

Modelos BDI graduados para arquitecturas de agentes

Ana Casali¹, Lluís Godó² y Carles Sierra²

¹ Depto. de Sistemas e Informàtica
Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura
Universidad Nacional de Rosario
Av Pellegrini 250, 2000 Rosario, Argentina.

² Institut d'Investigació en Intel·ligència Artificial (IIIA) - CSIC
Campus Universidad Autònoma de Barcelona s/n
08193 Bellaterra, Catalunya, España.

Resumen En los últimos años se ha incrementado el diseño e implementación de sistemas multiagentes (MAS), para abordar el desarrollo de sistemas distribuidos complejos. Para dar un sustento formal a estos sistemas, se han propuesto distintas teorías y arquitecturas, entre ellas se ha destacado el modelo BDI presentado por Rao y Georgeff. Para que la aplicación de los agentes en dominios reales se acreciente, es importante que los modelos formales incorporen el tratamiento de la incertidumbre. Este trabajo presenta un modelo general para especificar agentes BDI graduados y una arquitectura basada en los sistemas multicontextos. Este modelo permite representar y razonar con actitudes mentales graduadas, en particular se consideran las creencias (B), deseos (D) e intenciones (I). La arquitectura planteada establece un marco para diseñar distintos tipos de agentes particulares.

1. Introducción

En los últimos años se ha incrementado el diseño e implementación de sistemas multiagentes (MAS) para abordar el desarrollo de sistemas distribuidos complejos. Para dar un sustento formal a estos sistemas, se han propuesto distintas teorías y arquitecturas [21]. Las teorías de agentes son esencialmente especificaciones de su comportamiento. Entre las teorías más notorias están las que modelan al agente como un sistema intencional, cuyo comportamiento puede predecirse mediante la atribución de ciertas actitudes mentales como el conocimiento, creencias –actitudes de información– deseos, intenciones, obligaciones, compromisos –pro-actitudes, entre otras [4]. Las arquitecturas de agentes representan un punto intermedio entre las especificaciones y las implementaciones. Considerando al agente como un sistema intencional, una de las arquitecturas sobre la que más se ha trabajado es el agente BDI de Rao y Georgeff [17], [18]. Este modelo está basado en la representación explícita de las creencias del agente (B)—representando el estado del entorno, sus deseos (D)—representando sus motivaciones y las intenciones del agente (I)—modelizando sus metas u objetivos. Esta

arquitectura ha evolucionado en el tiempo y ha sido utilizada en importantes aplicaciones de sistemas multiagentes [22].

Modelizar las distintas nociones intencionales por medio de modalidades (B, D, I), utilizando un único marco lógico, suele presentar ciertas complejidades. Lo mismo ocurre si se trabaja con fórmulas modales de distintas lógicas, las cuales deben pasar de un sistema lógico a otro. Los trabajos sobre sistemas multicontexto —MCS— presentados por Giunchiglia et al. [7] presentan una propuesta para el diseño de estos sistemas lógicos complejos. Los MCS permiten definir diferentes componentes formales (contextos) y sus interrelaciones. Luego, para cada contexto se puede utilizar el formalismo lógico que sea más adecuado y las interacciones entre componentes son especificadas por medio de reglas inter-unidades, denominadas reglas puente. Estas reglas serán parte del aparato inferencial del sistema. Esta propuesta ha sido utilizada por Sabater et.al. [19] y Parsons et al. [16] para especificar distintas arquitecturas de agentes y en particular para la especificación de agentes BDI [14].

Las distintas arquitecturas de agentes desarrolladas hasta el momento, han sido planteadas para manejar información básicamente bivaluada. Si bien el modelo BDI de Rao y Georgeff, reconoce explícitamente que el conocimiento de un agente sobre el mundo es incompleto, representando las creencias de un agente como un conjunto de mundos posibles entre los cuales el agente sabe que puede estar su mundo real, no plantea usar la cuantificación de la estimación que cada mundo posible, sea el actual. Tampoco trata la valoración de los deseos e intenciones, información que podría ser útil para que la actuación de los agentes sea más eficiente. Hay algunos trabajos parciales en esta dirección, que destacan la importancia de trabajar con modelos graduados, como el de Parsons y Giorgini [15] donde consideran la cuantificación de las creencias utilizando la teoría evidencial. En esta propuesta se permite a un agente expresar su confianza respecto de los agentes con los cuales interactúa y realizar una revisión de creencias ante la presencia de inconsistencias. Los autores plantean también la importancia de cuantificar grados en los deseos e intenciones, pero esta problemática no es cubierta en ese trabajo. Lang et al. [12] presentan una lógica de intenciones donde consideran cierta incertidumbre escondida en las intenciones. Las intenciones son formalizadas para sustentar una real combinación de preferencia y plausibilidad (o normalidad). Plantean que la incertidumbre está presente en cierta noción ordinal de normalidad, considerando un orden en los mundos, según disten del mundo actual. También hay interesantes propuestas sobre la reconsideración de intenciones, como el trabajo de Schut et al. [20], para agentes que se desenvuelven en entornos con incertidumbre en términos de dinamismo, observabilidad y no-determinismo.

Las propuestas mencionadas anteriormente, modelizan aspectos parciales de la incertidumbre en relación a las actitudes mentales involucradas en la arquitectura de un agente. En este trabajo se plantea un modelo general de agente BDI graduado, especificando una arquitectura de agente que pueda tratar con la incertidumbre del entorno y actitudes mentales graduadas. En este sentido, los grados en las creencias van a representar en que medida el agente cree que

una fórmula es cierta. Los grados en los deseos positivos o negativos, permiten al agente establecer respectivamente, diferentes niveles de preferencia o de rechazo. Las graduaciones en las intenciones también estarán dando una medida de preferencia, pero en este caso, modelarán la relación costo-beneficio que le significa al agente alcanzar esa meta. A partir de la representación de estas tres actitudes y según como interactúen unas con otras, se puede modelar distintos tipos de agentes que tendrán diferentes comportamientos.

Este trabajo está estructurado de la siguiente forma: en la sección 2 se presentan los sistemas multicontexto y el marco lógico general para los contextos graduados. En las secciones siguientes se desarrollan los componentes del modelo BDI graduado: los distintos contextos —B, D,I, el Planner y la unidad de comunicación— y las reglas puente. Por último se presentan algunas conclusiones y el trabajo futuro.

2. Modelo de agente-BDI Graduado

Para especificar la arquitectura de un agente BDI graduado, utilizaremos las nociones de sistemas multicontextos. Estos sistemas han sido planteados por Giunchiglia [7] y utilizado por Sabater et al. [19] para la representación de arquitecturas de agentes, en particular los agentes BDI [14]. Estos sistemas plantean un esquema general para representar otro tipo de actitudes de un sistema intencional (obligaciones, compromisos, etc), las cuales pueden ser incorporadas incrementalmente.

Una especificación multicontexto de agente consta básicamente de unidades o contextos, lógicas y reglas puente. De esta forma, un agente es definido como un grupo de contextos interconectados: $\langle \{C_i\}_{i \in I}, \Delta_{br} \rangle$, donde cada contexto $C_i \in \{C_i\}_{i \in I}$ queda definido por $C_i = \langle L_i, A_i, \Delta_i \rangle$ donde L_i es un lenguaje, A_i axiomas y Δ_i reglas de inferencia, los cuales definen la lógica que utiliza el contexto. También se puede dar una teoría $T_i \subset L_i$ asociada a cada unidad. Δ_{br} son reglas de inferencia donde las premisas y conclusiones pertenecen a distintos contextos, por ejemplo la regla:

$$\frac{C_1 : \psi, C_2 : \varphi}{C_3 : \theta}$$

significa que podemos deducir θ en el contexto C_3 si las fórmulas ψ y φ son deducidas en C_1 y C_2 , respectivamente. En estos sistemas la deducción está a cargo de dos tipos de reglas de inferencia, las reglas internas Δ_i de cada contexto y las reglas puente Δ_{br} . Las reglas internas permiten obtener consecuencias dentro de una teoría, mientras que las reglas puente permiten exportar los resultados de una teoría a otra [6]. El modelo de agente considerado en esta propuesta tiene contextos para representar sus creencias (B), deseos (D) e intenciones (I). También se consideran otras unidades funcionales como un Planner (P) y una unidad dedicada a la comunicación (C). El Planner será el encargado de encontrar los distintos planes para pasar de un mundo a otro, calculando el costo

de los mismos. La unidad de comunicación establece una interface única y bien definida con el entorno, representando los sensores y actuadores del agente. Luego el modelo de agente es: $A_g = \langle \{B, D, I, P, C\}, \Delta_{br} \rangle$

2.1. El marco lógico

Cada contexto tiene su lógica asociada, lo que significa que se define un lenguaje, con su semántica y su sistema deductivo. Para representar y razonar con grados en las creencias, deseos e intenciones, se elige utilizar lógicas modales multivaluadas. En particular se seguirá la propuesta de Hájek et al. [10], [8], donde el razonamiento bajo incertidumbre se trata definiendo teorías modales adecuadas sobre lógicas multivaluadas. La idea básica es la siguiente, considerando el contexto B donde los grados de belief son modelados por ejemplo, como probabilidades, para cada fórmula clásica (bi-valuada), podemos considerar la fórmula modal $B\varphi$ denotando “ φ es probable”. Esta fórmula $B\varphi$ es entonces una fórmula fuzzy (multivaluada), la cuál puede ser verdadera en cierto grado, dependiendo de la probabilidad de φ . En particular, se puede considerar como grado de verdad de $B\varphi$ a la probabilidad de φ . Se necesita entonces, un marco lógico multivaluado para razonar sobre las fórmulas modales $B\varphi$'s, pero de forma que mantenga el modelo de incertidumbre que se elija para representar los grados de creencia. Es decir, un marco, donde además de los axiomas de la lógica multivaluada particular, se expresen los axiomas que garanticen una correcta interpretación del modelo de incertidumbre. En este trabajo se utilizará como lógica multivaluada la lógica de Łukasiewicz, por permitir modelizar distintas medidas de incertidumbre, en particular las probabilidades. El mismo marco lógico puede aplicarse a la representación y razonamiento con grados en los deseos e intenciones.

3. Contexto Belief

Este contexto estará dedicado a modelizar las creencias del agente. Para representar la incertidumbre de las mismas, se utilizan fórmulas multivaluadas, siguiendo el marco lógico descrito en la sección anterior y considerando en este caso particular, una medida de probabilidad como modelo de la incertidumbre. Otros modelos pueden ser planteados cambiando los axiomas correspondientes.

3.1. El lenguaje BL

Se define el lenguaje BL de las creencias a partir de la lógica multivaluada de Łukasiewicz, para razonar sobre la credibilidad de proposiciones crisp, siguiendo los trabajos de Godo et al. [8]. Para definir el lenguaje base (crisp) se parte de un lenguaje proposicional L al que hay que incluir los elementos que representan a las acciones, siguiendo la formalización planteada en las lógicas dinámicas y utilizadas en algunos trabajos sobre agentes [13]. Estas acciones, junto a las transformaciones que producen y a sus costos asociados, serán parte de las

creencias del agente. El lenguaje L es extendido a L_D incluyendo un conjunto de acciones y una modalidad para indicar las fórmulas que éstas harán ciertas. Partiendo del conjunto Π_0 de símbolos que representan las acciones elementales, el conjunto Π de acciones compuestas o planes se define inductivamente:

- $\Pi_0 \subset \Pi$
- si $\alpha, \beta \in \Pi$ entonces $\alpha; \beta \in \Pi$, (concatenación)
- si $\alpha, \beta \in \Pi$ entonces $\alpha \cup \beta \in \Pi$ (disjunción no-determinística)
- si $\alpha \in \Pi$ entonces $\alpha^* \in \Pi$ (iteración)
- si A es una fórmula, entonces $A? \in \Pi$ (test)

Las fórmulas en L_D se definen inductivamente siguiendo las definiciones de la lógica dinámica proposicional, ver e.g. [9]. Si $A \in L_D$ y $\alpha \in \Pi$ entonces el significado de $[\alpha]A$ es que "siempre después de α la fórmula A es cierta".

Sobre este lenguaje base L_D se introduce un operador modal fuzzy B , de modo que si $\varphi \in L_D$ la interpretación de $B\varphi$ será " φ es probable". Las fórmulas de BL son de dos tipos:

No modales: son las fórmulas (crisp) de L_D , $L_D \subseteq BL$.

Modales: se construyen a partir de fórmulas $B\varphi$, donde φ es una fórmula (crisp) de L_D , y de constantes racionales en el $[0, 1]$, usando los conectivos de la lógica multivaluada de Lukasiewicz: si $\varphi \in L$ entonces $B\varphi \in BL$, si r es un racional de $[0, 1]$ entonces las constantes $\bar{r} \in BL$, si $\Phi, \Psi \in BL$ entonces $\Phi \rightarrow_L \Psi$ y $\Phi \& \Psi \in BL$ (donde $\&, \rightarrow_L$ corresponden a la lógica de Lukasiewicz).

Otros conectivos (multivaluados) para las fórmulas modales pueden ser introducidos a partir de $\&, \rightarrow_L$ y $\bar{0}$, en particular usaremos $\neg_L \Phi$ como $\Phi \rightarrow_L \bar{0}$ y $\Phi \equiv_L \Psi$ como $(\Phi \rightarrow_L \Psi) \& (\Psi \rightarrow_L \Phi)$. Las fórmulas modales de la forma $\bar{r} \rightarrow_L \Psi$ pueden notarse como un par graduado (Ψ, r) .

3.2. Axiomas y reglas de BL

Como se mencionó en la Sección 2, para establecer una adecuada axiomatización de este contexto, se necesita combinar axiomas de las fórmulas crisp, axiomas de la lógica de Lukasiewicz para las fórmulas modales y axiomas adicionales para las fórmulas B-modales, de acuerdo a la semántica probabilística del operador B .

1. Axiomas de la lógica dinámica proposicional para fórmulas de L_D
2. Axiomas de la lógica multivaluada de Lukasiewicz para las fórmulas modales: e.g. axiomas de la lógica fuzzy Básica (BL) de Hájek [10] más el axioma:
 $\neg \neg \Phi \rightarrow \Phi$
3. Axiomas para el operador modal de creencia: si es modelada como una probabilidad, éstos son:
 $B(\varphi \rightarrow \psi) \rightarrow_L (B\varphi \rightarrow_L B\psi)$
 $B\varphi \equiv \neg_L B(\varphi \wedge \neg \psi) \rightarrow_L B(\varphi \wedge \psi)$
 $\neg_L B\varphi \equiv B\neg \varphi$
4. Reglas de inferencia: Modus Ponens, necesidad para los operadores de acciones (de φ derivar $[\alpha]\varphi$, para todo $\alpha \in \Pi$) y necesidad para B (de φ derivar $B\varphi$)

La noción de deducción en BL utilizando los anteriores axiomas y reglas de inferencia se denotará por \vdash_{BL} .

3.3. Semántica para BL

La semántica del lenguaje BL se define mediante estructuras de Kripke $M_B = \langle W, e, \mu, \rho, c \rangle$ donde:

- W es un conjunto no vacío de mundos posibles.
- $e : V \times W \rightarrow \{0, 1\}$ define la evaluación Booleana para cada variable proposicional en cada mundo, $e(p, w) \in \{0, 1\}$
- $\mu : \mathcal{B} \rightarrow [0, 1]$ es una medida de probabilidad sobre un álgebra \mathcal{B} del conjunto de partes de W tal que para cada p , el conjunto $\{w \mid e(p, w) = 1\}$ es μ -medible.
- $\rho : \Pi \rightarrow 2^{W \times W}$, donde para cada acción $\alpha \in \Pi$, $\rho(\alpha) \subseteq W \times W$ denota el conjunto de transiciones entre estados asociadas a la acción α

Las evaluaciones $e(\cdot, w)$ se extienden a las fórmulas de L_D siguiendo las reglas de la lógica dinámica proposicional (e.g. [9]), y a las fórmulas modales de acuerdo con la semántica de la lógica de Łukasiewicz y de la interpretación probabilística de las creencias, i.e.:

- $e(B\varphi, w) = \mu \{w' \in W \mid e(\varphi, w') = 1\}$
- $e(\bar{r}, w) = r$,
- $e(\Phi \& \Psi, w) = \max(e(\Phi, w) + e(\Psi, w) - 1, 0)$,
- $e(\Phi \rightarrow \Psi, w) = \min(1 - e(\Phi, w) + e(\Psi, w), 1)$

En particular $\bar{r} \rightarrow_L B\varphi$ toma el valor de verdad 1 sii el valor de verdad de $B\varphi$ es mayor o igual que el de \bar{r} , luego la fórmula modal $(B\varphi, r)$ expresa que la probabilidad de φ es al menos r . Finalmente, el grado de verdad de una fórmula Φ en la estructura $K = \langle W, e, \mu, \rho, c \rangle$ se define como $\|\Phi\|^K = \inf_{w \in W} e(\Phi, w)$.

Usando las técnicas planteadas por Hájek [10] no es difícil probar que esta semántica es correcta y completa respecto a la axiomática antes definida: si T es una teoría finita sobre BL , entonces $T \vdash_{BL} \Phi$ sii $\|\Phi\|^K = 1$ para toda estructura K modelo de T (i.e. tal que $\|\Psi\|^K = 1$ para toda $\Psi \in T$).

4. Contexto Desire

En este contexto se representan y se razona sobre los deseos de un agente. Estos manifestarán sus preferencias ideales, independientemente de cuál sea la ubicación del agente y del costo que involucre alcanzarlos. En las preferencias, es interesante poder distinguir entre lo que es positivamente deseado y aquello que no es rechazado. Según los trabajos sobre bipolaridad de Benferhat et al. [1], estos tipos de información positiva y negativa pueden modelizarse gradualmente mediante la lógica posibilística, por medio de un esquema bipolar utilizando restricciones expresadas en términos de medidas de la teoría de la posibilidad [2]. Con inspiración en estos trabajos, en este contexto se pueden representar los deseos positivos y negativos de un agente. Los deseos positivos modelizarán lo que

el agente desea que ocurra en algún grado, y los deseos negativos corresponderán a lo que rechaza o desea que no ocurra, con cierto peso.

4.1. Lenguaje DL

Se define el lenguaje DL de este contexto a partir de un lenguaje proposicional L finitamente generado, agregando dos operadores modales D^+ y D^- . D^+ se interpreta como " φ es positivamente deseada" y su grado de verdad representa el grado de satisfacción que le traerá al agente que φ sea cierta. En el caso de $D^-\varphi$, se lee como " φ es negativamente deseada" y su grado de verdad representa la medida de rechazo o del deseo de que no ocurra φ . Como en la lógica utilizada en el contexto BL, se utiliza una lógica modal multivaluada para poder modelizar estos grados. También aquí se usa como base la lógica de Łukasiewicz, con la introducción de un nuevo conectivo Δ (denominado conectivo de Baaz [10]). $\Delta\Phi$ es una fórmula que sólo toma valores 1 y 0: toma el valor 1 cuando Φ tiene valor 1, y toma el valor 0 en cualquier otro caso.

Se define el lenguaje DL de forma similar a BL, donde existirán fórmulas no-modales y modales. Las no-modales serán fórmulas proposicionales clásicas (crisp) φ , mientras que las modales (multivaluadas) se construirán a partir de fórmulas del tipo forma $D\psi$, donde D puede corresponder a D^+ o D^- y ψ es una fórmula clásica, con los conectivos de la lógica de Łukasiewicz. Al igual que en BL, $(D\psi, \bar{r})$ denotará $\bar{r} \rightarrow_L D\psi$.

En este contexto las preferencias del agente se expresarán por medio de una teoría T , que podrá contener expresiones sobre los dos tipos de preferencias, tanto cuantitativas del tipo $(D^+\phi_i, \alpha_i)$ o $(D^-\psi_i, \beta_i)$, como cualitativas del tipo $D^+\psi \rightarrow_L D^+\varphi$ (resp. $D^-\psi \rightarrow_L D^-\varphi$), expresando que φ es tan preferido (resp. rechazado) como ψ . En particular si $(D^+\phi_i, 1) \in T$ representa el caso en que el agente tiene preferencia máxima por ϕ_i y estará totalmente satisfecho ante su cumplimiento. Si $T \vdash_{DL} (D^+\phi_j, 0)$ significa que el agente es indiferente a ϕ_j y que su cumplimiento no le trae ningún beneficio. Por otro lado, si $(D^-\psi_i, 1) \in T$ representa que el agente tiene total rechazo por ϕ_i y que los estados donde ψ_i sea cierta serán totalmente inaceptables para el agente. Si se tiene $(D^-\psi_j, 0)$, significa que ψ_j no es rechazada, al igual que las fórmulas que no estén explicitadas en la teoría. En el caso en que $(D^-\phi, \alpha)$, $(D^-\psi, \beta)$, con $\alpha > \beta$, entonces ϕ es más rechazado que ψ .

4.2. Axiomas de DL

Al igual que en el contexto B, para axiomatizar esta unidad, se necesitan combinar distintos grupos de axiomas: de la lógica clásica, de la lógica de Łukasiewicz extendida con el conectivo Δ junto a axiomas que caractericen el comportamiento de los operadores D^+ y D^- . A partir de esta combinación surge el siguiente conjunto de axiomas y reglas para DL:

1. Axiomas de la lógica clásica para las fórmulas no modales

2. Axiomas de la lógica de Łukasiewicz con Δ (cf. [10]) para las fórmulas modales con el operador Δ (cf.[10]).
3. Axiomas para D^+ y D^- sobre la lógica de Łukasiewicz;

$$D^+(A \vee B) \equiv D^+A \wedge D^+B$$

$$D^-(A \vee B) \equiv D^-A \wedge D^-B$$

$$\neg_L(\nabla D^-A \& \nabla D^+A), \text{ donde } \nabla \text{ es } \neg_L \Delta \neg_L^1.$$
4. Reglas: modus ponens, necesitación para Δ , e introducción de D^+ y D^- para implicaciones: de $A \rightarrow B$ derivar $D^+(B) \rightarrow_L D^+(A)$ y $D^-(B) \rightarrow_L D^-(A)$.

Nótese que los primeros dos axiomas de D^+ y D^- describen su comportamiento respecto a la disyunción. El grado de deseo positivo para una disyunción $\varphi \vee \psi$ es naturalmente el mínimo de los grados de φ y ψ , mientras que el grado de satisfacción de alcanzar $\varphi \wedge \psi$ no debe ser menor que alcanzar a cada uno, en forma individual. Esta propiedad viene garantizada por las regla de introducción de D^+ y D^- para las implicaciones, que establece que el grado de deseo es monótono decreciente respecto a la implicación lógica. Estas son las propiedades de las *medidas de posibilidad garantizada* [1]. Análogamente el grado de rechazo de $\varphi \vee \phi$ se toma como el mínimo grado de rechazo de φ y de ϕ . El último axioma establece que no es posible tener deseos positivos y negativos sobre la misma fórmula. La deducción en DL mediante el anterior sistema de reglas y axiomas se denotará por \vdash_{DL} .

4.3. Semántica para DL

Los modelos para DL son estructuras de Kripke $M_D = \langle W, e, \pi^+, \pi^- \rangle$ donde las definiciones de W y e son las mismas utilizadas en la semántica de BL y $\pi^+, \pi^- : W \rightarrow [0, 1]$ son distribuciones de preferencias sobre el conjunto de mundos, utilizadas para dar semántica a los deseos positivos y negativos: si $\pi^+(w) < \pi^+(w')$ significa que w' es más preferido que w . mientras que $\pi^-(w) < \pi^-(w')$ significa que w' es más rechazado que w . Entre ambas distribuciones se requiere la siguiente condición de consistencia: si $\pi^-(w) > 0$ entonces $\pi^+(w) = 0$, ésto significa que si w es rechazado en algún grado, no puede ser deseado, y a la inversa. La evaluaciones Booleanas de $e(\cdot, w)$ se extienden a las fórmulas no-modales de L en forma clásica y a las fórmulas modales, utilizando los conectivos de Łukasiewicz (como en el caso de BL) junto con Δ y considerando:

$$\begin{aligned}
 & - e(D^+\varphi, w) = \inf\{\pi^+(w') \mid e(\varphi, w') = 1\} \\
 & - e(D^-\varphi, w) = \inf\{\pi^-(w') \mid e(\varphi, w') = 1\} \\
 & - e(\Delta\Phi, w) \begin{cases} 1, & \text{if } e(\Phi, w) = 1 \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}
 \end{aligned}$$

Como en el caso de BL, esta semántica es correcta y completa para la deducción \vdash_{DL} .

¹ Nótese que $e(\nabla\Phi, w) = 1$ si $e(\Phi, w) > 0$, y $e(\nabla\Phi, w) = 0$ en otro caso.

5. Contexto Intention

En este contexto se representan las intenciones del agente, las cuales son proactivas y representan los objetivos que el agente intentará alcanzar en pro de satisfacer sus deseos. Generalmente la intención deriva en un plan de una o varias acciones, que el agente desarrollará para lograr el objetivo. Se siguen los trabajos de Rao y Georgeff [17], [18], los cuáles consideran a las intenciones como una actitud proactiva fundamental. En este contexto, las intenciones dependerán no sólo del beneficio que le traerá alcanzar al agente el objetivo φ (representado en $D^+\varphi$), sino del estado w en que se encuentre el agente y del costo que le signifique transicionar a un estado w' donde se satisfaga la fórmula φ . Al permitir graduaciones en las intenciones se puede representar una medida que refleje la relación costo/beneficio que le traerá al agente alcanzar el objetivo.

5.1. Lenguaje, Semántica y Axiomática para IL

La sintaxis para IL se define al igual que lo realizado en el lenguaje BL, partiendo de un lenguaje base L_D e incorporando un operador modal I . Se utiliza la lógica multivaluada de Lukasiewicz para representar el grado de las intenciones. Como en los otros contextos, si se tiene que el grado de $I(\varphi)$ es δ , puede considerarse que el grado de verdad de la expresión “ φ es intentada” es δ . Si en una teoría se tiene $(I(\varphi), \alpha)$, $(I(\psi), \beta)$ con $\alpha > \beta$, entonces el agente intentará φ antes que ψ y posiblemente no intente las fórmulas $(I(\phi), \delta)$ con $\delta < Umbral$, ya sea que esta situación represente que el beneficio de alcanzar ϕ es bajo o el costo es muy alto.

Los modelos para IL son estructuras de Kripke $K = \langle W, e, \{\pi_w\}_{w \in W}, \rangle$ donde W y e son definidas como en los contextos anteriores y para cada $w \in W$, $\pi_w : W \rightarrow [0, 1]$ es una distribución de posibilidad de forma que $\pi_w(w') \in [0, 1]$ es el grado en que el agente va a intentar llegar al estado w' desde el estado w . La evaluación de verdad $e : V \times W \rightarrow \{0, 1\}$ se extiende a las fórmulas no-modales de L en forma clásica y a las fórmulas modales multivaluadas de acuerdo a la semántica de Lukasiewicz teniendo en cuenta la siguiente definición:

$$e(I(A), w) = N_w(\{w' \mid e(A, w') = 1\}),$$

donde N_w denota la medida de necesidad asociada a la distribución π_w .

La axiomática para el operador I será la que es correcta y completa respecto a las medidas de necesidad (cf. [10]), la cual corresponde a los siguientes axiomas y reglas:

- $I(A \rightarrow B) \rightarrow_L (I(A) \rightarrow_L I(B))$
- $\neg_L I(\perp)$
- $I(A \wedge B) \equiv (I(A) \wedge_L I(B))$
- Reglas: Modus Ponens y necesitación para I (de φ derivar $I\varphi$).

6. Contexto Planner y de Comunicación

Ambos contextos tienen un sentido funcional. En el caso del Planner (P), a partir de un mundo donde se encuentra el agente, debe encontrar un plan que le

permita trasladarse a otro, donde la fórmula que se intenta sea cierta, siguiendo algún criterio de optimización, por ejemplo, el mínimo costo. Este plan tendrá un costo asociado el cual puede ser normalizado llevándolo al intervalo $[0,1]$. Para este contexto se define un lenguaje de 1^{er} orden L_P restringido a cláusulas de Horn, que incluye los predicados:

- *acción*(β, P, A, c) donde $\beta \in \Pi_0$ es una acción elemental, $P \subset L_P$ es el conjunto de pre-condiciones, $A \subset L_P$ es el conjunto de las post-condiciones y $c \in [0, 1]$ es el costo normalizado de la acción.

- *plan*(φ, α, P, A, c) donde $\alpha \in \Pi$ donde $\alpha \in \Pi$ es una acción compuesta para alcanzar φ , P son las pre-condiciones of α , A son las post-condiciones, $\varphi \in A$, c es el costo normalizado del plan α .

La unidad de comunicación (C) encapsula la estructura interna del agente dándole una interface única y bien definida con el entorno. Esta unidad también está dotada de un lenguaje de 1^{er} orden, reducido a cláusulas de Horn y ambas utilizan resolución como método de inferencia.

7. Reglas puente

Las reglas puente Δ_{br} son reglas de inferencia inter-contextos, las cuales permiten exportar fórmulas de una teoría a otra. Estas reglas junto a las reglas de inferencia de cada contexto, conforman el aparato deductivo del sistema. Las reglas puente son formalizadas del siguiente modo:

$$\frac{u_1 : \varphi, \dots, u_j : \psi}{u_k : \theta} \text{ donde } u_i \in \{B, D, I, P, C\}$$

Para este modelo de agente BDI se define un conjunto de reglas puentes básicas, las cuales se ilustran en la figura 1. Para definir la relación de las creencias del agente con el Planner, a través de la cual el conocimiento del agente respecto al estado del mundo, las acciones que los modifican y sus costos pasan al Planner como fórmulas de 1^{er} orden $[\cdot]$, se tiene la siguiente regla:

$$\frac{B : B(\varphi)}{P : [B(\varphi)]} \quad (1)$$

A partir de los deseos positivos, las creencias del agente y de las posibles acciones transformadoras, el Planner construye planes. Estos planes se componen de acciones elementales, con el objeto de satisfacer los deseos positivos y evitar los negativos. La siguiente regla formaliza estas interacciones:

$$\frac{D : (D^+ \varphi, 0), D : (D^- \psi, \text{threshold}), P : \text{action}(\alpha, P, D, A, c), B : B([\alpha]\varphi), B : B(A \rightarrow \neg\psi)}{P : \text{plan}(\varphi, \alpha, P, A, c)} \quad (2)$$

El grado de una intención φ se infiere a partir del beneficio $D^+ \varphi$ y del costo del mejor plan α que encuentre el Planner para satisfacer a φ . Hay una regla puente

que permite realizar esta deducción:

$$\frac{D : (D^+\varphi, d), P : \text{plan}(\varphi, \alpha, P, A, c)}{I : (I\varphi, f(d, c))} \quad (3)$$

La definición de f dependerá del comportamiento de agente que se quiera modelar, por ejemplo, para un *agente equilibrado*, que de igual peso a la satisfacción que al costo, se puede definir $f(d, c) = (d + (1 - c))/2$.

En los agentes BDI también se ha visto la utilidad de usar reglas puente para representar las relaciones entre las creencias, deseos e intenciones del agente lo cual permite definir distintos comportamientos denominados realismos. Si utilizamos el modelo correspondiente al realismo fuerte [18] entonces, el agente no desea lo que no cree posible y no tiene la intención de una meta que no desea, estas relaciones son modelizadas por las reglas:

$$\frac{B : \neg B\psi}{D : \neg D\psi} \text{ y } \frac{D : \neg D\psi}{I : \neg I\psi} \quad (4)$$

También se definen reglas que manejen las interacciones del agente con el entorno. Si el agente intenta φ en grado i $-(I\varphi, i)$ — donde i es el máximo grado de las intenciones, entonces el agente comunicará la ejecución del plan α , que permite al agente obtener el máximo grado de intención i .

$$\frac{I : (I\varphi, i), P : \text{plan}(\varphi, \alpha, P, A, c)}{C : C(\text{does}(\alpha))} \quad (5)$$

Por medio de la unidad de Comunicación (C) el agente persive los cambios en el entorno, los cuales son introducidos al contexto B mediante la siguiente regla:

$$\frac{C : \beta}{B : B\beta} \quad (6)$$

La figura 1 muestra un esquema del modelo graduado de agente BDI planteado, representado los contextos involucrados y las reglas puentes que los interrelacionan.

8. Conclusiones y Trabajo Futuro

Se ha planteado un modelo de agente BDI que permite representar explícitamente la incertidumbre en las creencias, deseos e intenciones. Esta arquitectura graduada está especificada usando sistemas multicontextos y es lo suficientemente general como para poder especificar distintos tipos de agentes. En el modelo presentado se han planteado diferentes contextos para las Creencias, Deseos e Intenciones, utilizando una lógica específica en cada unidad. Se ha elegido la lógica multivaluada de Lukasiewicz para modelizar los grados, agregando la axiomática corespondiente para que represente su comportamiento —probabilidad, necesidad— en cada caso. Otras medidas de incertidumbre pueden ser usadas en

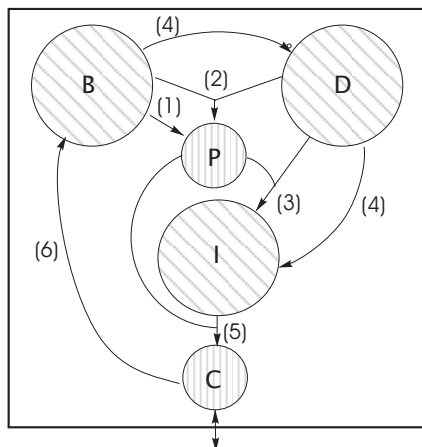


Figura 1. Modelo multicontexto de un agente BDI graduado

los distintos contextos, cambiando la axiomática correspondiente. Además, como el modelo está basado en una especificación multicontexto, puede extenderse fácilmente para incluir otras actitudes mentales. A partir de este modelo, estableciendo teorías concretas en cada contexto, se pueden definir agentes particulares. El comportamiento de un agente quedará determinado a partir de estas teorías específicas, de las diferentes medidas de incertidumbre de cada contexto y de las reglas puentes que los interrelacionan. Como trabajo futuro, planteamos desarrollar una implementación que soporte tanto a la definición genérica de agente BDI graduado, como a distintas instancias de agentes particulares.

Referencias

1. Benferhat S., Dubois D., Kaci S. and Prade, H. Bipolar Possibilistic Representations. *Proceedings of the 18th Conference in Uncertainty in Artificial Intelligence (UAI 2002)*: pages 45-52. Morgan Kaufmann 2002.
2. Benferhat S., Dubois D., Kaci S. and Prade, H. Bipolar representation and fusion of preferences in the possibilistic Logic framework. *In Proceedings of the 8th International Conference on Principle of Knowledge Representation and Reasoning (KR '02)*, pages 421-448, 2002.
3. Cimatti A. and Serafini L. Multi-Agent Reasoning with Belief Contexts: the Approach and a Case Study. In M. Wooldridge and N. R. Jennings, editors, *Intelligent Agents: Proceedings of 1994 Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*, number 890 in LNCS, pages 71-5. Springer Verlag, 1995.
4. Dennet, D. C. *The Intentional Stance*. MIT Press, Cambridge, MA, 1987.
5. Esteva, F., García, P. and Godo L. Relating and extending semantical approaches to possibilistic reasoning. *International Journal of Approximate Reasoning*, 10:311-344, 1994.
6. Ghidini C. and Giunchiglia F. Local Model Semantics, or Contextual Reasoning = Locality + Compatibility *Artificial Intelligence*,127(2):221-259, 2001.
7. Giunchiglia F. and Serafini L. Multilanguage Hierarchical Logics (or: How we can do without modal logics) *Journal of Artificial Intelligence*, vol.65, pp. 29-70, 1994.

8. Godo, L., Esteva, F. and Hajek, P. Reasoning about probabilities using fuzzy logic. *Neural Network World*, 10:811–824, 2000.
9. Goldblatt R. *Logics of Time and Computation*, CSLI Lecture Notes 7, 1992.
10. Hájek, P. *Metamathematics of Fuzzy Logic*, volumen 4 de Trends in Logic. Kluwer, 1998.
11. Jennings N.R. On Agent-Based Software Engineering. *Artificial Intelligence* 117(2), 277-296, 2000.
12. Lang J., van der Torre, L. and Weydert E. Hidden Uncertainty in the Logical Representation of Desires *International Joint Conference on Artificial Intelligence, IJCAI 03*, Acapulco, Mexico, 2003.
13. Meyer J. J. Dynamic Logic for Reasoning about Actions and Agents. *Workshop on Logic-Based Artificial Intelligence*, Washington, DC, June 14–16, 1999
14. Parsons, S., Sierra, C. and Jennings N.R. Agents that reason and negotiate by arguing. *Journal of Logic and Computation*, 8(3): 261-292, 1998.
15. Parsons, S. And Giorgini P. On using degrees of belief in BDI agents. *Proceedings of the International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Paris, 1998.
16. Parsons, S., Jennings, N.J., Sabater, J. and Sierra C. Agent Specification Using Multi-context Systems. *Foundations and Applications of Multi-Agent Systems 2002*: 205-226, 2002.
17. Rao, A. And Georgeff M. Modeling Rational Agents within a BDI-Architecture. *In proceedings of the 2nd International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR-92)*, pages 473-484 (ed R. Fikes and E. Sandewall), Morgan Kaufmann, San Mateo, CA, 1991.
18. Rao, A. and Georgeff M. BDI agents: From theory to practice. *In proceedings of the 1st International Conference on Multi-Agents Systems*, pp 312-319, 1995.
19. Sabater, J., Sierra, C., Parsons, S. and Jennings N. R. Engineering executable agents using multi-context systems. *Journal of Logic and Computation*12(3): 413-442 (2002).
20. Schut, M., Wooldridge, M. and Parsons S. Reasoning About Intentions in Uncertain Domains Symbolic and Quantitative Approaches to Reasoning with Uncertainty. *ECSQARU 2001, Proceedings*, pages 84-95, Toulouse, France, 2001.
21. Wooldridge, M. and Jennings N. R. Intelligent Agents: theory and practice. *The Knowledge Engineering Review*, 10(2), 115-152, 1995.
22. Wooldridge, M. *Introduction to Multiagent Systems*, John Wiley and Sons,Ltd., 2001