



Robots autodidactas

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

**Las máquinas que aprenden
del mismo modo que
los niños están ayudando
a entender cómo se
coordinan el cuerpo
y la mente para adquirir
conocimientos y destrezas**

Diana Kwon

Fotografías de Sun Lee





E

N *CHAPPIE*, UNA PELÍCULA DE CIENCIA ficción de 2015, Deon es un ingeniero que quiere crear una máquina capaz de pensar y de sentir. Para ello escribe un programa de inteligencia artificial (IA) que puede aprender como un niño. La máquina

parte de un estado de relativa *tabula rasa* y, solo a partir de la observación y la experimentación con el entorno, adquiere conocimientos generales, el lenguaje y otras habilidades complejas: algo inalcanzable para los sistemas de inteligencia artificial más avanzados de hoy.

Hay máquinas que ya superan las capacidades humanas en ciertas tareas específicas, como contestar las preguntas de un concurso de televisión o jugar al ajedrez y al juego de mesa chino go. En octubre de 2017, la empresa británica DeepMind dio a conocer AlphaGo Zero, la última versión de su sistema de IA para jugar al go. A diferencia de su predecesor, AlphaGo, que había llegado a dominar el juego analizando una inmensa cantidad de partidas jugadas por seres humanos, esta versión acumuló experiencia de forma autónoma, compitiendo contra sí misma. A pesar de tan notable logro, AlphaGo Zero se limita a aprender un juego con reglas claras, y tuvo que jugar millones de veces para obtener su destreza sobrehumana.

Por el contrario, desde la primera infancia en adelante nuestros hijos se desarrollan explorando su entorno y experimentando con el movimiento y el habla. Recopilan datos, se adaptan a nuevas situaciones y transfieren la pericia adquirida en una materia a otras.

Robotistas, neurocientíficos y psicólogos llevan desde los inicios del siglo xxi investigando vías para construir máquinas que imiten ese desarrollo tan espontáneo. Las colaboraciones entre ellos han cuajado en andróides capaces de mover objetos, adquirir vocabulario básico y capacidades numéricas, y que incluso exhiben signos de conducta social. Al mismo tiempo, estos sistemas de IA están ayudando a los psicólogos a entender cómo aprenden los niños pequeños.

MÁQUINA DE PREDICCIONES

Nuestro cerebro trata constantemente de predecir el futuro. A tal fin, actualiza sus expectativas para ajustarse a la realidad.

Imáginese que se encuentra con el gato de su vecino por primera vez. Como usted tiene un perro y conoce su naturaleza gregaria, infiere que el minino también disfrutará de sus caricias. Sin embargo, cuando alarga el brazo hacia la criatura esta le araña, de modo que usted revisa su teoría sobre los animales de aspecto adorable. Cuando le lleva golosinas, el animal permite que le acaricie. La próxima vez que se encuentre con un felino, le ofrecerá comida antes de tocarlo.

De esta forma, los centros de procesamiento superiores del cerebro refinan continuamente sus modelos internos conforme a las señales recibidas desde los órganos sensoriales. Considere nuestro sistema visual, de una gran complejidad. Las células nerviosas del ojo procesan los rasgos básicos de una imagen antes de transferir esa información a las regiones de nivel superior, que interpretan el significado global de una escena. Curiosamente, las conexiones neuronales también funcionan en sentido contrario: desde los centros de procesamiento de orden superior (como las áreas en las cortezas parietal o temporal) a los inferiores (como la corteza visual primaria y el núcleo geniculado lateral). Algunos neurocientíficos creen que estas conexiones «descendentes» transportan las predicciones del cerebro a los niveles inferiores, y que eso influye en lo que vemos.

Lo crucial es que las señales que descienden desde los niveles superiores del cerebro interactúan continuamente con aquellas que «ascienden» desde los sentidos, lo cual produce un error de predicción: la diferencia entre lo que esperamos y lo que experimentamos. Una señal que transmite esta discrepancia retorna a los niveles superiores, donde ayuda a refinar los modelos internos y a generar nuevas suposiciones, en un bucle que no conoce fin. «La señal del error de predicción impulsa el sistema hacia estimaciones de lo que hay realmente fuera», explica Rajesh P. N. Rao, neurocientífico computacional de la Universidad de Washington.

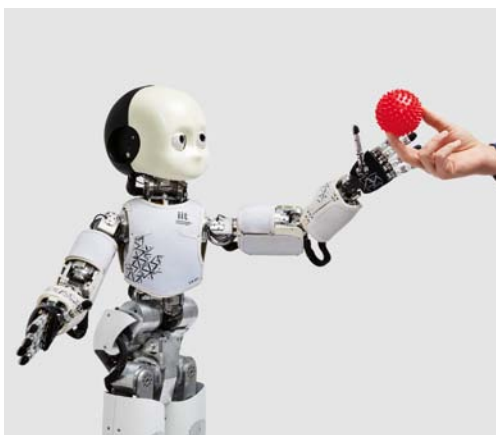
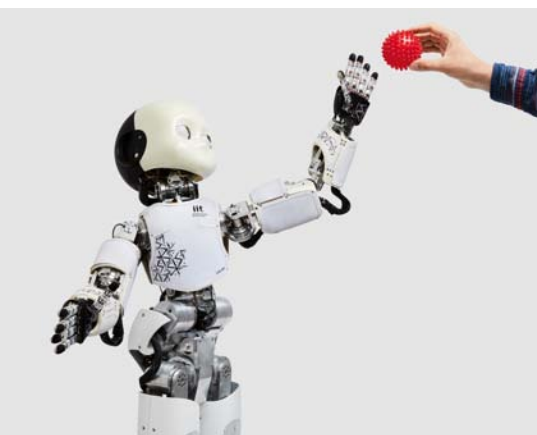
Mientras Rao realizaba el doctorado en la Universidad de Rochester, él y su director de tesis, el neurocientífico computacional Dana H. Ballard, actualmente en la Universidad de Texas en Austin, fueron los primeros en poner a prueba tal codificación

EN SÍNTESIS

Los bebés aprenden de forma autónoma experimentando con su cuerpo y jugando con los objetos de su entorno.

Los robotistas están programando andróides con algoritmos que les permiten aprender del mismo modo que lo hacen los niños.

Los estudios con estas máquinas están transformando la robótica y aportando una nueva visión del desarrollo infantil.



predictiva en una red neuronal artificial. (Las redes neuronales, una clase de algoritmos informáticos inspirados en el cerebro humano, adaptan de forma progresiva sus parámetros internos para generar, a partir de una entrada, la salida requerida.) En ese experimento, publicado en 1999 en *Nature Neuroscience*, los investigadores simulaban las conexiones neuronales de la corteza visual, incluidas las descendentes (que transmiten pronósticos) y las ascendentes (que llevan las señales sensoriales del mundo exterior). Tras entrenar la red con fotografías de naturaleza, vieron que aprendía a reconocer las características clave de una imagen; por ejemplo, las rayas de una cebra.

CONTANDO CON LOS DEDOS

Una diferencia fundamental entre los seres humanos y muchos sistemas actuales de IA estriba en que nosotros disponemos de un cuerpo que nos sirve para desplazarnos por el mundo y actuar en él. Los bebés y los niños de uno o dos años se desarrollan experimentando con los movimientos de sus brazos, piernas y dedos, y examinando todo aquello que cae dentro de su alcance. Aprenden de forma autónoma a andar, a hablar y a reconocer objetos y personas. De qué modo lo consiguen sin necesitar apenas orientación constituye un área clave de investigación tanto para psicólogos del desarrollo como para robotistas. Las colaboraciones entre ellos están conduciendo a sorprendentes hallazgos en ambos campos.

En una serie de experimentos pioneros que se iniciaron a finales de los noventa, el robotista Jun Tani, a la sazón en los Laboratorios de Ciencias de la Computación de Sony, diseñó junto con otros investigadores una red neuronal que se basaba en predicciones para aprender movimientos básicos y la puso a prueba en robots. Descubrió que las máquinas podían lograr ciertas habilidades rudimentarias, como navegar por entornos simples, imitar movimientos de las manos y obedecer órdenes verbales básicas, como «apuntar» y «tocar».

En trabajos más recientes, el robotista Angelo Cangelosi, de la Universidad de Plymouth, y Linda B. Smith, psicóloga del desarrollo de la Universidad de Indiana en Bloomington, han demostrado el papel crucial que desempeña el cuerpo en la adquisición de conocimientos. «La forma del cuerpo [del robot] y la clase de cosas que puede hacer influyen en las experiencias que tiene y en lo que puede aprender de ellas», asegura Smith. Uno de los principales sujetos de prueba es iCub, un robot humanoide de poco menos de un metro de altura que un equipo del Instituto Italiano de Tecnología construyó con fines de investigación. No incorpora ninguna función preprogramada, lo

iCub, un androide con el que trabajan los científicos de la Universidad de Plymouth, consigue aprender palabras nuevas, como *pelota*, con más facilidad si el investigador coloca sistemáticamente el objeto en el mismo sitio mientras lo nombra.

que permite que se implementen algoritmos específicos para cada experimento.

En un estudio realizado en 2015, Cangelosi, Smith y sus colegas dotaron a un iCub de una red neuronal que le otorgaba la capacidad de establecer asociaciones simples. Hallaron que asimilaba nuevas palabras con mayor facilidad si los nombres de los objetos se vinculaban sistemáticamente con posiciones corporales específicas. Colocaron repetidas veces una pelota o una copa a la izquierda o a la derecha del androide, de modo que vinculara el objeto con el movimiento requerido para mirarlo, como inclinar la cabeza. Después, emparejaron las acciones con los nombres de esos objetos. El robot aprendía mejor palabras básicas si los objetos correspondientes aparecían en una ubicación determinada en vez de en múltiples sitios.

Cuando repitieron el experimento con niños de 16 meses, llegaron a resultados similares: relacionar objetos con posturas concretas les ayudaba a aprender asociaciones de palabras. El laboratorio de Cangelosi está extendiendo esta técnica para enseñar a los robots palabras más complejas, como *este* o *aquel*, que no se hallan asociadas a cosas específicas.

El uso del cuerpo puede, además, favorecer que los niños y los robots adquieran destrezas numéricas básicas. Los estudios muestran que los niños que encuentran dificultades para visualizar mentalmente sus dedos también poseen capacidades aritméticas más flojas. En un trabajo del año 2014, Cangelosi y su equipo descubrieron que cuando se enseñaba a los robots a contar con los dedos, sus redes neuronales representaban cantidades con mayor exactitud que cuando se les instruía utilizando solo los nombres de los números.

MOTORES DE LA CURIOSIDAD

La novedad también facilita el aprendizaje. En un artículo publicado en 2015 en la revista *Science*, investigadores de la Universidad Johns Hopkins refirieron que, cuando los niños se topan con algo desconocido, como un objeto sólido que parece atravesar una pared, exploran ese fallo de sus expectativas. En términos prosaicos, su impulso inherente a reducir los errores de predicción les ayuda en su desarrollo.

Pierre-Yves Oudeyer, robotista del Instituto Nacional de Investigación en Informática y Automática (INRIA) de Francia, cree que el proceso de aprendizaje es más complejo. Sostiene

que los niños buscan activamente, y de manera sorprendentemente refinada, aquellos objetos de su entorno que les brindan mayores oportunidades para aprender. Por ejemplo, una niña pequeña preferirá jugar con un coche de juguete que con un rompecabezas de 100 piezas, pues posiblemente su nivel de conocimientos le permitirá formular hipótesis sobre el primero más sencillas de verificar.

Para corroborar esta teoría, Oudeyer y sus colegas dotaron a sistemas robóticos con una característica que denominan «motivación intrínseca», la cual premia la reducción en el error de predicción. (Para una máquina inteligente, la recompensa puede equivaler a un valor numérico que está programado para maximizarse en función de sus acciones.) Este mecanismo posibilitó que un robot AIBO de Sony (un pequeño artificio, parecido a un cachorro de perro, con capacidades motoras y sensoriales básicas) buscara de forma autónoma aquellas tareas que ofrecían un mayor potencial de aprendizaje. Los cachorros robóticos fueron capaces de adquirir habilidades básicas (agarrar objetos, interactuar vocalmente con otro robot) sin necesidad de que se les programara para conseguir fines tan específicos. Este resultado es «un efecto secundario de la exploración del mundo que efectúa el robot, impulsada por su motivación para mejorar sus predicciones», explica Oudeyer.

Cabe destacar que, si bien los robots pasaron por fases de entrenamiento similares, el azar tuvo una función destacada en lo que aprendieron. Unos exploraron un poco menos, otros un poco más, de modo que acabaron conociendo cosas distintas. Para Oudeyer, esta variación de resultados sugiere que, incluso con una programación idéntica y un entorno educativo similar, los robots pueden alcanzar diferentes niveles de habilidad, algo parecido a lo que sucede en un aula típica.

Más recientemente, el grupo de Oudeyer recurrió a simulaciones por ordenador para mostrar que un tracto vocal robótico equipado con este tipo de algoritmo predictivo podía aprender elementos básicos del lenguaje. En la actualidad colabora con la neurocientífica cognitiva Jacqueline Gottlieb, de la Universidad de Columbia, para investigar si tal motivación intrínseca impulsada por predicciones también subyace a la neurobiología de la curiosidad humana. En su opinión, una investigación a fondo de estos modelos podría ayudar a los psicólogos a comprender lo que ocurre en el cerebro de niños con discapacidades y trastornos del desarrollo.

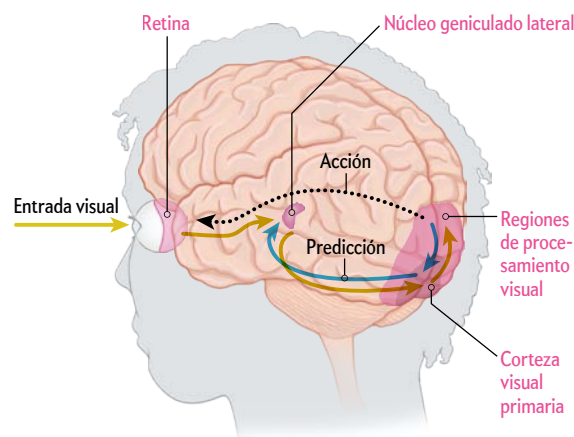
ANDROIDES ALTRUISTAS

Nuestro cerebro también trata de predecir el futuro cuando interactuamos con otras personas: intentamos deducir sin cesar las intenciones de la gente y anticipar lo que dirán a continuación. Sorprendentemente, el impulso a minimizar los errores de predicción puede inducir por sí solo una conducta social elemental, como demostraron en 2016 la robotista Yukie Nagai y su grupo de la Universidad de Osaka.

Los investigadores hallaron que, incluso cuando el robot iCub no era programado con una capacidad intrínseca de socializar, la motivación para reducir los errores de predicción lo conducía a comportarse de manera servicial. Por ejemplo, después de haberle enseñado a empujar un camión de juguete, si el robot observaba que una persona no lograba completar esa misma acción, a menudo él mismo desplazaba el objeto al lugar correcto, simplemente para aumentar la certeza de que el camión se encontraba en una ubicación dada. Nagai, actualmente en el Instituto Nacional de Tecnología de la Información y Comunicación de Japón, cree que es posible que el desarrollo

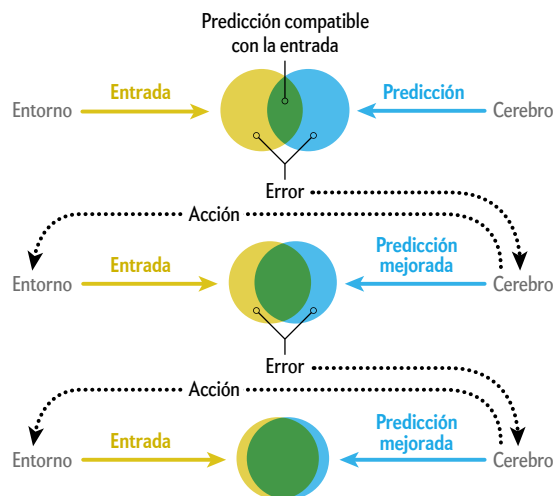
Cerebro predictivo

Nuestra mente es una máquina predictiva que utiliza los conocimientos y la experiencia previa para dar sentido a la avalancha de información que procede de nuestros alrededores. Muchos neurocientíficos y psicólogos creen que casi todo lo que hacemos —percepción, acción y aprendizaje— se basa en la generación y actualización de previsiones.



Procesamiento visual

La anatomía del cerebro respalda la idea del procesamiento predictivo. La corteza visual, por ejemplo, recibe información captada por el ojo, pero sus conexiones también funcionan en sentido contrario. Los neurocientíficos creen que estas conexiones que «descienden» desde los niveles superiores del cerebro hasta los inferiores (como la corteza visual primaria y el núcleo geniculado lateral) transportan predicciones. Estas se conjugan con las entradas sensoriales para generar un error de predicción: la diferencia entre lo que esperamos y lo que vemos. Una señal que codifica esta discrepancia regresa a los niveles superiores del cerebro. Otras señales descendentes envían las órdenes para mover los músculos oculares y ajustar lo que vemos.



Cascada de predicciones

Cuando el cerebro genera un error de predicción, utiliza esta información para actualizar sus previsiones y seleccionar las acciones que ayudarán a resolver la discrepancia entre creencias y realidad. Por ejemplo, si al mirar algo un individuo no es capaz de determinar qué es, el cerebro puede enviar la orden de tomar el objeto con la mano y examinarlo a fin de recolectar más información.

infantil se produzca de forma similar. «No hace falta que el niño tenga intención de ayudar a otras personas», argumenta. La motivación para minimizar el error de predicción puede por sí sola iniciar habilidades sociales elementales.

El procesamiento predictivo también ayudaría a los científicos a comprender trastornos del desarrollo, como el autismo. Según Nagai, ciertos individuos autistas pueden presentar una mayor sensibilidad a los errores de predicción, lo cual convierte en abrumadora toda la información sensorial entrante y explicaría su atracción por las conductas repetitivas, cuyas consecuencias resultan sumamente predecibles.

Harold Bekkering, psicólogo cognitivo de la Universidad de Radboud en los Países Bajos, cree que el procesamiento predictivo también contribuiría a explicar el comportamiento de las personas con trastorno por déficit de atención e hiperactividad. De acuerdo con esta teoría, mientras que los individuos autistas tenderían a protegerse de lo desconocido, aquellos que muestran problemas para concentrarse se verían atraídos permanentemente por los estímulos impredecibles de su entorno, explica Bekkering. «Algunas personas que son sensibles al mundo lo exploran, mientras que otras que son demasiado sensibles al mundo se blindan a sí mismas», sugiere. «En un marco de codificación predictivo se pueden simular muy bien ambas pautas.» En la actualidad, su laboratorio trabaja en la comprobación de esta hipótesis mediante el uso de imágenes del cerebro humano.

Nagai espera evaluar esta teoría efectuando estudios de «reflejo cognitivo», en los que robots equipados con algoritmos de aprendizaje predictivo interactuarán con seres humanos. A medida que el robot y la persona se comuniquen mediante lenguaje corporal y expresiones faciales, la máquina ajustará su comportamiento al de su interlocutor, reproduciendo de ese modo las preferencias de la persona en cuanto a predictibilidad. Así, los investigadores podrán emplear robots para modelizar la cognición humana, y luego examinar la arquitectura neuronal de la máquina para intentar descifrar lo que ocurre en nuestro cerebro. «Podremos exteriorizar en los robots nuestras características para comprendernos mejor a nosotros mismos», vaticina Nagai.

LOS ROBOTS DEL FUTURO

Los estudios con niños robóticos han ayudado a responder ciertas preguntas clave en psicología, incluida la importancia tanto del procesamiento predictivo como del cuerpo en el desarrollo cognitivo. «Hemos aprendido mucho acerca de cómo funcionan los sistemas complejos, de la importancia que tiene el cuerpo y de algunos aspectos verdaderamente fundamentales, como la exploración y la predicción», señala Smith.

Sin embargo, los robots capaces de desarrollar una inteligencia similar a la humana distan de convertirse en realidad. Chappie aún habita en el reino de la ciencia ficción. Para empezar, los científicos han de vencer obstáculos técnicos, como la fragilidad del cuerpo y las limitadas capacidades sensoriales de la mayoría de los robots. (En este sentido, los avances en campos como la robótica blanda y la visión artificial podrían aportar soluciones.) La increíble complejidad del propio cerebro representa un desafío aún mayor. A pesar de los esfuerzos que se realizan en numerosos frentes para obtener modelos de la mente, aún queda lejos la posibilidad de diseñar una máquina capaz de rivalizar con ella. «Disiento totalmente de quienes aseguran que dentro de 10 o 20 años tendremos máquinas con una inteligencia de nivel humano», declara Oudeyer. «Creo que esa afirmación denota una profunda falta de comprensión acerca de la complejidad de la inteligencia humana.»

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Inteligencia artificial*, un número de nuestra colección ESPECIAL (en PDF) donde podrás encontrar algunos de los mejores artículos publicados en *Investigación y Ciencia* sobre los retos científicos, técnicos, cognitivos y éticos que plantean las máquinas pensantes.



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial

Además, la inteligencia no solo necesita una maquinaria y circuitos apropiados. Una larga línea de investigación ha demostrado que los cuidadores desempeñan un papel crucial en el desarrollo infantil. «Si me preguntan si un robot podría llegar a ser verdaderamente humano, entonces yo preguntaré si alguien cuidaría a un robot como cuida a un niño», dice Tani. «En caso de que sea posible, entonces sí, podríamos conseguirlo. Pero de lo contrario no cabe esperar que un robot se desarrolle como un niño humano real.»

El proceso de acumulación gradual de conocimientos también puede resultar indispensable. «El desarrollo es un sistema de cascadas extremadamente complejo», señala Smith. «Lo que sucede un día prepara el terreno para el siguiente.» Como consecuencia, argumenta, quizá no sea posible construir una inteligencia artificial de nivel humano sin integrar de algún modo el proceso de aprendizaje paso a paso que tiene lugar a lo largo de la vida.

Poco antes de su muerte, Richard Feynman escribió: «Lo que no puedo crear, no lo entiendo». En el libro que publicó en 2016, *Exploring robotic minds* («Explorar las mentes robóticas»), Tani da un giro a esta idea y sostiene: «Entiendo aquello que puedo crear». Argumenta que la mejor forma de entender la mente humana es sintetizando una.

Quizás algún día los seres humanos logremos construir un robot capaz de explorar, adaptarse y desarrollarse como un niño, tal vez junto con sustitutos de cuidador que le brinden el afecto y la orientación necesarios para un crecimiento saludable. Entretanto, los robots de tipo infantil continuarán proporcionando información valiosa acerca de cómo aprenden los niños y revelando lo que sucede cuando los mecanismos básicos se desvían de su funcionamiento normal. 

PARA SABER MÁS

Developmental robotics: From babies to robots. Angelo Cangelosi y Matthew Schlesinger. MIT Press, 2015.

Exploring robotic minds: Actions, symbols, and consciousness as self-organizing dynamic phenomena. Jun Tani. Oxford University Press, 2016.

How evolution may work through curiosity-driven developmental process. Pierre-Yves Oudeyer y Linda B. Smith en *Topics in Cognitive Science*, vol. 8, n.º 2, págs. 492-502, abril de 2016.

EN NUESTRO ARCHIVO

Así piensan los bebés. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2010.

Metal bípedo. John Pavlus en *IyC*, octubre de 2016.

Hacia una inteligencia artificial más humana. Alison Gopnik en *IyC*, septiembre de 2017.