici o a elaborar una conjectura. En la nomenclatura més acadèmica se'ls anomena *sistema I* i *sistema II*.

Els processos cognitius que duu a terme el sistema I, també conegut com a ment autònoma o inconscient cognitiu, es caracteritzen per la rapidesa i per l'automatisme. Bàsicament, són heurístics i associatius. Són de baix esforç cognitiu, és a dir, que no requereixen una concentració mental per a produir-se. Són les idees que ens apareixen a la consciència de sobte, sempre relacionades amb un problema que ens ocupa o que ens ha ocupat en un moment determinat. És el que col·loquialment coneixem com a *intuïció*. Per descomptat, són la font tant d'errors i de biaixos cognitius com de solucions. Quant als continguts que processa el sistema I, són reals, concrets i sempre contextualitzats en un domini específic.

Un dels paradigmes de la psicologia cognitiva és el reconeixement d'una ment inconscient amb capacitat cognitiva i d'aprenentatge. Pot sorprendre, però és una evidència empírica que tothom pot corroborar; si no, com expliquem l'aprenentatge de la parla, per exemple?

Els processos cognitius del sistema II pertanyen a l'àmbit del jo conscient. Són processos lents, controlats, analítics, basats en regles i d'alt esforç cognitiu. Quant als continguts que processen, són hipotètics, abstractes, descontextualitzats i de dominis generals. Hi ha autors que hi distingeixen dos subsistemes (Stanovich, 2011): la ment algorítmica o executiva, i la racional o reflexiva. La primera executa procediments reglats, fruit d'aprenentatges conscients, mentre que la segona fixa objectius, tria i controla les execucions algorítmiques, i avalua les propostes que emergeixen de la ment autònoma.

És obvi que els dos sistemes funcionen en paral·lel i que es realimenten mútuament, tal com es representa a l'esquema de la figura 1.

De l'aula estant, de poc ens serveix aquest model de la ment si no té una aplicació pràctica. Com a model cognitiu,

1. <https://projectes.xtec.cat/steamcat>.

2. <https://conventagusti.com/maker>.

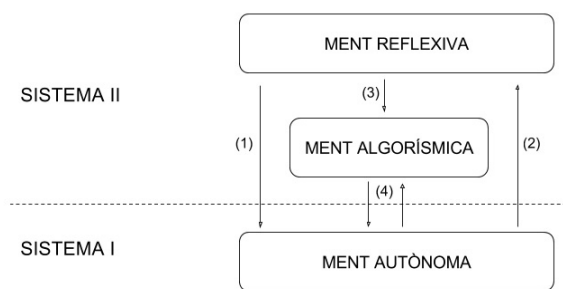


FIGURA 1. Esquema de les tres ments de Keith Stanovich.
 FONT: Keith STANOVICH (2011), *Rationality and the reflective mind*, Nova York, Oxford University Press, p. 33.

és una eina metodològica per a modelar l'aprenentatge de coneixements concrets. La seva usabilitat depèn de practicar una mena d'enginyeria didàctica inversa que desconstruïx els coneixements concrets i ubiqui els elements constituents en cadascuna de les tres ments del model cognitiu. Tot plegat esdevindrà un coneixement didàctic que bastirà l'estratègia docent.

D'heurístiques i problemes

La llegenda posa l'exclamació «Eureka!» en boca d'Arquimedes en el moment en què va descobrir (comprendre) el principi de la flotació. En els àmbits de la ciència i de la tecnologia es qualifica d'heurístic qualsevol procés de resolució d'un problema mitjançant mètodes no rigorosos, és a dir, quan se cerca la solució per tempteig o per procediments empírics, és a dir, sense usar procediments inductius o deductius. En informàtica, per exemple, un algorisme es qualifica d'heurístic quan normalment troba bones solucions, encara que hi hagi constància que pugui ser erroni en alguns casos. En el camp de la didàctica de la matemàtica, l'ensenyament de la metodologia heurística va originar un corrent pedagògic, vigent actualment, anomenat *aprenentatge basat en problemes* (ABP), del qual George Pólya (1887-1985) fou pioner.

En psicologia cognitiva, el terme es refereix a les propostes d'acció que la nostra ment ens presenta de manera espontània, automàtica i ràpida quan se'ns demana actuar, emetre un judici o prendre una decisió. Les heurístiques, doncs, pertanyen a la constel·lació de les intuïcions i de les conjectures, i són el resultat de processos cognitius que s'esdevenen en les profunditats de la ment autònoma, els quals, literalment, llampeguen en l'espai mental de la consciència.

Les tres característiques bàsiques i generals de les heurístiques (Gigerenzer, 2007; Kahneman, 2011) són les següents:

- Són ràpides i frugals, perquè necessiten poca informació per a activar-se.
- No són el resultat d'un esforç mental.
- Són autònomes, és a dir, que no les produïm d'una manera voluntària, ens venen al cap quan som interpellats de manera directa per algun requeriment o per un problema, o bé quan no hi pensem voluntàriament.

Tenim una predisposició natural a seguir les nostres heurístiques, a fer-ne cas i en elles basem bona part dels nostres judicis i decisions; per això també són una font d'errors.

Quant a l'aprenentatge per assaig i error, la derivada pedagògica d'aquest concepte és clara. Com que són proactives, les heurístiques (*H*) mobilitzen algorismes (*A*), de manera que el binomi $H \rightarrow A$ defineix i concreta l'assaig o temptativa per resoldre el problema que ens ocupa.

De l'aula estant no hi ha millor mètode per a estimular la producció d'heurístiques per part de l'alumnat que les pluges d'idees, tot afavorint un ambient emocional propici, és a dir, superar les pors i les vergonyes dels nois i de les noies a equivocar-se. El docent té el paper d'administrar els protagonismes i de fomentar la cooperació perquè una bona idea en boca d'un alumne acostuma a tenir un bon precedent en boca d'un altre, és a dir, un jugador marca el gol perquè un altre li passa la pilota.

El paper de les heurístiques en els aprenentatges escolars i l'explotació epistemològica i didàctica de les heurístiques errònies són dues realitats poc investigades, per bé que arreu del territori escolar hi ha un munt de bones pràctiques docents que, per pur instint professional, es mouen en aquests paràmetres.

Tant si som en un marc STEAM com si no, és un exercici pedagògic apassionant identificar les heurístiques que fan possible l'aprenentatge de la resolució de problemes concrets i elaborar-ne una descripció. Seguint el tradicional enfocament d'investigació-acció de l'aula estant, a l'*Assaig de didàctica* (Achón, 2020) hi exposo les que em semblen més rellevants:

a) Heurístiques de la interrogació

La ment autònoma està especialment dotada per a distingir allò que és sorprenent o singular d'allò que considerem com a normal o habitual, i quan això s'esdevé, les preguntes ens llampeguen a la consciència i ens interpel·len. Immediatament, la ment racional les passarà pel sedàs del llenguatge i, tot mobilitzant la ment algorísmica, formularem preguntes de manera espontània.

Ara bé, aquesta espontaneïtat es pot educar per fer-la més intel·ligent. Hi ha unes quantes estratègies per a aprendre a formular bones preguntes (Achón, 2020). Per exemple, és més eficient, per concreta, començar una pregunta amb *com* + verb que amb *per què* + nom. Una segona estratègia consisteix a capgirar l'ordre causa-efecte d'un fenomen físic. Una tercera és preguntar-se *Què passaria si...*. Una quarta és conjecturar per analogia.

b) Heurístiques de l'exploració i del descobriment

Si després de llegir o formular un problema s'entreveu que la solució depèn d'examinar diferents opcions que són enumerables i practicables, és a dir, que es poden definir i

concretar atenint-nos a un criteri prou precís per a generar-ne variacions, aleshores, som davant d'una heurística exploratòria. Certament, el llampegueig del panorama per explorar és difús i poc clar, precisament, perquè no està explicat.

Exploració i descobriment caminen agafats de la mà. Explorem un conjunt d'opcions amb l'expectativa de descobrir-hi alguna cosa. A diferència del llampegueig tènue de l'espai d'opcions per explorar, el del descobriment és un llampec intens de clarividència.

c) Heurístiques del raonament per analogia

Les analogies són el motor del pensament (Hofstadter i Sander, 2013) i construeixen les categories amb què opera la nostra ment. Una analogia estableix una associació entre dos objectes (objecte d'origen i objecte de destí) que presenten un cert grau de semblança. El llampegueig d'aquesta heurística és una conjectura que pretén esbrinar si una determinada propietat detectada a l'objecte d'origen es trobarà també a l'objecte de destí, si no igual, almenys semblant. Evidentment, la conjectura caldrà provar-la.

d) Heurístiques del raonament per deducció

La implicació és una de les operacions lògiques més comunes i més practicades en els raonaments lògics de caràcter deductiu que tenen lloc en els aprenentatges científics. La finalitat de la implicació és evidenciar les proposicions que no estan explicades en la definició del problema. L'heurística de la implicació actua com una mena d'escàner que llampega quan detecta un element implícit en el context del problema, de manera que estableix una connexió entre antecedent i conseqüent.

e) Heurístiques del raonament per inducció

El raonament inductiu opera sobre premisses derivades de l'observació experimental, que generen un conjunt de dades sobre les quals es conjecturen lleis o relacions. A diferència de la deducció, el raonament inductiu opera de la part al tot o de l'efecte a la causa, i estableix una llei general. Una de les característiques de la inducció és que permet anticipar noves observacions i fer prediccions. El llampegueig heurístic es fa sobre poques dades i salta directament a la conjectura, que evidentment caldrà provar.

f) Heurístiques del prototip

El procés de creació d'un giny tecnològic arrenca amb un problema concret, de manera que en l'origen hi ha alguna mena d'heurística. Les heurístiques del prototip tenen tres

característiques: responen a un problema «tecnològic», mobilitzen idees i coneixements, i s'integren en un únic sistema que els relaciona i els ordena en un prototip, que és la resposta al problema. El llampegueig heurístic és aquest prototip, que per força és sintètic, és a dir, de trets generals i poc detallats. Recordeu que les heurístiques són frugals per necessitat. Després la ment racional i algorítmica ja les detallaran.

g) L'heurística del «tot s'hi val»

Les heurístiques exposades fins ara tenen un munt de casos que les justifiquen. Per descomptat, no pretenc exhaurir ni limitar l'acció de la ment autònoma. Segur que la llista d'heurístiques s'eixamplaria amb un camp més ampli de recerca i en descobriríem més. És per això que tanco aquest apartat amb una mena d'heurística comodí, que anomeno l'heurística del «tot s'hi val», per retre homenatge a la filosofia de l'anarquisme epistemològic (Feyerabend, 1970), que defensa la inexistència de regles metodològiques universals en la producció del coneixement científic.

Sobre els errors d'aprenentatge. La perspectiva docent

Per bé o per mal, l'error és el nostre company de per vida. Així doncs, sens dubte, ja és hora de conèixer-lo (Schulz, 2010). A l'aula estant, passes un munt de temps bregant amb els errors d'aprenentatge de l'alumnat. Una actitud docent proactiva davant la multiplicitat d'errors que fan les noies i els nois durant llurs aprenentatges és una de les claus per a una bona pràctica docent. La dita segons la qual, de l'error, se n'aprèn és ben certa. Tanmateix, com que els errors sovint comporten conseqüències indesitjables i doloroses, socialment són percebuts d'una manera negativa. I aquesta visió, transposada a l'aula, pot alimentar reaccions emocionals de rebuig tant per part del professorat com de l'alumnat.

Si en la història de la ciència i de la tecnologia els errors són gairebé un imperatiu epistemològic (Popper, 1972), com no ho han de ser en els aprenentatges escolars? Per això, considerar l'error com una limitació de l'alumne o com una incompetència docent és una de les moltes causes de l'anomenat *fracàs escolar*. Una de les claus de l'èxit o del benestar escolar, i, en general, de la vida, és aprendre a extreure un profit cognitiu dels errors. I això implica comprendre'ls.

En el marc de l'aprenentatge per assaig i error, a l'apartat anterior ja he exposat que els assajos són temptatives cognitives formades per una heurística i per un algorisme ($H \rightarrow A$), de manera que l'error és, en la major part dels casos, una heurística infructuosa o un algorisme mal executat.

Des de la perspectiva docent, l'anàlisi d'errors d'aprenentatge es comença elaborant una descripció objectivable a partir de les produccions de l'alumnat. I aquí ens tro-

barem, com bé sap qualsevol docent, que, per a cada aprenentatge concret, l'alumnat produeix una diversitat d'errors, de manera que per a cada error caldrà una descripció concreta.

Per no generar confusió i fer practicable l'anàlisi d'errors és necessari establir una frontera metodològica entre la descripció de l'heurística errònia i l'explicació de les possibles causes que la produeixen, per bé que aquestes no sempre és possible evidenciar-les amb claredat. Les causes pertanyen al domini subjectiu, és a dir, al procés cognitiu del subjecte, mentre que la manifestació de l'heurística errònia pertany al domini objectiu, és a dir, a tot allò que una observació rigorosa de les produccions dels alumnes pot descriure.

Esbrinar les causes d'un error concret implica entrar en els dominis de la psicologia cognitiva. De nou es posa de manifest la necessitat d'un model de la ment per a almenys situar les causes, és a dir, si l'error és atribuïble a la ment racional, a l'algorísmica o a l'autònoma. Aquí cal esmentar els anomenats *biaixos cognitius*, àmpliament estudiats per les ciències cognitives i molt freqüents en els aprenentatges. Són errors que es produeixen de manera inconscient i automàtica, són dreces que fa la ment per respondre immediatament a una qüestió. Un exemple són les tradicionals i enganyoses fal·làcies lògiques.

Un exemple clàssic és el *biaix de la substitució per simplificació*, que és deliciós de comprovar quan les noies i els nois s'inicien en el llenguatge algebraic.

Vet aquí el problema: una llibreta i un bolígraf costen 1,10 €. La llibreta costa 1 € més que el bolígraf. Quant costa el bolígraf?

«El bolígraf costa 10 cèntims». És probable que aquesta sigui la primera resposta que us hagi vingut al cap i, segurament, ara mateix desconfieu, i tal vegada sospitareu que té trampa i prendreu consciència que us cal comprovar si els 10 cèntims són, efectivament, la resposta correcta. Esbrinareu que la resposta correcta són 5 cèntims, però no a tanta velocitat com heu pensat en els 10 cèntims.

El problema no té trampa, però és persuasiu i convida a l'equívoc. És un dels tres ítems del test de reflexió cognitiva (Shane, 2005). S'ha testat en milers d'estudiants universitaris i sempre amb resultats sorprenents: aproximadament, la meitat responen, erròniament, que la llibreta costa 10 cèntims. L'objectiu del test no és avaluar els coneixements d'àlgebra, sinó comprovar fins a quin punt confiem cegament en la nostra intuïció, en aquest cas, en l'heurística dels 10 cèntims. Una confiança cega que bloqueja l'acció de la ment racional, l'encarregada d'avaluar les heurístiques que proposa la ment autònoma.

Però una descripció més precisa d'aquest error posa en relleu que s'eludeix o s'esquiva la dificultat comprensiva del fragment de l'enunciat «La llibreta costa 1 € més que el bolígraf» i que se substitueix i s'opera amb un enunciat més simple: «La llibreta costa 1 €». Una vegada feta aquesta simplificació, tot eliminant l'oració subordinada comparativa «més que el bolígraf», se substitueix l'enunciat original per un de més simple: «Una llibreta i

un bolígraf costen 1,10 €. La llibreta costa 1 €. Quant costa el bolígraf?».

Resumint, aquest biaix cognitiu afronta la complexitat del problema simplificant-la en substituir l'enunciat inicial per un altre que és més fàcil i ràpid de manejar, de manera que també redueix l'esforç cognitiu que requereix la solució.

Som éssers fal·libles i economitzem l'energia cognitiva.

De l'error al coneixement: l'aprenentatge

Aprendre dels errors és un procés que ocupa una bona part del temps d'aprenentatge i requereix una didàctica orientada a ensenyar a l'alumnat com extreure coneixement dels errors. Aquesta capacitat forma part del nostre ADN. Exercitar-la és la millor manera de garantir uns aprenentatges profunds i, en la mesura que es practica, es millora la marea de totes les competències educatives: saber aprendre.

Des del punt de vista metodològic es poden establir tres fases amb les quals guiar l'alumnat a fi que s'emopodiri del procés de resolució de problemes i exerciti l'autonomia personal.

L'erupció d'un conflicte cognitiu, tant si és espontani com si és induït, és segurament la millor i potser l'única manera eficient de prendre consciència dels errors; per tant, aquesta és la primera fase per passar de l'error al coneixement. I és obvi que mobilitza emocions de molta diversitat índole. Si són emocions positives que incentiven la curiositat i la motivació, oli en un llum, però no sempre és així. Atenció a les reaccions emocionals de cada alumne quan s'adonen que s'han equivocat.

Una cosa és saber que t'has equivocat i una altra de molt diferent és localitzar, identificar i analitzar en què consisteix l'error. Aquí comença la segona fase. De fet, aquesta fase és un nou problema que cal resoldre. Si P_0 és el problema inicial contra el qual s'ha llançat una temptativa de solució, una vegada ha emergit l'error, P_i és el problema que té per objectiu localitzar, identificar i analitzar l'error.

P_i té una característica rellevant que cal tenir molt present des d'un punt de vista didàctic. En efecte, d'entrada, no es disposa de cap enunciat, és a dir, que no se sap en què consisteix l'error i, fins que no es localitza i s'identifica com a tal, es poden fer molts tombs. De manera que P_i genera les seves temptatives cognitives ($H \rightarrow A$), que tant poden ser encertades com errònies. Podem trobar-nos amb errors que nien dintre del primer error i entrar en laberints inextricables: és el risc cognitiu. Si l'error està ben localitzat i es comprèn com s'ha produït, aleshores, es pot analitzar i fer-ne una diagnosi que ens aportarà un coneixement valuós per a obrir la tercera fase.

El coneixement que s'obté una vegada resolt P_i esdevé imprescindible per a elaborar la nova temptativa cognitiva que abordarà de nou el problema primari, P_0 . L'eliminació o la depuració de l'error es produeix quan la nova temptativa reïx. Per descomptat que aquesta també pot ser errònia, de manera que el procés de resolució del problema és

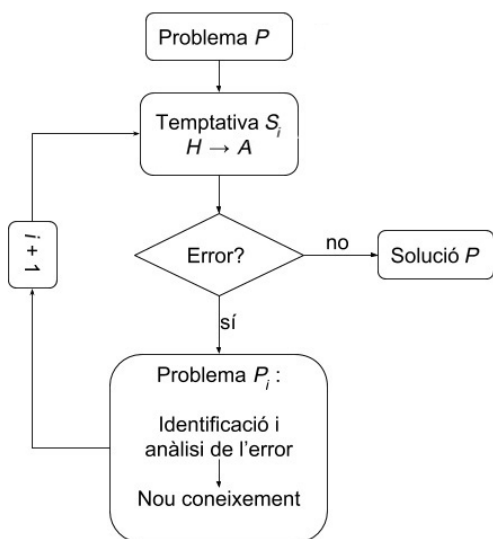


FIGURA 2. De l'error al coneixement: les tres fases.

una dinàmica cognitiva d'assajos i errors conduïda i controlada pel procés racional d'avaluació (ment racional). En això consisteix bàsicament l'aprenentatge per assaig i error (figura 2).

Modelant l'aprenentatge per assaig i error

Devem a Popper (1972) la formulació d'una epistemologia que concep el mètode científic com un procés de resolució de problemes en el qual la formulació de temptatives i l'emergència i l'eliminació d'errors tenen un paper clau en la producció històrica del coneixement científic. No hi ha millor equivalent filosòfic per a l'aprenentatge per assaig i error que l'esquema bàsic de l'anomenada *epistemologia del realisme objectiu*:

$$P_0 \rightarrow TT \rightarrow EE \rightarrow P_1$$

A partir d'un problema o una pregunta inicial (P_0), s'elabora una teoria temptativa (TT) que intenta resoldre'l, però quan aquesta teoria es posa a prova mitjançant un procés de falsabilitat (de *falsar*: 'invalidar una hipòtesi, una teoria, etcètera, mitjançant una observació o un experiment') n'emergiran errors i contradiccions, de manera que l'eliminació d'errors (EE) constituirà un nou problema (P_1), la solució del qual mena a una nova teoria, i així continua repetint-se el cicle creatiu. El coneixement científic és un sistema obert. L'epistemologia de Popper és un elogi i una apologia de la fertilitat dels errors en el progrés històric del coneixement. L'analogia d'aquest esquema amb l'aprenentatge per assaig i error salta a la vista. Des de la perspectiva pedagògica, les teories temptatives del model de Popper es corresponen amb les temptatives cognitives ($H \rightarrow A$), és a dir, amb una heurística seguida d'un algorisme, de manera que l'esquema queda:

$$P_0 \rightarrow (H \rightarrow A) \rightarrow EE \rightarrow P_1 \rightarrow \dots$$

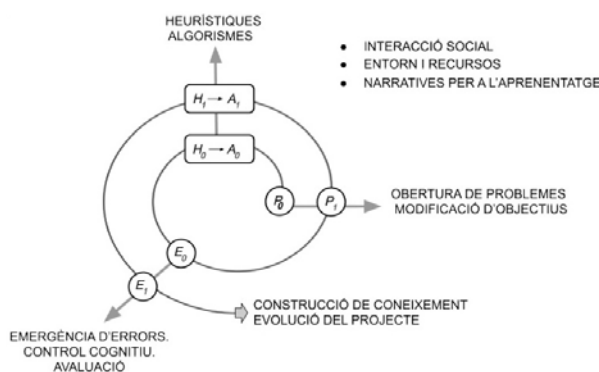


FIGURA 3. Model general de l'aprenentatge per assaig i error.

De fet, aquest esquema és el de la figura 2, en la qual s'ha manllevat la representació de la realimentació i representa un sol cicle, però si tenim present la dimensió temporal i els successius cicles que es poden donar en un aprenentatge concret, la representació més adequada és la de la figura 3.

Cal contextualitzar el model perquè només representa la individualitat de l'aprenent i nosaltres ens movem dins d'una aula amb una rica interacció social, de manera que, situats en el context del treball per projectes i col·laborador, les interaccions entre l'alumnat incideixen plenament en els processos cognitius personals. Una bona pluja d'idees, per exemple, estimula la producció d'heurístiques. En el treball en equip, per exemple, es produeixen avaluacions entre alumnes. Totes aquestes interaccions formen part del model d'aprenentatge d'assaig i error.

Un altre factor molt potent des del punt de vista motivacional és crear narratives per a l'aprenentatge, és a dir, que el projecte que es vol desenvolupar es presenta com un relat que interpel·la l'alumnat perquè protagonitzi i representi diferents rols. Aquestes narratives tenen una funció pedagògica molt definida ateses les implicacions emocionals que comporten i, també, perquè proporcionen un significat als aprenentatges, ja que els connecta amb una realitat, amb el benentès que qualsevol ficció també és una realitat essencial del nostre imaginari col·lectiu o personal.

De les idees als projectes

Un projecte arrenca amb una idea, que és, per necessitat, genèrica i poc concreta, és a dir, de poca complexitat cognitiva. I dic «per necessitat» perquè una idea no conté en ella mateixa el desenvolupament posterior per a fer-la realitat o per a implementar-la. Una idea mare ve a ser l'equivalent d'una cèl·lula mare. De l'aula estant, quan una idea esdevé l'expressió d'una voluntat col·lectiva de fer-la real, de realitzar-la, aleshores, parlem de *projecte didàctic*. Hi ha mil exemples, volem dissenyar un vestit esportiu, volem fer la maqueta d'un planetari, volem construir tots els poliedres platònics, etc.

Des d'una perspectiva escolar, el concepte *projecte* no és el mateix que *projecte tècnic*, que es refereix a un conjunt



FIGURA 4. Resolució del motor de cc: plantejament del problema.

d'especificacions per a assolir un objectiu determinat, sinó que es refereix a l'aventura cognitiva, al procés d'assolir l'objectiu proposat per la idea inicial. La característica principal de la idea mare és projectar-se cap endavant i materialitzar-se fins a esdevenir una realitat concreta més o menys reeixida.

És en aquest punt en què el model d'aprenentatge per assaig i error ha de validar-ne la utilitat; si no, seria pura retòrica. L'exemple que segueix és un projecte concret, prou experimentat per diferents centres de secundària. Forma part de la proposta didàctica «Creant coneixement STEAM: Imants, motors i generadors l'Aplicació de Recursos al Currículum»,³ que trobareu al repositori de materials didàctics del CESIRE.⁴

(Re)Inventant el motor elèctric de corrent continu

La narrativa

Situar l'alumnat en el context social, històric i tecnològic on es van inventar els primers motors elèctrics és molt inspirador. És una part fonamental de la història de l'electricitat. Hi ha una mà de relats sobre la màquina de vapor, que generava tota l'energia mecànica per a moure les màquines de la indústria tèxtil, les mines el transport, etc., fins a la progressiva substitució pels motors elèctrics.

Situats en aquest context, es posen sobre les taules del taller uns quants motors elèctrics de corrent continu (cc) i es planteja a l'alumnat el repte següent (figura 4): «Aprofitant tot el que sabeu d'imants i d'electroimants, dissenyeu i construïu el giny electromecànic que fa girar un eix sense parar, és a dir, un motor elèctric». Vet aquí la idea inicial (P_0). Poc concreta, sí, perquè no saben què hi ha dins la carcassa, però clara, perquè l'objectiu ho és: l'eix ha de voltar.

Recordeu que l'heurística del prototip recorre a un conjunt de coneixements i d'elements tecnològics per a solucionar el problema plantejat. Bàsicament, les noies i els nois han de:

- Conèixer què és una pila elèctrica i el sentit del corrent elèctric continu.
- Saber muntar circuits elèctrics elementals.
- Saber que si es canvia el sentit del corrent elèctric en un electroimant, la polaritat magnètica canvia, és a dir, que l'extrem que és nord canvia a sud i viceversa.

— Conèixer les forces d'atracció i repulsió entre pols magnètics, siguin d'imants permanents o d'electroimants.

— Entendre la regla d'interacció entre pols magnètics: els pols iguals es repel·leixen i els pols diferents s'atrauen. I s'ha observat que la interacció implica un moviment.

— Tenir una mínima experiència amb operadors mecànics.

Fomentar una pluja d'idees per estimular la ideació de prototips és una bona manera de començar aquest projecte. Cada idea que en surti, cal representar-la i sotmetre-la a la crítica, així fins a obtenir-ne una que sembli que funcionarà.

Primera temptativa

A l'apartat «D'heurístiques i problemes» ja s'ha concretat el concepte de temptativa com una heurística que genera un pla d'acció, de manera que detallarem així cadascuna de les temptatives.

Heurística del prototip (H_0). Figura 5, esquerra. Un electroimant es fixa a un eix central de manera que giri lliurement. És l'eix del motor. Aquest electroimant rotor se situa entre dos imants permanents fixos, amb pols diferents encarats. Si se sap com canviar el sentit del corrent de l'electroimant en els moments i en les posicions adequades, les forces d'atracció i de repulsió entre els pols dels imants i els de l'electroimant actuen sobre l'eix rotor, de manera que aquest gira.

Pla de construcció. Algorisme pràctic (A_0). Figura 5, dreta.

Emergència d'errors

El prototip inicial ja està fet. I ara es fa palès l'error del disseny inicial, que no inclou com es resol el canvi del sentit del corrent de l'electroimant en els moments i en les posicions adequades (E_0). Vet aquí el problema emergent que genera aquesta mancança del prototip inicial, la qual origina la segona temptativa: com fer que els dos cables de la font d'alimentació freguin els borns de l'electroimant (els dos claus de la fotografia de la figura 6).

Segona temptativa

Heurístiques. Dues làmines de coure són les escombretes del motor: el problema (P_1) consisteix a esbrinar la posició que han d'ocupar. Com que hi ha diverses possibilitats de col·locar-les, es dispara una heurística de l'exploració (H_1) i es plantegen dues possibilitats: o les escombretes es col·loquen paral·leles als imants (posició A de la figura 7) o transversals (posició B de la figura 7). Per a cada exploració, intervé una heurística del raonament deductiu (H_1), ja que cal mirar la posició de l'electroimant del rotor respecte als imants, és a dir, si s'hi encara o no, ja que ha de desactivar-se cada vegada que s'hi encara. I d'aquí es dedueix

3. <https://apliense.xtec.cat/arc/node/31027>.

4. <https://agora.xtec.cat/cesire/>.

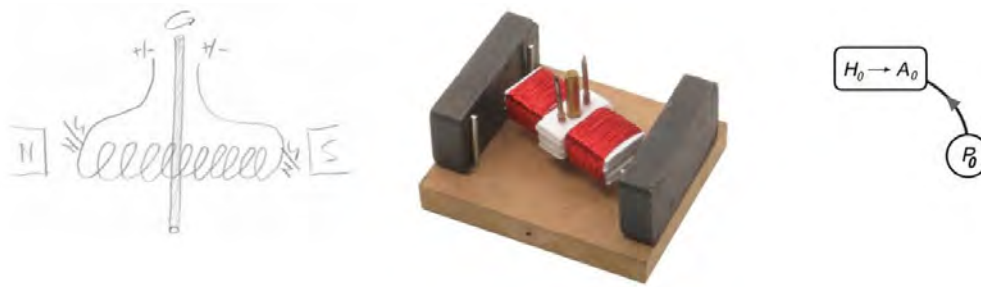


FIGURA 5. Resolució del motor de cc: primera temptativa.

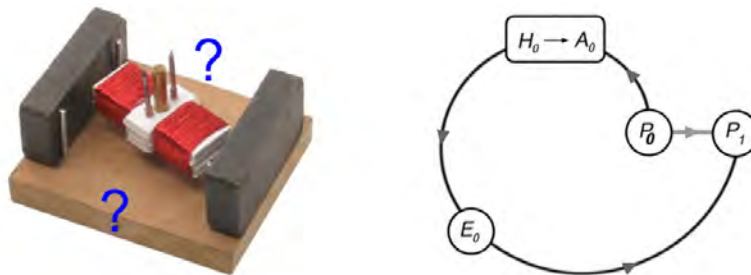


FIGURA 6. Resolució del motor de cc: emergència de l'error.



FIGURA 7. Resolució del motor de cc: segona temptativa.

que la posició A (figura 7) és la que activa i desactiva l'electroimant quan convé.

Pla de construcció. Algorisme pràctic (A_1). Figura 7, dreta.

Emergència d'errors

Una vegada hem posat les escobretes, arriba el moment més emocionat (figura 8). Tots els prototips, si s'han construït correctament i han passat els controls de qualitat respectius, funcionaran. Sovint no arrenquen a la primera. Pocs alumnes resistiran la temptació d'empentar el rotor. I vet aquí com emergeix un error inesperat: el motor s'ha d'engegar sol, quan li donem corrent. Algun error hi ha en el disseny (E_1).

Vegeu el vídeo d'aquest enllaç: <https://www.youtube.com/watch?v=wXg33N4DBww>.

Identificació de l'error. Comencem per *observar* la funció de les escobretes: cada mitja volta del rotor, el sentit del corrent elèctric de l'electroimant s'inverteix i desactiva l'electroimant cada vegada que els braços s'encaren als imants, ja que no fan contacte amb els borns de l'electro-

imant. Com que ens preguntem per què no arrenca d'entrada, probablement, es dispararà una heurística del raonament deductiu: si l'electroimant s'encara als imants, aleshores, les escobretes no freguen els borns de contacte, de manera que està inactiu. Per tant, no pot arrencar.

Tercera temptativa

La identificació d'aquest error ens porta a la conclusió que un rotor de dos braços mai no arrenca sol, llevat que en posició inicial les escobretes freguin els borns de l'electroimant, però això depèn de l'atzar, no del disseny inicial. Un motor eficient no pot dependre d'una empenta externa. La identificació d'aquest error ens planteja un nou problema; per tant, calen noves heurístiques.

I arribats a aquest punt és on actuen les heurístiques del «tot s'hi val»: i si el rotor té tres braços? Si els nois i les noies desmunten un motor, veuran que, efectivament, té tres braços i tres borns. I això anima a construir-lo.

El rotor de tres braços és més complex de disseny i realització, però és una magnífica oportunitat perquè els

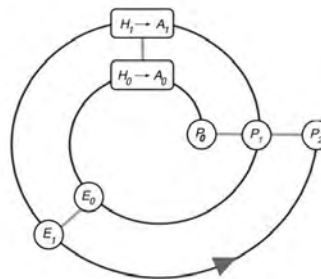


FIGURA 8. Resolució del motor de cc: emergència de l'error.

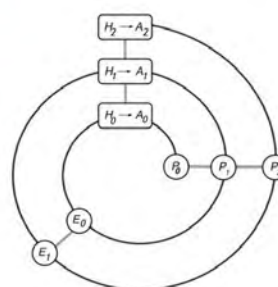


FIGURA 9. Resolució del motor de cc: tercera temptativa.

alumnes més avançats ho intentin (figura 9), ja que els ritmes d'aprenentatge no són uniformes.

Vegeu el vídeo d'aquest enllaç: https://www.youtube.com/watch?v=_AE3Nlh2lnQ.

Una vegada es comprova que un rotor de tres braços engega a la primera és el moment d'entendre'n el funcionament, que no té una explicació immediata. En efecte, el circuit elèctric format per tres electroimants connectats en sèrie i el fet que a mesura que els tres borns giren només dos freguen les escobretes, no és senzill de comprendre. A la proposta didàctica esmentada hi trobareu tot el desenvolupament didàctic.

Obrim perspectives, nous projectes

Sempre amb la perspectiva que un coneixement concret no és una peça aïllada i tancada en si mateixa, sinó que és un node d'una xarxa cognitiva extensa i sempre amb connexions, el prototip de motor que acabem de veure esdevé un punt de partida des del qual albirar nous projectes de motors elèctrics. A la proposta didàctica esmentada hi trobareu un nou projecte sobre els motors sense escobretes, el fonament dels motors pas a pas.

Bibliografia

ACHÓN, Jordi (2020). *Assaig de didàctica: De l'error al coneixement: l'aprenentatge: De les idees als projectes (STEAM)* [en línia]. Barcelona: Iniciativa Digital Politècnica. Oficina de Pu-

blicacions Acadèmiques Digitals de la UPC. <<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/179442/9788498808230.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.

FEYERABEND, Paul K. (1970). *Against method: Outline of an anarchistic theory of knowledge*. Minnesota Studies in the Philosophy of Science. [En castellà: *Contra el método: Esquema de una teoría anarquista del conocimiento*. Barcelona: Ariel, 1974]

GIGERENZER, Gerd (2007). *Gut Feelings*. Londres: Penguin Books. [En castellà: *Decisiones instintivas*. Barcelona: Ariel, 2008]

HOFSTADTER, Douglas; SANDER, Emmanuel (2013). *Surfaces and essences: Analogy as the fuel and fire of thinking*. Nova York: Basic Books. [En castellà: *La analogía: El motor del pensamiento*. Barcelona: Tusquets, 2018]

KAHNEMAN, Daniel (2011). *Thinking, fast and slow*. Nova York: Farrar: Straus and Giroux. [En castellà: *Pensar rápido, pensar lento*. Barcelona: Debate, 2012]

PÓLYA, George (1945). *How to solve it*. Nova Jersey: Princeton University Press. [En castellà: *Cómo plantear y resolver problemas*. Mèxic DF: Trillas, 1965]

POPPER, Karl (1972). *Objective knowledge: An evolutionary approach*. Oxford: Oxford University Press. [En català: *El coneixement objectiu*. Barcelona: Edicions 62, 1985]

SCHULZ, Kathryn (2010). *Being wrong: Adventures in the margin of error*. Nova York: Harper Collins Publishers. [En castellà: *En defensa del error*. Madrid: Siruela, 2015]

SHANE, Frederick (2005). «Cognitive reflection and decision making». *Journal of Economic Perspectives*, vol. 19, núm 4, p. 25-42.

STANOVICH, Keith (2011). *Rationality and the reflective mind*. Nova York: Oxford University Press.