

Director
Luis Vega

Secretaria
Paula Olmos

Edición Digital
Roberto Feltrero

El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos en agentes artificiales

María Inés SILENZI

*Departamento de Humanidades; Centro de lógica y filosofía de la Ciencia.
 Universidad Nacional del Sur
 Magallanes 3914- Bahía Blanca- Buenos Aires CP 8000- Argentina.
 ines_silenzi@hotmail.com*

RESUMEN

El problema de marco surgió al intentar crear modelos de computación que imiten la conducta humana cotidiana. Frente a dicha posibilidad aparecieron dos grandes problemas: i) crear un sistema que tenga la información almacenada de modo tal que pueda acceder a la información correcta y relevante para un fin concreto en el tiempo apropiado y ii) conseguir que ese sistema reconozca los rasgos importantes del entorno dinámico en el que se encuentra inserto. Como se infiere a partir de (i) las referencias temporales son imprescindibles siempre que se desee modelar el comportamiento inteligente de un agente actuando en un entorno dinámico, según (ii). En nuestro trabajo consideraremos qué se entiende por el problema de marco, enfatizando sus aspectos temporales, y propondremos una alternativa posible, la lógica temporal desarrollada por Arthur Prior, para su solución.

PALABRAS CLAVE: agentes artificiales, argumentación, Arthur Prior, lógica temporal, problema de marco, sistemas dinámicos.

ABSTRACT

The frame problem arose when attempting to create computer models that imitate human behavior every day. Indeed, facing the possibility of a daily task there were two major problems: i) create a system that has stored information so that the system can access the correct information and relevant for a particular purpose at the proper time and ii) ensuring that the system recognizes the important features of the dynamic environment in which it is inserted. However, as inferred from (i) the time references are essential if you want to model the intelligent behavior of an agent acting in a dynamic environment, as reflected in (ii). In our work we will consider what is meant by the frame problem, emphasizing its temporal aspects, and then propose a possible alternative, the temporal logic developed by Arthur Prior, for resolution.

KEYWORDS: argumentation, Arthur Prior artificial agents, dynamical systems, frame problem, temporal logic.



Copyright © María Inés Silenzi

Se permite el uso, copia y distribución de este artículo si se hace de manera literal y completa (incluidas las referencias a la Revista Iberoamericana de Argumentación), sin fines comerciales y se respeta al autor adjuntando esta nota. El texto completo de esta licencia está disponible en: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/2.5/es/legalcode.es>

1. INTRODUCCIÓN

Desde finales de los años '90 hasta el presente, la argumentación se ha consolidado como un nuevo paradigma para modelar el razonamiento de sentido común; razonamiento al que prestaremos especial atención en este trabajo. La argumentación en el área de Inteligencia Artificial es una línea de investigación destacada y actual que se ha tratado en las principales conferencias de Inteligencia Artificial en el mundo durante el 2011 (tales como IJCAI, AAMAS, ECSQARU, AAI, ECAI, entre otras). También se han desarrollado varios talleres específicos tales como "Computational Models of Natural Argument" (CMNA), "Argumentation in Multiagent Systems" (ArgMAS) y, más recientemente, "Theoretical Aspects of Formal Argumentation" (TAFA), en IJCAI 2011. Además, desde 2006, se ha realizado bianualmente una conferencia internacional en tal disciplina (International Conference on Computational Models of Argument, COMMA).

Es nuestra intención, a modo de trabajo interdisciplinario de investigación, relacionar los estudios sobre argumentación con aquellos provenientes del campo de la Inteligencia Artificial a través de un problema en particular: el problema de marco, el cual surge al pretender construir modelos de computación "inteligentes" que imiten nuestra conducta humana "cotidiana" o de "sentido común". Una de las definiciones de Inteligencia Artificial más apropiadas, y que concuerda con nuestros propósitos, es la que propone Marvin Minsky en *La sociedad de la mente* (1986). El autor entiende por Inteligencia Artificial aquel campo de investigación que se interesa en lograr que las máquinas ejecuten acciones que, en opinión de las personas, exigen inteligencia. Parecería, según esta definición, que la Inteligencia Artificial es la ciencia que se ocupa de construir máquinas que hagan "cosas" que requerirían inteligencia si las hiciesen personas. Así entendida, la Inteligencia Artificial intentaría generar un modelo de inteligencia que imite nuestra inteligencia humana. Ahora bien, restringiremos semejante tarea, la de imitar la conducta humana, atendiendo a la conducta "cotidiana" o de "sentido común". Ciertamente la investigación en Inteligencia Artificial refleja, por un lado, la tremenda complejidad de la mente, pues permite apreciar la enorme sutileza psicológica de los "simples" actos cotidianos. Pero también, y a partir de ello, nos sugiere nuevas hipótesis sobre los procesos cognitivos implicados en el razonamiento cotidiano con respecto al modo en que interactuamos con el mundo.

Creemos que los intentos por explicar el modo en que interactuamos con el mundo cotidianamente, así como cuáles son los procesos cognitivos implicados en ellos, se sintetizan en la búsqueda de soluciones de lo que se conoce como el

3. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

“problema de marco” (*frame problem*). Precisamente el problema de marco fue inicialmente señalado por Mc Carthy (McCarthy y Hayes, 1969) al discutir sobre un sistema que formaliza, o analiza, razonamientos lógicos (luego llamado cálculo de situaciones). El problema surgió cuando los investigadores en Inteligencia Artificial intentaron construir un modelo de computación que imitase la conducta humana cotidiana. En efecto, frente a la posibilidad de realizar una tarea de razonamiento común, aparecieron dos grandes problemas: i) crear un sistema que tenga la información almacenada de modo tal que el sistema pueda acceder a la información correcta y relevante para un fin concreto en el tiempo apropiado y, ii) conseguir que ese sistema reconozca los rasgos importantes del entorno dinámico en el que se encuentra inserto.

Ahora bien, como se infiere a partir de (i) las referencias temporales son imprescindibles siempre que se desee modelar el comportamiento inteligente de un agente actuando en un entorno dinámico, tal como lo refleja (ii). Es necesario entonces tener en cuenta referencias temporales para poder representar el momento en el que suceden los hechos dentro del mundo conocido por el agente modelado. Si la intención es modelar nuestro actuar cotidiano, debe formalizarse también un razonamiento adecuado sobre las acciones que no pueden ocurrir simultáneamente, o cuya ejecución en el tiempo es parcial o totalmente dependiente de otras acciones.

En nuestro trabajo consideraremos, en primer lugar, qué se entiende por el problema de marco, atendiendo a su origen y a sus implicaciones más relevantes en relación a lo que se conoce como “razonamiento de sentido común”. En su descripción e ilustración, atenderemos luego al aspecto temporal del problema para, y ya en la segunda parte, proponer una alternativa posible, la lógica temporal desarrollada por Arthur Prior para la solución del problema de marco. Es nuestro objetivo entonces considerar al problema de marco y la lógica temporal de Prior mediante el análisis de operadores temporales que permitan una alternativa posible para la formalización de sistemas dinámicos en agentes artificiales.¹

2. EL PROBLEMA DE MARCO ORIGINAL

Es necesario aclarar que la primera dificultad que presenta el problema de marco es puramente de tipo definitorio: ¿de qué trata el problema de marco? Atenderemos entonces al problema de marco original, tal como ha surgido dentro de la Inteligencia

¹ Por supuesto, aunque en este trabajo consideraremos sólo la lógica temporal de Prior, existen otras varias alternativas posibles (ver Brzoska, 1993) que podrían resolver al problema de marco.

4. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

Artificial, introduciendo para ello el cálculo de situaciones pues es dentro de este formalismo en donde se ha ubicado originariamente a este problema.

El cálculo de situaciones es el formalismo mejor conocido para la descripción del conocimiento en un mundo cambiante. Fue introducido por McCarthy y Hayes y publicado por primera vez en 1969 en su trabajo *Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence* (aunque McCarthy ya lo había descrito antes en un memo no publicado en 1963). Por cuestiones de espacio, sólo describiremos de manera resumida este cálculo a fin de entender el problema de marco, sin adentrarnos demasiado en algunos detalles. Como ya hemos dicho, el cálculo de situaciones es uno de los formalismos más conocidos para representar los efectos de las acciones dentro de la Inteligencia Artificial. Este cálculo incluye, como categorías de entes fundamentales, a *situaciones*, *fluentes* y *acciones*.

Las *situaciones* (s) pueden entenderse como fotos instantáneas del mundo (Shanahan, 1997: 2) o, dicho de otra manera, como un completo estado del universo en un momento dado del tiempo (McCarthy y Hayes, 1969: 481). Un *fluente* (f), también según las palabras de Mc Carthy y Hayes: «is a function whose domain is the space Sit of situations» (1969:482) y que pueden tomar distintos valores en diferente situaciones. Estos pueden también ser pensados «as time-varying properties» (Shanahan, 1994: 2). Por último, las *acciones* generan nuevas situaciones basadas en las viejas porque el valor de algunos fluentes cambia de la situación original a la nueva.

Este cálculo particular, además de poseer símbolos para estas categorías, incluye un símbolo para predicados, *Se tiene (Holds)*, que relaciona determinado fluente con aquellas situaciones donde éste es verdadero, y el predicado igual (=), a partir del cual pueden construirse las fórmulas atómicas del cálculo. Veamos, a continuación, uno de los ejemplos más usados para explicar el cálculo de situaciones, en el que se describe una torre de bloques que se encuentra sobre una mesa. La Figura 1 muestra una situación particular que puede describirse del siguiente modo, entre otros. Inicialmente se tiene el bloque A libre (donde “libre” denota que hay espacio suficiente para colocar un bloque sobre otro bloque o sobre la mesa), luego se tiene al bloque A sobre el bloque B (donde “sobre” denota que un bloque está sobre otro bloque o sobre la mesa), después se tiene al bloque B sobre la mesa y, finalmente, se tiene a la mesa libre (en el sentido ya explicado). Formalmente:

5. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

Se tiene (S0, Libre (Bloque A))

Se tiene (S0, Sobre (Bloque A, Bloque B))

Se tiene (S0, Sobre (Bloque B, Mesa))

Se tiene (S0, Libre (Mesa))

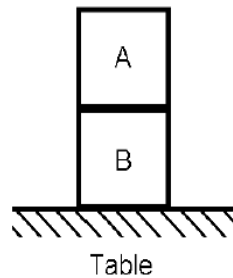


Figura 1.

$S0$ denota la situación que es descrita en la Figura 1 y el fluente *Sobre (Bloque A, Bloque B)* está relacionado con $S0$ por el símbolo predicativo “Se tiene”. Esta es una manera de describir qué fluentes se sostienen en una determinada situación.

El cálculo de situaciones incluye también *Resultados (Result)*, los cuales son símbolos de función que tienen dos argumentos, el primero es una acción y el segundo, una situación. Por ejemplo, consideremos la acción de poner el Bloque A sobre la mesa:

Poner sobre (Bloque A, Mesa)

Con *Resultados* (símbolo de función) podemos denotar la (nueva) situación que se produce si la acción previa es realizada en la $S0$:

Resultados (Poner sobre (Bloque A, Mesa), $S0$)

Para establecer que el Bloque B está sobre la mesa luego de esta acción, decimos:

Se tiene (Resultados (Poner sobre (Bloque A, Mesa), $S0$), Sobre (Bloque B, Mesa))

También podemos mencionar ciertas fórmulas que describen los efectos de ciertas acciones, adecuadamente llamadas *axiomas de efectos (effect axioms)*. Éstos deben

6. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

considerar las precondiciones de tal acción, es decir, los fluentes que son necesarios suponer para que ciertas acciones puedan realizarse:

$$\text{Se tiene } (s, \text{libre}(x)) \wedge \text{se tiene } (s, \text{libre}(y)) \wedge x \neq \text{mesa} \wedge x \neq y \rightarrow \text{Se tiene } (\text{Resultados} \\ (\text{Poner sobre } (x, y), s), \text{Sobre}(x,y))$$

Ahora bien, dentro de este intento de formalización se pueden observar algunas cuestiones. McCarthy y Hayes descubrieron que podrían aparecer ciertos problemas precisos si se les cuestionaba sobre cómo formalizar en este cálculo fluentes que *no* cambian cuando una acción determinada es realizada. Siguiendo con el ejemplo de los bloques sobre la mesa, describamos la situación resultante de introducir este nuevo hecho a S_0 :

$$\text{Se tiene } (S_0, \text{Rojo}(\text{Bloque A}))$$

¿Se cumple que, a partir de este nuevo hecho *Se tiene* (*Resultados* (*Poner sobre* (*Bloque A*, *Mesa*), S_0), *Rojo* (*Bloque A*))? Claramente cualquier ser humano diría que no, pues no hay razones para pensar que el Bloque A cambia de color solo por el hecho de moverlo de lugar. Sin embargo, en este sistema no se habían incluido enunciados que permitan demostrar este "hecho", es decir, no se había formalizado suficientemente bien lo que se intentaba modelar. Se debe pues introducir la hipótesis de que las cosas permanecen rojas aun al ser movidas:

$$\text{Se tiene } (s, \text{Rojo}(x)) \rightarrow \text{Se tiene } (\text{Resultados} (\text{Poner sobre } (x, y), s), \text{Rojo}(x))$$

Este axioma, denominado *axioma de marco* (*frame axiom*), describe la persistencia de un fluente al no ser afectado por una acción. Pero varios fluentes permanecen iguales cuando un bloque se mueve. Aunque pueda o no haber espacio en la mesa como para poner muchos más bloques, sea cual sea la situación y, asumiendo que el bloque B y la mesa pueden tener otros colores, el color que tiene cualquier ente que "haya" en la situación no varía después de la acción *Poner sobre*

La cantidad de axiomas de marco necesarios para describir las acciones adecuadamente es considerablemente importante en comparación al dominio de n fluentes y m acciones porque, en general, la mayoría de los fluentes no se encuentran afectados por la mayoría de las acciones. Cada vez que agregamos una nueva acción, tendríamos que agregar casi tantos axiomas de marco como fluentes hay y, a su vez, cada vez que agregamos un nuevo fluente, tenemos que agregar casi tantos axiomas

7. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

de marco como acciones hay (dependiendo esto de que no haya acciones concurrentes). Por lo tanto, la total cantidad de axiomas de marco requeridos para un dominio de n fluentes y m acciones será, como máximo, de $m \times n$. Ahora bien, en la medida en que queramos que agentes inteligentes actúen en dominios amplios, tenemos que encontrar una manera de minimizar esos axiomas de marco, pues, de lo contrario el tiempo que un agente necesite para predecir una situación determinada sería importante.

El problema de marco surge entonces cuando uno intenta expresar los efectos de las acciones, o de los eventos involucrados, usando la lógica clásica como herramienta de formalización. A través de esta lógica deberíamos describir (formalmente) no solo qué cambia cuando una clase particular de acción es realizada, o un evento en particular ocurre, sino también lo que *no* cambia. Si quisiéramos hacer esto, notaremos que tal descripción es dificultosa y que las conclusiones a la que esta descripción nos llevaría serían totalmente inútiles para, por ejemplo, tomar una decisión adecuada en un momento dado cuando el tiempo que se tarda en alcanzar conclusiones es mucho mayor.²

Por ejemplo, para ilustrar estas afirmaciones, consideremos una descripción determinada que incluya el hecho particular de pintar las paredes de una oficina. A partir de este hecho, deberíamos describir no solo que lo que cambia finalmente es el color de las paredes de la oficina, sino también deberíamos incluir afirmaciones que reflejen que ciertos hechos *no* cambian por el hecho de pintar la pared: pintar las paredes no altera la forma ni el espesor de la pared; pintar las paredes no altera mi corte ni mi color de pelo, etc.

Es claro que esta lista puede extenderse indefinidamente. Cuando usamos el sistema lógico clásico de primer orden para describir los efectos de tales acciones, la descripción acerca de lo que *no* cambia resulta mucho más extensa que la descripción que se refiera acerca de lo que *sí* cambia. Parecería ser que los hechos acerca de lo que *sí* cambia pertenecen a lo que llamamos sentido común, pues cuando describimos los efectos de las acciones, solo nos concentramos en lo que *sí* cambia, considerando entonces lo que *no* cambia como ya concedido.

De esta manera, podemos decir que el problema de marco surge cuando se intenta construir una estructura formal que permita describir, de manera precisa y formal, el modo en que actuamos cotidianamente los seres humanos, es decir, el

² El problema del marco surgió al intentar formalizarlo dentro de la lógica clásica de primer orden. Es a las dificultades dentro de esta lógica a las que nos referimos. Es necesario aclarar que desde que se descubrió el problema del marco se han propuesto otros formalismos o sistemas formales para intentar resolverlo que no pueden calificarse como lógica clásica, aunque sí como lógicas no monótonas.

8. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

razonamiento de sentido común. El razonamiento de sentido común es el tipo de razonamiento que realizamos todos los días. Querer definir la naturaleza del razonamiento de sentido común es tan difícil como intentar definir la naturaleza del problema de marco. Nos limitaremos a la definición de E. Mueller, quien ha analizado en detalle este tipo de razonamiento, e incluso lo ha relacionado con el problema de marco. Según ese autor «is a process that involves taking information about certain aspects of a scenario and making inferences about other aspects of the scenario based on our commonsense knowledge, or knowledge of how the world works» (Mueller, 2006:2). El razonamiento de sentido común nos permite reconstruir las partes que faltan en un escenario, es decir, imaginar lo que sucedió y predecir qué puede ocurrir luego. Podemos predecir que, si una persona entra a una cocina, entonces, luego, la persona va a estar en la cocina. O que, si alguien entra con un diario a la cocina, entonces el diario va a estar en la cocina, sabiendo que esa persona y ese diario son dos objetos distintos.

Ahora bien, porque hacemos tales inferencia tan fácilmente, aunque muchas veces erróneas, podemos tener la impresión de que el razonamiento de sentido común es un razonamiento demasiado simple, cuando, en realidad, se vuelve mucho más complejo a la hora de formalizarlo y mucho más aún a la hora de intentar adecuarlo a inteligencias artificiales. Una de las razones por las cuales es interesante analizar este razonamiento es que éste es esencial para que un agente pueda realizar un comportamiento inteligente, lo cual le permitiría suponer ciertos datos ante una situación nueva, calculando que pasó y prediciendo cuál es la mejor decisión posible para conseguir algo. La solución al problema de marco permitiría, en efecto, simular en agentes artificiales cierta flexibilidad acerca del conocimiento de sentido común, asemejándose así al tipo de razonamiento por el cual los humanos actuamos cotidianamente.

3. AGENTES ARTIFICIALES Y LA FORMALIZACIÓN DEL SENTIDO COMÚN

Los seres humanos podemos “ver” (por ejemplo, a través de muchos años de aprendizaje) rápidamente las consecuencias relevantes de ciertos cambios en una situación dada y comprender qué es lo que está sucediendo. También extraemos conclusiones de manera rápida (aunque muchas veces equivocada) aun cuando esto signifique retractarse o adoptar nuevas creencias, es decir parecería que los seres humanos no razonamos de acuerdo a la lógica clásica. El problema de marco, como ya hemos mencionado, surge entonces cuando se intenta modelar esta misma habilidad desde un punto de vista computacional, es decir, cuando nos preguntamos:

9. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

¿cómo armamos un programa que reúna solo los datos que importan, es decir, solamente los que se deben necesitar para actuar en un momento determinado?

Imaginemos que estamos en un restaurante cenando con amigos concentrados en pedir el primer plato. Repentinamente suena la alarma de incendio y vemos que sale humo de las ventanas del edificio que se encuentra justamente enfrente del restaurante. Frente a este hecho, deberíamos decidir si continuamos eligiendo el primer plato de nuestra cena o si hacemos algo frente al incendio que estamos observando. Supongamos ahora que se encuentra un ordenador en estas mismas circunstancias, el cual posee ciertos programas especializados capaces de captar algún aspecto específico del conocimiento humano, práctico o teórico. En nuestro ejemplo, supongamos que tenga un programa que capte el conocimiento que se requiere para pedir una comida en un restaurante y otro programa que trate de captar el conocimiento que se requiere para prestar ayuda ante ciertas eventualidades, como un incendio (aunque pueda discutirse si los seres humanos realmente tengamos este conocimiento). Es claro que ninguno de los programas por sí mismos va a especificar qué es lo que hay que hacer en tales circunstancias, pues cada uno de ellos está exclusivamente dedicado a su propio terreno de competencia. Supongamos ahora que un programador pudiera combinar todos sus programas especializados para superar este tipo de limitación. Rápidamente descubriría que esta posibilidad no servirá de nada debido a la cantidad de maneras diferentes en las que una actividad inteligente podría requerir cederle el paso a otra actividad durante el transcurso de esta situación.

Supongamos ahora que el programador incluyera en el programa de petición de platos la disposición para actuar en caso de incendio (introduciendo una jerarquía): en un caso así, el programa especifica que habría de abandonarse la petición de plato y que, en su lugar, habría que seguir el programa de ayuda en caso de incendio. Pero, y siguiendo con nuestro ejemplo cotidiano, es posible también que se puedan presentar otras circunstancias inesperadas que requieran algún otro curso de acción. Supongamos que en el momento en que uno está pensando en llamar a los bomberos, y dejar de pedir el plato, advierte que delante de la puerta del restaurante se encuentra un niño pequeño a punto de ser atropellado por un auto que transita a gran velocidad. Frente a esta situación, o llamamos a los bomberos y nos ocupamos del incendio, o salimos corriendo inmediatamente a salvar el niño del accidente. Sin embargo, aunque lo hayamos decidido, siempre puede ocurrir otra nueva complicación que conduzca a un nuevo cambio de opinión. Es claro que estas situaciones que hemos querido ilustrar a través de nuestro ejemplo son solo algunas de entre un sinnúmero de posibilidades que podrían darse. Parecería imposible que un programador informático

10. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

pueda contemplar anticipadamente todas estas posibilidades que frente a un caso tan simple como pedir un plato podrían darse.

Ahora bien, y volviendo a nuestros propósitos, el aspecto temporal del problema se ve claramente en este ejemplo, pues estas situaciones implican un cambio en el tiempo. Una vez que se han comprendido algunas de las dificultades implícitas en este problema, podemos sostener que este problema consistiría entonces en la dificultad de crear un programa que incorpore en el mismo momento (instante) todos los conocimientos generales de que disponemos los seres humanos y que, además, especifique también todos los modos en que esos conocimientos se aplican adecuadamente en un momento del tiempo determinado.

Otro de los ejemplos más ilustrativos del problema de marco es el que presenta Daniel Dennett en su memorable ensayo sobre el problema de marco publicado en 1984, llamado *Las ruedas del conocimiento: el problema de marco en la IA*. En este ejemplo se refleja intencionalmente a diseñadores incompetentes para enfatizar las dificultades inherentes al problema de marco. Para entender este problema, Dennett apela a un experimento mental en el que invita a imaginarnos un robot imaginario *R1* al que sus diseñadores le habrían fijado la tarea de recuperar su batería de repuesto. La batería se encontraba dentro de un carro en una habitación cerrada en la que había una bomba programada para estallar en poco tiempo. *R1* se habría propuesto la hipótesis de que una cierta acción, *Sacar (Carro, Habitación)*, le permitiría cumplir su tarea. Entra pues a la habitación y saca el carro con su batería de repuesto. Desafortunadamente, al estar la bomba también dentro del carro, el robot estallaría a los pocos segundos.

Los diseñadores de *R1*, para enfrentarse con el problema y evitar la explosión, creyeron que era necesario que el robot no solo considerara las implicaciones intencionadas de sus actos, sino también las implicaciones secundarias. Así, el siguiente robot diseñado, llamado *R1D1*, también encontró la batería y diseñó un plan de acción; sin embargo, acababa de deducir que quitar la muñeca hacia afuera de la habitación no cambiaría el color de las paredes de ésta y estaba embarcándose en la comprobación de la siguiente implicación cuando, finalmente, explotó la bomba.

Con esta situación, los diseñadores consideraron necesario enseñarle al robot a diferenciar, a través de mecanismos de inferencia, aquellas implicaciones que son pertinentes y que deben tenerse en cuenta al diseñar un plan de acción, de aquellas otras que no lo son. El diferenciar tales implicaciones permitiría que el robot no se quedara congelado considerando todas y cada una de las implicaciones, relevantes e irrelevantes. Llamaron a este tercer robot *R2D1*, el "robot deductor" y le dieron la

11. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

misma orden. Cuando el robot localizó la batería, se sentó afuera de la habitación. Los diseñadores, angustiados por ver que el robot se había quedado congelado de nuevo, le gritaron que hiciera algo y el robot respondió: “¡Lo estoy haciendo estoy ignorando diligentemente las miles de implicaciones que determiné improcedentes. Tan pronto descubra una implicación improcedente, la sumo a la lista de las que debo ignorar!” Así, mientras el robot se concentraba en omitir consideraciones innecesarias, explotó. Es claro, como en los ejemplos anteriores, la importancia del aspecto temporal en la solución del problema del marco, pues es necesario lograr que el programa construido permita tomar las decisiones "adecuadas" en un tiempo "razonable". Los tres robots que explotaron no habrían solucionado, según Dennett, al problema de marco. El primer robot no tenía un mecanismo que le permitiera considerar de manera completa las implicaciones de sus actos, mientras que el segundo y el tercero, aunque poseían esta capacidad, no podían hacerlo de manera eficiente, pues no hallaron las estrategias adecuadas al enfrentarse a la explosión computacional de cálculos.

Hasta aquí, hemos intentado describir el problema de marco, atendiendo a su origen y a sus implicaciones más relevantes, en relación a lo que se conoce como “razonamiento de sentido común”. En todos los ejemplos que hemos utilizado para ilustrarlos, destacamos el aspecto temporal del problema de marco. En lo que sigue, como ya hemos anticipado, vamos a proponer, como posible alternativa, la lógica temporal desarrollada por Arthur Prior para la formalización del problema de marco.

4. ENFOQUES TEMPORALES PARA LA FORMALIZACIÓN DEL PM

Las personas cotidianamente nos encontramos afectadas por el tiempo continuamente, y para poder sobrevivir en un mundo cambiante, debemos tomar decisiones “en el momento”, es decir, en el mismo momento en el que tenemos que actuar. Es sabido que la Inteligencia Artificial ha puesto un gran interés en tratar de analizar la forma en la cual los seres humanos tomamos estas decisiones³ y, en particular, existe una necesidad urgente de obtener un análisis lógico preciso de la actividad temporal humana que dé cuenta, entre otras cuestiones, del razonamiento de sentido común de los seres humanos. Precisamente, el análisis lógico del problema de marco, lo cual es de interés en este trabajo, ha tenido un desarrollo constante y notable en las últimas décadas. Para lograr sobreponerse a las limitaciones de la lógica tradicional, han sido introducidos constructores lógico-temporales (Gabbay *et al.*, 1994) en forma de anotaciones y predicados especiales del sistema. De esta

³ Aunque también muchas veces tomamos decisiones por medio de "actos reflejos" que no exigen razonar.

12. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

manera, se ha extendido la utilización de la lógica clásica a lógicas temporales, modales y otras formas de lógica intencional. Si bien, estas lógicas siguen siendo clásicas en el sentido de que son todas ellas monótonas –y de que, si en la lógica clásica tenemos explosión computacional, también la tendremos en sus extensiones– atenderemos a continuación a las contribuciones que estas últimas hacen con respecto a la importancia de la dimensión temporal del problema de marco ya descrito. Recordemos que en este trabajo nos hemos limitado a la lógica clásica, sin que ello signifique desestimar los aportes de la lógica no monótona.

Concretamente, existen dos enfoques principales para el tratamiento de nociones temporales y, por lo tanto, para presentar lógicas temporales que traten el problema de marco. Estos son: el enfoque apoyado en la Lógica de Primer Orden y el enfoque basado en la Lógica Modal. En el primer enfoque, el tiempo es tratado como un parámetro más, y el razonamiento lógico sobre este nuevo parámetro es el mismo que para el resto. Este enfoque permite representar nociones temporales de una forma sencilla pero que dificulta la consideración de algunos problemas relacionados con la utilización del tiempo en el razonamiento ordinario, dentro del cual, todo agente toma decisiones (y donde parecería ser que el problema de marco no existiera).

En cambio el segundo enfoque, basado en la Lógica Modal, permite utilizar relaciones temporales, en las que no es necesario conocer el momento preciso en que ocurrió un hecho. A veces este enfoque resulta más intuitivo y de alguna manera más “expresivo” –ver Garson (2006), donde se enfatiza el carácter expresivo sobre la lógica modal. La principal desventaja de este enfoque radica en que hay menos trabajo realizado con tendencia a proveer herramientas de programación basadas en él, lo cual sería útil en la búsqueda de solución al problema de marco.

Ambos enfoques resultan de mucha utilidad y no se puede decir que uno sea mejor que otro. Ello depende directamente del problema que se esté intentando resolver, de la concepción filosófica y/o de la concepción temporal que el agente que intente resolverlo adopte. Es a estas tres consideraciones a las que el presente trabajo intenta apuntar, atendiendo a si el tratamiento de la lógica temporal de Prior podría ofrecer algunos aspectos relevantes que ayuden a solucionar el problema de marco, desde el segundo enfoque mencionado.

Ahora, ¿qué concepción filosófica del tiempo se adecuaría para describir el problema de marco? La filosofía ha propuesto distintas concepciones del tiempo.⁴ El

⁴ Se ha visto que, desde el punto de vista filosófico, existen divergencias en la concepción del tiempo. Cada una de estas concepciones tiene un conjunto de factores que las hace atractivas para su uso en algunas áreas, y un conjunto de desventajas claras frente a otras situaciones.

13. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

estudio del tiempo no es novedoso entre los filósofos y lógicos, ya que los griegos dedicaron su atención a los fenómenos temporales del lenguaje en sus escuelas estoica y megárica. Desde entonces hasta el presente siglo, en varios momentos de la historia, importantes filósofos han dedicado su atención al problema de su formalización y entendimiento (véase Kowalski, 1979 y Kowalski y Sergot, 1986). En las últimas décadas, ha habido un resurgimiento del interés por la filosofía del tiempo y, en consecuencia, han surgido una serie de trabajos relevantes. En tal sentido, los tratados sobre el tiempo más conocidos son Quine (1960), Prior (1967a y 1967b) y, finalmente, Rescher y Urquhart (1971) especialmente en su libro *Temporal Logic*.

A continuación, consideraremos solo dos concepciones del tiempo, de entre la gran variedad de concepciones filosóficas del tiempo que la filosofía ha propuesto, y que enfatizan ciertos aspectos de la naturaleza del tiempo que creemos convenientes, dados nuestros propósitos, a saber:

- i) la que considera que el tiempo existe como tal y por sí mismo,
- ii) la que asegura que el tiempo no existe en sí mismo, sino como consecuencia de los eventos que se suceden.

Estas visiones del tiempo filosóficamente contrapuestas (véase Pinto y Reiter, 1993) fueron adoptadas dentro del campo de la Inteligencia Artificial con el fin de solucionar algunos problemas, como el problema de marco. Las dos vertientes filosóficas que se estuvieron mencionando se reflejan a través de lo que se conoce como: i) series A (pasado - presente - futuro) desarrolladas por Prior y ii) series B (antes - después) desarrolladas por Rescher y Urquhart (1971). Dentro de cada una de estas categorías, se desarrollaron varias lógicas a fin de observar las diferencias, virtudes y defectos de cada una de estas concepciones del tiempo (véase Vardi y Wolper 1986).

5. ALGUNOS PROBLEMAS INHERENTES AL PROBLEMA DE MARCO

Hemos dicho que nuestro objetivo es atender al intento de la Inteligencia Artificial de construir modelos de computación “inteligentes” que imiten nuestra conducta humana “cotidiana” o de “sentido común”, y a la necesidad del tratamiento computacional de las nociones temporales que se encuentran implícitas. El problema de marco reúne ambas cuestiones. De hecho, podemos considerar algunas cuestiones como interrelacionadas entre sí (véase Shanahan 1997 y 1993), por ejemplo, de este modo: ¿cómo hacer buenas predicciones sobre el futuro sin tomar en cuenta la totalidad del

14. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

pasado? (problema de la calificación) o ¿cuál es la duración de los intervalos de tiempo hacia el futuro a los cuales se refieren nuestras predicciones? (problema de la ramificación). Veamos con más detalle estos problemas, los cuales reflejan claramente el aspecto temporal de las dificultades implícitas dentro del problema de marco.

El problema de calificación cuestiona cómo hacer buenas predicciones sobre el futuro sin tomar en cuenta la totalidad del pasado mientras que el problema de la ramificación se cuestiona cuáles formas son las más adecuadas para especificar los efectos indirectos o tardíos que se derivan de una acción. El problema de la predicción extendida, por otra parte, se cuestiona sobre la manera en que, a partir de predicciones sobre intervalos futuros cortos, predécimos sobre una parte substancial del futuro. Por ejemplo, sobre la base de observar una bola que rueda, predécimos que rodará apenas un poquito más lejos, pero prediremos también que rodará una distancia larga, para lo cual deberíamos iterar el proceso muchas veces.

El problema de la persistencia, finalmente, considera el hecho de que, generalmente, se predice sobre la base de que el hecho a predecir continuará sin cambiar durante un intervalo futuro de larga duración. Por ejemplo, cuando sacamos del bolsillo una bola de billar y la ponemos en un lugar escogido de la mesa, querríamos predecir que permanecerá ahí hasta que la golpeemos. En otras palabras, el problema de persistencia es la dificultad de determinar qué es lo que permanece en un mundo que cambia. Veamos en detalle este último problema para introducir la lógica temporal métrica de Prior.

La noción de persistencia surge como una alternativa para representar la “inercia” a la que están sujetas ciertas propiedades de los objetos que forman el mundo (véase Quine, 1960). Por ejemplo, si uno conoce que cierta persona está viva en una fecha determinada, pueda asumir, de manera tentativa, que permanecerá viva al día siguiente; si uno recuerda que ayer el color de una casa conocida era blanco, es común que hoy razone asumiendo que el color no ha cambiado.

Nuestra intuición indica “asumir tentativamente” que una cierta propiedad, en una situación determinada (s_i), permanecerá sin cambios en su valor de verdad a través del tiempo (denotado esto por s_{i+1}). Por lo tanto una *regla de persistencia* tendrá la forma:

$$\text{Se tiene } (P(x_1 \dots x_n), s_i) \text{ } \vdash \text{ Se tiene } (P(x_1 \dots x_n), s_{i+1})$$

Como ejemplo de tales reglas, podemos considerar las siguientes instancias del esquema anterior:

$Se\ tiene\ (Brilla\ (sol),\ s_i) \supset Se\ tiene\ (Brilla\ (sol),\ s_{i+1})$

Esto expresa que generalmente uno puede asumir que el sol permanecerá brillando y

$Se\ tiene\ (Vive\ (Pedro),\ s_i) \supset Se\ tiene\ (Vive\ (Pedro),\ s_{i+1})$

que expresa que generalmente uno puede asumir que una persona viva tiende a permanecer en ese estado.

Naturalmente en el caso de conocer que una persona está viva en un momento dado, también podemos asumir tentativamente que ha estado viva en el momento anterior. Si vemos un edificio, podemos asumir que estuvo ahí en el momento anterior. Esto induce a considerar el caso simétrico:

$Se\ tiene\ (P(x_1\dots x_n),\ s_{i-1}) \supset Se\ tiene\ (P(x_1\dots x_n),\ s_i)$

Para distinguir ambos casos denominaremos a las primeras reglas de *persistencia hacia el futuro* y reglas de *persistencia hacia el pasado*. Si una aserción, de tipo temporal (véase Terttu, 1993) puede reflejar persistencia, entonces tal vez el análisis de una lógica temporal como la que ofrece Arthur Prior, podría servir como herramienta para la formalización del problema de marco en general (y el problema de persistencia en particular). Cabe destacar que este tipo de lógica permite utilizar relaciones temporales, en las que no es necesario conocer el momento preciso en que ocurrió un hecho, lo cual permite que este enfoque resulte mucho más intuitivo y de alguna manera más “expresivo”, reflejando nuestro razonamiento de sentido común. Veamos a partir de su análisis, en qué aspectos la lógica métrico-temporal de Prior podría ser útil al problema de marco.⁵

6. LA LÓGICA TEMPORAL MÉTRICA DE PRIOR

Prior no solo investigó sobre lógicas y sistemas no métricos (Prior, 1966) sino que siguiendo la misma idea que utilizó para desarrollar éstos, también logró desarrollar métricos. La lógica métrica que desarrolló Prior es contrapuesta a la idea que Rescher (1966) utilizó en su lógica métrica.

⁵ Este análisis del problema de marco desde la lógica temporal de Prior, se podría complementar con el análisis del problema de marco desde la lógica temporal de Rescher y con la interacción de ambos tipos de lógicas por intentar dar una posible solución al problema de marco.

16. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

Concretamente, Prior (Prior, 1967a) mencionó, en sus trabajos, la posibilidad de enriquecer la lógica temporal con variables que representen intervalos. Un sistema de este tipo fue bosquejado en *Time and Modality* (Prior, 1957) con operadores de forma $P_n p$ para “Fue el caso en el intervalo n pasado que p ”, y $F_n p$ para “Será el caso en el intervalo n que p ”. Junto con ellos se agregan los cuantificadores, dando lugar a $\exists n F_n p$ para “Para algún n , será el caso en el intervalo n que p ”; $\forall n F_n p$ para “Para todo n , será el caso en el intervalo n que p ”; y los análogos con P . $\exists n F_n$, $\forall n F_n$, $\exists n P_n$, $\forall n P_n$ pueden corresponderse, respectivamente, con los operadores F , G , P y H ,⁶ teniendo en cuenta que no haya ninguna referencia temporal n libre, es decir sin ligadura a algún cuantificador. La estipulación es necesaria, porque, por ejemplo:

i) “Para algún n , será el caso en el intervalo n que se den ambos:

1. Matías sale afuera desabrigado y
2. será el caso en el n intervalo más tarde que Matías esté enfermo”.

Sentencia que queda expresada de forma lógica de la siguiente manera:

$$(\exists n F_n (p \wedge F_n q))$$

la cual significa algo un poco diferente de

ii) “Más pronto o más tarde

1. Matías saldrá afuera desabrigado y
2. será el caso en el n intervalo posterior que Matías esté enfermo.”

siendo su expresión lógica:

$$(F(p \wedge F_n q))$$

Ahora bien i) es una proposición completa, es decir, significa que algún tiempo después de ahora Matías saldrá desabrigado y exactamente la misma cantidad de tiempo después de eso, Matías estará enfermo y ii) por otro lado, es aún una sentencia abierta, y no dice nada definitivo hasta que la variable n es reemplazada por

⁶ Respectivamente: Fp : p es verdadera en algún tiempo futuro.
 Pp : p fue verdadera en algún tiempo pasado.
 Gp : p será verdadera en todos los tiempos futuros.
 Hp : p siempre ha sido verdadera en el pasado.

17. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

un intervalo específico o bien ligada por un nuevo cuantificador en alguna parte. Si se pone un $\exists n$ al comienzo de i), este cuantificador resultara redundante o vacuo, y dejará el sentido de la sentencia inalterado; si se pone al comienzo de ii) dará como resultado una nueva sentencia, diferente de las ya consideradas:

iii) "Para algún n , sería tarde o temprano el caso que

1. Matías sale afuera desabrigado y
2. será el caso en el intervalo n posterior que Matías está enfermo."

y esto significa algo un poco menos específico que i), diciendo que Matías va a salir desabrigado y luego estará enfermo, sin decir que la enfermedad aparecerá dos veces más alejado de la acción de salir desabrigado que se da en presente. La F de ii) y iii) puede, sin embargo, ser reemplazada por una cuantificación sobre intervalos, indicando que la variable usada no es n , por ejemplo, se podría dar iii) como $\exists n \exists m F_m (p \wedge F_n q)$.

No debería ser necesario decir que la cuantificación de este tipo no implica que los intervalos sean entidades. $\exists n P_n p$ "fue el caso en algún momento u otro que p ", es solo una generalización de afirmaciones como "Fue el caso ayer que p ", en el cual no hay entidades nombradas excepto alguna que puede ser mencionada dentro de la expresión dentro de p . Hay, sin embargo, un error más sutil que puede darse aquí.

En el simbolismo, la n no tiene significado aparte del indicado en el P precedente, y no puede formar parte de la proposición que lo sigue salvo en la compañía de ese P. En el hablar ordinario, se pueden malinterpretar frases construidas en un modo diferente. "Yo estaba enfermo ayer" sugiere que "ayer" modifica "enfermo", y que estar enfermo ayer es una manera particular de estar enfermo. No lo es; lo sería si hubiese algo como una manera de haber estado enfermo; y más exacto "haber estado ayer" es una forma de haber estado. El formalismo de Prior, sería tal vez adecuado para formalizar en una situación s , que la acción a deja invariable el valor del fluente p durante n intervalos, pero lo varía en el intervalo $n+1$.

7. COMENTARIOS FINALES

El presente trabajo partió de considerar como punto de referencia el problema de marco y sus propósitos, examinando como surge la temporalidad a través de la problemática implícita en esta cuestión, a saber, intentar determinar qué es lo que cambia y lo que no cambia de forma tal que apoyándose en esa determinación el agente pueda lograr tomar una decisión lo más eficientemente posible para conseguir el objetivo "previsto" o "deseado".

Varias observaciones al respecto apoyan la necesidad de adoptar una perspectiva de tipo temporal a la hora de tratar el problema de marco, atendiendo a diversas alternativas que han surgido al tratar la noción de tiempo. En este trabajo, y de manera sintética, hemos desarrollado de entre esas alternativas la sintaxis de los intervalos expuesta por Prior.

La teoría de proposiciones basadas en intervalos (que podría complementarse con la lógica temporal-cronológica de Rescher como otra posible vía) está preparada para mostrar la existencia de relaciones lógicas entre proposiciones tal que la verdad de la aserción de una sentencia en un momento podría estar ligada esencialmente con la verdad o falsedad de la aserción de una sentencia totalmente diferente en otro momento, atendiendo al conocimiento o no de cierta duración de tiempo. De ello la importancia de la noción de intervalo, propia de la Serie A que permite construir sentencias abiertas y/o proposiciones completas. La lógica temporal métrica, basada en intervalos, podría establecer puentes de conexión entre aquellos hechos (acciones, eventos o situaciones) que cambian, por un lado, y que persisten por otro, atendiendo a las nociones de tiempo (cambio y persistencia) en las que el problema de marco se basa (Allen, 1983).

El análisis de proposiciones métricas (véase Hamblin, 1972) frente a una situación nueva (atendiendo al conocimiento-marco del agente) reflejaría indirectamente, entonces: i) la necesidad de usar las nociones de intervalos (véase Reiter, 1993); ii) el modo en que se permite tal persistencia (en cuanto a un hecho-acción o hecho-evento del agente) tanto hacia el pasado como hacia el futuro; iii) los aspectos que persisten (y los que no) y, iv) finalmente, el tiempo en que podría persistir ese hecho.

A partir de las dificultades implícitas en el problema de marco al querer representar eficientemente el conocimiento de qué propiedades permanecen verdaderas a través de la realización de acciones en el mundo (problema de marco),

19. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

es relevante comprender cuánto se mantiene la verdad de un hecho (persistencia), atendiendo al intervalo de tiempo en el que estas acciones se realizan (temporalidad basada en intervalos). Fue nuestro aporte considerar como posible alternativa la lógica temporal (métrica) ofrecida por Prior como un modo, entre varios otros, de resolución del problema de marco.

REFERENCIAS

- Allen, J. (1983). "Maintaining knowledge about temporal intervals". *Communications of the ACM* 26: 832–843.
- Brzoska, C. (1993). "Temporal logic programming with bounded universal modality goals". *Proceedings of the Tenth International Conference on Logic Programming*: 239-256.
- Dennett, D. (1984). "Cognitive Wheels: The Frame Problem of AI". En: C. Hookway (Ed.), *Minds, Machines and Evolution* (pp. 129-151), Londres: Cambridge University Press.
- Gabbay, D. M., Hogger, C. J., y Robinson, J. A. (Eds.). (1994). *Handbook of Logic in Artificial Intelligence and Logic Programming, Volume 3: Nonmonotonic Reasoning and Uncertain Reasoning*. Oxford: Oxford University Press.
- Garson J. (2006). *Modal Logic for Philosophers*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Hamblin, C. L. (1972). "Instants and intervals". En: F. Haber, J. Fraser y G. Muller (Eds.), *The Study of Time* (pp.324-328), New York: Springer Verlag.
- Kowalski, R. (1979). *Logic for problem solving*, New York, Elsevier North Holland.
- Kowalski, R. y Sergot, M. (1986). "A logic-based calculus of events". *New Generation Computing* 4, 67–95.
- McCarthy, J. (1963). "A basis for a mathematical theory of computation. En: P. Brafford y D. Hirschberg, (Eds.), *Computer Programming and Formal Systems*, (pp. 33-70), Amsterdam: North-Holland
- (1986). "Applications of circumscription to formalizing common sense knowledge", *Artificial Intelligence*, 28, 89-116.
- McCarthy, J. y Hayes, P. (1969). "Some philosophical problems from the standpoint of artificial intelligence", *Machine Intelligence*, 4, 463-502.
- Minsky, M. (1986). *La sociedad de la mente. La inteligencia humana a la luz de la inteligencia artificial*. Buenos Aires: Ediciones Galápagos.
- Müller, E. (2006). *Commonsense reasoning*. San Francisco: Elsevier.
- Pinto, J. y Reiter, R. (1993). "Temporal reasoning in logic programming: A case for the situation calculus", *Proceedings of the Tenth International Conference on Logic Programming*: 203-221.
- Prior, A. (1957). *Time and Modality*. Oxford; Clarendon Press.
- (1966). "Postulates for tense logic", *American Philosophical Quarterly* 2: 153-161.
- (1967a). *Past, Present and Future*. Oxford: Clarendon Press.
- (1967b). "Stratified metric tense logic", *Theoria* 33: 28-38.
- Quine, W. (1960). *Word and Object*. Cambridge: MIT Press.
- Reiter, R. (1993). "Proving properties of states in the situation calculus". *Artificial Intelligence* 64: 337-351.
- Rescher, N. y Urquhart, A. (1971). *Temporal Logic*. New York: Springer-Verlag.
- Rescher, N. (1966). "On the logic of chronological propositions". *Mind* 75 (297): 75-96.
- Shanahan, M. (1993). "Explanation in the situation calculus". *Proceedings of IJCAI*: 160-165.
- Shanahan, M. (1997). *Solving the frame problem: A mathematical Investigation of the Common Sense Law of Inertia*. Cambridge: The MIT Press.
- Terttu, O. (1993). *Temporal reasoning and data base*. PhD thesis, Royal Institute of Technology, Department of Computer and System Sciences, Sweden.
- Vardi M. y Wolper P. (1986). "Automata-theoretic techniques for modal logics of programs", *Journal of Computer and System Science* 32(2): 183–221.

20. El problema de marco: la formalización de sistemas dinámicos. M. INÉS SILENZI

M. I. SILENZI: María Inés Silenzi (Bahía Blanca, 1976) es Licenciada en Filosofía (Universidad Nacional del Sur, 2003), Profesora en filosofía (Universidad Nacional del Sur, 2010), y Doctoranda en Filosofía (Universidad Nacional del sur, en curso). Es miembro del Centro del Lógica y Filosofía de la Ciencia (UNS) y participa del proyecto de investigación: “Argumentación y racionalidad en decisiones, acciones, elecciones y aceptación de creencias” (2011-2014). Se desempeña actualmente como docente en la Universidad Nacional del Sur y en la Universidad del Salvador, como asistente de cátedra y profesora adjunta respectivamente. Es Becaria doctoral (tipo II) del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas, Argentina (CONICET). Actualmente se encuentra realizando su tesis doctoral orientada al área de filosofía de la mente. Su gran interés es la filosofía de las Ciencias Cognitivas, particularmente el problema de marco y otros “viejos” problemas de la filosofía de la mente, a la luz del enfoque clásico y dinámico de las Ciencias Cognitivas.