

UNA APLICACIÓN DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL A LA MEDIACIÓN DEL APRENDIZAJE INDEPENDIENTE⁽¹⁾

Fidel Oteiza M. ^(2*)

Nadja Antonijevic H. ^(3**)

Patricio Montero L. ^(4***)

Presentación

Este artículo resume los propósitos, los antecedentes, las características y los aprendizajes obtenidos en el desarrollo de un SISTEMA TUTOR destinado a poner a prueba conceptos y estrategias de mediación del aprendizaje matemático autodirigido.

Haciendo uso de tecnologías provenientes del campo de la "inteligencia artificial", los autores y un equipo de investigadores y ayudantes, diseñaron un sistema destinado a analizar la actuación de un estudiante en el proceso de resolver expresiones y ecuaciones lineales en el contexto del álgebra introductoria.

Los objetivos del estudio fueron dos: primero, crear las herramientas para el estudio de las condiciones, características, estrategias y resultados de la intervención adulta en el aprendizaje independiente y segundo, estudiar el potencial de la mencionada tecnología para resolver importantes limitaciones de la enseñanza asistida por computadores, específicamente las que se refieren al modelo pedagógico que pone en manos del educador –del computador en este caso– la conducción del proceso de aprendizaje.

El desarrollo del SISTEMA TUTOR que aquí se analiza, estuvo a cargo de los ayudantes Jorge Boza y Eduardo Castillo, bajo la dirección del investigador principal (Boza y Castillo, 1987).

¹ 1. Trabajo desarrollado en el marco del proyecto de investigación "Mediación efectiva del aprendizaje matemático", proyecto FONDECYT N° 1046-88, parcialmente financiado por el Programa Nacional de Investigadores en Educación, La Barnechea, septiembre de 1989.

^{2*} Profesor investigador del Departamento de Matemática y Ciencias de la Computación de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santiago de Chile.

^{3**} Profesora investigadora de la Escuela de Psicología de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

^{4***} Profesor investigador del Departamento de Matemática y Ciencias de la Computación de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santiago de Chile.

La enseñanza asistida por computadores ha sido una promesa tecnológica durante años; en la actualidad presenta limitaciones técnicas, escaso desarrollo y serias dificultades de orden filosófico-ideológico. La tecnología informática, por otra parte, se sigue desarrollando e influye en la mayoría de las actividades humanas.

La limitación más seria de la enseñanza asistida por computadores es de orden filosófico-ideológico. En efecto, en su mayoría, los programas de enseñanza asistida por computadores responden al modelo impuesto por la instrucción programada. En una secuencia de eventos determinados y encaminados al logro de un objetivo, el programa propone información, hace preguntas y entrega un mensaje evaluativo al usuario. Este tipo de actuación se puede justificar, pero en general, tiene lugar en el contexto de un sistema educativo que potencia el control y la responsabilidad del docente por sobre la autorreflexión del estudiante.

El paradigma pedagógico imperante –en particular el que enfatiza relaciones verticales, donde es el docente quien selecciona los tópicos, propone objetivos, desarrolla actividades y evalúa los resultados– es un modelo cuestionable y ha sido muchas veces criticado. En nuestro continente son bien conocidas las críticas que Paulo Freire hizo a la escuela, a la que calificó como impartiendo “educación bancaria”. En la literatura internacional, las críticas son numerosas, comenzando por la hecha por el mismo creador de la instrucción programada, B.F. Skinner (1954); también Carroll, quien propuso (1963) un modelo para analizar los factores que condicionan la enseñanza tal como es la práctica en el aula; o los análisis de Bernstein, en Inglaterra, quien introdujo la noción de control y de poder para comprender las relaciones que se dan en la práctica educativa (1971) y las de B. Bloom (1975), el que elaborando sobre el modelo de Carroll, propuso el “aprendizaje para el dominio”, para nombrar algunas de las más influyentes. Más recientemente, y en el medio nacional, podemos considerar los cuestionamientos desde la educación popular, que sigue la escuela de Freire, también Cox (1984), Filp, Cardemil y Espíndola (1987) y Montero (1987).

Las críticas principales hacen referencia a la relación de dependencia del estudiante respecto del sistema, de los contenidos y del docente, así como a los efectos de esa dependencia: acriticidad, conformismo, visión del mundo como externamente determinado, falta de experiencia con la investigación y con las prácticas que harían del estudiante un ser independiente y autodeterminado. También, y esta es una crítica desde dentro del mismo paradigma, se cuestiona la capacidad del modelo para lograr los objetivos que los propios sistemas han fijado.

Las metáforas básicas sobre las cuales se han construido las aplicaciones educativas de la informática han sido las tres señaladas por Taylor (1980); el tutor, el aprendiz y la herramienta. La enseñanza asistida por computadores es la forma más frecuente de la modalidad tutor; la enseñanza de lenguajes de computación, como el BASIC y el LOGO, que permiten “enseñarle” algo al computador, corresponden a la metáfora del aprendiz; los

procesadores de texto y los programas utilitarios en general, son ejemplos de las herramientas a que se refiere la tercera metáfora.

De estas tres modalidades la más difundida es la segunda, la enseñanza de lenguajes de computación, y al parecer, en la actualidad, estaría cediendo terreno frente al crecimiento de las aplicaciones, dando lugar a la modalidad que Taylor denomina “herramientas” (Locked, M. y E. Mandinash, 1986).

Se podrían resumir las tendencias diciendo que las aplicaciones educativas de la tecnología informática comenzaron con la enseñanza asistida por computadores, se generalizaron con la enseñanza de lenguajes y estaría ahora, orientándose hacia el uso de las múltiples herramientas que se desarrollan a partir de la existencia de los computadores personales.

El desarrollo de las capacidades que permiten la autodirección en el aprendizaje es un objetivo importante de la educación. Bajo denominaciones diferentes: “aprender a aprender”, “estrategias cognitivas de orden superior” (Antonijevic y Chadwick, 1982), “autodependencia” (Max Nef y otros, 1986) la capacidad para determinar los objetivos propios, formular las preguntas, trazar los planes de acción, ejecutarlos y evaluar los resultados, y así aprender bajo la responsabilidad personal —que aquí resumimos en la expresión autodirección— ha sido una aspiración sentida de pedagogos, innovadores y de pensadores de la educación.

La capacidad para aprender por sí mismo es una característica importante de un pensador independiente, de un profesional actualizado y de un ser humano competente en su área de trabajo o de interés. El “autodidacta” es cada vez más necesario y frecuente. En efecto, el campo laboral y todos los campos del conocimiento cambian con una velocidad creciente, los períodos de obsolescencia del conocimiento y —especialmente— de las aplicaciones técnicas, son cada vez menores.

La cantidad y la diversidad de información disponible también aumenta; las necesidades relacionadas con la búsqueda, recuperación, organización y selección de la información son cada vez mayores. ¿Cómo afectan estas situaciones a la escuela?, ¿puede, la educación, seguir centrada en la entrega de información sin preocuparse de desarrollar habilidades para que sea el estudiante quien pueda adquirirla en forma independiente?

El computador ha resultado ser una herramienta mucho más versátil de lo que pudieron sospechar sus creadores o de lo que sugiere su nombre. En otra parte (Oteiza, 1988), se discute el potencial de una “máquina universal”, en el sentido que Alain Turing dio a esa expresión. Resumiendo, podemos decir que se trata de sistemas formales que pueden imitar el funcionamiento de cualquier sistema especificable. Los computadores actuales son una muy buena aproximación a la noción introducida por Turing, salvo limitaciones de memoria —que disminuyen— un computador es un objeto físico que se comporta como una máquina universal. Una vez especificado un sistema, es cuestión de trabajo, de tiempo y de recursos, el poder simularlo mediante un computador.

La tecnología de los microprocesadores de alta integración ha intensificado los trabajos en un área de las ciencias de la computación que recibe el nombre —muy discutido— de inteligencia artificial. En una entrevista, el profesor Ernesto Azorín (Cid, 1988), la definió del modo siguiente:

"Podemos decir que un problema pertenece al área de la inteligencia artificial si la acción que resuelve el problema la realiza mejor el hombre que la máquina. Esto es, aquellos problemas para los cuales la máquina ya es más eficaz, más rápida o más económica que la acción del hombre, pertenecen, en todo caso, a la computación, pero no a la inteligencia artificial."

De este modo, la inteligencia artificial tiene fronteras móviles; en la medida en que las actuaciones humanas son simuladas eficazmente por la máquina, el problema deja de pertenecer al área así definida.

Los resultados obtenidos en esta área de la informática son de diversa naturaleza, tienen en común, la simulación de actividades o comportamientos típicos de los seres humanos. Programas que juegan ajedrez, que emulan el diagnóstico de un especialista, que simulan los resultados de la percepción de imágenes, que traducen de un lenguaje a otro (al menos de un subconjunto de un lenguaje a otro subconjunto), que sueldan, pintan y arman automóviles, son ejemplo de estos desarrollos.

La sola cuestión planteada por la existencia de la inteligencia artificial debe interesar al educador. ¿Puede pensar una máquina?, ¿cuáles son los límites del comportamiento de un sistema automático?, ¿qué preguntas plantean estos desarrollos al hombre contemporáneo?

En el marco de la línea de investigación en educación matemática, en la Universidad de Santiago de Chile⁵¹, estos investigadores, sus colegas y ayudantes se propusieron estudiar el potencial de estas tecnologías para la construcción de soluciones a problemas educacionales, en particular, los que se refieren a la participación adulta en los procesos de aprendizaje de la matemática.

Las preguntas

En el marco antes descrito, las preguntas que guían la línea de investigación iniciada en 1988, se pueden clasificar en dos categorías: aquellas que se refieren a los conceptos involucrados, a las características y a los significados de la mediación⁶² adulta en los procesos de aprendizaje matemático, bajo la óptica de la autodirección; y las que tienen que ver con las posibilidades

⁵¹ Actividad del Grupo de Estudios en Educación Matemática, del Departamento de Matemática y Ciencia de la Computación, de la Facultad de Ciencias de esa Universidad.

⁶² Expresión usada después de R. Feuerstein (1980): "el aprendizaje mediado ocurre cuando los eventos provenientes del medio ambiente son seleccionados, ordenados, filtrados e investidos de un sentido por el agente mediador".

tecnológicas que brinda la informática, tanto para estudiar el fenómeno enunciado como para facilitar sus aplicaciones.

En relación con la mediación adulta en el aprendizaje matemático

En esta área las preguntas de investigación fueron:

1. ¿Cómo caracterizar el razonamiento matemático?
2. ¿Qué se entiende por autodirección en el aprendizaje?; ¿cómo se traduce el concepto en el caso del aprendizaje matemático?
3. ¿Cómo caracterizar la mediación adulta en los procesos de aprendizaje matemático?
4. ¿Cuál es el instrumental intelectual necesario y/o que favorece la autodirección en el aprendizaje?
5. ¿Cuáles son, a la luz de las respuestas a las preguntas anteriores, las formas que consideraremos efectivas en la mediación del aprendizaje?

Estas preguntas llevaron al desarrollo de un marco de referencia conceptual que será objeto de otra publicación.

En relación con la tecnología

Desde el punto de vista de las posibilidades, alcances y limitaciones de las tecnologías asociadas con las ciencias cognitivas y con la inteligencia artificial, las preguntas fueron las siguientes:

¿Permiten las técnicas y el enfoque de la inteligencia artificial y de las ciencias cognitivas, en particular, lo que se refiere a ingeniería del conocimiento y representación del conocimiento, estudiar los procesos involucrados en la mediación adulta del aprendizaje matemático?

1. ¿De qué modo la interdisciplina —indispensable en las ciencias cognitivas y en la educación matemática— puede contribuir al conocimiento de la mediación efectiva del aprendizaje? ¿Puede esta interdisciplina aportar en la búsqueda de instrumentos intelectuales para la autodirección en el aprendizaje?
2. ¿Permiten las herramientas creadas en torno a la inteligencia artificial implementar un modelo alternativo al predominante en la enseñanza asistida por computadores?
3. ¿Es técnicamente factible simular electrónicamente, un modelo pedagógico en el que se favorezcan las conductas autodirectivas?

Metodológicamente el asunto fue abordado mediante tres líneas de trabajo paralelas e íntimamente ligadas. La primera línea de trabajo condujo al desarrollo de un marco de referencia conceptual. La segunda —en curso— consistió en una serie de observaciones de situaciones de enseñanza en ambiente natural de aula y en un ambiente experimental uno —a— uno. La tercera, la que se pasa a analizar en las secciones siguientes, consistió en el

desarrollo de soluciones computacionales para componentes claves de un modelo de interacciones estudiante—tutor en desarrollo.

Los objetivos

En este estudio se abordó la última de las preguntas formuladas: cuál es el potencial de las tecnologías asociadas con la inteligencia artificial para el desarrollo de sistemas tutoriales que propicien la autodirección.

Desde los primeros análisis se vio la necesidad de conocer mejor las características de los tutores humanos hábiles. La primera aproximación fue el tutor espontáneo, aquel que actúa en la situación en la que un estudiante hace una consulta, deseablemente fuera del ámbito de la sala. Se observó que estos tutores proceden por preguntas—a diferencia del profesor en la sala de clases que comienza por entregar información. ¿Qué es lo que te interesa saber? ... luego varias preguntas para comprender lo que su interlocutor sabe o cuáles son las formas en que lo sabe o maneja (esta última es una preocupación de orden superior poco frecuente), la mayoría de las veces se da luego, un diálogo que podríamos llamar socrático.

Quedó muy pronto claro que si la tecnología podía contribuir en la dirección esperada, era indispensable construir un **generador de preguntas** y un **analizador de respuestas**. Metodológicamente se decidió postergar la construcción del generador de preguntas hasta haber desarrollado la base de conocimientos acerca del tutor que así lo permitiese y comenzar por construir un programa que permitiese analizar respuestas o acciones decididas por el usuario.

Específicamente, los objetivos del estudio fueron:

1. Estudiar las condiciones, características y estrategias de la intervención adulta en el aprendizaje matemático y formalizar este conocimiento de modo de traducirlo en un sistema automático que pueda emular aspectos importantes de la actuación de un tutor humano, y
2. Determinar el potencial de la tecnología asociada con la inteligencia artificial para superar algunas de las limitaciones de la enseñanza asistida por computadores, en especial las que se relacionan con el modelo pedagógico que pone en poder del educador la conducción y la responsabilidad del proceso de aprendizaje.

Los antecedentes

Hace ya algún tiempo que se realizan aplicaciones de la inteligencia artificial a la enseñanza. En una publicación de 1987, se reconocen cinco tipos de programas que Kearsley (1987) designa por ICAI (intelligent computer assisted instruction).

El primer tipo de programa descrito en la referida publicación, lo podríamos llamar "socrático"; estos programas usan un diálogo para apoyar el aprendizaje de un tema, la forma que adoptan se asemeja al descubrimiento guiado. Parece más adecuado para situaciones en las que el estudiante debe aprender temas verbales, como en ciencias sociales o en filosofía.

El segundo tipo de programas emula a un entrenador: observa la actuación del estudiante y le da consejos, el autor lo señala como adecuado para situaciones de resolución de problemas.

El tercer tipo busca los errores en el trabajo del estudiante, al modo de un compilador. También, tal como en el caso de un compilador, tiene una biblioteca de errores que utiliza para informar al estudiante. Un ejemplo de este tipo de programa es un tutor para programadores principiantes en PASCAL.

Los "micromundos" son el cuarto tipo. Es conocido el caso de LOGO. Los micromundos son ambientes controlados, en los que determinadas acciones son posibles y el estudiante las explora libremente. Hay programas para física, música y geometría. El "estuche de geometría" es un micromundo preparado en México para que el niño explore la geometría; tal como en un estuche, se pueden encontrar en él la regla, el compás, las escuadras, las serchas, los lápices, lápices de colores, la goma para borrar, así como otros instrumentos.

La quinta y última categoría la constituyen los programas que hacen uso de conocimiento especializado, los sistemas expertos. En este tipo de programas el alumno puede hacer consultas, el sistema le responde con algunas preguntas para conocer el caso consultado y luego busca en su base los conocimientos aplicables al caso propuesto.

Otro antecedente que puede ser útil para ubicar el trabajo aquí presentado, es el que se refiere al estado de desarrollo de la tecnología.

Si consideramos la curva "S" que siguen las innovaciones (Cunningham, 1987), se puede hacer la siguiente comparación:

Mientras la enseñanza asistida por computadores ha recorrido toda la curva, es decir, pasó la etapa experimental, en la que se requiere de grandes esfuerzos para obtener pequeños logros, pasó a la segunda etapa, aquella en que la curva se acerca a la vertical, donde con pequeños esfuerzos se obtienen logros importantes (es en esta fase en la que se forman compañías comerciales para explotar la innovación) y llegó a la fase en que para mejorar la tecnología hay que hacer esfuerzos considerables, la "S" se acerca asintóticamente a los límites de la tecnología.

La tecnología asociada a los sistemas expertos, que son los productos de la inteligencia artificial que más se asemejan a los sistemas de los que aquí se trata, habría terminado su etapa experimental y estaría pasando a la segunda. En efecto, ya existen productos comercializados en este terreno.

De acuerdo con la misma fuente, los programas de enseñanza asistida por computadores con tecnología "inteligente", estarían terminando la primera etapa, esto es están hacia el final de la fase experimental, luego se debería poder verlos en funcionamiento y comercialmente distribuidos.

Un analizador de respuestas

A continuación se describen las características técnicas de un sistema tutor que fue construido para experimentar con un ambiente en el que el estudiante pueda trabajar problemas elegidos por él mismo —eventualmente podrían ser sus tareas— y recibir apoyo durante el proceso.

El programa TUTOR hace uso de PROLOG, un lenguaje de programación en lógica. La estructura de un programa en PROLOG se asemeja a una teoría matemática, el autor debe definir los términos primitivos, los términos derivados, el conjunto de axiomas —en este caso son reglas— y las normas de inferencia; en el caso de PROLOG, el procedimiento inferencial está hecho y es la base dinámica del sistema; por último, las preguntas que se le formulan a la base así construida, constituyen los “teoremas por demostrar”. En otro trabajo, Oteiza (1986), se analiza esta relación entre la programación en lógica y la estructura de una teoría matemática.

La base conceptual del programa TUTOR es la siguiente: dado que la estructura de un programa en PROLOG se basa en reglas, hechos y preguntas, es pensable preparar un ambiente de trabajo que contenga las reglas de actuación en un ámbito de la matemática; una “pizarra” o “cuaderno” para que el estudiante haga su tarea, o los ejercicios que él desea resolver: procedimientos inferenciales que permitan comparar las actuaciones del estudiante con las reglas del ambiente conceptual seleccionado y una interfase que comunica, al estudiante, los mensajes que el sistema infiere del análisis.

En la práctica, haciendo uso del TUTOR construido para expresiones algebraicas y ecuaciones de primer grado con coeficientes enteros en los reales, son posibles diálogos del tenor siguiente:

Alumno: Escribe una expresión o una ecuación, por ejemplo:

$$ax + bx = 1$$

Sistema: Bien, tu quieres resolver una ecuación

Alumno: $(a + b)x = 1$

Sistema: OK!, reducción de términos semejantes/distributividad

Alumno: $x = 1 - (a + b)$

Sistema: ¡Oh, oh!, tienes un problema

Sistema: ¿Hiciste una operación con ambos miembros?

Alumno: Resté (a + b)

Sistema: Intenta otra operación con ambos miembros

Alumno: ...

El sistema reconoce la conmutatividad, la asociatividad, la existencia de inversos, las ecuaciones, las expresiones algebraicas, operaciones válidas en ambos casos y la reducción de términos semejantes. En este momento se le agregan nuevas heurísticas para tratar fracciones y ampliar el dominio de las expresiones y ecuaciones que "entiende".

En modo de interacción diferente, y sólo a petición del estudiante, el sistema puede tomar el problema a partir del último paso válido, desplegar en pantalla los pasos siguientes y dar una explicación —en realidad una referencia a las reglas usadas— frente a cada paso.

La versión actual dispone de una pequeña interfase de lenguaje natural, que permite el uso de expresiones del castellano para hacer y recibir preguntas.

En las páginas siguientes se incluyen algunos de los aspectos técnicos tenidos en cuenta para preparar el programa.

El programa hace uso de una **gramática formal**⁷³

$$E \rightarrow E + F, E - F, F$$

$$F \rightarrow F * G, F / G, G$$

$$G \rightarrow -E, (E), A$$

$$I \rightarrow E = E$$

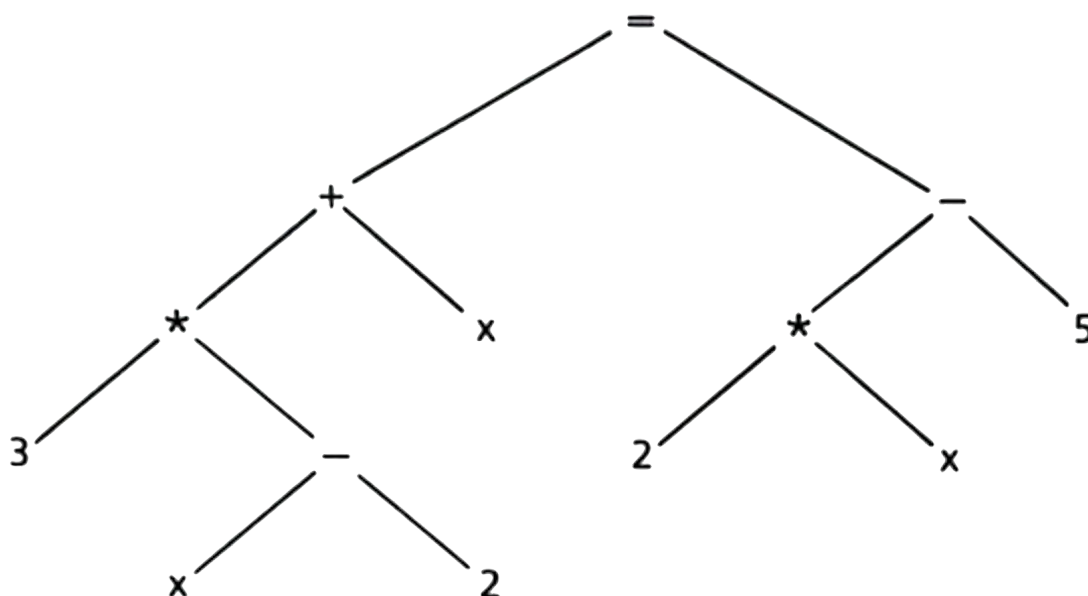
Donde E, F y G son expresiones, la primera regla detecta o acepta las sumas algebraicas; la segunda los productos y la división; la tercera se refiere a los opuestos, al uso de paréntesis y a la existencia de coeficientes constantes; la última permite la igualdad entre expresiones.

Las ecuaciones, por ejemplo, son descompuestas para su análisis en un árbol; así, la ecuación:

$$3(X - 2) + X = 2X - 5$$

El sistema la interpreta como:

⁷³ Desarrollada por los memoristas E. Castillo y J. Boza, en el citado trabajo de 1987.



Frente a una expresión/ecuación escrita por el estudiante, el sistema compara con la gramática y determina si el escrito es sintácticamente correcto y emite sus “opiniones” cualquiera sea el resultado de su análisis. Hasta aquí, un compilador simple.

Si el estudiante modifica la expresión/ecuación, el sistema usa la gramática para verificar la corrección de la nueva expresión y una “base de conocimientos” que contiene las reglas permitidas en el ambiente. Sobre la base de esas reglas —y procediendo recursivamente— trata de “justificar” las diferencias que encuentra entre dos expresiones válidas sucesivas.

Se diseñó una estrategia que actúa por defecto en caso de no encontrarse justificación a las transformaciones hechas. Esta estrategia procede a “resolver” la última expresión/ecuación válida y la presente, si llega al mismo valor —o a valores equivalentes— aprueba el paso y señala que no “supo” entenderlo; en caso de llegar a valores diferentes no equivalentes, señala la existencia de un error y su “ignorancia” para detectarlo, sugiriendo rehacer el último paso. En las versiones experimentales actuales esta estrategia fue temporalmente eliminada para hacer espacio al estudio de estrategias más complejas.

La base de conocimientos es relativamente extensa. En principio se reduce a los axiomas que rigen la operatoria en el cuerpo de los racionales (en la práctica expresiones con coeficientes enteros y fracciones simples en los resultados); pero la cantidad de supuestos implícitos en la forma habitual de definirlos, hace que el número de reglas crezca. En efecto, el concepto de igualdad, de término, de equivalencia entre fracciones, de relación entre operaciones o convenciones como que $3 \cdot A$ representa el producto del entero 3 por una constante y, lo que complica las cosas, “3A” es equivalente con “3·A” y que “3(” (3 multiplicado por un paréntesis),

también es un caso de multiplicación, son algunas cosas que hay que “enseñarle” al sistema, además de la axiomática misma.

Otra situación a tener en cuenta, y nada fácil de controlar, es la siguiente: las reglas que establecen simetrías, como la igualdad o la conmutatividad conducen a búsquedas que se disparan en ciclos repetidos como $A=B$, $B=A$, $A=B, \dots$ o, $A*B$, $B*A$, $A*B, \dots$. En estos casos se tuvo que recurrir a “podas” en los espacios de búsqueda.

Entre las cuestiones interesantes a considerar en este tipo de sistemas se encuentran las que provienen de la relación entre axiomas, teoremas o reglas derivadas de los axiomas. Al operar, todos usamos reglas que pueden estar bastante alejadas de la axiomática. El sistema TUTOR, tal como fue diseñado, consulta directamente la base de reglas. De este modo, debe “demostrar” los teoremas o reglas derivadas, cada vez que opera. En la mejor tradición impuesta por Shannon⁸⁴, el TUTOR, contiene un mínimo de reglas. En la práctica, el volumen de inferencias sobrepasa a menudo las capacidades de un computador personal. Se puede considerar el uso de heurísticas humanas que permitirían eliminar parte importante de los espacios de búsqueda.

El sistema TUTOR⁹⁵ actúa en la solución o en el análisis de la ejecución de problemas que involucran la manipulación de expresiones algebraicas en el cuerpo de los números reales $(R, +, *)$, de modo que:

1. Acepta expresiones o igualdades escritas por un alumno o genera expresiones según especificaciones dadas¹⁰⁶. Esto significa que una sesión de trabajo tutorial puede tener su origen en un problema formulado por el usuario o por uno propuesto por el sistema.
2. Reconoce expresiones o igualdades sintácticamente válidas y reacciona frente a ellas de acuerdo con patrones de comportamiento previamente establecidos.
3. Sigue paso a paso la ejecución del problema a medida que el usuario lo digita y a) responde con una señal de aprobación y una referencia a la heurística y/o axiomas utilizados, en caso que el paso sea correcto y b) señala la causa posible de invalidez del paso en caso que el usuario se equivoque.

⁸⁴ En el área de la inteligencia artificial se pueden reconocer dos tradiciones, una, en la que encontramos a uno de los creadores del área, Claude Shannon, propicia la solución de problemas mediante un mínimo de reglas lógicas; la otra, la que ha producido los sistemas expertos, hace uso del conocimiento y lo aplica sin, necesariamente, recurrir a la inferencia de todas las alternativas a partir de una axiomática mínima. En el primer caso la metáfora es la del pensador; en el segundo, la del especialista.

⁹⁵ La versión actual está hecha en Turbo PROLOG 2.0, para microcomputadores PC compatibles, con al menos 640K de memoria RAM y de preferencia con disco duro.

¹⁰⁶ La opción que supone acciones iniciadas por el sistema fue omitida en la versión actual debido a limitaciones en la capacidad de los computadores personales usados.

4. Si el usuario lo solicita, el sistema debe poder seguir la ejecución del problema, paso a paso, siguiendo una heurística humana comúnmente aceptada en el ambiente educacional.
5. En el caso de no reconocer la justificación del paso dado, el sistema tiene la capacidad para interrogar al estudiante por pasos intermedios u otras señales por medio de las cuales poder evaluar su actuación.
6. Dispone de una base de conocimientos que contiene: a) la axiomática de un cuerpo ordenado y algunas de sus propiedades expresadas como teoremas, b) heurísticas comunes para la simplificación y/o transformación de expresiones algebraicas, c) heurísticas para la solución de ecuaciones de primer grado en $(\mathbb{R}, +, \cdot)$ y d) reglas y recomendaciones de actuación extraídas del repertorio de un tutor con experiencia en la enseñanza de los temas tratados.

Entre las heurísticas cabe destacar las siguientes:

a) simplificación de fracciones; b) resolución de paréntesis; c) reducción de términos semejantes; d) factorización; e) amplificación de una ecuación con coeficientes fraccionarios; f) transposición de términos; g) multiplicación de polinomios y h) productos notables¹¹⁷.

7. Dispone de una interfase de lenguaje natural que permite el uso de sinónimos y de expresiones castellanas comunes en la comunicación entre un alumno y su profesor.
8. Tiene la capacidad de llevar un registro de cada sesión en el que se almacenan los resultados principales de la misma.
9. Dispone de diversos ambientes de trabajo para las distintas situaciones en las que pueda actuar, en particular, ambientes para: analizar expresiones propuestas por el estudiante, analizar ecuaciones de primer grado, también propuestas por el estudiante y continuar la resolución de un problema a petición del mismo.

Una condición general guarda relación con la interacción estudiante-máquina. El programa fue preparado para seguir una interacción natural con el usuario, incluso en los casos en que no reconozca la actuación del estudiante.

El producto es un prototipo experimental que realiza la mayor parte de las operaciones antes especificadas en ámbitos reducidos del cuerpo de los reales, reconoce las cuatro operaciones con dígitos y con expresiones literales, hace uso de los paréntesis, analiza expresiones válidas y ecuaciones de primer grado simples, dispone de un lenguaje mínimo que permite interacciones razonables en un ambiente experimental.

La mayor limitación la constituyó la disponibilidad de memoria de los sistemas utilizados. Esta limitación actuó en dos sentidos, por un lado reduciendo la extensión del programa fuente y por otra, cortando los espacios de búsqueda que genera PROLOG al hacer las inferencias.

¹¹⁷ Se encuentra implementada sólo la heurística de reducción de términos semejantes.

El programa está constituido por módulos y se prepara una versión en lenguaje objeto que se espera pueda contener más elementos que la actual y poder, así, extender el campo de operaciones y la capacidad para sostener un diálogo razonable con un estudiante sin tener que recurrir a tecnicismos. Esta versión permitiría usar el sistema en situaciones de terreno y experimentar con formas alternativas de mediación.

Los aprendizajes

De acuerdo con lo dicho en la introducción, los objetivos del estudio fueron:

- Primero, crear herramientas para el estudio de las condiciones, características, estrategias y resultados de la mediación adulta para el aprendizaje independiente y
- Segundo, estudiar el potencial de las tecnologías asociadas con el área de las ciencias cognitivas para buscar alternativas a algunas de las limitaciones que presenta la enseñanza asistida por computadores.

Específicamente este estudio tuvo por objeto desarrollar un SISTEMA TUTOR que tuviese la capacidad para analizar las acciones o respuestas de un alumno en el dominio de la transformación de expresiones algebraicas y de la resolución de ecuaciones de primer grado con coeficientes enteros.

La pregunta de investigación guarda relación con el potencial de las tecnologías y conocimientos asociados con las ciencias cognitivas y con la inteligencia artificial, para proveer de herramientas para el estudio de la mediación del aprendizaje matemático y de su eventual aplicación en la docencia.

Esta pregunta se descompone en varias cuestiones parciales, a saber:

1º ¿El desarrollo alcanzado por el “saber hacer” y el software de aplicaciones existente en estas áreas, son adecuados para el propósito enunciado?

2º ¿Qué posibilidades existen de aplicar ese conocimiento y el software existente en los computadores personales actuales y accesibles?

3º Esas preguntas acerca de los medios disponibles se relacionan de un modo nada simple con la capacidad propia para hacer uso de ellos: ¿son realizables los diseños y los desarrollos por los equipos locales, es decir, por nosotros?

Por último, las preguntas acerca de las proyecciones: ¿qué enseña la experiencia?, ¿cuáles son los caminos que recomienda el conocimiento adquirido en el intento de responder las preguntas anteriores?

El estudio corresponde a un intento de apropiación de una tecnología y su aplicación a problemas válidos en el medio en que los investigadores se desenvuelven. Los logros y los

aprendizajes se resumen a continuación en el orden en que estas cuestiones fueron enunciadas.

En relación con el potencial de la tecnología

Tanto la experiencia como la literatura consultada permiten afirmar que las técnicas de la inteligencia artificial permiten desarrollar sistemas que emulan aspectos importantes, pero parciales, de un tutor humano.

Se puede agregar que se trata de un área muy interesante, llena de alternativas y que presenta muchos desafíos que vale la pena aceptar. Las ciencias cognitivas, son hoy, un campo de encuentro entre especialistas en informática, de psicólogos, de neurofisiólogos, de epistemólogos y de los interesados por las disciplinas del comportamiento de sistemas; esto lo hace un campo en expansión que no debe escapar de la atención de los educadores, menos aún, de los educadores en matemáticas y en ciencias.

Junto con ser un campo en expansión y que plantea desafiantes preguntas: ¿puede pensar una máquina?, ¿cuáles son las fronteras entre los comportamientos que llamamos inteligentes y los sistemas automáticos?, la inteligencia artificial es un campo controversial.

Mientras el equipo de investigación aprendía a trabajar en este campo y desarrollaba sistemas, se vio obligado a revisar los conceptos propios acerca del aprendizaje, del conocimiento y de los mecanismos de cognición. Tal como esperaban los investigadores, desarrollar estos sistemas sirvió para catalizar un proceso de creación de un pensamiento en torno al hecho educativo, en particular, en torno a la facilitación del pensamiento matemático.

El proceso de aprendizaje que significó el desarrollo de sistemas en este ambiente, modificó, en la mente de los investigadores, el sentido de las preguntas acerca de las posibilidades de los sistemas para simular el pensamiento humano. Este proceso mostró algunas de las limitaciones más importantes de los sistemas formales para representar el conocimiento. En efecto, el razonamiento estrictamente lógico, el razonamiento formal, el deductivo, el que se estructura en torno a la lógica, es sólo una parte, y por momentos no lo esencial, del pensamiento o del modo de proceder inteligente.

Muchas de las soluciones las encuentra el ser humano sobre la base de un razonamiento analógico—bastante débil a la hora de justificar las soluciones, pero fuerte para descubrirlas—o de inducciones incompletas o inexplicables por quien las realiza. Por otra parte, la imaginación, el uso de la imagería o de representaciones figurativas; la componente afectiva; los derivados lejanos de la experiencia o meta-reglas—para llamarlos de algún modo—que guían los “yo creo”, “sospecho que”, “por allí no hay nada” o “supongamos que”, son otros caminos por los cuales encontramos soluciones válidas.

Dado el desarrollo actual de la teoría y de la práctica informática, la metáfora del pensador creativo le queda grande a la tecnología, pero, la actividad en el campo tiene mucho que

aportar al pensamiento y a la práctica en torno a la mediación efectiva del pensamiento matemático y científico.

En relación con los equipos, con el “hardware”

Los computadores personales a la vez permiten y limitan el desarrollo de software que haga uso de mecanismos inferenciales. Al comienzo del estudio, la memoria de un computador básico nos quedaba grande, en estos momentos trabajamos para hacer uso del último rincón de los 2M, de memoria RAM de los equipos que disponemos y, simultáneamente, buscamos financiamiento para obtener equipos de varios órdenes de magnitud mayores.

Se puede afirmar que con los equipos personales disponibles las posibilidades de desarrollar tutores con componentes “inteligentes” y que sean operativos con independencia de sus autores, son muy limitadas.

Los PC son, en todo caso, suficientes para desarrollar prototipos y poner a prueba ideas básicas en la materia. El software ha progresado mucho desde 1986, pero así y todo estas limitaciones subsisten; es más, con la generalización del “disco duro”, mucho software de aplicaciones ha aumentado sus exigencias de memoria, limitando más las posibilidades de generalización de los programas en desarrollo, por lo menos en nuestro medio.

En relación con el proceso de apropiación de la tecnología

Una de las responsabilidades de los equipos técnicos de las universidades corresponde a la apropiación de la tecnología. Los autores de este trabajo se propusieron lograr este propósito en el área abordada.

¿Los logros?, el producto obtenido fue lo suficientemente alentador como para desarrollar varios proyectos en la misma dirección. Además de este sistema TUTOR, se realizó un trabajo en el área de sistemas basados en conocimiento, un prototipo de sistema experto en el área de la orientación profesional (Aguilar y Orsola, 1987), se adelanta ahora en dos tutores en el área del aprendizaje del cálculo para cursos universitarios introductorios.

Podemos agregar, que como resultado del proceso completo, la programación en lógica está instalada en la Universidad de Santiago de Chile; hay varios docentes que trabajan en el tema, distintos alumnos desarrollan proyectos haciendo uso de este tipo de programación y se desarrollan cinco memorias de titulación en el tema. Paralelamente se ha constituido un equipo conformado por educadores, especialistas en computación, una psicóloga y dos matemáticos, con capacidad para trabajar problemas de aprendizaje con un enfoque interdisciplinario.

Proyecciones

Hasta ahora los esfuerzos han estado centrados en el descrito proceso de apropiación del conocimiento y del saber hacer en el área elegida y en la creación de un ambiente de estudio estimulante. El resultado es un laboratorio que permite abordar problemas relativos al aprendizaje y hacerlo con buenas probabilidades de éxito.

El potencial de la programación en lógica está en su capacidad inferencial. La experiencia permite anticipar diferentes sistemas en los que este potencial puede resultar valioso para la educación y para el aprendizaje matemático.

Además de profundizar en el manejo de PROLOG, se vio la necesidad de incorporar nuevos conocimientos y recursos en software en las áreas siguientes:

1. Desarrollo y manejo de bases de datos relacionales administradas desde procesos inferenciales. Es decir, relacionar PROLOG con utilitarios que administran bases de datos.
2. Relación entre procesos inferenciales y procesos algorítmico-cuantitativos. El potencial de una base de conocimientos se verá muy aumentado si se complementa con programas algorítmicos. Al respecto, se estudiará la relación entre programas preparados en PROLOG y procedimientos algorítmicos escritos en "C".
3. Profundizar el desarrollo de interfaces de lenguaje natural.
4. Para el tratamiento de conocimiento simbólico —como parte importante de las expresiones del conocimiento matemático— se requiere de una implementación adecuada de LISP, el lenguaje más difundido en el área de la inteligencia artificial.
5. Relacionado con los desarrollos actuales de material de apoyo para el aprendizaje del cálculo, el equipo de investigación está comenzando a trabajar con "manipuladores simbólicos", programas especialmente contruidos para el tratamiento de problemas de álgebra y de cálculo diferencial e integral.

Paralelamente, se estima importante continuar con los estudios tendientes a caracterizar las estrategias de actuación de un tutor entrenado y exitoso, y abrir el campo de estudios a las actuaciones del estudiante autodirigido.

¿Qué se entiende por autodirección?, ¿cómo se caracteriza un estudiante independiente?, ¿cuáles son las herramientas intelectuales que maneja? y, naturalmente, las preguntas relacionadas con la incorporación de ese conocimiento a la práctica educativa.

Los sistemas de apoyo al aprendizaje pueden desarrollarse en varias direcciones. La primera es la ya iniciada, sistemas que "siguen" el trabajo independiente de un estudiante y que están listos para reaccionar frente a consultas del usuario. Otra guarda relación con la representación del conocimiento y su utilización para el desarrollo de sistemas expertos o basados en conocimientos, que servirían como consejeros en el proceso de aprendizaje.

En efecto, los sistemas basados en conocimientos pueden servir para aprender más acerca de los procedimientos, estrategias, conocimiento especializado que usa un tutor entrenado y,

simultáneamente, para hacer uso de ese conocimiento en el desarrollo de sistemas que respondan preguntas hechas por estudiantes en áreas específicas.

Para seguir adelante el equipo investigador se ha fijado —a modo de metáfora rectora— la de una sala de estudio en el nivel de la educación superior. Por ejemplo, una sala especializada en cálculo, en la que el estudiante pueda encontrar un ambiente de trabajo y los medios para explorar por sí mismo ese tema de la matemática. Textos, guías, colecciones de problemas resueltos, en fin, recursos para el aprendizaje y uno o más TUTORES informáticos, que puedan guiar su estudio, ofrecerle información y ayudarle frente a sus dificultades.

Por ahora, parece una estrategia adecuada desarrollar varios sistemas diferentes: uno que administre el ambiente de aprendizaje, otro que analice las respuestas o las acciones del estudiante —al modo del descrito en este trabajo— y otro que responda preguntas sobre la base de conocimiento especializado.

En síntesis, la brecha abierta por el sistema TUTOR aquí discutido y la capacidad tecnológica resultante del proceso de desarrollo que lo acompañó, permite anticipar la creación de diversos sistemas de apoyo al aprendizaje y una mejor comprensión de los mecanismos y herramientas intelectuales necesarios para que sea el propio estudiante el que controle sus procesos de aprendizaje.

Referencia

- ANTONIJEVIC, N. y CHADWICK, C. (1982): Estrategias Cognitivas y Metacognición. **Revista de Tecnología Educativa**, N° 4, Vol. 7.
- BERNSTEIN, B. (1971): *Class, Codes and Control*, Vol. 1, Theoretical Studies Toward a Sociology of Language. Londres: Routledge and Kegan.
- BLOOM, B. (1975): El marco efectivo del rendimiento escolar, en J. Block (Ed.) *Como lograr el dominio de lo aprendido*, Buenos Aires, Ed. El Ateneo.
- BOZA, J. y Castillo, E. (1987): *Un sistema tutor sobre base inferencial*. Universidad de Santiago de Chile: Memoria para optar al grado de Licenciado en Educación Matemática y Computación.
- BRATKO, I. (1986): *Prolog Programming for Artificial Intelligence*. Wokingham-Inglterra, Addison-Wesley.
- CARROL, JOHN B. (1963): A model of school learning. **Teachers College Record**, 64, p. 723-733.
- CID, GLADYS (1988): *Tópicos de inteligencia artificial para educadores*. Universidad de Santiago de Chile, Memoria de graduación como licenciada en Educación Matemática y Computación.
- COOPER L. y REGAN, D. (1982): Attention, perception and intelligence. **Handbook of Human Intelligence**, R. Sternberg (Ed.) Cambridge-Inglterra: Cambridge University Press.
- COX, C. (1984): *Clases y transmisión cultural*. Santiago-Chile: CIDE, documento de trabajo N° 6.
- CHARNAIK, E. y McDERMOTT D. (1986): *Artificial Intelligence*. Reading-Massachusetts: Addison-Wesley.
- CUNNINGHAM, P. (1987): Multiple Knowledge Sources in Intelligent Teaching Systems, en **IEEE-Expert**. Vol. 2, N° 2.
- DANSEREAU, D. (1978): *The Development of a Learning Strategies Curriculum*. H. O'neil (Ed.) **Learning Strategies**. New York: Academic Press.
- DEAR, B. (1987) AI and the Authoring Process. **IEEE-Expert**. Vol. 2 N° 2.
- EYSENCK, MICHAEL W. (1987): *A Handbook of Cognitive Psychology*. Londres: LEA.
- FILP, J., CARDEMIL C. y ESPINOLA V. (1987): *Disciplina, Control Social y Cambio: estudio de las prácticas pedagógicas en una escuela básica popular*. Santiago-Chile: CIDE.

- FEURSTEIN, R. y otros (1980): Instrumental Enrichment an Intervention Program for Cognitive Modifiability. Baltimore-EE.UU.: University Park Press.
- FLAVELL, J. (1981): Cognitive Monitoring. P. Dickson (Ed.) Children's Oral Communication Skills. New York: Academic Press.
- FRIEZE, I. (1976): The Role of Information Processing in Making Causal Attributions for Success and Failure. J.S. Carrol y J. Paine (Eds.). **Cognition and Social Behavior**, Hillsdale, N.J.: Erlbaum Press.
- LOCKED, M. y MANDINASH, E. (1986): Trends in Educational Computing: Decreasing Interest and the Changing Focus of Instruction. **World Bank Reprints Series**, Nº 377.
- HUNT, E. (1980): Intelligence as an Information Processing Concept. **British Journal of Psychology**, Vol. 71, pp. 449-474.
- MAX-NEF y otros (1986): Desarrollo a escala humana. Cepaur. Fundación Dag Hammarskjöld, **Development Dialogue, número especial**.
- MONTERO, P. (1987): Efectos de la educación primaria de niños en el mundo laboral de América Latina y el Caribe, un panorama de las investigaciones. Santiago-Chile: CIDE.
- OTEIZA, F. (1988): Informática, educación y sectores populares. Santiago-Chile: Oficina Regional de Educación para América Latina y el Caribe (OREALC/UNESCO).
- OTEIZA, F. (1986): La programación en Lógica y el razonamiento matemático, Ponencia presentada en el Sexto Congreso de la Comisión Interamericana en Educación Matemática. República Dominicana.
- AGUILAR y ORSOLA, J. (1988): Un sistema basado en conocimientos para la orientación profesional y vocacional. Universidad de Santiago de Chile, memoria para optar al grado de Licenciado en Educación Matemática y Computación.
- STERNBERG, R. (Ed.) (1982): Handbook of Human Intelligence. Cambridge-Inglaterra: Cambridge University Press.
- SHAVELSON y otros (1976): Self Concept: validation of construct interpretations. **Review of Educational Research**. Vol. 46, pp. 127-148.
- SKINNER, B.F. (1954): The Science of Learning and the Art of Teaching. **Harvard Educational Review**, 24, pp. 86-97.