

1. Panorama de la IA

José J. Martínez P.

josejesusmp@gmail.com
Septiembre 2022

Un acercamiento a la IA

La IA se ha convertido en el paradigma de la nueva ingeniería, pues en la era que estamos viviendo no se puede concebir un nuevo producto o servicio que no incluya alguna de sus técnicas ya sea en su diseño, en su proceso de construcción o en su operación. Por otra parte, el desarrollo tecnológico conlleva necesariamente un cambio a nivel de comportamiento social producto de la utilización masiva de la tecnología, lo que ha a su vez lleva a la utilización de estas técnicas. De ahí la importancia de conocer a cierto nivel de detalle algunas de sus técnicas y tener criterio para su implementación, especialmente en el desarrollo de los algoritmos que afectan a muchas personas.

Una primera definición es la de IA ancha y de IA estrecha. La IA ancha busca que todo un gran sistema funcione con IA, es decir la automatización completa, por ejemplo, de una ciudad usando IA. Esta todavía es una meta a largo plazo y muchos autores consideran imposible de lograr, aunque si bien ya hay algunos proyectos que se han comenzado a construir como el proyecto Arup en el Valley Cloud en el sur de China, del que se considera que todavía falta mucha interoperabilidad. De manera que lo que se trabaja actualmente es la IA estrecha, el uso de IA para la solución de problemas aislados, específicos. Por ejemplo, la traducción automática o la optimización de un proceso. Así que cuando hablamos de IA en el contexto actual hablamos de IA estrecha.

Por otra parte, aun no se ha establecido un concepto que unifique una definición de IA, claramente hay muchos puntos de vista. Además, para enfrentar el reto de la IA hay varios enfoques por lo que en este capítulo vamos a hacer un acercamiento para tratar de llegar a nuestro propio punto de vista de lo que es IA. También, a través de un estudio de sistemas vamos a encontrar cual es el campo de aplicación de la IA. Luego vemos la vida natural y posteriormente la vida artificial para llegar a un modelo generalizado. Todo esto con el fin de tener un marco de referencia de todas las tecnologías alrededor de la IA.

1 Antecedentes

Los estudios sobre la forma en cómo piensan los humanos se dieron en todas las culturas antiguas, pero entre ellos por sus implicaciones sobresalen las obras de Platón. En su texto Primeros Analíticos, presenta su silogismo, una forma de razonamiento deductivo que consta de dos enunciados o premisas y otra como conclusión o inferencia deducida de los dos primeros. Por esto se le conoce como el padre de la Lógica. En el siglo XIX, estos textos, influenciados por la escuela de Lógica India, dieron lugar a los trabajos pioneros de Charles Babbage, Augusto De Morgan y particularmente de George Boole con sus tratados “Análisis Matemático de la Lógica” (1847) y “Las Leyes del Pensamiento” (1854).

Desde otra perspectiva, si la inteligencia se puede mecanizar, ¿qué es lo único de los humanos que lo distingue de las maquinas? La cuestión de una copia artificial del hombre

y de la complejidad de todo lo que esto implica, no son nuevas. La reproducción e imitación del pensamiento ya fue trabajada hace siglos. En la antigua Grecia, se probó que se habían concretado diferentes ideas sobre robots humanoides. Un ejemplo de esto es Dédalo, de quien se dice que gobernó la mitología del viento, para tratar de crear humanos artificiales. Estas ideas se retomaron alrededor del siglo XVI, que lo llenó de leyendas y de criaturas artificiales. El Homúnculo, los autómatas mecánicos, el golem, el ajedrez autómatas de Mälzel, o Frankenstein, fueron intentos imaginarios o reales en los siglos pasados para producir artificialmente inteligencia e imitar lo esencial del ser humano.

En 1913 A. Whitehead y B. Russell, publicaron “Principia Mathematica”, donde se trata de describir un conjunto de axiomas y reglas de inferencia en lógica simbólica a partir del cual se deberían probar todas las verdades matemáticas. Sin embargo, en 1931 K. Gödel publicó sus teoremas de incompletez, con los cuales invalidó la propuesta del “Principia Mathematica”. En 1936, A. Turing publicó su artículo “Sobre números computables, con una Aplicación al *Entscheidungsproblem*”, alrededor de ver el problema de indecisión como: ¿existe un algoritmo que pueda decidir si una proposición es cierta o ¿por el contrario es falsa? En el artículo planteó, su contribución esencial, la noción rigurosa de computabilidad basada en lo que se conoce como la “Máquina de Turing” que captura la esencia del manejo simbólico abstracto.

Con la construcción del primer computador americano en 1943, se concretaron las posibilidades de implementar estos procesos de pensamiento humano, una máquina para la manipulación mecánica de símbolos. Basado en la esencia del razonamiento matemático, el computador y las ideas en que se basó su construcción, inspiraron a varios científicos a discutir la posibilidad de llegar a un “cerebro electrónico”. El término Inteligencia Artificial fue acuñado en 1956, en un taller realizado durante dos meses en Darmouth College, al que asistieron muchos de los que posteriormente fueron los líderes en investigación en este campo, como H. Simon, J. McCarthy, C. Shannon, A. Newell y M. Minsky.

El documento que se produjo en esta reunión define “el problema de la inteligencia artificial es el de construir una máquina, que, si se comporta de manera similar al comportamiento que realice un ser humano, esta sería llamada inteligente”. Veamos ahora los 5 diferentes enfoques que se han trabajado para llevar al computador esos procesos de toma de decisiones humanas.

2. Enfoques para afrontar la IA

2.1 Pensar Humanamente

Si decimos que un programa piensa como un humano, debemos tener alguna forma de determinar cómo piensa un humano. Así que se necesita entrar en el trabajo real de cómo funciona la mente humana. La mejor forma de hacerlo es a través de experimentación psicológica. Una vez se tenga una teoría precisa y suficiente de la mente, se vuelve posible expresar la teoría como un programa de computador. Si la entrada/salida y el comportamiento en el tiempo concuerdan con el comportamiento humano, esta es una evidencia de que algunos mecanismos del programa pueden operar en los humanos. El campo interdisciplinario de la ciencia cognitiva reúne modelos computacionales a partir de la IA y de técnicas experimentales de la psicología para tratar de construir teorías precisas y probables del trabajo de la mente humana.

La ciencia cognitiva, se basa necesariamente en investigación experimental de humanos y animales reales. Simplemente anotaremos que la IA y la ciencia cognitiva continúan fertilizándose una a la otra, especialmente en áreas de visión, lenguaje natural y aprendizaje. Un ejemplo, son los robots de Braitenberg, que muestran de manera simple inteligencia artificial basada en comportamiento y cognición corpórea que emerge de la interacción robot-ambiente.

2.2 Inteligencia Artificial Simbólica

Como vimos, Aristóteles fue el primero en tratar de codificar el “pensamiento correcto”, esto es, procesos de razonamiento irrefutables. Sus famosos silogismos proveen patrones de estructuras de argumentos, que siempre llevan a conclusiones correctas a partir de premisas correctas. Estas leyes del pensamiento se suponía que gobernaban la operación de la mente, e iniciaron el campo de la lógica. El desarrollo de la lógica formal proveyó una notación precisa de enunciados para toda clase de cosas y de sus relaciones con el mundo. Según la concepción de 1965, los programas podrían, dándoles el tiempo y la memoria suficiente, tomar la descripción de un problema en notación lógica y encontrar su solución, si existía. Esta se conoce como IA simbólica.

Sin embargo, este enfoque tiene dos obstáculos importantes. Primero, en la gran generalidad de casos, no es fácil a partir de conocimiento informal, establecer ese conocimiento en términos formales, en notación lógica. Segundo, hay una gran diferencia entre ser capaz “en principio” de solucionar un problema y luego hacerlo en la práctica. Aunque estos obstáculos se aplican a cualquier intento de construir sistemas de razonamiento computacional, aparecen primero en la IA simbólica debido al poder de sus sistemas de representación y razonamiento que están bien definidos y bastante bien comprendidos.

Este enfoque se continúa aplicando en ambientes controlados, donde es posible establecer formalmente, lógicamente, sus procesos. Uno de tales ambientes se presenta en los problemas de la robótica fija. Los robots fijos son principalmente manipuladores industriales que trabajan en ambientes muy bien definidos, adaptados para estos robots.

2.3 El enfoque de agentes

Actuar inteligentemente significa actuar para lograr sus propias metas, considerando nuestros sentimientos. En este enfoque, la IA se ve como el estudio y construcción de agentes inteligentes. En el enfoque de IA simbólica, todo el énfasis está en las inferencias correctas. Parte de ser un agente inteligente es hacer inferencias correctas, **debido a que una forma de actuar racionalmente es razonar lógicamente para llegar a la conclusión**, de que dada una acción se llegará a las metas que uno ha definido, y luego actuar sobre esa conclusión. Por otro lado, la inferencia correcta no es toda racional, debido a que hay otras situaciones donde probablemente no hay cosas correctas que hacer, sin embargo, siempre hay que hacer algo. También siempre hay formas de actuar inteligente que no se pueden plantear formalmente para que impliquen una inferencia.

Las “destrezas cognitivas” que requiere el Test de Turing son para permitir acciones inteligentes. Esto es, necesitamos la habilidad para representar el conocimiento y razonar con él, lo que nos permite alcanzar buenas decisiones en una variedad de situaciones. Necesitamos ser capaces de

generar enunciados comprensibles en lenguaje natural debido a que el plantear esos enunciados nos ayuda a sobrevivir en una sociedad compleja. **Necesitamos aprender porque el tener una mejor idea de cómo trabaja el mundo nos permite generar estrategias más efectivas para tratar con él.**

El estudio de la IA con base en el diseño de agentes inteligentes tiene dos ventajas. Primera, es más general que el enfoque de IA simbólica debido a que las inferencias correctas son únicamente un mecanismo útil pero no necesario para lograr inteligencia. Segundo, es más responsable con el desarrollo científico ya que la inteligencia estándar es completamente general.

De la figura 1.1, podemos observar que un **agente inteligente es un ente que percibe y actúa.** El ambiente produce mucha información, que el agente percibe y filtra la información pertinente a través de sus sensores, que llevan información a su modelo mental que la analiza y decide ordenar a los actuadores ejecutar acciones.

Algo interesante de observar también en la figura 1.1 es la connotación humanoide del agente. Algo que de alguna manera lo podemos asumir al vernos como agentes inteligentes: con base en nuestro modelo interno recibimos la información que nos provee el medio ambiente, filtrada por nuestros sensores, la procesamos y la interpretamos para tomar nuestras decisiones, en espera de obtener algún tipo de recompensa.

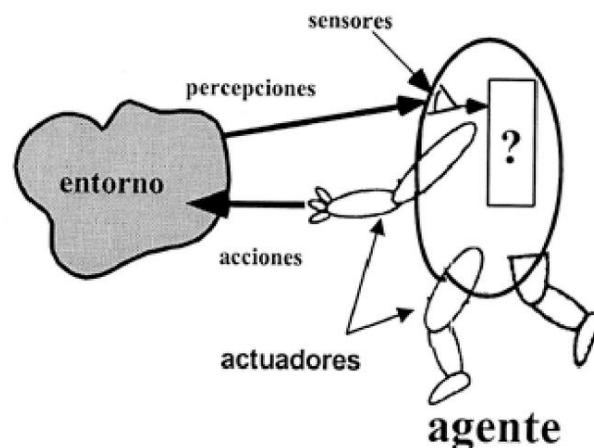


Figura 1.1. Un agente inteligente.

Algo que podemos asumir al vernos como agentes inteligentes: con base en nuestro modelo interno recibimos la información que nos provee el medio ambiente, filtrada por nuestros sensores, la procesamos y la interpretamos para tomar nuestras decisiones, en espera de obtener algún tipo de recompensa.

La mejor decisión nos dará una mejor recompensa. En nuestra competencia, con otros individuos, por esas recompensas seremos más “inteligentes” o no. La recompensa o meta puede ser algo muy simple; o algo mucho más complejo, que puede requerir esfuerzos mayúsculos. Este enfoque se utiliza especialmente en sistemas de Machine Learning con aprendizaje reforzado.

2.4 El enfoque de la vida, sistemas bio-inspirados

Cuando observamos los seres vivos, encontramos que existe una gran diversidad de especies, que aprovechan diversos ecosistemas para mantenerse y reproducirse, producto de un proceso evolucionario complicado y bastante desconocido.

Cada uno de estos seres es autónomo, capaz de autoorganizarse y crear estrategias, para mantenerse vivo y lograr enviar su información genética al futuro. Su lucha permanente con un entorno incierto, la generación de estrategias para atrapar a presas o para eludir predadores, son todas acciones “inteligentes”.

La observación de estos comportamientos y de muchos de los procesos de los seres vivos, para la solución de los problemas que enfrentan, permite pensar en el desarrollo de herramientas de IA. Por ejemplo, del estudio y análisis del proceso evolutivo, del sistema nervioso, del sistema inmune, de cómo se organizan, de cómo se comportan; ha llevado a la creación de muchas herramientas de IA, como son los Autómatas Celulares, los Algoritmos Genéticos, las Redes Neuronales Artificiales y muchas otras.

2.5 El enfoque de datos

Los datos, provienen de hechos reales, irrefutables, que de una u otra manera han sucedido, son verdades. Podemos usarlos para, a través de algoritmos solucionar problemas complejos, ¿que solo soluciona el humano? En el año, 2020, cada uno de los humanos generó, en promedio, alrededor de 1.7 megabits de datos por segundo. Con esta disponibilidad de datos, a través de su estudio, procesamiento y análisis, no solamente es posible construir modelos predictivos de sistemas bastante complejos, sino también obtener ideas útiles, por ejemplo, para hacer crecer los negocios y encontrar soluciones a los problemas de las organizaciones.

Este enfoque es tan importante en este momento que Machine Learning se toma como toda la IA. Veamos la siguiente definición de ML: “ML es la ciencia o el arte de programar los computadores, de manera que puedan aprender a partir de los datos”.

Empresas como Netflix, Amazon y otras, basan sus decisiones en esta tecnología. Esto ha obligado al desarrollo de nuevas ciencias y tecnologías como Ciencia de Datos y Big Data, para producir conjuntos de datos de entrenamiento sin sesgos.

3. Pero ¿qué es inteligencia?

Veamos algunas definiciones de inteligencia, tomadas del artículo de “A Collection of Definitions of Intelligence” de S. Legg y M. Hutter.

“Nos parece que en la inteligencia hay una facultad fundamental, **el juicio**, que es de la mayor importancia para la vida práctica. También se llama buen sentido, sentido práctico, iniciativa, es la **facultad de adaptarse a las circunstancias**”. A. Binet.

“Es la capacidad de **aprender o de sacar provecho de la experiencia**”. W. F. Dearborn

“Capacidad de adaptarse adecuadamente a situaciones relativamente nuevas en la vida”. R. Pinter.

“Una persona posee inteligencia en la medida en que ha aprendido o puede aprender a adaptarse a su entorno”. S. S. Colvin.

“Usamos el término "inteligencia" para referirnos a la **capacidad de un organismo para resolver problemas nuevos**”. W. V. Bingham.

“Un concepto global que involucra la capacidad de un individuo para **actuar a propósito, pensar racionalmente y tratar eficazmente con el medio ambiente**”. D. Wechsler

“Las personas difieren en su capacidad para comprender ideas complejas, de adaptarse efectivamente al entorno, **aprender de la experiencia**, participar en diversas formas de razonamiento, **superar obstáculos mediante la adopción del pensamiento**”. American Psychological Association

"La inteligencia es parte del entorno interno que se muestra en la interfaz entre la persona y el entorno externo como una función de las demandas de tareas cognitivas". R. E. Snow

“... cierto conjunto de capacidades cognitivas que permiten a un **individuo adaptarse y prosperar en cualquier entorno en el que se encuentre**; esas capacidades incluyen cosas como memoria y recuperación, y resolución de problemas, etc. Hay un conjunto de habilidades cognitivas que conducen a una adaptación exitosa a una amplia gama de entornos”. D. K. Simonton

Resaltemos algunas frases de estas definiciones: mayor importancia para la vida práctica; aprender o sacar provecho de la experiencia; adaptarse adecuadamente; ha aprendido o puede aprender; resolver problemas nuevos; superar obstáculos; adaptarse y prosperar en cualquier entorno dado. Estas frases conllevan metas, aprendizaje, memoria, adaptación e incertidumbre sobre el ambiente.

Sin embargo, no aparece la variable tiempo, básica a la “inteligencia”. Por lo que incluimos un sinónimo como “rápidamente” y decir: adaptarse adecuadamente rápidamente; ha aprendido o puede aprender rápidamente; resolver problemas nuevos rápidamente; adaptarse y prosperar en cualquier entorno rápidamente. Aunque es claro que en algunos casos no funcione tan bien.

Con lo anterior tenemos las siguientes palabras-clave: meta, aprendizaje, memoria, adaptación, incertidumbre, tiempo. Lo que nos lleva a la siguiente definición: “Un agente inteligente es aquel que tiene una meta definida, utiliza la experiencia almacenada en su memoria, lo que le permite interactuar con un ambiente dinámico, adaptándose y tomando decisiones en un tiempo prudencialmente mínimo”.

Volviendo al agente, de la figura 1.1, tenemos que todo lo que hace el individuo inteligente está controlado por su cerebro, las vastas redes neuronales, que se han ido conformando topográficamente, para permitirle a ese individuo la interacción exitosa con el ambiente dinámico.

Por otra parte, una de las estrategias de la biología, para lograr la creación del individuo, ha sido la de proveer miles de soluciones al problema de la incertidumbre del ambiente. De esta manera, algunas de esos miles de soluciones, un muestreo de la explosión exponencial de soluciones podrá interactuar exitosamente con ese ambiente y enviar su información genética al futuro, mientras las otras simplemente fracasarán en el proceso. En cada generación, a través de siglos de experimentación con todo tipo de ambientes, esa información genética se ha ido filtrando para dar lugar a individuos con todas las aptitudes biológicas para enfrentar esos nuevos ambientes

desconocidos. Los procesos de **selección, cruce y mutación** son los responsables de esos seres exitosos que habitan toda la biomasa, es la evolución.

Otra estrategia de la biología es que, a partir de la información genética conformada por seres exitosos, se logra la creación de un cigoto o huevo, o programa genético. Este programa se ejecuta a través de la replicación de las células. Cada replicación de una célula se ejecuta con base en reglas seleccionadas del ADN por su vecindad con otras células. Es un autómata celular. La ejecución de este programa es autónoma y permite la creación permanente de los seres vivos.

4. Sistemas

Un **sistema** es un conjunto de elementos, componentes, subsistemas, agentes; que están ligados a través de enlaces, vecindades, canales; de alguna manera. Esta ligazón genera un comportamiento nuevo, **emergente**, que generalmente no es propio de ninguno de los elementos o agentes que componen el sistema.

Generalmente utilizamos el término sistema en diferentes circunstancias, una como forma de tratar de comprender el mundo, segmentándolo y haciéndolo más asequible, así hablamos del sistema de transporte, sistema de gobierno, sistema de salud, sistema de educación y de muchos otros; y otra, la más común, dada la necesidad de interactuar permanentemente con varios de ellos, debemos tomar decisiones, tanto como personas como sociedad, en cada aspecto y momento de la vida, basados en la predicción de los comportamientos de los sistemas que nos rodean. De manera general, podemos decir que el secreto de una buena interacción con los sistemas, ser “inteligentes”, se encuentra en el tipo de herramientas que utilizamos para hacer la predicción de sus comportamientos.

4.1 Clasificación general de los sistemas

La ciencia actual normalmente considera aspectos simplificados de la realidad. Abstrae un subconjunto de propiedades del fenómeno que estamos estudiando y desarrolla fórmulas matemáticas, que de alguna manera modelan y predicen su comportamiento. Sin embargo, muchos de los comportamientos de la naturaleza no son apropiados para este tipo de simplificación, pues surgen como el resultado de interacciones complejas entre sus diferentes componentes y su ambiente. Aquí aparece una primera gran clasificación: Sistemas Lineales (SL) y Sistemas No Lineales, (SNL).

Sistemas Lineales

Generalmente nuestro comportamiento cotidiano frente a las circunstancias diarias responde a que las situaciones habituales con las que tratamos permanentemente se repiten en el tiempo. Podemos decir que presentamos un comportamiento “normal”, salimos a una determinada hora, realizamos nuestro trabajo y volvemos a la casa a la hora acostumbrada. Podemos hacer predicciones sobre horas de llegada, horas de salida, y de toda una serie de actividades que desarrollamos diariamente. Nuestro modelo mental del mundo se basa en nuestra experiencia acumulada, suponiendo que nuestro modelo es estático. Este comportamiento normal se debe a que nuestra interacción se realiza en la zona lineal de un conjunto de sistemas no lineales. Este comportamiento normal comúnmente se asocia directamente con la eficiencia. Tenemos así, que si quiero llegar lo más pronto a otro sitio de la ciudad debo ir más rápido, si trabajo

más, produzco más artículos, si estudio más aprendo más (?). Son relaciones proporcionales que se olvidan de muchos detalles, que solamente son válidas en casos especiales, en los que, los SNL se encuentran en su zona lineal. Comencemos entonces por definir lo que es un sistema lineal.

Superposición. Se presenta si al excitar el sistema con una señal de entrada $u_1(t)$ se produce una señal de salida $y_1(t)$; y si al excitar el sistema con una señal de entrada $u_2(t)$ se produce una señal de salida $y_2(t)$; entonces cuando el sistema se excita con una entrada $u_1(t) + u_2(t)$, el sistema produce una salida $y_1(t) + y_2(t)$, Ver figura 1.2.

Veamos un ejemplo en términos comunes. Supongamos que cuando se trabaja un sistema de producción durante una hora se producen 10 artículos. Ahora, si se trabaja en el mismo sistema durante tres horas se producen 30 artículos; entonces cuando se trabaja, en el mismo sistema de producción, durante cuatro horas se producen 40 artículos. Hay una relación de proporcionalidad.

Homogeneidad. Se presenta si al excitar el sistema con una señal de entrada $u_1(t)$; produce una señal de salida $y_1(t)$; y si se excita el sistema con una señal de entrada $b_1 u_1(t)$; donde $b_1 \geq 0$ es un multiplicador, el sistema produce una señal salida $b_1 y_1(t)$. Ver figura 1.3.

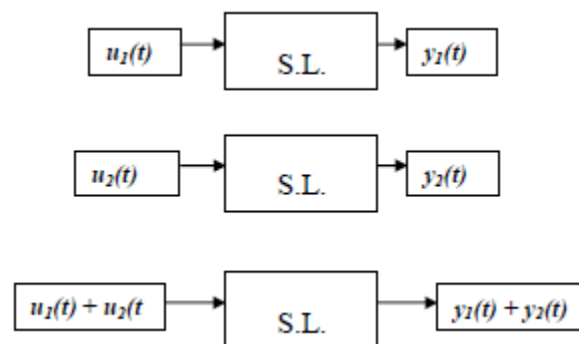


Figura 1.2. Principio de superposición de los Sistemas Lineales.

Continuando con el ejemplo anterior se tendría que si se trabaja en un sistema de producción durante una hora se producen 10 artículos; si se trabaja en el mismo sistema durante un millón de horas se producirían 10 millones de artículos. Si el sistema de producción cumple con esto se tendría que es homogéneo. En este caso la estructura interna del sistema siempre responde, independientemente del número de horas de trabajo. Sin embargo, en la práctica no existe ningún sistema homogéneo, lo que hay son ciertas regiones donde el SNL es homogéneo.

En los Sistemas Lineales, no hay necesidad de estudiar el todo, si se estudia una parte del sistema y se obtienen ciertas características, estas se pueden expandir y asimilarlas a todo el sistema, esto se conoce como el enfoque “reduccionista”; por ejemplo, en el estudio de materiales de ingeniería, es común tomar una parte de material, una probeta, con ella realizar diferentes pruebas y obtener sus características físicas. Se supone que todo el material también posee las mismas características, aunque el ingeniero en sus diseños incluye un factor de seguridad, que lo que hace en el fondo es tratar de homogeneizar las propiedades del material.

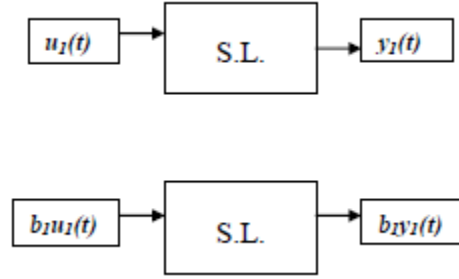


Figura 1.3. Principio de homogeneidad de los Sistemas Lineales.

Otra forma de pensar la linealidad es considerar que el comportamiento de un sistema es la suma de los comportamientos de sus componentes del sistema.

Por circunstancias históricas del desarrollo del pensamiento occidental y del pensamiento científico, este tipo de pensamiento, el pensamiento líneal, reduccionista, ha permeado la sociedad. En ese sentido muchas de las predicciones que se hacen sobre el comportamiento de todo tipo de sistemas es considerándolos como sistemas lineales. Es uno de los lastres de nuestra sociedad actual. Los SNL simplemente son sistemas que no cumplen con los principios de superposición y homogeneidad. Pero veamos otra clasificación que nos abarca todo tipo de sistemas, a partir de un modelo matemático generalizado.

4.2 Modelo de sistema matemático generalizado

Vamos a comenzar con un modelo matemático generalizado de lo que es un sistema, considerando sus agentes, sus relaciones y cómo se relaciona el comportamiento de los agentes con el comportamiento global del sistema. Como modelo abstracto es aplicable a cualquier sistema.

Un sistema S se puede definir como el par $S = \{A, R\}$, donde A es el conjunto de agentes que conforman el sistema y R es el conjunto de relaciones o enlaces existentes entre los agentes A del sistema S .

Se define Q como alguna medida del comportamiento emergente del sistema S , a partir de los comportamientos q de cada uno de los componentes A del sistema S , que expresamos como¹:

$$Q = f(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

Donde q_i es el comportamiento del agente a_i para $i = 1, \dots, n$

Ahora para encontrar el comportamiento dinámico del sistema S en el tiempo, en función del cambio de comportamiento de cada uno de los agentes, hacemos:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{df}{dq_1} \frac{dq_1}{dt} + \frac{df}{dq_2} \frac{dq_2}{dt} + \dots + \frac{df}{dq_n} \frac{dq_n}{dt}$$

¹ Ecuación 3.1, página 56, General Systems Theory, L. von Bertalanffy, 1968

Por otro lado,

$$\frac{dq_1}{dt} = f'(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = f'(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

...

$$\frac{dq_n}{dt} = f'(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

Es claro que el resultado de la derivada es diferente para el cambio de comportamiento de cada agente. Entonces ahora, vamos a clasificar **todos** los sistemas a partir de estas ecuaciones, en: Sistemas Simples, Sistemas Complicados, Sistemas Caóticamente Desorganizados y Sistemas Complejos.

Sistemas Simples

En los sistemas simples, $S_s = \{A_s, R_s\}$, el número de agentes A_s es muy bajo, del orden de 2 o 3 o máximo 4 agentes y el conjunto de relaciones entre esos agentes R_s está definido formalmente, matemáticamente. Además, se conoce el comportamiento de cada agente. Luego no hay ningún problema en encontrar cambios o hacer predicciones en el sistema cuando cambia alguno de los agentes. Por ejemplo, todos los sistemas eléctricos, están compuestos de tres agentes fundamentales: resistencias, condensadores y bobinas. Veamos la ecuación que incluye estos tres elementos en una malla figura 3.1, que tiene una fuente $v(t)$:

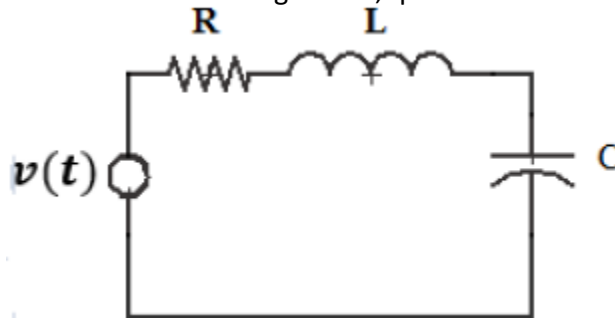


Figura 1.4. Circuito eléctrico con los tres agentes universales.

$$L \frac{di}{dt} + Ri + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i dt + v_c(t_0) = v(t)$$

Donde R es la resistencia, L es la inductancia de la bobina, C la capacitancia del condensador e i es la corriente que fluye por el circuito. $v_c(t_0)$ es la carga del condensador en tiempo cero. Donde sus agentes son R , L y C , con todos sus operadores lineales como son la multiplicación, la derivada y la integral. Los sistemas que se estudian en diferentes ramas de la ingeniería son sistemas lineales, a los que se ha llegado a través de diferentes abstracciones. Así en el caso de los sistemas mecánicos, muchas de sus ecuaciones son iguales a las de los circuitos eléctricos. De esta manera, tenemos que, para este tipo de sistemas, las analogías permiten el estudio de diferentes sistemas sin importar su composición física.

Podríamos incluir aquí también, los sistemas de inteligencia artificial trabajados con el enfoque de inteligencia artificial simbólica, como es el caso de los sistemas con ambientes completamente controlados, donde tenemos todo completamente formalizado, ver figura 1.5.

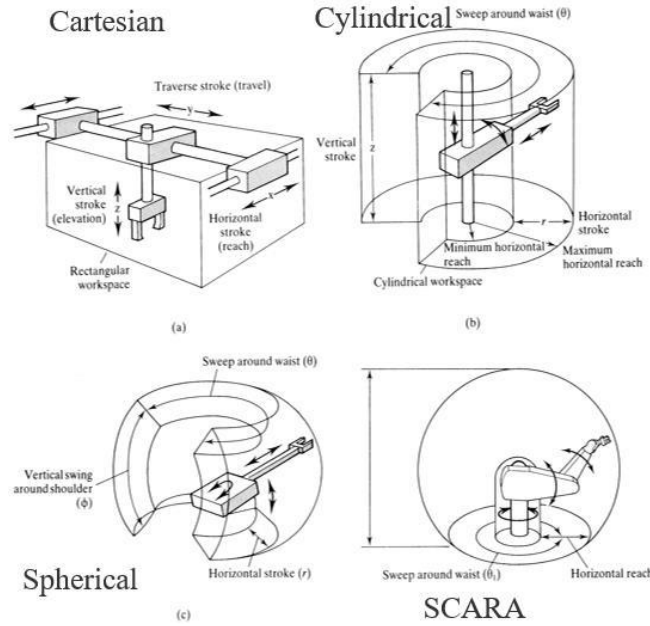


Figura 1.5. Sistemas de desplazamiento robóticos, todos los podemos expresar con ecuaciones.

Sistemas Complicados

En los sistemas complicados, $S_c = \{A_c, R_c\}$, el número de agentes A_c no es muy alto; y el conjunto de relaciones R_c entre los comportamientos de los agentes es $= \{\emptyset\}$. Además de que el comportamiento de cada agente es independiente, también es constante. En otras palabras:

$$\frac{dq_1}{dt} = f'(q_1)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = f'(q_2)$$

...

$$\frac{dq_n}{dt} = f'(q_n)$$

De manera que:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{df}{dq_1} f'(q_1) + \frac{df}{dq_2} f'(q_2) + \dots + \frac{df}{dq_n} f'(q_n)$$

El comportamiento dinámico del sistema depende del comportamiento de cada agente individual. Básicamente son los sistemas tecnológicos, contruidos por el hombre a través de procesos de ingeniería, siguiendo ciertos procedimientos y diseñados para un ambiente determinado. Su comportamiento no es lineal, pero es completamente predecible.

Por ejemplo, un carro. Está diseñado para que en el ambiente haya oxígeno disponible para que con el combustible explote en los cilindros del motor. Además, requiere una estructura de

carreteras sobre las cuales se desplace con seguridad, siguiendo un reglamento de tránsito, a unas determinadas velocidades, llevando un determinado número de personas. El consumo de combustible es casi proporcional a los recorridos que realiza. Además, cuando un carro se daña, se siguen procedimientos muy precisos, complicados, pero que a la larga permiten su arreglo.



Figura 1.6. Sistemas complicados.

Es interesante observar que estas piezas se modelan en sistemas CAD, que obedecen a una serie de ecuaciones matemáticas. Son el producto de sistemas simples.

Sistemas Caóticamente Desorganizados

En los sistemas caóticamente desorganizados, $S_{cd} = \{A_{cd}, R_{cd}\}$, el número de agentes A_{cd} es alto o muy alto. El conjunto de relaciones R_{cd} entre los comportamientos de los agentes es $= \{\emptyset\}$. En estos sistemas cada agente se comporta de manera independiente de los otros agentes y su espacio de estados es el mismo. En momentos diferentes un agente que estaba en un estado puede cambiar a otro estado independientemente, de manera que, para este caso podemos suponer que sus comportamientos son similares, $f'(q_i) = f'(q)$.

$$\frac{dq_1}{dt} = f'(q)$$

$$\frac{dq_2}{dt} = f'(q)$$

...

$$\frac{dq_n}{dt} = f'(q)$$

De manera que:

$$\frac{dQ}{dt} = \frac{df}{dq_1} f'(q) + \frac{df}{dq_2} f'(q) + \dots + \frac{df}{dq_n} f'(q)$$

Entonces

$$\frac{dQ}{dt} = n \frac{df}{dq} f'(q)$$

Se ve aquí que el comportamiento de los sistemas caóticamente desorganizado es la sumatoria de los comportamientos de sus agentes, por eso para el estudio y predicción del comportamiento de estos sistemas se aplica toda la teoría estadística.



Figura 1.7. Sistemas caóticamente desorganizados

Sistemas Complejos

En los sistemas complejos, $S_{co} = \{A_{co}, R_{co}\}$, el número de agentes A_{co} es relativamente alto. El conjunto de relaciones R_c entre los comportamientos de los agentes no se puede plantear en términos formales dado que el comportamiento de un agente puede influir de diversas maneras en el comportamiento de otros agentes. Así que si tomamos:

$$\frac{dq_1}{dt} = f'(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

Derivando

$$\frac{dq_1}{dt} = \frac{\partial f''}{\partial^2 q_1} \frac{\partial^2 q_1}{dt} + \frac{\partial f''}{\partial^2 q_2} \frac{\partial^2 q_2}{dt} + \dots + \frac{\partial f''}{\partial^2 q_n} \frac{\partial^2 q_n}{dt}$$

Ahora,

$$\frac{\partial^2 q_1}{dt} = \frac{\partial f'''}{\partial^3 q_1} \frac{\partial^3 q_1}{dt} + \frac{\partial f'''}{\partial^3 q_2} \frac{\partial^3 q_2}{dt} + \dots + \frac{\partial f'''}{\partial^3 q_n} \frac{\partial^3 q_n}{dt}$$

Podemos seguir derivando, no sabemos hasta donde, para tener el cambio de comportamiento de solo el agente q_1 del sistema. Lo mismo se debe considerar para el resto de los agentes del sistema. Y una vez tengamos todos esos comportamientos ver cómo se obtiene el comportamiento dinámico de todo el sistema. Dado que no podemos conocer estos comportamientos, tampoco podemos conocer el comportamiento global del sistema, en otras palabras, no podemos predecir, desde esta perspectiva, el comportamiento de un sistema complejo.

Estos sistemas pueden ser Sistemas Complejos No-adaptativos, SCN o Sistemas Complejos Adaptativos, SCA. Esta diferencia hace referencia al uso de la información y del conocimiento,

por parte de los sistemas. Los SCN, no guardan información, ni utilizan conocimiento para tomar las decisiones que conforman su comportamiento, como por ejemplo el tiempo atmosférico, son sistemas sin propósito. Mientras que los SCA, sí cambian de comportamiento con base en la información disponible y el conocimiento retenido. Este es uno de los nichos de aplicación más importante de la IA: tratar de predecir el comportamiento de estos sistemas, que en principio son imposibles de pronosticar. Es en este tipo de sistemas donde se utilizan todos los otros enfoques de la Inteligencia Artificial. Por otra parte, la vida se considera como el sistema complejo más trascendente con el que se ha encontrado el hombre.

Complejidad computacional. Otro tipo de complejidad es la *complejidad computacional* que tiene que ver con el costo computacional en términos de tiempo de ejecución de un algoritmo. Casi que la totalidad de algoritmos que se ejecutan actualmente en los computadores tiene un tiempo de ejecución proporcional al número de transacciones o datos que procesan, es una relación lineal. Sin embargo, hay algoritmos cuyo tiempo de ejecución crece exponencialmente o más, con el número de transacciones o datos que procesan. Por ejemplo, en el Sudoku, el crecimiento es impresionante. Un sudoku de tamaño 2x2 tiene 288 diferentes combinaciones, mientras uno de 3x3, el más popular, tiene aproximadamente 6.7×10^{21} posibles configuraciones; y el de 4x4, tiene aproximadamente 6×10^{98} . Claramente encontrar la solución usando el método de fuerza bruta es imposible. Este es otro nicho donde se requieren técnicas de IA para la solución.

5. Autómatas

La visión Newtoniana del mundo permitió predecir la posición de los cuerpos celestiales en determinado momento, entonces, ¿no sería la vida igualmente predecible? Emergió una nueva escuela de pensamiento, **que consideraba la vida como un proceso mecánico**. Así, la vida era literalmente un autómata. ¿Se podría entonces duplicar? Meticistas como Descartes y Leibnitz pensaron que había posibilidad de hacerlo. Algunos se atrevieron, y construyeron una clase especial de autómatas, dispositivos mecánicos que mostraban cierto comportamiento realista.



Figura 1.8. (a) Autómata dibujante de H. Maillardet, construido en 1805. (b) Dibujo producido por el autómata en cinco minutos².

La segunda mitad del siglo XVIII fue bastante productiva en la construcción de estos autómatas como el de la figura 1.8, hecho por Henry Maillardet, donde la memoria está hecha con base en engranajes, que dibujan el barco.

5.1 Máquinas de Turing

En los años 1920s el matemático David Hilbert, abogó por que la meta primaria de los investigadores era que las matemáticas se debían establecer sobre una base sólida de axiomas, consistente y demostrable, a partir de los cuales, en principio, se pudieran deducir todas las verdades matemáticas.

En 1928, Hilbert formuló el *Entscheidungsproblem* (problema de la decisión): ¿se puede idear un procedimiento efectivo que evidencie si, en un tiempo finito, cualquier proposición matemática ¿es o no es demostrable a partir de un conjunto de axiomas? Aquí se presentan tres aspectos. Primero, *Consistencia*: el conjunto de axiomas debe ser consistente y demostrable. Segundo, *Completos*: todas las verdades matemáticas deben ser, en principio, deducibles a partir de estos axiomas. Tercero, *Decidibilidad*: debe haber un procedimiento claramente formulado, que, dado cualquier enunciado matemático, se pueda definitivamente establecer, dentro de un tiempo finito, sí se llega o no a ese enunciado a partir de los axiomas dados. En términos formales se entiende que en un sistema consistente nunca es posible demostrar que una proposición **P** así como su negación **not(P)** son verdaderas. Y un sistema completo es aquel en el que siempre es posible probar **P** o **not(P)**, para cualquier proposición **P** expresable dentro del sistema.

Trabajando sobre este problema, Kurt Godel publicó en 1931 dos teoremas, conocidos como los teoremas de incompletes de Godel, que enunciados en términos informales dicen:

1. Todo sistema completo es inconsistente
2. Todo sistema consistente es incompleto



Figura 1.10. Un problema de indecisión³.

² Glorioso R., Colón, Engineering Intelligent Systems, p. 417

³ Personal

Aunque Godel demostró que cualquier sistema axiomático consistente de la aritmética deja algunas verdades aritméticas imposibles de demostrar, esto no descarta la existencia de algún procedimiento de decisión "efectivamente computable", que infaliblemente, y en un tiempo finito, revele si o no cualquier proposición **P** es o no verdadera es demostrable, dejando pendiente el *Entscheidungsproblem*.

En 1936, Alan Turing publicó su artículo "Sobre números computables, con una Aplicación al *Entscheidungsproblem*", alrededor de ver el problema de indecisión como: ¿existe un algoritmo que pueda decidir si una proposición es cierta o ¿por el contrario es falsa? En el artículo planteó, su contribución esencial, la noción rigurosa de computabilidad basada en lo que luego se conoció como la "Máquina de Turing".

Hasta ese momento, todos los mecanismos de autómatas conocidos eran de propósito particular, es decir, que todo mecanismo o autómata, se hizo para realizar solo una tarea determinada. Sin embargo, la idea de autómata tal y como se utiliza hoy día, y que da lugar a la teoría de autómatas, aparece con la formulación de la "Máquina de Turing"⁴.

Para su trabajo Turing, primero definió intuitivamente algoritmo como un procedimiento que se puede ejecutar mecánicamente. Luego definió el cómputo, como aquel proceso en el que un algoritmo se descompone en una secuencia de pasos atómicos simples, y concluyó que el sistema resultante es una construcción lógica, conocida como la Máquina de Turing.

Turing supuso que nuestro universo es granular; que se mueve a pasos discretos en el tiempo, aunque esos pasos pueden ser tan pequeños como uno se imagine. En cada uno de estos instantes, una MEF (Máquina de Estado Finito) se encuentra en algún estado que se puede describir. La descripción puede ser muy complicada o simple; la única limitación es que el conjunto de posibles estados sea finito (el número puede ser muy grande pero no infinito). Entre el instante actual y el siguiente, la MEF, por medio de algún sensor puede tomar la información del ambiente que la rodea. Entonces con base en una "tabla de reglas" que controla su comportamiento, la MEF puede tener en cuenta ambos datos, su estado interno y la entrada externa del ambiente para determinar su comportamiento en el siguiente paso del tiempo, es decir, el estado interno que la máquina debe tomar en el próximo paso.

Formalmente se puede definir una máquina de Turing como la tupla:

$$A = (X, Q, \{I, D, P\}, f)$$

X : Conjunto finito de entradas x_i

Q : Conjunto finito de estados q_i

$$f: Q \times X \rightarrow Q \times X \times \{I, D, P\}$$

I : Movimiento del autómata una posición a la izquierda sobre la cinta

D : Movimiento del autómata una posición a la derecha sobre la cinta

P : Parada del autómata en la posición actual de la cinta

La Máquina de Turing se puede visualizar como una grabadora sofisticada, con una cinta arbitrariamente extensible, ver figura 1.10. La cinta está marcada por cuadros y cada cuadro

⁴ DEWDNEY A. K., The Turing Omnibus, 1989.

contiene un bit de información. La cabeza lectora, lee los bits y si es necesario borra lo que hay en el cuadro y/o graba encima. Hay también un mecanismo de control, el cual dice qué hacer, al leer cada bit de información.

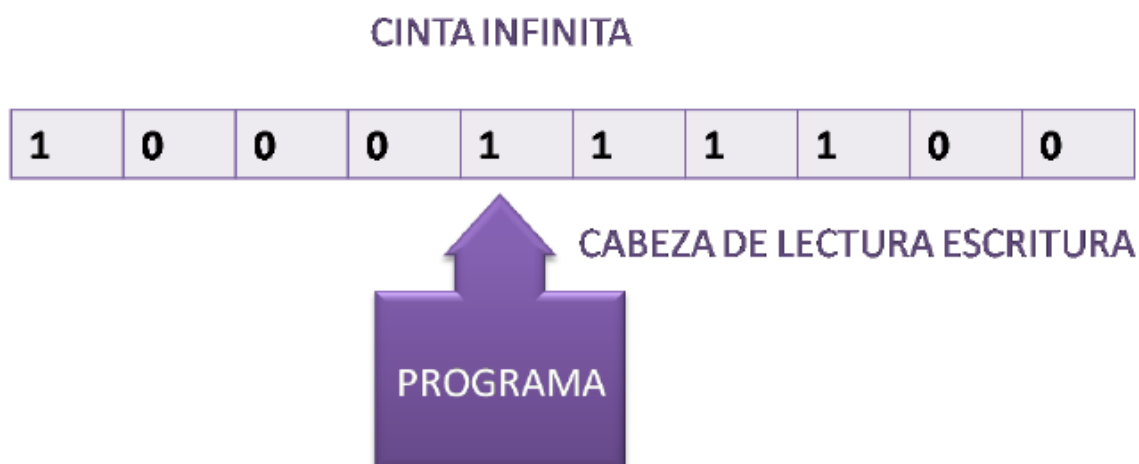
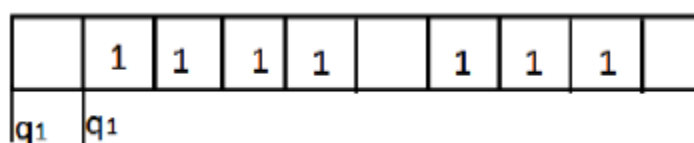


Figura 1.7. Visualización de una máquina de Turing.

Vamos a trabajar un ejemplo sencillo, la suma de dos números, para ver cómo se efectúa la operación en una máquina de Turing. En la Tabla 1.1 se describe la Máquina de Turing para la suma de dos números, expresados en formato (i + 1) unos, es decir, que el 3 se representa como 1111.

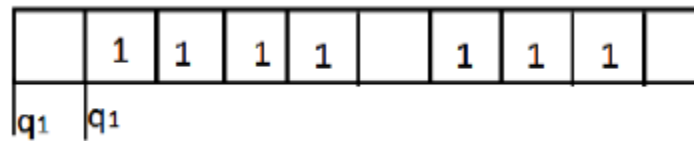


Estado inicial de la cinta.

La disposición inicial de la cinta, incluye el número tres y el número 2, separados por un “ ”. Los símbolos del conjunto X son {“ ”, 1}. El autómata comienza en el estado q₁, lee el “ ” a la izquierda del primer número. Siguiendo la Tabla 1.1, va al estado q₂, y se desplaza una posición a la izquierda.

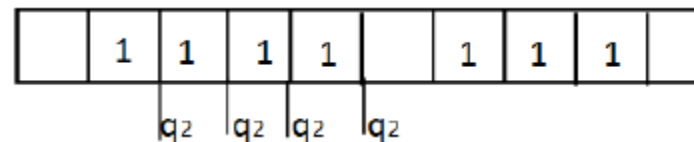
ESTADOS	ENTRADAS	
	“ ”	1
q ₁	q ₁ / d	q ₂ / d
q ₂	q ₃ / 1	q ₂ / d
q ₃	q ₄ / iz	q ₃ / d
q ₄	-	q ₅ / “ ”
q ₅	q ₅ / iz	q ₆ / “ ”
q ₆	q ₆ / p	q ₆ / p

Tabla 1.1. Máquina de Turing para sumar de dos números. / d, indica que la cabeza lectora se desplaza una posición a la derecha; / izq, desplazamiento una posición a la izquierda; / p, parada; / “ ”, escribe un blanco en la cinta, /1 escribe un 1 en la cinta.

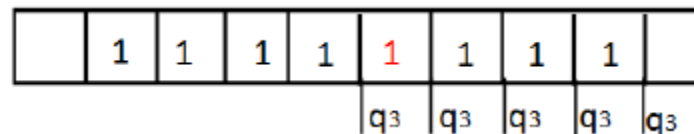


Estado inicial de la cinta.

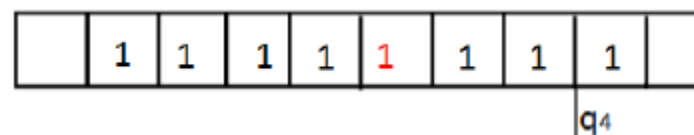
La disposición inicial de la cinta, incluye el número tres y el número 2, separados por un “ ”. Los símbolos del conjunto X son {“ ”, 1}. El autómata comienza en el estado q₁, lee el “ ” a la izquierda del primer número. Siguiendo la Tabla 1.1, va al estado q₂, y se desplaza una posición a la izquierda.



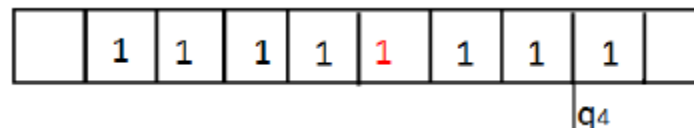
En el estado q₂, lee un 1, el autómata sigue en el estado q₂ y se desplaza una posición a la derecha. Mientras lee un 1, sigue en el estado q₂ desplazándose una posición a la derecha.



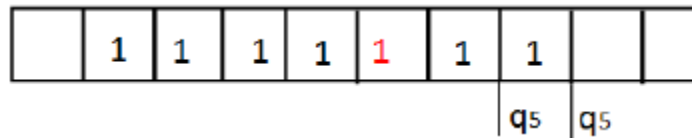
Está en el estado q₂ y lee un “ ”, graba en esa posición un 1 y pasa al estado q₃. Estando en el estado q₃ y lee un 1, el autómata se desplaza una posición a la derecha. Mientras lee un 1, sigue en el estado q₃ desplazándose una posición a la derecha.



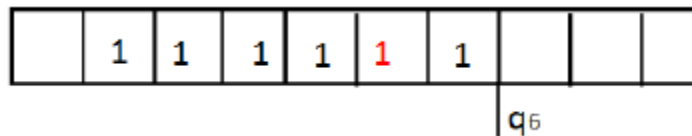
En el estado q₃ lee un “ ”, se desplaza una posición a la izquierda y pasa al estado q₄.



En el estado q₄ aparece un 1, que hace que la máquina pase al estado q₅ y grave en esa posición un “ ”.



En el estado q_5 lee un “”, el autómata sigue en q_5 y se desplaza una posición a la izquierda. Estando en q_5 lee un 1, graba en esa posición un “” y pasa al estado q_6 . Al llegar al estado q_6 , independientemente de la entrada, la máquina se detiene.



Como se puede ver el resultado es 5, expresado en la notación $(i + 1)$ unos, que es la respuesta correcta.

Ahora, consideremos que las reglas del autómata son un programa, mientras que las cadenas de símbolos en la cinta de memoria son los datos iniciales sobre los que opera dicho programa. Al cambiar las reglas que conforman el programa, encontramos diferentes salidas para los mismos datos iniciales; entonces diremos que los programas son diferentes o que las máquinas son diferentes. Pero qué pasa si el programa lo almacenamos en otra Máquina de Turing, con un conjunto mucho mayor de símbolos de entrada; incluso podríamos modificar las reglas, y tendríamos un programa diferente, con otras salidas.

Entonces llamamos Máquina de Turing Particular (MTP) a aquella máquina que, con un esquema de interacciones básico, posee también una cadena de símbolos como entrada y/o programa. Y llamaremos Máquina de Turing Universal (MTU) a una sin tal lista de símbolos y, por lo tanto, dispuesta a recibir cualquier programa que le podamos proporcionar.

Fácilmente se comprende su potencialidad y el siguiente principio: toda MTU se puede programar para que opere (simule) una MTP. De manera que las propiedades de una MTU no se pueden deducir de las propiedades de una determinada MTP, sino de las propiedades del conjunto potencial de todas las MTP. Este conjunto es el que forman todas las posibles máquinas con cintas de tamaño 1, 2, 3, etc.

Lo que hace que la MTU sea extremadamente poderosa es la capacidad de almacenamiento de su cinta. Con la información adecuada, la MTU puede emular las acciones de diferentes máquinas. Turing probó que la Máquina de Turing Universal puede también ser un computador universal. Esto significa que, dándole el tiempo suficiente, puede emular cualquier máquina cuyo comportamiento se pueda describir completamente.

Extendiendo este concepto a nuestra mente, se puede decir que en cualquier instante una mente se encuentra en un posible estado. Antes del próximo instante, pueden llegar datos de las entradas sensoriales. La información ambiental, en combinación con el estado inicial y las reglas culturales o adquiridas por aprendizaje, determinan el próximo estado de la mente. Turing aseveraba que la mente, como una MTU, seguía un protocolo lógico, esencialmente, una tabla de reglas determinada por fuerzas culturales, físicas y biológicas, para llegar a ese estado próximo.

5.2 Autómata auto-reproductor de von Neumann

Von Neumann estaba interesado en la auto-reproducción. En la construcción del primer computador electrónico, investigó sobre dispositivos basados en operaciones lógicas. Admitió que los organismos biológicos son complejos, más complicados que cualquier estructura artificial que el hombre hubiera examinado y que la vida estaba basada en la lógica, consideraba la vida misma como una concatenación reconstruible de eventos e interacciones.

En 1943 von Neumann leyó el artículo de W. McCulloch y W. Pitts, "A Logical Calculus of the Ideas Immanent in Nervous Activity", donde presentan un modelo para emular las funciones del sistema nervioso: una red neuronal artificial. Von Neumann asoció este desarrollo con la aseveración de Turing: una MTU puede emular cualquier sistema de computación. Aquí estaba un sistema que sugería que los organismos vivos, en sí mismos, tenían un sistema de computación innato, cuya salida determinaba su comportamiento.

De esta manera, un computador universal puede semejar las funciones mentales de cualquier criatura viviente. No se necesita construir la máquina real para entender el mensaje: la vida es una clase de autómata. Von Neumann se dio cuenta que la biología ofrecía el sistema de procesamiento de información más eficaz y su emulación sería la llave hacia sistemas artificiales poderosos.

En 1948, fue invitado a dar una serie de conferencias, la más famosa en Pasadena, California, "Teoría Lógica y General de los Autómatas". Por "autómata" von Neumann se refiere a máquinas auto-operativas; una máquina cuyo comportamiento se define en términos matemáticos. Von Neumann no vio ninguna razón por la cual los organismos, no se pudieran ver como máquinas, y viceversa. Si se entienden los autómatas, entonces, no solamente se entienden mejor las máquinas, se entiende la vida. Lo más importante, el concepto de auto-reproducción. Puede una máquina artificial producir una copia de sí misma, ¿estaría en capacidad de crear más copias?

Entonces, diseñó una criatura artificial, que asumiría esta función, la auto-reproducción. Así que hizo una lista completa de las partes requeridas y escribió las instrucciones para la construcción del autómata, robot, que copió en una cinta **D**. El hábitat del Autómata auto-reproductor era un depósito de componentes con los que se hacía el autómata. Se constituía de tres subsistemas principales. El subsistema **A**, una especie de fábrica, que podía tomar componentes del depósito y ensamblarlas según las instrucciones **D**. El subsistema **B** funcionaba como una fotocopidora: su trabajo era copiar las instrucciones **D**. El subsistema **C**, el mecanismo de control, le dice al subsistema **A** cómo construir el autómata siguiendo **D**, y le da la orden para que **B** saque una copia de las instrucciones **D**, y la inserte en el autómata que acababa de construir en su subsistema **A**. Cuando se produce el primer robot automáticamente envía las instrucciones **D** a **C**, que ordena a **A** para que arme un nuevo robot y una vez finalizada su construcción, se le saque una fotocopia en **B** de las instrucciones **D** y la almacene en **A**.

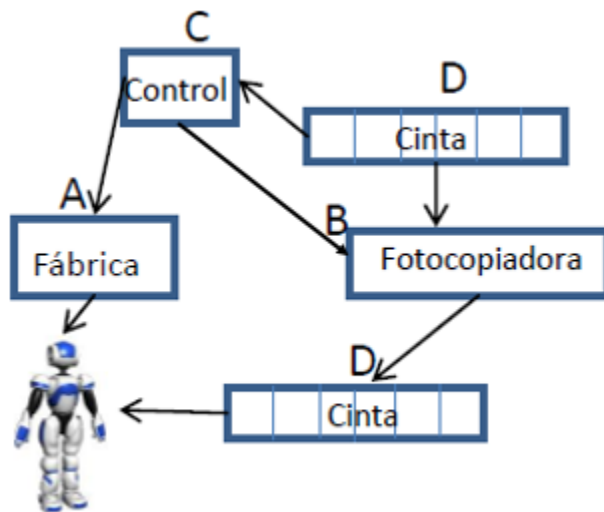


Figura 1.8. Hábitat del autómata auto-reproductor de von Neumann.

En la mente de von Newman se inició la auto-reproducción, y el autómata tomó vida, siguiendo las instrucciones de la cinta. El componente C leyó las instrucciones, las suministró al duplicador el cual las copió y dio las instrucciones duplicadas a la fábrica, mientras almacenaba las originales.

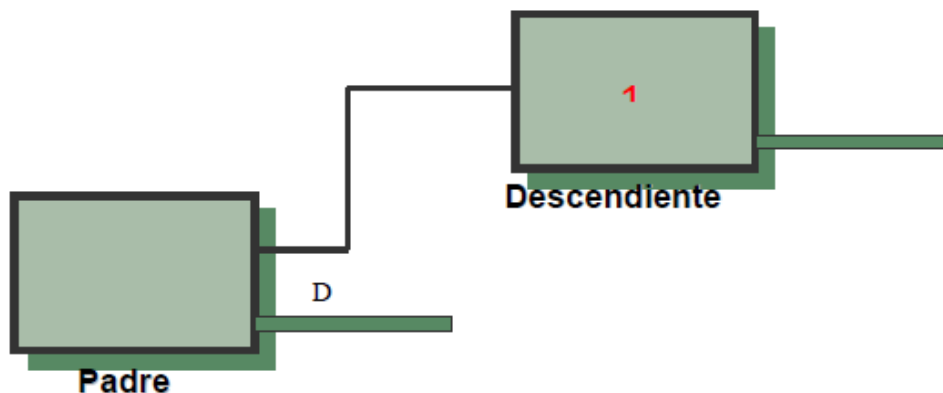


Figura 1.9. Autómata auto-reproductor de von Newman.

No solo estos autómatas se reproducían como nosotros, sino que, con el paso del tiempo, tenían la posibilidad de desarrollarse hacia algo más complejo que su estado original. Pues es posible que, en el proceso de copiado de **D**, a través de muchas generaciones y muchos autómatas, se produjeran defectos en **D**, que impedirían la reproducción de los autómatas que los incluyeran o beneficiaran a otros haciéndolos más competitivos.

Pero, este primer autómata tenía un defecto fatal, incluía muchas cajas negras. Algunos matemáticos y físicos dejaron de lado el problema de las cajas negras, dedicándose a trabajar en estructuras auto-reproductivas menos ambiciosas. Estas construcciones, mucho más modestas tenían la ventaja de existir. En este punto von Newmann de nuevo anticipó el fenómeno. Su estudio de sistemas naturales lo llevó a considerar instintivamente que la vida estaba fundamentada no solo de información sino también de complejidad.

El modelo de Von Newmann tenía problemas y su solución provino del matemático Stanislaw Ulam. Ulam sugirió, inspirado en el crecimiento de un cristal, un ambiente diferente: una rejilla infinita,

como un tablero de damas. Cada cuadro se podría ver como una “celda”. Cada celda sería una MTU, actuando sobre un conjunto de reglas común. Cada celda guardaría información, su estado, y en cada intervalo de tiempo observaría las celdas a su alrededor y consultaría la tabla de reglas para determinar su estado en el próximo paso. La colección de celdas de la rejilla se podría ver como un organismo. A partir de esta sugerencia, von Newmann rediseñó su autómata auto-reproductor, lo que se conocería como el primer autómata celular⁵ (AC).

Este modelo celular de autómata auto-reproductor, empezó con un tablero de damas sin fronteras, con cada celda en un estado activo, de 29 estados diferentes. La combinación precisa de esas celdas y sus estados era lo que realmente definía la criatura. Cada celda individual, como una MUT, seguiría la regla que se le aplicara. El efecto de estos comportamientos locales provocaría la emergencia de un comportamiento global: la estructura auto-reproductora. Interactuando con las celdas vecinas y cambiando algunos de sus estados, se transformaría a sí misma en los materiales, en términos de los estados de la celda, que formaban el organismo original.

Esencialmente la máquina trabajaría en una forma similar a su primo cinemático. La celda contenía instrucciones para el cuerpo de la criatura, cuya colección de celdas, dependiendo de su estado, actuaba como un computador, una fábrica o un duplicador. Eventualmente, siguiendo las reglas de transición, el organismo hallaría el modo de crear un duplicado de su cuerpo. La información se pasaba a través de una especie de cordón umbilical. Dos criaturas idénticas, ambas capaces de auto-reproducirse, estarían ahora en el tablero sin fin. Por esto se considera a von Newmann el padre de la Vida Artificial.

Desde el punto de vista de la ingeniería, la V.A. nos ofrece posibilidades de ampliar nuestra visión y ser creativos en el desarrollo de nuevos productos y servicios. Si bien es cierto que somos orgullosos de los desarrollos de la ingeniería, también es cierto que sus productos, comparados con las características de auto-organización, auto-reparación, adaptabilidad, aún están en etapas primarias. Por ejemplo, nuestras viviendas no han cambiado mucho desde la época de las cavernas pues necesitamos estar pendientes de todos sus detalles: iluminarla, enfriarla o calentarla, asegurarla, dotarla de todos los servicios, etc. Se trata de dotar los productos humanos de un mínimo de patrones de comportamiento de los seres vivos⁶.

6. Robots, vida artificial e IA

Definimos robot como: una máquina que puede ejecutar operaciones y movimientos de manera autónoma. Si cambiamos la palabra robot por ser vivo y máquina por organismo, tendríamos: un ser vivo es un organismo que puede ejecutar operaciones y movimientos de manera autónoma. En otras palabras, debemos ver cómo funciona la vida, ver sus principales características y sus procesos, para tener claridad sobre cómo deben funcionar los robots. Así que echaremos una mirada a la vida natural.

6.1 La vida natural

La vida se reconoce como el SCA fundamental, y lo que se busca es que, a partir de este estudio, extrapolemos sus propiedades y procesos al desarrollo de las máquinas. Es importante aclarar

⁵ NEWMANN Von. Theory of Self-Reproducing Automata, editado por Arthur Burks, 1966

⁶ MARTÍNEZ J. J., Vida artificial, nuevos conceptos para la ingeniería, Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional, Bogotá, 1999.

que este análisis de la vida se hace desde el punto de vista de la ingeniería, de ver la vida y sus productos, los seres vivos, incluidos nosotros mismos, como máquinas bioquímicas, conformadas de material biológico. No vamos a entrar en aspectos filosóficos o teológicos, muy respetables, pero que aquí no son de interés.

Evolución de la vida natural

Es una de las teorías más importantes de todos los tiempos, pues es la única explicación científica e integral de la existencia y las características del fenómeno más complejo con que el ser humano se ha encontrado en su largo camino de logros y descubrimientos: la vida en nuestro planeta.

Esta se comenzó a desarrollar hace aproximadamente 4.300 millones de años. Es difícil de imaginar que la asombrosa complejidad natural que nos rodea evolucionó de estructuras sorprendentemente simples, según la teoría del origen de las especies dada por Darwin en su libro "El Origen de las Especies" (Darwin, 1859) y más contemporáneamente, la teoría del Gen Egoísta (Dawkins, 1993).

En este proceso, los individuos tienden a perfeccionarse más en cada nueva generación, con respecto a su ambiente, permitiendo su supervivencia como especie. A partir de la interacción de moléculas simples con el ambiente y la energía disponible en la atmósfera terrestre se conformó el "caldo primario" que constituyó la base para la formación de formas vivientes que se fueron creando al azar.

El proceso de replicación de esas formas mejoró a través de instrucciones que se fueron enviando de una generación a otra. Estabilizado el proceso de replicación, se obtuvo el primer programa digital de la tierra, el ADN. El término ADN tiene el mismo significado que el de un programa de computador digital, como el programa de nómina que se corre cada mes para el pago de los empleados. Este ADN es propio de toda la biomasa del planeta.

Adaptación

Los conceptos anteriores permiten entender la forma en que la evolución produce organismos cada vez más aptos en ambientes inciertos. Los problemas de adaptación son difíciles por la complejidad y la incertidumbre encontradas en la búsqueda de lo óptimo. La complejidad hace que el objetivo, lo óptimo, sea lejano o incluso inalcanzable. Además, la incertidumbre debe reducirse con rapidez, permitiendo el aumento de opciones con comportamiento "deseable", es decir, la información se debe explotar durante el proceso mismo de la optimización.

Una vez se registra en el ADN, alguna alteración al código, mutación, esta se replica y se lleva a los descendientes. La selección es producto del azar, pero opera bajo las exigencias del ambiente con rigor férreo. Dichas exigencias dan la orientación que permiten los logros sucesivos de los seres vivos: mantenerse vivos y enviar su información genética al futuro, su objetivo teleonómico. La noción de la biología contemporánea es precisa: las únicas alteraciones aceptables son las que refuerzan su objetivo teleonómico.

Adquisición de Información del Ambiente

Podemos considerar la adaptación como un aprendizaje genético en una escala de tiempo alta, miles o millones de años. Sin embargo, cada individuo debe interactuar permanentemente con su ambiente en el transcurso de su vida, aprendiendo para sobrevivir. Para esto debe tomar información de ese ambiente, filtrarla y con base en sus modelos internos tomar decisiones, que en

muchos casos pueden ser de vida o muerte. En el caso de nosotros y de muchos animales, la adquisición de la información se hace a través de los sentidos: ojos, oídos, nariz, boca y piel, se envía al modelo interno interpretando la información que recibe, con base en la memoria, las creencias y actitudes, para así tomar las decisiones.

La muerte

La vida es un proceso permanente de cambio, nuestras células están continuamente reproduciéndose y muriendo. Son varias las formas de reproducción, pero lo básico es la transferencia del código genético de la célula madre a la célula hija con una muy alta fidelidad. Sin embargo, a este proceso se le han encontrado límites, las células no se pueden replicar al infinito. El telómero es una región de ADN no codificante, instrucciones que no generan proteína, cuya función es mantener la estabilidad estructural de los cromosomas. Se encontró que el problema de la replicación terminal se debía al acortamiento progresivo de los telómeros. En la actualidad se acepta que el telómero es en realidad un reloj molecular que cuenta con un número de ciclos de replicación máximo que la célula puede soportar.

Nuestro envejecimiento se debe entonces a dos aspectos. El primero, a los errores en la copia del ADN de cada célula, que con el paso del tiempo se van acumulando, lo que va afectando la ejecución de las funciones en diferentes órganos del individuo. El segundo, a la incapacidad de que las células se puedan reproducir al infinito. Así al pasar los años estos dos aspectos van dominando la ejecución de las funciones del individuo pluricelular, generando problemas de información entre los órganos y tejidos, hasta cuando algunas funciones vitales dejan de ejecutarse y llega la muerte. Pero ¿qué es lo que realmente pasa? simplemente que la información de las células se ha dañado y/o que el sustrato donde se mantiene esa información falla. Todo es un problema de información.

Cuando se presentan cierto tipo de daños a la estructura de individuo, sin que lleguen a afectar sistemas esenciales, la vida es un sistema robusto y automáticamente trata de arreglar el daño producido, generando una serie de procesos en función de su recuperación; o tratando de que otros elementos del sistema asuman la función deteriorada o perdida. Por otra parte, el reciclaje en los seres vivos es total.

6.2 Modelo POE de V.N.

Este modelo desarrollado por un grupo de investigadores, en el que hacían parte varios colombianos, en la Escuela Politécnica de Suiza, hace una abstracción de la vida en la tierra en tres niveles de organización: el nivel filogenético que concierne al proceso de evolución de los programas genéticos; el nivel ontogenético concierne al proceso de desarrollo de un solo organismo multicelular; y el nivel epigenético que trata con los procesos de aprendizaje durante el tiempo de vida de un organismo.

Filogénesis. Este eje corresponde al proceso evolutivo en nuestro planeta con una duración aproximada de 3.500 millones de años, para la conformación de un genoma o programa genético. A partir de la primera molécula que pudo auto-reproducirse este proceso ha llegado, hasta ahora, a la conformación de programas genéticos más complejos, pasando por toda la diversidad de especies, la gran mayoría ya extintas. La existencia de los organismos se explica por la reproducción del programa genético en su descendencia, sujeta a una tasa extremadamente baja de error.

La introducción de errores, en la transferencia de información de una generación a otra, en general conlleva errores en el programa que impiden su propagación a las generaciones siguientes. En casos

muy especiales es posible que el error implique una mejora de ese programa con respecto a los demás, dándole mayor posibilidad de que su propagación a las generaciones siguientes sea más alta. La intermitente aplicación de operadores genéticos da origen a la emergencia de nuevos organismos. Este es un mecanismo estocástico.

Ontogénesis. Una vez se ha conformado un nuevo programa genético, genoma o cigoto, a partir de la recombinación de información de sus padres, comienzan sus divisiones sucesivas, a través del proceso de morfogénesis autónoma. Cada nueva célula posee una copia del genoma original, pero dependiendo de su posición física, se inicia un proceso de especialización que se puede comenzar a observar a partir de un número muy bajo de células, alrededor de 8, fase que se conoce como de diferenciación celular. Es un proceso esencialmente determinístico de desarrollo de un organismo.

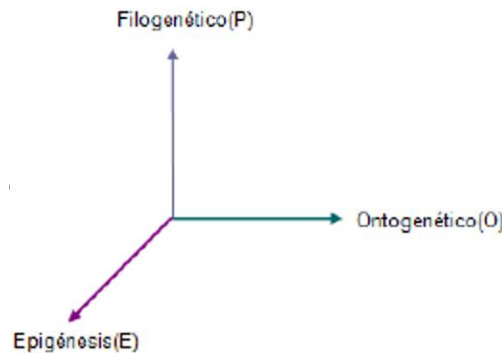


Figura 1.9, modelo POE

Epigénesis. La cantidad de información del programa genético humano, o genoma humano, es del orden 3.200 Mb (millones de bases A, C, T, G). Esta cantidad de información representa la descripción completa de un organismo humano. Sin embargo, esta sola descripción no le permite a un ser humano interactuar con su entorno. De manera que para que un organismo pueda manejar la complejidad del ambiente se requieren otros medios de almacenamiento de información no genéticos, más plásticos, que permitan almacenar conocimiento de sus interacciones con el ambiente. Así, en el desarrollo del individuo aparecen procesos que le permiten integrar una gran cantidad de información proveniente de las interacciones con el ambiente. Estos procesos están soportados por los sistemas nervioso, inmune y endocrino.

Con estos sistemas se tiene una información mucho más plástica que junto con la información genética, estática, le permite al individuo confrontar adecuadamente el ambiente. La epigénesis es un proceso estocástico de aprendizaje del individuo. Dentro del espacio de definido por estos tres ejes encontramos toda la diversidad de seres que constituyen la biomasa en nuestro planeta. Todos compartiendo el mismo código y los mismos componentes elementales.

6.3 Vida Artificial,

Hemos llegado a que la vida es información, información que se transmite, información que se interpreta. La interpretación de la información genética es el proceso de ejecución del ADN que produce y ensambla en 3D los 20 aminoácidos que crean las proteínas que forman todos los organismos existentes.

El computador, trabaja con un código binario y en el que es muy sencillo realizar la replicación de los datos. En otras palabras y sin mucha elaboración formal, en teoría se podría desarrollar “vida” en el computador. También hay toda una disponibilidad de componentes de diferentes tecnologías con los cuales se puede pensar en formas más “concretas de vida”, de vida artificial. Una vez delimitamos el campo de la V.A. y el computador como su herramienta fundamental, vamos a presentar un modelo de V.A., el cual nos permiten situar nuestros desarrollos en un punto.

6.3.1 Modelo de VA.

Con base en lo anterior, y en analogía con la naturaleza, podemos definir el espacio de los sistemas de V.A., conformado por los mismos tres ejes: Filogénesis, Ontogenésis y Epigénesis; pero con otra connotación. Ahora la Filogénesis, la llamamos **Evolución**, o informática evolutiva, ya que sus procesos emulan el proceso evolutivo natural; la Ontogenésis, la llamamos **Replicación**, pues generan comportamientos holísticos con base en reglas determinísticas que siguen todas las células artificiales; y la Epigénesis que llamamos **Aprendizaje**, ya que permiten el aprendizaje del agente por retroalimentación del ambiente.

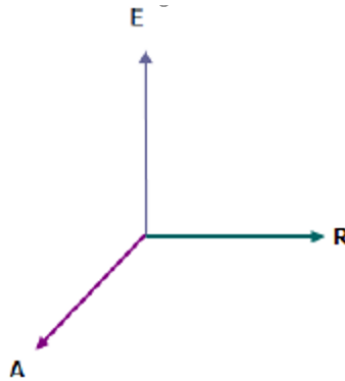


Figura 1.10, modelo de VA

E. Evolución

Hace referencia a las herramientas que podemos agrupar como **Informática Evolutiva**, El tema central es la aplicación de los conceptos de selección, cruce y mutación, con base en la aptitud de una población de estructuras de datos en la memoria del computador. Estas estructuras se reproducen de una manera tal que el contenido genético de sus descendientes está relacionado de alguna forma con el contenido genético de los padres; de la misma forma la aptitud de los hijos está relacionada, pero es diferente a la aptitud de sus padres.

Desde el punto de vista de la vida natural, en este eje, estamos usando la característica de teleonomía. El objetivo último de los seres artificiales es satisfacer de la mejor manera posible la función de aptitud definida por el programador. En general, a los individuos de la población se les permite su reproducción en diferentes cantidades basada en la función de aptitud diseñada por el programador.

Son varios los estilos que se han desarrollado en la informática evolutiva. Su distinción se encuentra en los tipos de estructuras que comprenden los individuos en la población y los énfasis en los operadores genéticos empleados. Estas diferencias caracterizan a los individuos y hacen permisible la variación genética. También hay diferencias en los operadores que crean la descendencia, así como en los métodos de selección y otros detalles menos significativos. Entre los estilos de

informática evolutiva se tienen: Estrategia Evolucionaria, Programación Evolucionaria, Algoritmos Genéticos y Programación Genética.

R. Replicación.

Este proceso se puede resumir como de crecimiento o construcción, bottom-up, con base en reglas determinísticas, que define el genoma y que comparten todas las células, lo que conlleva a la producción de comportamientos emergentes. Hay que diferenciar entre replicación y auto-reproducción. Aquí se usa replicación como aplicar el mismo programa a todas las células, mientras que auto-reproducción consiste en la producción de un nuevo genoma, a partir de otros genomas con la misma estructura.

Cada una de las células dependiendo de su posición y estado ejecuta el mismo programa, el genoma. En algunos casos los sistemas replicantes tienen la habilidad de auto-repararse cuando sufren determinados daños. La herramienta básica en este eje son los Autómatas Celulares, A.C.

A. Aprendizaje.

Este eje tiene que ver con el aprendizaje que debe realizar cada agente individual para poder interactuar con el mundo real. Se define como aprendizaje plástico, pues en general puede variar con el tiempo en contraposición con el aprendizaje genético que realizan poblaciones completas de especies en largos periodos de tiempo, que el individuo no puede cambiar en el transcurso de su vida. Es un proceso que depende directamente de las interacciones con el ambiente. Las herramientas básicas en este eje son las Redes Neuronales Artificiales, RNA; el Machine Learning, la Lógica Difusa; y los Sistemas Inmunológicos artificiales.

Dentro del espacio definido por estos ejes, E (Evolución), R (Replicación) y A (Aprendizaje) se puede situar cualquier ente desarrollado por el hombre con características de organismo vivo; que en principio se puede construir con las herramientas clásicas bioinspiradas: RNA, A.G. y A.C. Todas herramientas de IA.

7. Ejercicios y Problemas.

1. Dé una definición propia de inteligencia humana.
2. Dé una definición propia de inteligencia artificial.
3. Vea los videos en <https://www.youtube.com/watch?v=kOKdeHpU2Bg> y <https://www.youtube.com/watch?v=JsmKUCiPHUY&t=7s> . Haga un análisis de lo discutido en el documento y los videos.
4. Lea un artículo sobre los robots de Braitenberg, y escriba un programa que efectúe los comportamientos reactivos de estos robots.
5. Imagínese un robot que incluya componentes de cada uno de los ejes del modelo de VA.

8. Bibliografía.

Adami, C., Introduction to Artificial Life, Springer-Verlag, 1998.
Braitenberg V, Vehicles, Experiments in Synthetic Psychology, MIT Press
Franco O., Escallon S., Estudio Básico de Vida Artificial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional, Bogotá, 1995.
Both A., Kuhn W., Matt Duckham, Spatiotemporal Braitenberg Vehicles.

Gribbin J., Deep Simplicity, Random House, 2004.
Langton, Christopher, Artificial Life, an Overview, A Bradford Book, MIT Press, 1995.
Legg S., Hutter M., A Collection of Definitions of Intelligence, IDSIA Switzerland, 2007.
Martínez J. J., Vida artificial, nuevos conceptos para la ingeniería, Revista Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional, Bogotá, 1999.
Martínez J. J., *Vida Artificial*. Revista de la Facultad de Medicina, Universidad Nacional, Bogotá, Volumen 46, No. 2. Abril - Junio 1998.
Mijwel M. M., History of Artificial Intelligence, Universidad de Bagdad, 2015.
Mordechai Ben Ari, F. Mondada, Elements of Robotics, Springer Open, 2018