

Un problema obvio es el relacionado con la cooperación y los acuerdos ¿Cómo se alcanza un acuerdo en una sociedad de agentes individualistas? A diferencia de los escenarios extremos de suma cero, en la mayoría de las interacciones reales es posible alcanzar un acuerdo benéfico para todos los participantes. Lograr esto sin la intervención de un tercero, a manera de árbitro, es una habilidad fundamental de los agentes autónomos inteligentes. Las capacidades de negociación y argumentación sustentan la habilidad para alcanzar acuerdos.

Los escenarios de negociación son gobernados por protocolos que definen las reglas del encuentro para todos los participantes. El diseño de tales protocolos es un área de investigación por sí misma, por ejemplo, ver el trabajo de Rosenschein y Zlotkin [164].

Otro tema es, dado un protocolo particular ¿Cómo podemos diseñar una estrategia que los agentes puedan usar cuando negocian? Un agente intentará usar la estrategia que maximiza su bienestar. Lo importante es que diseñar al agente que teóricamente maximiza alguna medida de bienestar, no es suficiente: tenemos que diseñar agentes que maximicen esta medida en la práctica.

¿Qué propiedades deben tener los protocolos de negociación? Cuando diseñamos protocolos convencionales de comunicación, deseamos demostrar que están libres de bloqueos mutuos (incluyendo los llamados *livelocks*: cuando dos personas son gentiles en un pasillo y se ceden el paso una y otra vez). En el caso de los SMA estos bloqueos evidentemente deben ser resueltos, pero además estamos interesados en **propiedades** como las siguientes:

Propiedades

- **Garantizar el éxito.** Un protocolo garantiza el éxito si asegura que, eventualmente, un acuerdo puede ser alcanzado.
- **Maximizar el bienestar social.** Intuitivamente, un protocolo maximiza el bienestar social si asegura que el resultado de la negociación maximiza la suma de las utilidades de los participantes. Si la utilidad del resultado para un agente dado fue simplemente definida en términos del dinero que éste recibe, entonces el protocolo que maximice el bienestar social será aquel que maximice el total de dinero recibido por el agente.
- **Eficiencia de Pareto.** El resultado de una negociación se dice pareto eficiente, si no existe otro resultado posible que haga que un agente mejore sin hacer al mismo tiempo que un agente empeore. Intuitivamente, si el resultado de una negociación no es pareto eficiente, entonces existe otro resultado que hace que uno de los agentes sea más feliz, manteniendo a los demás tan felices como estaban.

- **Racionalidad individual.** Un protocolo se dice individualmente racional si, seguir las reglas del juego es de interés para todos los participantes. Este tipo de protocolos son esenciales, pues sin ellos no hay razones o incentivos para que los agentes inicien una negociación.
- **Estabilidad.** Un protocolo es estable si, provee a todos los agentes de un incentivo para actuar de cierta manera. La forma más conocida de estabilidad es el **equilibrio de Nash**, como se mencionó en el capítulo anterior.
- **Simplicidad.** Un protocolo simple es aquel que hace parecer a la estrategia apropiada, como obvia para todos los agentes participantes. Si el protocolo es simple, los participantes debería determinar la estrategia óptima fácilmente.
- **Distribución.** Un protocolo debe diseñarse para asegurar que no hay un sólo punto de fallo (como un árbitro) e, idealmente, minimizar la comunicación entre los agentes.

El hecho de que aún para protocolos simples de negociación, estas propiedades puedan ser verificadas formalmente, sustenta el éxito del enfoque basado en teoría de juegos en la investigación de los SMA, por ejemplo en el trabajo de Shoham y Leyton-Brown [174].

9.1 SUBASTAS

Las subastas eran relativamente raras en nuestra vida cotidiana, pero ahora es común escuchar, por ejemplo, que una escultura de Modigliani fue vendida en 52.8 millones de Euros, usando estos mecanismos. Aunque en Latino América, siguen siendo raras, Internet cambió esto en los países desarrollados, por ejemplo, EBAY ¹ hace circular una cantidad y diversidad de bienes considerable, por esta vía. Una razón del éxito de estos protocolos en Internet, es que son extremadamente **simples**, lo cual significa que son fáciles de automatizar. A pesar de su simplicidad, las subastas ofrecen una rica colección de problemas interesantes a los investigadores y poderosas herramientas para **adjudicación** de bienes, tareas y recursos.

En abstracto, una subasta tiene lugar entre un agente llamado **subastador** y un grupo de agentes conocidos como **licitadores**. La meta del subastador es adjudicar un bien a alguno de los licitadores. En las configuraciones tradicionales, el subastador desea maximizar el precio del bien ofertado y los licitadores, desean minimizarlo. El subastador tratará de satisfacer su deseo, estableciendo las reglas de la subasta, el protocolo. Los licitadores, por su parte, abordarán este problema vía la adopción de una estrategia acorde al protocolo, que ofrezca un resultado óptimo.

Diversos factores pueden influir en el protocolo y la estrategia adoptados por los agentes. El más importante de ellos es si el bien subastado tiene un valor **privado** ó **público** (ó común). Por ejemplo, consideren la subasta de un billete de un dólar. Uno esperaría que, siéndo un billete normal, los

Valores

¹ <http://www.ebay.com/>

licitadores estuvieran dispuestos a pagar por él, a lo más un dólar. Ese billete tiene un valor común, el mismo valor para todos los agentes licitadores. Sin embargo, supongan que ese billete fue el último que uso Michael Jackson! Tendrían millones de fanáticos queriendo pagar mucho más por el billete, aunque yo seguiría pagando por él a lo más un dólar. En ese caso el billete tiene un valor privado, diferente valor para diferentes licitadores.

Hay un tercer tipo de valoración del bien subastado, la **correlacionada**. En ese caso la valoración del bien depende en una parte de su valor privado y en otra del público. Por ejemplo, los marchantes de arte valoran muchas veces así las obras: que tanto me gustaría tener un Barceló y en cuanto lo puedo vender más tarde.

Existen **variaciones** al protocolo básico de subasta que hemos introducido informalmente. Se puede variar el mecanismo para **determinar un ganador**. En el caso común, el mecanismo parece aparente: el licitador que ofrece más es el que gana. Este tipo de subastas se conocen como de **precio primero**. Sin embargo, esta no es la única posibilidad. Una posibilidad es adjudicar el bien a quien ofreció más, pero el ganador paga lo ofrecido por el segundo lugar (**precio segundo**). Aunque parezca contraintuitivo hay algunas configuraciones de subasta, donde esto es conveniente. Otra variación posible al mecanismo básico de subasta es si las ofertas son públicas o no. Si se conocen todas las ofertas, se dice que la subasta es **abierta**; en caso contrario se les conoce como **selladas**. Otra variación posible está en la forma en que se llevan a cabo las ofertas. Lo más común es que haya una sola ronda de recepción de ofertas, tras lo cual el subastador adjudica el bien al ganador. Este tipo de subastas se conocen como de **un tiro**. Otra posibilidad es que la subasta sea **ascendente**, esto es, el bien inicia con un precio bajo y hay sucesivas rondas de ofertas, hasta que nadie oferta más. Por supuesto, las subastas también pueden ser **descendentes**.

Variaciones

9.1.1 Subasta inglesa

Las subastas inglesas son las más conocidas: precio primero, abiertas, ascendentes. Como en Sothebys, que subastó la cabeza de Modigliani. El protocolo es como sigue:

- El subastador inicia sugiriendo un **precio de reserva** para el bien (el cual puede ser cero). Si ningún agente desea hacer una oferta superior al precio de reserva, el bien es adjudicado al subastador por ese precio.
- Se invita a los demás agentes a hacer ofertas, que deben ser superiores a la oferta actual. Todos los agentes pueden ver las ofertas hechas por otros agentes y pueden participar en el proceso, si así lo desean.
- Cuando ningún agente desea elevar la oferta, el bien es adjudicado al agente que ha hecho la más alta oferta, y el precio a pagar por el bien es el indicado en esa oferta.

Precio de reserva

¿Qué estrategia debería usar un licitador en una subasta inglesa? La estrategia dominante parece ser ofertar sucesivamente pequeñas cantidades

sobre la oferta actual hasta que la oferta alcance el precio de la valuación actual del bien y entonces retirarse.

Este tipo de subastas tiene propiedades interesantes, por ejemplo, cuando el valor del bien subastado no es bien conocido. Supongan que un campesino subasta su ejido y los compradores en realidad quieren comprarlo para explotar minerales en él. Solo que no se sabe muy bien la cantidad de los minerales que se hallará en el terreno. Siguiendo la estrategia dominante eventualmente el proceso de subasta acaba ¿Debería estar contento el ganador por obtener el terreno por un precio igual o menor al valor privado del bien? ¿O debería preocuparse de que los demás licitadores decidieron retirarse? Cuando se da el caso de que el ganador sobrevalora el bien, se habla de la **maldición del ganador**. Aunque este fenómeno no es exclusivo de las subastas inglesas, ocurre frecuentemente en estas.

Maldición del ganador

9.1.2 Subastas holandesas

Las subastas holandesas, son ejemplo de los casos abiertos y descendentes:

- El subastador inicia ofreciendo un bien a un precio artificialmente alto.
- El subastador entonces baja continuamente el precio del bien en una pequeña cantidad, hasta que un agente hace una oferta por él, que es igual al valor de la oferta actual.
- El bien se adjudica al agente que hizo la oferta.

Observen que en este tipo de subastas, la maldición del ganador también está presente. No hay estrategia dominante para este tipo de subastas.

9.1.3 Subastas primer precio, selladas

Son ejemplo del caso de subastas de un tiro y quizá sean el caso más simple de todos los que consideraremos. En este tipo de subastas solo hay una ronda de ofertas que los licitantes hacen llegar al subastador del bien. No hay rondas subsecuentes y el bien se adjudica al agente que haya hecho la oferta mayor. El ganador paga el precio de su oferta. No hay por tanto, oportunidad para que los otros licitadores, ofrezcan ofertas más altas por el bien. La estrategia dominante es ofrecer menos que el verdadero valor del bien ¿Qué tanto menos? Depende de lo que ofrezcan los otros agentes. No hay solución general para este caso.

9.1.4 Subastas Vickrey

Es la menos usada y quizá la menos intuitiva de todas las subastas vistas. Este es el caso de una subasta de segundo precio, sellada. Eso significa que solo hay una ronda de negociación, en la cual cada licitador propone una sola oferta. El bien se adjudica al agente que hizo la mayor oferta, pero paga el precio de la segunda mejor oferta. La razón para considerar estas subastas es que tienen una verdadera estrategia dominante: ofertar el verdadero valor del bien. Consideren lo siguiente:

- Supongamos que ofertamos más que el valor real del bien. En ese caso, el bien nos será adjudicado, pero se corre el riesgo de adquirir el bien a un precio superior a su valor real. Si se gana en esas circunstancias, la compra fue una pérdida.
- Supongamos que ofertamos menos que el valor real del bien. Se reduce la posibilidad de ganar el bien. Pero aún ganando en ese caso, haber ofrecido menos no tiene efecto pues el precio a pagar es el de la segunda mejor oferta.

Un problema con este tipo de subastas es que los humanos las encuentran complicadas. Además dan lugar a situaciones anti-sociales. Por ejemplo, si el valor de un bien es de 90 morlacos, y el agente cree que otro agente ofrecerá 100 morlacos, la estrategia dominante le dice que debería abandonar la subasta; pero igual puede ofrecer 99 morlacos para castigar a su oponente, quien entonces no pagará 90 sino 99 morlacos. Esto es muy común en intercambios comerciales, donde una compañía no puede competir con otra, pero usa su posición para forzar la banca rota del oponente.

9.1.5 Ganancia esperada

El agente subastador, como se mencionó, tratará de maximizar su ganancia esperada. Para ello elegirá un protocolo con el que obtendrá el mayor precio por el bien ofertado. ¿Qué protocolo debería adoptar? Para las subastas privadas, la respuesta depende parcialmente en la actitud ante el riesgo del subastador y los licitadores:

- Para licitadores neutrales al riesgo, la ganancia esperada es probablemente idéntica en los cuatro casos de subasta discutidos. Esto es, el subastador puede esperar una ganancia similar en todos los casos.
- Para licitadores con aversión al riesgo, las subastas holandesa y de primer precio, sellada, llevan a ganancias más altas para el subastador.
- Para subastadores con aversión al riesgo, funcionan mejor las subastas Vickrey e inglesa.

9.1.6 Mentiras y Colusiones

¿Hasta que punto los protocolos revisados son sensibles a las mentiras y la colusión de subastadores y licitadores? Idealmente, como subastador, un agente desea que el protocolo que usa sea inmune a la colusión de los licitadores. Igualmente, un licitador desea que la honestidad del subastador. Pero, ninguna de las subastas revisadas es inmune a la colusión. Por ejemplo, los licitadores pueden aliarse para obtener un precio bajo del bien, luego venderlo al precio real y repartirse las ganancias. La mejor manera de evitar la colusión es modificar el protocolo para que los licitadores no se conozcan entre ellos, aunque esto no es posible en subastas abiertas.

Con respecto a la honestidad del subastador, el protocolo que presenta problemas es de las subastas Vickrey, donde se puede mentir acerca del

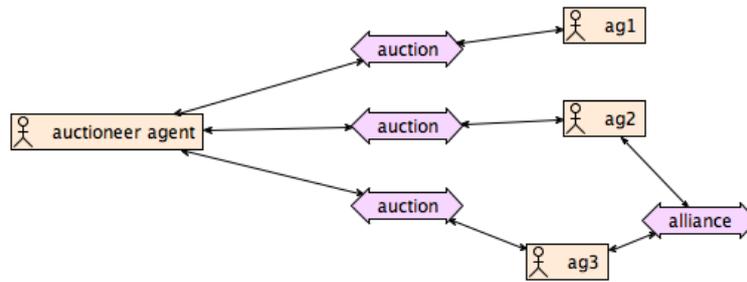


Figura 9.1: Diagrama General de un Sistema Multi-Agentes de subastas.

monto de la segunda mejor oferta, haciendo pagar más de esta forma al ganador. Una forma de evitar esto es firmando las ofertas, de forma que el ganador pueda verificar el resultado. La otra es contratar a un tercero, confiable, para procesar las ofertas. En los casos de subasta abierta, no hay forma que el subastador mienta.

Otra oportunidad de mentir para el subastador es que contrate falsos licitadores, para artificialmente inflar la subasta. Esto solo es posible en las subastas inglesas.

9.1.7 Caso de estudio: alianzas

La distribución de Jason incluye un ejemplo sobre subastas ². La definición del Sistema Multi-Agente se muestra a continuación:

```

1 MAS subasta {
2
3   infrastructure: Centralised
4
5   agents:
6     ag1; ag2; ag3;
7     subastador agentArchClass SubastadorGUI;
8
9   aslSourcePath:
10    "src/asl";
11 }
  
```

Se tienen tres agentes licitadores y un agente subastador que es una instancia de la clase de agente *SubastadorGUI*. El diagrama general de este sistema se muestra en la Figura 9.1.

El código del subastador se muestra a continuación:

```

1 // Este agente administra la subasta e identifica al ganador
2
3 +!iniciarSubasta(N) // esta meta es creada por la GUI
4   <- .broadcast(tell, subasta(N)).
5
6 @pb1[atomic]
7 +ofrece(N,_) // recibe una oferta y checa el ganador
8   : .findall(b(V,A),ofrece(N,V)[source(A)],L) &
9     .length(L,3) // las 3 ofertas han sido recibidas
10  <- .max(L,b(V,W));
11  .print("El ganador es ",W," con ", V);
  
```

² /examples/auction

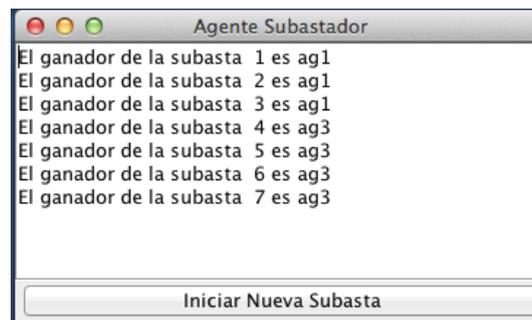


Figura 9.2: Interfaz gráfica del subastador

```

12 |     mostrarGanador(N,W); // desplegar en la GUI
13 |     .broadcast(tell, ganador(W));
14 |     .abolish(ofrece(N,-)).

```

El plan de la línea 3 responde a un evento generado por la interfaz gráfica de este usuario (tiene un botón que lanza una nueva subasta, etiquetado como *Iniciar Nueva Subasta*). N inicialmente valdrá uno. La figura 9.2 muestra la interfaz gráfica del agente subastador luego de 7 subastas.

El agente *ag1* es muy sencillo, siempre ofrece 6 en la subasta:

```

1 | // Este agente siempre ofrece 6
2 |
3 | +subasta(N)[source(S)] : true
4 |   <- .send(S, tell, ofrece(N,6)).

```

Los agentes *ag2* y *ag3* pueden formar alianzas (línea 5 a continuación). La iniciativa la lleva *ag3* así que *ag2* ofrece 4 (línea 4) cuando no hay alianza formada y o cuando está aliado (plan de la línea 11):

```

1 | // Este agente normalmente ofrece 4,
2 | // pero en alianza con el agente ag3, ofrece 0
3 |
4 | ofertaPorDefault(4).
5 | aliado(ag3).
6 |
7 | +subasta(N)[source(S)] : not alianza
8 |   <- ?ofertaPorDefault(0);
9 |     .send(S, tell, ofrece(N,0)).
10 |
11 | +subasta(N)[source(S)] : alianza
12 |   <- .send(S, tell, ofrece(N,0)).
13 |
14 | // Propuesta de alianza de otro agente
15 | +alianza[source(A)]
16 |   : .my_name(I) & aliado(A)
17 |   <- .print("Alianza propuesta por ", A);
18 |     ?ofertaPorDefault(B);
19 |     .send(A,tell,oferta(I,B));
20 |     .send(A,tell,alianza(A,I)).

```

El plan de la línea 14 hace que *ag2* acepte alianzas de sus conocidos especificados por el predicado *ally/1*.

El agente *ag3* es el más sofisticado, su código es el siguiente:

```

1 | // Este agente ofrece 3, pero
2 | // si pierde 3 subastas, propone una alianza al agente

```

```

3 // ag2 y por tanto ofrece 7 (3 de el mismo + 4 de ag2)
4
5 ofertaPorDefault(3).
6 aliado(ag2).
7 umbral(3).
8
9 +subasta(N)[source(S)]
10 : (umbral(T) & N < T)
11 |
12 (.my_name(I) & ganador(I) & aliado(A) & not alianza(I,A))
13 <- !ofertaNormal(S,N).
14
15 +subasta(N)[source(S)]
16 : .my_name(I) & not ganador(I) & aliado(A) & not alianza(I,A)
17 <- !alianza(A);
18 !ofertaNormal(S,N).
19
20 @palliance
21 +subasta(N)[source(S)]
22 : alianza(_,A)
23 <- ?ofertaPorDefault(B);
24 ?oferta(A,C);
25 .send(S, tell, ofrece(N,B+C)).
26
27 +!ofertaNormal(S,N) : true
28 <- ?ofertaPorDefault(0);
29 .send(S, tell, ofrece(N,0)).
30
31 @prop_alliance[breakpoint]
32 +!alianza(A) : true
33 <- .send(A,tell,alianza).

```

Básicamente *ag3* recuerda cuantas subastas ha perdido y si pierde más de tres, propone una alianza al agente *ag2* pasando así a ofertar 7 (3 suyos que ofertaba al principio más los 4 que dejó de ofertar *ag2*, una vez formada la alianza). El valor por default de oferta está especificado en la creencia de la línea 5. La línea 6 expresa la creencia del agente de que *ag2* es su aliado. La línea 7 expresa el umbral para pasar a formar una alianza.

9.2 NEGOCIACIÓN

Las subastas son herramientas útiles para adjudicar bienes a los agentes, sin embargo, resultan demasiado simples en muchos casos, particularmente cuando se deben alcanzar **acuerdos** en cuestiones de mutuo interés. Las técnicas de negociación que revisaremos en esta sección, propuestas por Rosenschein y Zlotkin [164], son más ricas y distinguen dos casos: **dominios orientados a tareas** y **dominios orientados a valor**. Para el caso general, las negociaciones tienen cuatro componentes:

Acuerdos

- Un **conjunto de negociación** que representa el espacio de posibles propuestas que un agente puede hacer.
- Un **protocolo** que define las propuestas legales que los agentes pueden hacer, en función de un historial de negociaciones previas.

- Una **colección de estrategias**, una por cada agente participante, que determina que propuestas hará cada agente. Normalmente la estrategia que un agente usa es privada.
- Una **regla** que determina cuando se ha alcanzado un acuerdo y cual es ese acuerdo.

Las **negociaciones** normalmente se llevan a cabo en series de rondas, con cada agente haciendo propuestas en cada ronda. Las propuestas que un agente hace están determinadas por su estrategia, deben proceder del conjunto de negociación y ser legales (de acuerdo al protocolo). Si el acuerdo se alcanza, de acuerdo a la regla mencionada, la negociación termina y se asume el acuerdo alcanzado. Los parámetros mencionados dan lugar a un ambiente complej y rico en análisis.

Negociación

La primer complicación a enfrentar es cuando se negocia sobre multiples temas, en lugar de sobre sólo uno. Las subastas son ejemplos de negociaciones sobre un tema, el valor de un bien para su venta. En ese caso la preferencia de los participantes suele ser simétrica, lo que es bueno para el comprador, no suele ser bueno para el vendedor; y en el análisis es fácil entender el concepto de **concesión**. Ahora consideren la compra de un auto: Aunque el precio es relevante, en realidad se negocian muchos otros factores, como la duración de la garantía, el servicio post-venta, accesorios incluidos, etc. El concepto de concesión es menos claro en esos casos.

Concesión

Cuando se consideran multiples atributos, el espacio de posibles tratos crece **exponencialmente**. Por ejemplo, en un dominio donde los agentes negocian sobre el valor de n variables booleanas v_1, \dots, v_n , evidentemente hay 2^n tratos posibles en ese problema (asignaciones diferentes de falso o verdadero a las variables en cuestión). Si los atributos tienen m posibles valores, entonces el espacio de negociación tienen m^n posibles tratos.

Complejidad

Otra fuente de complejidad es el **número de agentes** que participan en el proceso de negociación. Tenemos tres posibilidades:

- **Negociación uno a uno.** Un agente negocia con otro. Un caso especial es cuando las preferencias de los agentes son simétricas con respecto a todos los tratos posibles. Los escenarios de compra venta, suelen ejemplificar este caso.
- **Negociación muchos a uno.** Un solo agente negocia con varios más. Es el caso de las subastas. Aparentemente, estos casos pueden tratarse como iteraciones de negociaciones uno a uno.
- **Negociación muchos a muchos.** Es el caso de muchos agentes negociando con muchos agentes, por ejemplo en la bolsa de valores. En el peor de los casos habrá n agentes participando activamente en la negociación, con lo cual tenemos hasta $n(n - 1)/2$ hilos de negociación.

Por las razones expuestas anteriormente, la mayoría de los esfuerzos por automatizar procesos de negociación, se concentran en casos **simples**: un solo tema negociado, preferencias simétricas, en negociaciones de uno a uno. Es en ellos que mantendremos nuestro análisis.

Casos simples

9.2.1 Dominios orientados por Tareas

Consideren el siguiente ejemplo [164]: Imaginen que tiene tres hijos, cada uno de los cuales necesita ser llevado por las mañanas a diferentes escuelas. Su vecino tiene cuatro hijos, y también necesita llevarlos a diferentes escuelas. Llevar a un niño puede ser modelado como una tarea indivisible. Ustedes y su vecino pueden discutir la situación y llegar al acuerdo de lo que es mejor para ambos (por ejemplo, llevar a dos niños que comparten el mismo destino y son de diferente familia, para ahorrar un viaje). Incluso no hay problema si cada quien decide llevar a sus propios hijos, lo cual sería el peor de los casos. Observen que estamos introduciendo una noción de **costo**: llevar a dos niños a la misma escuela, cuesta lo mismo que llevar a uno. ¿Qué tipos de acuerdo se pueden alcanzar? Pues llevar a los niños en días pares y el vecino en impares; o bien, llevar a esos dos niños y que el vecino se encargue de otros dos, etc.

Formalmente, un **dominio orientado a tareas** se define como una tripleta $\langle T, Ag, c \rangle$ donde:

- T es el conjunto (finito) de todas las posibles **tareas**. *Tareas*
- $Ag = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto (finito) de los **agentes** que participan en la negociación. *Agentes*
- $c : \mathcal{P}(T) \rightarrow \mathbb{R}^+$ es la función que define el **costo** de ejecutar cada subconjunto de tareas en términos de un número real positivo. *Costo*

El costo debe satisfacer dos restricciones. Primero, debe ser **monótono** en el sentido de que el hecho de agregar una tarea, nunca decrementa el costo. Formalmente, si $T_1, T_2 \subseteq T$ son conjuntos de tareas, tales que $T_1 \subseteq T_2$ entonces el $c(T_1) \leq c(T_2)$. La segunda restricción es que el costo de no hacer nada es **cero**: $c(\emptyset) = 0$.

Monotonía

Costo nulo cero

Un **encuentro** en un dominio orientado a tareas $\langle T, Ag, c \rangle$ ocurre cuando a los agentes en Ag se les asignan tareas del conjunto T . Intuitivamente, cuando un encuentro ocurre, hay un potencial de que los agentes alcancen un acuerdo para volver a asignar las tareas entre ellos. Formalmente un encuentro es una colección de **asignaciones** de tareas $\langle T_1, \dots, T_n \rangle$, donde para toda T_i tenemos que $i \in Ag$ y $T_i \in T$.

Encuentro

Asignaciones

Concentremos nuestra atención en escenarios de negociación uno a uno, asumiendo que $Ag = \{1, 2\}$. Ahora, dado un encuentro $\langle T_1, T_2 \rangle$, un **trato** será muy similar a un encuentro: una asignación de las tareas $T_1 \cup T_2$ a los agentes 1 y 2. Formalmente, un **trato puro** es un par $\langle D_1, D_2 \rangle$, donde $D_1 \cup D_2 = T_1 \cup T_2$. Su semántica es que el agente 1 está comprometido a llevar a cabo las tareas en D_1 y el agente 2 las tareas en D_2 .

Trato

Trato puro

El **costo** asumido por el agente i en un trato $\delta = \langle D_1, D_2 \rangle$ es $c(D_i)$ y se denota como $costo_i(\delta)$. La **utilidad** del trato δ para un agente i es la diferencia entre el costo para el agente i de llevar a cabo las tareas T_i , tal y como se le asignaron en el encuentro, y el $costo_i(\delta)$ de las tareas asignadas en el trato:

Costo

Utilidad

$$utilidad_i(\delta) = c(T_i) - costo_i(\delta)$$

La utilidad por lo tanto, representa **cuanto** gana el agente acordando el trato. Si es negativa, significa que le conviene más ejecutar las tareas tal y

como le fueron asignadas en el encuentro, originalmente. Lo mismo ocurre si la negociación falla, por eso $\Theta = \langle T_1, T_2 \rangle$ denota el llamado **trato conflictivo**.

Trato conflictivo

La noción de **dominio** se extiende fácilmente a los tratos. Se dice que un trato δ_1 domina a uno δ_2 , denotado por $\delta_1 \succ \delta_2$, si y sólo si:

Dominio

1. El trato δ_1 es al menos tan bueno como δ_2 , para todo agente:

$$\forall i \in \{1, 2\}, \text{utilidad}_i(\delta_1) \geq \text{utilidad}_i(\delta_2)$$

2. El trato δ_1 es mejor que δ_2 , para algún agente:

$$\exists i \in \{1, 2\}, \text{utilidad}_i(\delta_1) > \text{utilidad}_i(\delta_2)$$

Si el trato δ_1 domina a otro trato δ_2 , entonces debería ser claro para todos los participantes que δ_1 es mejor que δ_2 . Se dice que el trato δ_1 domina débilmente a δ_2 , denotado por $\delta_1 \succeq \delta_2$, si al menos la primer condición se cumple. Se dice que un trato que no es dominado por ningún otro es **pareto óptimo**. Formalmente, un trato δ es pareto óptimo si no existe un trato δ' tal que $\delta' \succ \delta$.

Optimalidad de Pareto

Se dice que un trato es **racional individualmente** si domina débilmente al trato conflicto Θ . Si el trato no es racional individualmente, entonces al menos un agente obtiene más utilidad ejecutando las tareas tal y como le fueron asignadas en el encuentro. Formalmente, un trato δ es racional individualmente si y sólo si $\delta \succeq \Theta$.

Racionalidad individual

Ahora estamos en posición de definir el espacio de posibles propuestas que los agentes pueden hacer. El **conjunto de negociación** consiste en un conjunto de tratos que son racionales individualmente y pareto óptimos. La idea detrás de la primera restricción es que no tiene caso proponer un trato que es menos preferido que el trato conflicto por un agente, ya que éste elegirá entrar en conflicto Θ ; La segunda restricción nos dice que no tiene sentido ofrecer un trato, si existe un trato alternativo en que al menos un agente saldría beneficiado, sin perjudicar a nadie más.

Conjunto de negociación

Protocolo de concesión monótona

Las reglas de este **protocolo**, introducido también por Rosenschein y Zlotkin [164], son:

Protocolo

- La negociación se lleva a cabo en una serie de rondas.
- En la primera ronda $u = 0$, ambos agentes proponen simultáneamente un trato del conjunto de negociación.
- Un acuerdo se alcanza si los dos agentes proponen tratos δ_1 y δ_2 respectivamente, tal que $\text{utilidad}_1(\delta_2) \geq \text{utilidad}_1(\delta_1)$, ó bien $\text{utilidad}_2(\delta_1) \geq \text{utilidad}_2(\delta_2)$. Esto es, si alguno de los agente encuentra que la propuesta del otro es mejor o al menos tan buena como la suya. Si se alcanza un acuerdo, la regla para determinar que trato se adopta es como sigue: Si las ofertas de ambos agentes son iguales o mejores que las del encuentro, entonces se elige una al azar. Si no se elige la mejor.

- Si no se logra un acuerdo, se propone a una nueva ronda $u + 1$. Ningún agente puede hacerle una propuesta al otro agente, que sea menos preferida que la ofertada en la ronda u .
- Si ningún agente hace una concesión en alguna ronda $u > 0$ entonces la negociación termina y se adopta el trato conflicto.

Es claro que este protocolo es efectivamente verificable, en el sentido de que ambas partes pueden ver si las reglas del mismo se están siguiendo. Usando este protocolo se garantiza que la negociación termina (con o sin acuerdo) en un número finito de pasos. Eso sí, el protocolo no garantiza que se llegue a un acuerdo rápidamente, puesto que el número de ofertas posibles es $O(2^{|T|})$ y por lo tanto es concebible que la negociación continúe por un número de rondas exponencial en el número de tareas a ser asignadas.

La estrategia Zeuthen

No hemos dicho nada sobre la **estrategia** a seguir por los participantes en una negociación, cuando estamos siguiendo el protocolo de concesión monótona. Estudiando el protocolo, pareciera que hay tres cuestiones a abordar:

Estrategia

- ¿Cual debe ser la **primer propuesta** de un agente?
- Dada una ronda ¿**Quién** debe conceder?
- Si un agente concede ¿**Cuanto** debe conceder?

La primer pregunta tiene una respuesta casi directa: la primer propuesta de un agente debe ser su **trato preferido**.

Con respecto a la segunda pregunta, la idea de la estrategia Zeuthen es medir la disposición de los agentes a arriesgarse a entrar en un conflicto. Intuitivamente, un agente estará dispuesto al riesgo de un conflicto si la diferencia en la utilidad de la propuesta actual y el trato conflicto es baja. En cambio, si la diferencia es grande, entonces el agente tiene más que perder y tratará de evitar el conflicto. El **riesgo** del agente i en la ronda t se mide como sigue:

Riesgo

$$\text{riesgo}_i^t = \frac{\text{utilidad } i \text{ pierde concediendo y aceptando oferta de } j}{\text{utilidad } i \text{ pierde no concediendo y causando conflicto}}$$

o su equivalente:

$$\text{riesgo}_i^t = \begin{cases} 1 & \text{Si } \text{utilidad}_i(\delta_i^t) = 0 \\ \frac{\text{utilidad}_i(\delta_i^t) - \text{utilidad}_i(\delta_j^t)}{\text{utilidad}_i(\delta_i^t)} & \text{En otro caso} \end{cases}$$

La estrategia de Zeuthen propone que en la ronda t el agente que debe conceder, debe ser aquel con el valor de **riego más pequeño**.

La tercer pregunta era ¿Cuándo hay que conceder? y la respuesta es: **Justo lo necesario**. Si concede demasiado poco, en la siguiente ronda el balance de riesgo indicará que aún tiene más que perder en caso de conflicto y tendrá que volver a ceder. Esto es ineficiente. Pero si cede demasiado, estará

desperdiciando utilidad. Por lo tanto, debería ceder lo suficiente como para cambiar el balance de riesgo y que en la siguiente ronda el otro agente conceda.

Este protocolo no garantiza éxito, pero **garantiza** terminación. No garantiza maximizar el bienestar social, pero garantiza que si un acuerdo es alcanzado, éste es pareto óptimo. Es racional individualmente y es descentralizado. Un punto interesante es que la combinación de protocolo y estrategia está en equilibrio de Nash, por tanto la estrategia puede hacerse pública (si un agente la usa, lo mejor para otro agente es adoptarla). Problemas, cualquier problema real, tendrá un espacio de tratos demasiado grandes como para computarlos de esta forma. Para $n > 2$ agentes, las extensiones no son obvias.

Propiedades

Un interesante considerar el caso de que los agentes no sean confiables al declarar sus tareas en un encuentro. Al hacer eso, pueden subvertir el proceso de negociación. Consideren los dos casos siguientes:

- **Tareas fantasmas y tramposas.** La forma más evidente en que un agente puede sacar provecho en este protocolo es al pretender que se le ha asignado una tarea, cuando este no es el caso. Estas son las llamadas tareas fantasmas. Para el ejemplo de repartirse a los niños para llevarlos a la escuela, el clásico en México es – tengo que ir al entierro de mi abuelita. Otra forma de engaño es inventarse tareas artificiales dependientes de dominio. Este caso es más difícil de detectar que el primero.
- **Tareas ocultas.** Contra-intuitivamente, es posible que un agente saque ventaja de ocultar que le han sido asignadas ciertas tareas. Por ejemplo, en el caso de los niños nuevamente, si resulta que dos niños van a escuelas vecinas, visitar ambas escuelas le toma a nuestro agente una hora, pero visitar una sola de ellas le toma solo 45 minutos. Si el vecino debe ir a una de estas escuelas, nuestro agente le puede ocultar la información de sus tareas quizás solo deba llevar a uno de sus hijos.

9.2.2 Dominios orientados por valor

Ahora veremos un domino en donde las metas del agente se definen mediante funciones de valor para los posibles estados del ambiente. La meta del agente es llegar al estado con un valor mayor que el de los demás estados. Asumiremos que los agentes tienen un conjunto de **planes conjuntos**. Los planes son conjuntos en el sentido de para ejecutarse, requieren la participación de varios agentes. Los planes transforman un estado del ambiente en otro diferente cuando son ejecutados. En este caso, la negociación no tiene que ver con la distribución de las tareas que serán asignadas a los agentes, sino con los planes conjuntos adoptados. El interés de un agente es formar el plan conjunto que lo lleve al estado que maximiza la función de valor.

Formalmente un domino orientado por valor se define como una tupla $\langle E, Ag, J, c \rangle$, donde:

- E es el conjunto de posibles **estados del ambiente**.

Estados

- $Ag = \{1, \dots, n\}$ es el conjunto de posibles **agentes**. *Agentes*
- J es el conjunto de posibles **planes conjuntos**. *Planes conjuntos*
- $C : J \times Ag \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de **costo** que asigna a cada plan $j \in J$ y a cada agente $i \in Ag$ un número real que representa el costo $C(j, i)$ para el agente i ejecutando el plan j . *Costo*

Un **encuentro** se define por la tupla $\langle e, W \rangle$ donde:

Encuentro

- $e \in E$ es el estado inicial del ambiente.
- $W : E \times Ag \rightarrow \mathbb{R}$ es una función de valor, que asigna a cada estado del ambiente $e \in E$ y cada agente $i \in Ag$ un número real $W(e, i)$ que representa el valor para el agente i de estar en e .

La expresión $j : e_1 \rightsquigarrow e_2$ denota que el plan conjunto j puede ejecutarse en el estado e_1 , resultando en el estado e_2 . Ahora, supongamos que el agente i opera solo en su medio ambiente, que está en el estado inicial e_0 . ¿Qué debería hacer el agente i ? En este caso, no hay necesidad de negociar, basta con que el agente elija el plan j_{opt}^i y que el plan sea ejecutable en e_0 de forma que:

$$j_{opt}^i = \arg \max_{j: e_0 \rightsquigarrow e \in J} W(i, e) - c(j, i)$$

Cuando opera solo, la utilidad que el agente i obtiene al ejecutar el plan j_{opt}^i representa lo mejor que él puede hacer. En el contexto Multi-Agentes, puede parecer que el agente no puede hacer nada mejor que j_{opt}^i pero esto no es cierto. Un agente puede beneficiarse de la presencia de otros agentes, al ser capaz de ejecutar planes conjuntos y llegar así a estados del ambiente, a los cuales no habría podido llegar solo. Si no hay planes conjuntos que superen a j_{opt}^i , entonces no hay interacción y la negociación no es racional individualmente. Por otra parte, si los planes interfieren, no hay más opción que negociar. Por ejemplo: si mi mujer y yo necesitamos el auto mañana y solo tenemos un auto.