

# Agentes y Mecanismos de Votación

**Marcelo Errecalde, Guillermo Aguirre, Fernando González**

LIDIC - Departamento de Informática. Universidad Nacional de San Luis  
Ejército de los Andes 950. (C.P. 5700) San Luis, Argentina  
{merreca,gaguirre}@unsl.edu.ar, ffjgonzalez@hotmail.com

## Resumen

Los *mecanismos de votación* se encuentran entre los métodos más utilizados para resolver problemas de la vida diaria en los que un conjunto de agentes deben tomar una decisión social consensuada. La familiaridad con este tipo de mecanismos ha llevado a que distintos investigadores propongan esta forma de elección social como un medio para lograr que agentes artificiales interactúen de manera coordinada en un sistema multiagente. Sin embargo, el uso de mecanismos de votación no está restringido a escenarios con múltiples agentes. También son aplicables en situaciones donde existen múltiples componentes internas del agente que pueden entrar en conflicto durante la toma de sus decisiones. En este trabajo analizamos el uso de mecanismos de votación en este último tipo de escenarios donde los “electores” surgen por el diseño modular del agente, o por la existencia de múltiples objetivos o preferencias que pueden entrar en conflicto. Para ello, introducimos conceptos básicos de teoría de votación que son utilizados en el diseño de un agente que debe balancear múltiples preferencias de un usuario durante la selección de aulas para el dictado de clases. Las principales fortalezas y debilidades de este enfoque son analizados como así también su vinculación con trabajos relacionados y posibles extensiones futuras.

**Palabras claves:** Agentes Inteligentes, Sistemas Multiagente, Mecanismos de Votación.

## 1. Introducción

Cuando dos o más agentes actúan en un ambiente compartido, es necesario contar con *mecanismos* que permitan que sus *interacciones* conduzcan a un resultado social coordinado. En este sentido, el desarrollo de sistemas multiagente artificiales suele basarse en mecanismos de interacción de alto nivel que son utilizados rutinariamente por los seres humanos como por ejemplo los mecanismos de *subastas*, *negociación*, *mercado*, *votación*, *argumentación*, etc. Estos mecanismos difieren en el tipo de resultado social alcanzado y en los *protocolos de interacción* aplicables en cada caso.

Varios de estos mecanismos de interacción pensados originalmente para sistemas multiagente, también han sido aplicados como parte de los procesos internos que se producen “dentro de la cabeza” del agente. En particular, estos métodos han resultado útiles en aquellos casos donde el diseño del agente ha resultado en arquitecturas modulares donde la toma de decisiones del agente adquiere características distribuidas similares a las observadas en los sistemas multiagente convencionales.

En este tipo de escenarios, uno de los enfoques que ha recibido una atención creciente es aquel que considera que las decisiones de un agente pueden ser obtenidas a partir de un proceso de *votación* entre distintas componentes internas del agente [10, 11, 13]. En este caso, dichas componentes actúan como los electores (o votantes) y las acciones del agente son las alternativas sujetas a votación.

En este trabajo analizamos el uso de mecanismos de votación en el diseño de un agente que debe balancear múltiples preferencias de un usuario durante la selección de aulas para el dictado de clases. Para ello, en la sección 2 introducimos algunos conceptos básicos de teoría de votación que serán utilizados en las secciones posteriores. En la sección 3 presentamos el marco de trabajo general en el cual estos conceptos son aplicados. En la sección 4 describimos la forma en que las preferencias del usuario son representadas internamente en el agente. La sección 5 describe el formato de las alternativas a ser votadas y en la sección 6 veremos de que manera las preferencias del usuario son utilizadas durante el proceso de votación. En la sección 7 discutimos fortalezas y limitaciones del enfoque propuesto, su vinculación con trabajos relacionados y posibles extensiones futuras.

## 2. Votación

La votación es un mecanismo utilizado tradicionalmente en la toma de decisiones sociales. En un escenario de votación, existe un conjunto  $\mathcal{C}$  de alternativas *candidatas* (o resultados sociales posibles) y un conjunto  $A$  de agentes. Cada agente  $i \in A$  tiene una relación de preferencia *racional*<sup>1</sup>  $\succsim_i$  definida sobre  $\mathcal{C}$ . El objetivo de un mecanismo de votación consiste en determinar una regla de elección social que tome como entrada las preferencias individuales de los agentes y produzca como salida una relación de preferencia social  $\succsim_A$  con algunas propiedades deseables. Arrow [1] planteó cuales serían estas propiedades<sup>2</sup> y demostró a partir de su *teorema de imposibilidad* que no existía ninguna regla de elección social que pudiera satisfacerlas a todas ellas *simultáneamente*. Straffin [14] por su parte, listó diversos criterios de deseabilidad para los resultados obtenidos con distintas reglas de votación, los cuales serán relevantes para nuestro trabajo:

1. **Criterio Pareto:** Si *cada* votante prefiere una alternativa  $x$  a una alternativa  $y$ , una regla de votación no debería producir  $y$  como ganadora.
2. **Criterio del ganador Condorcet:** Si una alternativa  $x$  obtendría una mayoría de votos en contienda de a pares contra *cada una* de las otras alternativas, la alternativa  $x$  debería ser ganadora.
3. **Criterio del perdedor Condorcet:** Una alternativa  $y$  que perdería en contienda de a pares por mayoría contra *cada una* de las otras alternativas, no debería ser elegida como la ganadora.
4. **Criterio de monotonicidad:** Si una alternativa  $x$  es ganadora bajo una regla de votación, y uno o más votantes cambian sus preferencias en una manera favorable a  $x$  (sin cambiar el orden en que ellos prefieren las otras alternativas), entonces  $x$  aún debería ser la ganadora.
5. **Criterio de la mayoría:** Si una mayoría de votantes tienen una alternativa  $x$  como su primera elección, una regla de votación debería elegir  $x$  como ganadora.

Si bien no es esperable que encontremos una regla de elección perfecta, algunas reglas (o protocolos) de votación pueden ser mejores que otras. La *votación secuencial* de a pares por ejemplo, no garantiza el criterio Pareto y el resultado es sensible al orden en que son consideradas las alternativas (*efecto agenda*). La popular *votación por pluralidad*<sup>3</sup> cumple con los criterios Pareto, monotonicidad, mayoría y no sufre del efecto agenda pero no cumple con ninguno de los Criterios Condorcet. Ésto se debe a que este tipo de elección sólo considera las preferencias del primer lugar pero no toma en

---

<sup>1</sup>Seguimos en este caso la terminología utilizada en [7] donde “racional” significa completa y transitiva.

<sup>2</sup>Eficiencia Pareto, no existencia de dictadores e independencia de alternativas irrelevantes entre otras. Ver [1, 12, 7] para una descripción detallada.

<sup>3</sup>Cada votante vota por una alternativa y la alternativa con el mayor número de votos gana.

cuenta el resto de la información sobre las preferencias individuales. La versión con “ballotage” de este método satisface el criterio del perdedor Condorcet pero viola el criterio de monotonicidad.

Una regla de votación interesante propuesta por Borda en 1781, conocida como el *protocolo o cuenta de Borda*, especifica que los votantes deben proveer su ranking de preferencias para las  $n$  alternativas a ser consideradas. Una alternativa recibe 0 puntos si está ubicada última en la lista de preferencias de un votante, 1 si es la penúltima hasta  $n - 1$  puntos si está ubicada primera. Los puntos para cada alternativa son sumados por cada uno de los votantes y la alternativa con el total más alto gana. Si por ejemplo, existen 3 alternativas denotadas  $a, b$  y  $c$  y 5 votantes, 3 de los cuales tienen la siguiente relación de preferencia estricta:  $a \succ b \succ c$  y los dos restantes tienen como preferencias:  $b \succ c \succ a$ ; el protocolo de Borda asignará las siguientes cuentas a las tres alternativas:  $a : 6, b : 7$  y  $c : 2$  y la alternativa  $b$  será la ganadora de acuerdo al método de Borda.

La regla de Borda satisface los criterios enunciados previamente a excepción de los de mayoría y ganador Condorcet como puede observarse en el ejemplo previo donde la alternativa  $a$  debería ser seleccionada de acuerdo a estos criterios. Para solucionar estas falencias, Duncan Black propuso una regla simple que consiste en elegir el ganador Condorcet en caso de existir y, en caso contrario elegir el ganador de Borda. Este método sencillo conocido como la *regla de Black* logra cumplir todos los criterios enunciados previamente y será el protocolo de votación que utilizaremos en este trabajo.

### 3. Marco de trabajo general

En esta sección explicaremos el marco de trabajo general en el que fueron aplicados los conceptos introducidos en la sección previa. El problema abordado consistió en el diseño e implementación de un sistema que permite seleccionar aulas y horarios en forma automática actuando en representación de un docente de una cátedra de una universidad. Este problema es interesante ya que se deben considerar distintas preferencias de los docentes que usualmente entran en conflicto. Es común por ejemplo, que un docente deba decidir entre alternativas que satisfacen algunos criterios (por ejemplo día y horario en que un aula está disponible) pero no satisfacen otros (como por ejemplo la ubicación del aula).

Para este problema, se diseñó un tipo de agente que denominaremos *Cátedra* que intenta balancear las distintas preferencias de un docente de una cátedra utilizando técnicas de teoría de votación para realizar una elección consensuada de las aulas. El esquema general de trabajo se muestra en la figura 1<sup>4</sup>. Un agente *Cátedra* forma parte de un sistema multiagente donde cohabita con otros agentes de tipo *Cátedra* y uno o más agentes de tipo *Aulero*. Este último tipo de agente administra la información sobre los horarios en que un grupo de aulas de la universidad están libres o reservadas.

El requerimiento de un docente de una cátedra particular se recibe por intermedio de la interfaz de usuario y es enviado al agente *Cátedra* correspondiente (paso 1). Este requerimiento incluye dos ítems fundamentales  $Cap$  y  $Hor$  que denominaremos las *restricciones duras* de la solicitud.  $Cap$  es la capacidad mínima requerida para el aula y  $Hor$  es el número de horas que el aula será utilizada. Una alternativa que no satisfaga estas condiciones mínimas no será considerada como válida.

En el paso 2, el agente *Cátedra* solicita al agente *Aulero* información sobre las aulas con una capacidad mayor o igual a  $Cap$  y que están disponibles durante un intervalo de tiempo no menor a  $Hor$ . Esta información es comunicada por el aulero en el paso 3 mediante una tabla  $T$  donde cada entrada de la tabla contiene información diversa sobre las características de un aula. Esta información incluye la ubicación del aula (edificio), bloque contiguo de horas disponibles para un día particular, disponibilidad de calefacción, retroproyector y asientos con pupitres, etc.

Una vez recibida la tabla  $T$ , el módulo generador de alternativas *GenAlt* del agente *Cátedra*

---

<sup>4</sup>Ver [5] para una descripción detallada del resto de las funcionalidades e implementación del sistema multiagente.

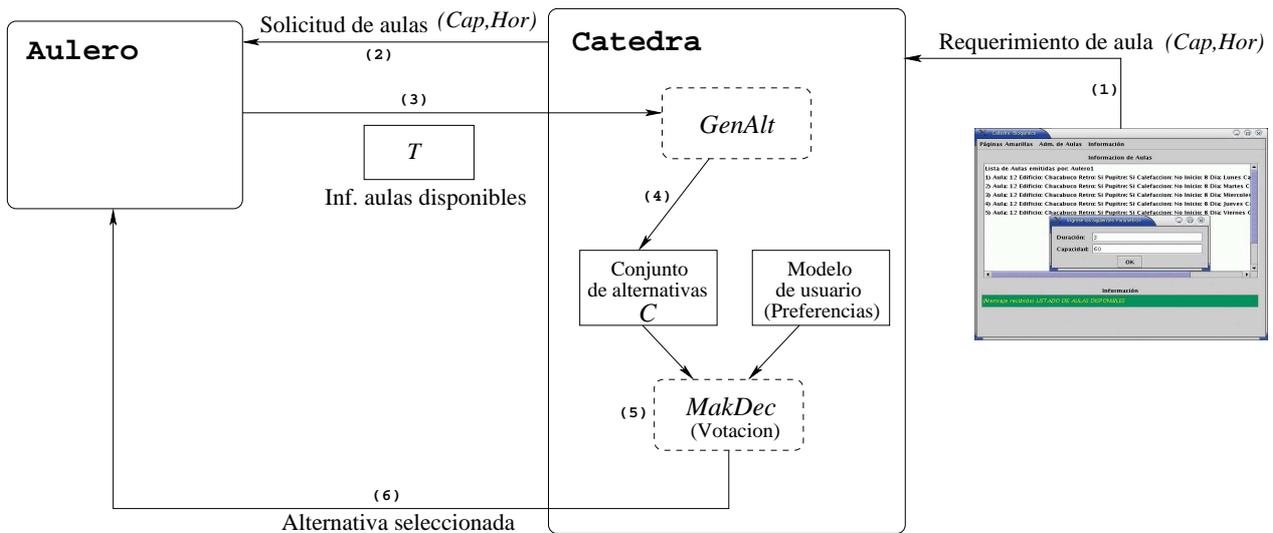


Figura 1: Marco de trabajo general.

construye en el paso 4 el conjunto de alternativas  $C$  que estarán sujetas a votación. La información que incluye cada alternativa será similar a la contenida en cada una de las entradas en  $T$  con algunas diferencias menores. En primer lugar, las alternativas usualmente contendrán sólo un subconjunto de las características de un aula particular, formado por todos aquellos aspectos que el agente toma en cuenta para tomar sus decisiones. Por otra parte, una entrada en  $T$  podrá representar todo un bloque de horas en que el aula está disponible cuya duración es mayor que la requerida en  $Hor$ . Ésto significa que este bloque de horas deberá ser particionado en un conjunto de alternativas cuya duración sea exactamente  $Hor$ . A modo de ejemplo, si un aula está disponible desde las 8 a las 12 horas de la mañana y se ha solicitado un aula por dos horas ( $Hor = 2$ ) se generarán 3 alternativas diferentes que coinciden en todos los atributos a excepción de la hora de inicio (8, 9 y 10 horas respectivamente).

En el paso 5, el módulo de toma de decisiones  $MakDec$  del agente *Cátedra* tomará como entrada las alternativas a considerar y un modelo del usuario con las preferencias que deben ser consideradas para seleccionar una propuesta particular. El módulo  $MakDec$  seleccionará una alternativa particular en base a un proceso de votación y la alternativa seleccionada será comunicada en el paso 6 al agente *Aulero* para que actualice la información necesaria. En las tres secciones siguientes describiremos la forma en que son representadas las preferencias de un docente, las alternativas a considerar y el proceso de votación de alternativas que se lleva a cabo para seleccionar un aula.

## 4. Preferencias

Para actuar en representación de un usuario particular, un agente debe contar con un *modelo* del usuario que pueda ser utilizado cuando deba tomar sus decisiones. En el contexto de este trabajo, el modelo estará dado por la representación de las preferencias que el usuario (docente) tiene sobre distintos aspectos que pueden ser considerados a la hora de seleccionar un aula particular para el dictado de una clase. Estos aspectos serán referenciados de ahora en más como las posibles *dimensiones* e incluirán entre otras la ubicación del aula, día en que está disponible, etc. Cada dimensión tendrá asociada un conjunto de valores posibles que denominaremos de ahora en más como *opciones*. Así por ejemplo, la dimensión *día de la semana* podrá tener como opciones posibles todos los días de la semana a excepción del domingo. Por cada una de las dimensiones, tendremos preferencias sobre

las opciones correspondientes y un umbral de aceptación que representa un valor debajo del cual, el usuario preferiría rechazar una alternativa con respecto a esa dimensión.

Más formalmente, diremos que un agente *Cátedra* contará con un conjunto de *nombres de dimensiones*  $\mathcal{D} = \{D_1, D_2, \dots, D_n\}$ . Por cada dimensión  $D_i \in \mathcal{D}$  el agente mantendrá información representada por una tri-upla  $\langle O_{D_i}, P_{D_i}, \theta_{D_i} \rangle$  donde  $O_{D_i}$  es un conjunto de *opciones* disponibles para la dimensión  $D_i$ ,  $P_{D_i}$  son las *preferencias del usuario respecto a  $D_i$* , representadas por una función  $P_{D_i} : O_i \rightarrow [0, 1]$  y  $\theta_{D_i}$  es una constante que denota *el umbral de aceptación* para la dimensión  $D_i$ .

En nuestro caso, las dimensiones consideradas estuvieron representadas por el conjunto  $\mathcal{D} = \{E, R, H, P, D, C\}$  donde  $E$  corresponde a los *edificios* donde se encuentran las aulas,  $R$  representa la disponibilidad de *retroproyector*,  $H$  es la *hora* en que el aula comienza a utilizarse,  $P$  denota la disponibilidad de asientos con *pupitre*,  $D$  es el *día* de la semana y  $C$  corresponde a la disponibilidad de *calefacción* en el aula. En la figura 2 se muestran las preferencias y umbrales de aceptación que fueron utilizados para cada una de las dimensiones. Si consideramos la dimensión  $E$  por ejemplo, vemos que tiene asociada una tri-upla  $\langle O_E, P_E, \theta_E \rangle$  donde  $O_E = \{cha, 4-b, 2-b, au\}$  y  $P_E$  y  $\theta_E$  son especificadas en la figura 2(a). En esta figura podemos observar que una alternativa que tiene como edificio la opción 4-b (cuarto bloque de aulas) será preferida a una alternativa cuyo edificio es el 2-b (segundo bloque). Por otra parte, una alternativa con la opción 2-b debería ser rechazada de acuerdo a la dimensión  $E$ , ya que el valor  $P_E(2-b) = 0,55$  es menor que el umbral de aceptación  $\theta_E = 0,7$ .

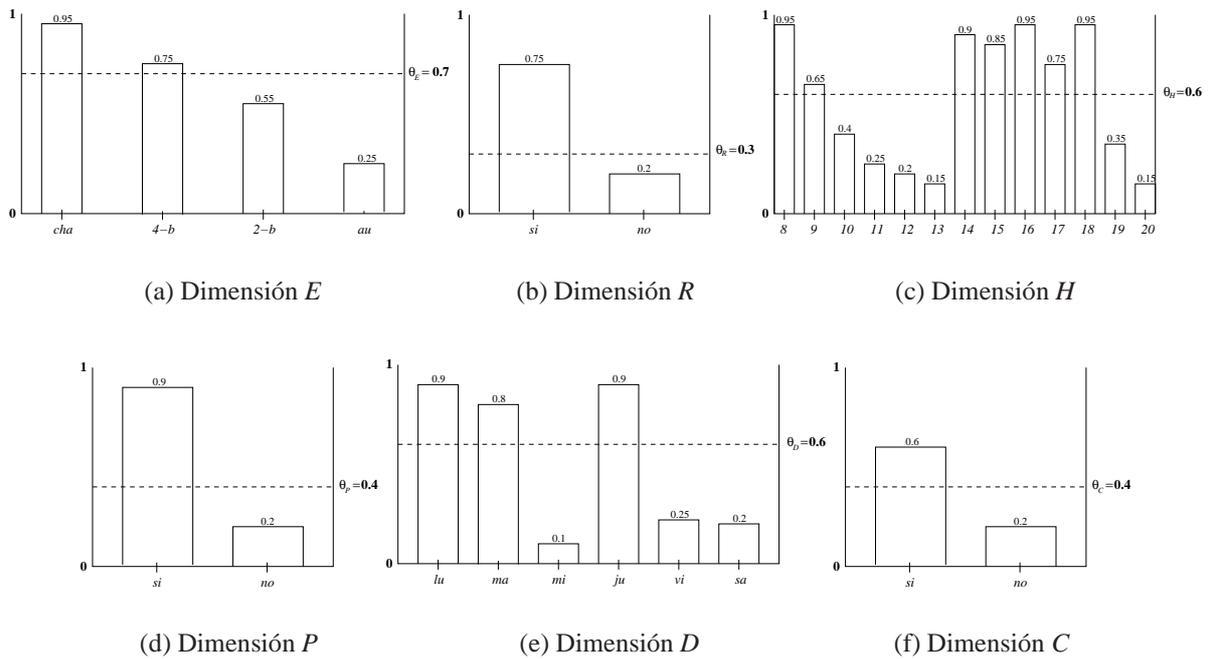


Figura 2: Preferencias y umbrales de aceptación para las distintas dimensiones del agente

En general las dimensiones no tendrán la misma relevancia para el usuario. Un docente puede considerar muy importante el día de la semana en que dicta sus clases pero asignar poca importancia al hecho de que el aula cuente con retroproyector o no. Es por ésto, que también será necesario expresar cual es la importancia relativa que tienen cada uno de los aspectos (dimensiones) en la toma de las decisiones. Para ello, un agente *Cátedra* también contará con una función  $P_D$ ,  $P_D : \mathcal{D} \rightarrow [0, 1]$ , tal que el número  $P_D(D_i)$  representa la importancia que tiene para el usuario la dimensión  $D_i \in \mathcal{D}$ . En la figura 3 se muestran los valores de la función  $P_D$  que fueron utilizados en nuestro caso para representar las preferencias sobre las distintas dimensiones.

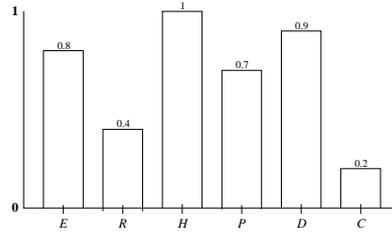


Figura 3: Preferencias entre dimensiones para el agente Cátedra.

## 5. Alternativas

El módulo *GenAlt* construye un conjunto de alternativas candidatas  $\mathcal{C} = \tilde{\mathcal{A}} \cup \{a_R\}$  cada vez que el agente debe seleccionar un aula particular.  $\tilde{\mathcal{A}}$  es un conjunto de alternativas comunes generadas a partir de la información recibida desde el aulero en la tabla  $T$ , donde  $\tilde{\mathcal{A}} \subseteq \mathcal{A}_c$  y  $\mathcal{A}_c$  es el conjunto de todas las alternativas comunes posibles. La alternativa de rechazar  $a_R$  es una alternativa especial que será necesaria debido a que uno de los posibles resultados del proceso de votación es que todas las alternativas comunes sean rechazadas.

Si  $|\mathcal{D}| = n$  es el número de dimensiones que se toman en cuenta en el proceso de votación y  $\mathcal{O} = O_{D_1} \cup O_{D_2} \cup \dots \cup O_{D_n}$  es el conjunto de las opciones disponibles para todas las dimensiones, diremos que una alternativa común  $a_j \in \mathcal{A}_c$  es un mapping  $a_j : \mathcal{D} \rightarrow \mathcal{O}$ , tal que  $a_j(D_i) \in O_{D_i}$ ,  $1 \leq i \leq n$ . Cada alternativa  $a_j$  puede ser considerada una  $n$ -tupla y usualmente referenciaremos a  $a_j(D_i)$  como el valor de  $a_j$  en la dimensión  $D_i$  o bien el valor- $D_i$  de  $a_j$ .

En general, las alternativas comunes serán presentadas en forma tabular correspondiendo cada fila de la tabla a una de las alternativas bajo consideración. A modo de ejemplo, en la tabla 1 se muestra la alternativa  $a_1$  cuyo valor  $a_1(D)$  sugiere la utilización del aula el día viernes (*vi*). Los valores de  $a_1$  para las dimensiones restantes especifican que el aula se encuentra en el edificio del segundo bloque (*2-b*), que cuenta con retroproyector, pupitre y calefacción y que está disponible a partir de la hora 10.

Id. alternativa	<i>E</i>	<i>R</i>	<i>H</i>	<i>P</i>	<i>D</i>	<i>C</i>
$a_1$	<i>2-b</i>	<i>si</i>	<i>10</i>	<i>si</i>	<i>vi</i>	<i>si</i>

Tabla 1: La alternativa  $a_1$

## 6. Votación entre alternativas para el agente Cátedra

La elección de una alternativa del conjunto  $\mathcal{C}$  es realizada por el módulo *MakDec* mediante el método conocido como *regla de Black*. Como vimos en la sección 2 esta regla de votación sugiere que la alternativa que debe ser seleccionada es aquella que es ganadora Condorcet en contienda de a pares entre todas las alternativas en  $\mathcal{C}$ . En caso de no existir tal alternativa ganadora, la selección de la alternativa debería ser realizada mediante el método de *cuentas de Borda*. En la sección 6.1 veremos distintos ejemplos del procedimiento utilizado para determinar si existe un ganador Condorcet. En la sección 6.2 explicaremos como se aplica el método de Borda en un caso donde la contienda de a pares no ha arrojado un ganador Condorcet.

El primer paso para realizar la votación entre las alternativas actuales consistirá en determinar el número de votos que tendrá asociada cada dimensión. Esta cantidad estará dada por la función  $V_{\mathcal{D}}$ ,

$V_{\mathcal{D}} : \mathcal{D} \rightarrow \mathbb{R}$ , y que se define de la siguiente manera:

$$V_{\mathcal{D}}(D_i) = \frac{P_{\mathcal{D}}(D_i)}{\sum_{D_j \in \mathcal{D}} P_{\mathcal{D}}(D_j)} \times K \quad (1)$$

donde  $K \in \mathbb{R}$  es una constante arbitraria utilizada para escalar el número de votos por dimensión. Si por ejemplo,  $K = 1000$  y  $P_{\mathcal{D}}$  corresponde a la función graficada en la figura 3, los votos asociados con la dimensión  $E$  estarán dados por  $V_{\mathcal{D}}(E) = \frac{0,8}{0,8+0,4+1+0,7+0,9+0,2} \times 1000 = 200$ . En la tabla 2 se muestran los votos correspondientes a todas las dimensiones. Estos votos serán utilizados en los dos

	Dimensiones					
	$E$	$R$	$H$	$P$	$D$	$C$
Votos por Dimensión	200	100	250	175	225	50

Tabla 2: Votos para las distintas dimensiones.

procedimientos involucrados en la regla de Black que se explican en las dos subsecciones siguientes.

## 6.1. Contienda de a pares

Una contienda entre un par de alternativas  $a_j, a_k \in \mathcal{C}$  consiste básicamente en determinar cuantos son los votos que reciben estas alternativas por cada una de las dimensiones en el conjunto  $\mathcal{D}$  y seleccionar aquella con mayor cantidad de votos acumulados. Los votos de cada dimensión  $D_i \in \mathcal{D}$  son determinados por la función  $V_{\mathcal{D}}(D_i)$  correspondiente a la ecuación 1. Para determinar si los votos de la dimensión  $D_i$  son adjudicados a una u otra alternativa se compara el valor  $f_{D_i}$  de cada alternativa al que denominaremos la *fuerza* de la alternativa para la dimensión  $D_i$ . Para el caso de una alternativa común  $a_j \in \mathcal{A}_c$ , su fuerza para la dimensión  $D_i$  será el valor que la función  $P_{D_i}$  asocia a la opción correspondiente a  $a_j(D_i)$ . Para la alternativa de rechazar ( $a_R$ ) en cambio, su fuerza para la dimensión  $D_i$  estará dada por el valor  $\theta_{D_i}$ , el umbral de aceptación para la dimensión  $D_i$ . En base a las consideraciones previas, si  $\mathcal{A} \equiv \mathcal{A}_c \cup \{a_r\}$  es el conjunto de todas las alternativas posibles (incluida la de rechazar),  $f_{D_i}$  será una función  $f_{D_i} : \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$  tal que:

$$f_{D_i}(a_j) = \begin{cases} P_{D_i}(a_j(D_i)) & \text{si } a_j \in \mathcal{A}_c, \\ \theta_{D_i} & \text{si } a_j = a_R. \end{cases} \quad (2)$$

En base a  $f_{D_i}$  podemos decir que una alternativa  $a_j$  es *preferida* a una alternativa  $a_k$  en la dimensión  $D_i$ , y que denotaremos  $a_j \succ_{D_i} a_k$ , si y solo si  $f_{D_i}(a_j) > f_{D_i}(a_k)$ . Los votos que una alternativa  $a_j$  obtiene en una contienda contra una alternativa  $a_k$  pueden ser calculados como la suma de los votos de todas aquellas dimensiones en que la alternativa  $a_j$  es preferida a la alternativa  $a_k$ . Si  $V_{par}(a_j, a_k)$  representa este valor, y consideramos que  $\mathcal{D}_{a_k}^{a_j} = \{D_i \in \mathcal{D} | a_j \succ_{D_i} a_k\}$  es el conjunto de dimensiones en que la alternativa  $a_j$  es preferida a la alternativa  $a_k$ ,  $V_{par}$  puede ser definida como una función  $V_{par} : \mathcal{A} \times \mathcal{A} \rightarrow \mathbb{R}$  tal que

$$V_{par}(a_j, a_k) = \sum_{D_i \in \mathcal{D}_{a_k}^{a_j}} V_{\mathcal{D}}(D_i) \quad (3)$$

Pueden existir dimensiones en las que ambas alternativas tienen la misma fuerza (empatan), y los votos correspondientes a esas dimensiones no son adjudicados a ninguna de las dos alternativas.

Denotaremos con  $\tilde{V}_{par}(a_j, a_k)$  al número total de votos correspondientes a las dimensiones en las que  $a_j$  y  $a_k$  tienen igual fuerza <sup>5</sup>.

Considerando la función  $V_{par}$ , podemos decir que una alternativa  $a_j$  será *preferida o derrotada por mayoría* a una alternativa  $a_k$  en una votación de a pares, y que denotaremos  $a_j \succ a_k$ , si y solo si  $V_{par}(a_j, a_k) > V_{par}(a_k, a_j)$ . Cuando este concepto es extendido a una contienda entre cada par de alternativas es posible determinar, en algunos casos, un *ganador Condorcet*. Una alternativa  $a_j \in \mathcal{C}$  será el *ganador Condorcet* en  $\mathcal{C}$  si y solo si  $a_j \succ a_k$  para todo  $a_k \in \mathcal{C}$ , y  $k \neq j$ .

Vemos por lo tanto que la determinación de un ganador Condorcet queda reducida en este caso a encontrar aquella alternativa  $a_j \in \mathcal{C}$  cuyo valor de  $V_{par}(a_j, a_k)$  es mayor que el de  $V_{par}(a_k, a_j)$  para cada una de las alternativas restantes  $a_k \in \mathcal{C} - \{a_j\}$ . A modo de ejemplo, si la única alternativa común con que cuenta el agente es la alternativa  $a_1$  de la tabla 1, las alternativas candidatas estarán dadas por el conjunto  $\mathcal{C} = \{a_1, a_R\}$  y la determinación de un ganador Condorcet involucrará el siguiente cálculo de los valores de  $V_{par}$  en una contienda entre ambas alternativas:

$$V_{par}(a_1, a_R) = 100 + 175 + 50 = \boxed{325} \quad V_{par}(a_R, a_1) = 200 + 250 + 225 = \boxed{675} \quad (4)$$

Para este caso particular, no existen empates en ninguna de las dimensiones bajo consideración, por lo que el número de votos correspondiente a  $\tilde{V}_{par}(a_1, a_R)$  será igual a 0.

Como podemos observar, la alternativa de rechazar ( $a_R$ ) es ganadora Condorcet para este conjunto de alternativas  $\mathcal{C}$  y por lo tanto el agente debería rechazar la alternativa  $a_1$  como una propuesta aceptable para ser seleccionada por el agente. En la figura 4 mostramos el grafo que representa la contienda de a pares entre las alternativas  $a_1$  y  $a_R$ . Cada nodo representa una alternativa y el arco que une los dos nodos representa el resultado de la votación entre el par de alternativas. El arco es rotulado con los valores  $V_{par}(a_1, a_R) - \tilde{V}_{par}(a_1, a_R) - V_{par}(a_R, a_1)$  y la orientación del arco denota cual es la alternativa ganadora (arco que sale) y cual es la perdedora (arco entrante).

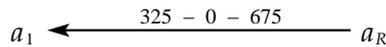


Figura 4: Contienda de a pares entre  $a_1$  y  $a_R$ .

De ahora en más utilizaremos este tipo de representación gráfica para resumir los resultados de las contiendas entre cada par de alternativas. En cada caso, el valor  $V_{par}(a_j, a_k)$  en el rótulo del arco corresponderá a la alternativa  $a_j$  del nodo más cercano. En la figura 5 por ejemplo, se muestran dos alternativas comunes ( $a_2$  y  $a_3$ ) y el resultado de la contienda de a pares para el conjunto de alternativas candidatas  $\mathcal{C} = \{a_2, a_3, a_R\}$ . Ambas alternativas comunes derrotan a la alternativa de rechazar ( $a_R$  es perdedora Condorcet) y  $a_3$  derrota a  $a_2$  por lo cual,  $a_3$  es la ganadora Condorcet para este conjunto de alternativas. Si analizamos las alternativas comunes, podemos observar que  $a_2$  y  $a_3$  empatan en todas las dimensiones a excepción de las dimensiones  $E$  ( $a_2 \succ_{D_E} a_3$ ) y  $H$  ( $a_3 \succ_{D_H} a_2$ ). La alternativa  $a_3$  resulta ganadora ya que los votos de la dimensión  $H$  superan a los votos de la dimensión  $E$ .

En la figura 6 por su parte, mostramos 3 alternativas comunes ( $a_4, a_5$  y  $a_6$ ) que sólo difieren en el horario de inicio de la clase. La alternativa  $a_4$  es la ganadora Condorcet para el conjunto de alternativas  $\mathcal{C} = \{a_4, a_5, a_6, a_R\}$  lo cual parece razonable si consideramos que el horario de las 8 de la mañana de la alternativa  $a_4$  es preferido al horario de inicio de las otras dos alternativas comunes (ver figura 2(c)).

<sup>5</sup>Este valor puede ser obtenido realizando la sumatoria de los votos correspondientes a estas dimensiones o puede ser determinado en base a la función  $V_{par}$  de la siguiente manera  $\tilde{V}_{par}(a_j, a_k) = K - (V_{par}(a_j, a_k) + V_{par}(a_k, a_j))$ .

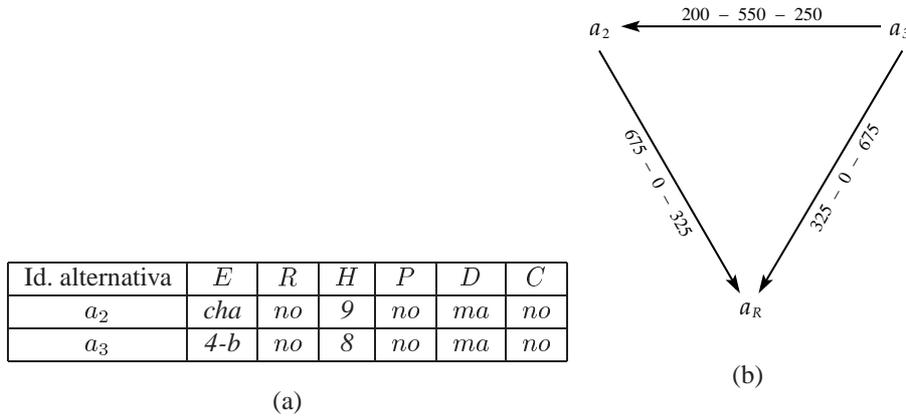


Figura 5: Alternativas  $a_2$  y  $a_3$  ( 5(a) ) y resultados de contienda de a pares ( 5(b) )

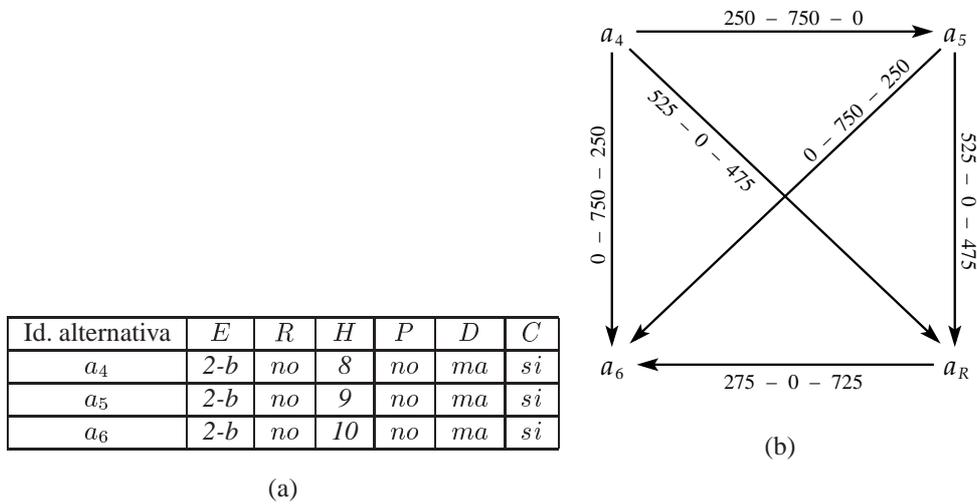


Figura 6: Alternativas  $a_4$ ,  $a_5$  y  $a_6$  ( 6(a) ) y resultados de contienda de a pares ( 6(b) )

En la figura 7 mostramos un caso en que no existe una alternativa ganadora Condorcet. En la subsección 6.2 describimos la forma en que la cuenta de Borda permite determinar un ganador en este caso.

## 6.2. Método de Borda

Para aplicar el método de Borda con la representación de preferencias utilizada en nuestro caso, es conveniente considerar en cada dimensión  $D_i$  el ordenamiento de alternativas determinado por la fuerza de cada una de las alternativas para la dimensión  $D_i$ . En la tabla 3 por ejemplo, se muestran los ordenamientos de las tres alternativas del último ejemplo para cada una de las dimensiones. Dado que admitiremos la posibilidad de indiferencia entre dos alternativas, utilizaremos la notación  $a_j \sim a_k$  para un par de alternativas respecto de una dimensión  $D_i$  para aquellos casos en que  $f_{D_i}(a_j) = f_{D_i}(a_k)$ . En base a estos ordenamientos, es sencillo determinar la cantidad de puntos  $C_B(a_j, D_i)$  que el método de de Borda asigna a cada alternativa  $a_j$  con respecto a cada dimensión  $D_i$ . En el caso de la dimensión  $R$  por ejemplo, estos valores serán  $C_B(a_7, R) = 0$ ,  $C_B(a_R, R) = 1$  y  $C_B(a_8, R) = 2$ . Para la dimensión  $E$  donde existe indiferencia entre  $a_7$  y  $a_8$ , estas alternativas recibirán el valor promedio

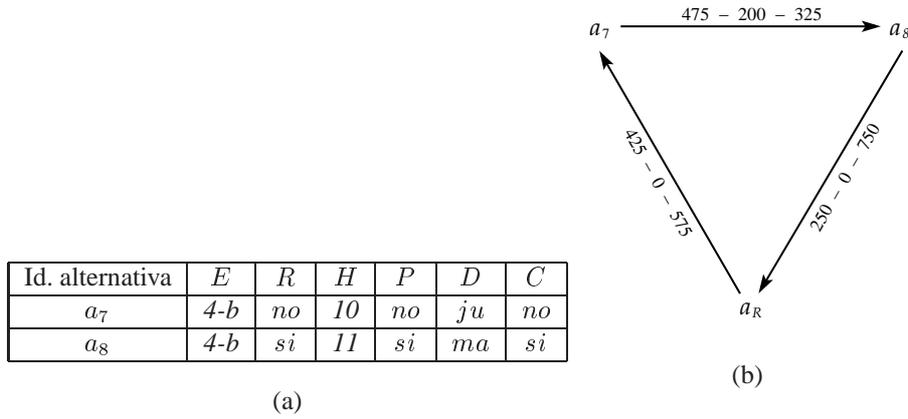


Figura 7: Alternativas  $a_7$  y  $a_8$  (7(a)) y resultados de contienda de a pares (7(b))

$E$	$R$	$H$	$P$	$D$	$C$
$a_7 \sim a_8 \succ a_R$	$a_8 \succ a_R \succ a_7$	$a_R \succ a_7 \succ a_8$	$a_8 \succ a_R \succ a_7$	$a_7 \succ a_8 \succ a_R$	$a_8 \succ a_R \succ a_7$

Tabla 3: Orden de las alternativas para las distintas dimensiones.

de los puntos correspondientes a sus ubicaciones en la lista de preferencia, es decir,  $C_B(a_R, E) = 0$ , y  $C_B(a_7, E) = C_B(a_8, E) = 1,5$ . La cantidad total de votos  $V_B(a_j)$  que una alternativa  $a_j$  recibe de acuerdo al método de Borda, es obtenida considerando que los votos de cada dimensión representan la cantidad de votantes con esas preferencias, es decir,  $V_B(a_j) = \sum_{D_i \in \mathcal{D}} C_B(a_j, D_i) V_D(D_i)$ . De esta manera, los resultados de la votación para cada una de las alternativas será en este caso:

$$\begin{aligned}
 V_B(a_7) &= 1,5 \times 200 + 1 \times 250 + 2 \times 225 = 1000 \\
 V_B(a_8) &= 1,5 \times 200 + 2 \times 100 + 2 \times 175 + 1 \times 225 + 2 \times 50 = 1175 \\
 V_B(a_R) &= 1 \times 100 + 2 \times 250 + 1 \times 175 + 1 \times 50 = 825
 \end{aligned}$$

y la alternativa ganadora de acuerdo al método de Borda es la alternativa  $a_8$  con 1175 votos.

## 7. Consideraciones generales y Conclusiones

Existen otros trabajos previos que también han utilizado los mecanismos de votación para lograr decisiones consensuadas. En [9] se aplican conceptos de teoría de elección social a problemas de filtrado colaborativo. En [3] y en el contexto de *planning* multiagente, las acciones conjuntas de un grupo de agentes individualistas fueron seleccionadas utilizando un protocolo de votación *no manipulable* conocido como el *impuesto (o contribución) de Clarke*. Conitzer y Sandholm [2] por su parte, también abordan problemas de votación con agentes egoístas y proponen protocolos que pueden ser manipulados, pero a un costo computacional muy alto. En este sentido, debemos notar que el protocolo de Borda utilizado en nuestro trabajo es manipulable, pero este aspecto no es relevante en el contexto de votación cooperativa que resulta cuando los votantes representan componentes internas del agente.

Las propuestas presentadas en [10, 11, 13] tienen una relación más cercana con nuestro trabajo ya que los mecanismos de votación son utilizados en los procesos de decisión internos del agente. En [10, 11] y en el contexto de sistemas basados en comportamientos para problemas de navegación de robots móviles, cada comportamiento expresa sus preferencias sobre las acciones del agente.

Estas preferencias son interpretadas como votos para cada una de las alternativas y son combinadas utilizando distintos protocolos de votación. La forma en que los comportamientos expresan sus preferencias en [10] es igual a la utilizada en nuestro trabajo en las funciones  $P_{D_i}$  y en [11] se utiliza un esquema de ponderación de los votos de cada comportamiento que tiene semejanzas con nuestra función de preferencia entre dimensiones  $P_D$ . Sin embargo, el trabajo que constituye el antecedente más cercano de nuestra propuesta es el presentado en [13] para problemas de planificación de encuentros distribuida. En este caso, la representación de las preferencias y el método de votación utilizados son similares a los que hemos aplicado en la asignación automática de aulas, pero difiere en la forma en que interactúan los agentes y se generan las alternativas a ser votadas.

Con respecto a las fortalezas del enfoque presentado en nuestro trabajo, debemos resaltar la posibilidad que brinda el sistema de automatizar una tarea que puede resultar muy tediosa para el docente. Si bien en los ejemplos consideramos pocas alternativas, la selección de aulas puede involucrar decenas o cientos de alternativas que el usuario no siempre estará dispuesto a analizar. Algunas pruebas preliminares realizadas en estos casos nos ha permitido verificar que el agente *Cátedra* puede procesar cantidades considerables de alternativas en forma eficiente, logrando resultados razonables en la selección de aulas. Otro aspecto positivo es la posibilidad que brinda la teoría de votación de representar y razonar formalmente con preferencias conflictivas proveyendo garantías formales respecto a propiedades deseables de los resultados obtenidos [13]. En este sentido, la regla de votación que utilizamos satisface criterios de deseabilidad interesantes para el dominio abordado y permite tener un grado de confianza considerable respecto a la plausibilidad de las alternativas seleccionadas.

Como aspectos débiles de nuestra propuesta podemos mencionar en primer lugar algunas limitaciones para representar preferencias más complejas con casos excepcionales que involucran a más de una dimensión. La representación de las preferencias asume que las dimensiones son independientes y es posible considerarlas como votantes separados que sólo toman en cuenta un criterio particular para la selección de un aula. Así por ejemplo, es sencillo especificar que un docente prefiere normalmente los horarios de la tarde sobre los de la mañana y un edificio arbitrario  $e_j$  sobre otro edificio  $e_k$ . Sin embargo, existen limitaciones para expresar que estas preferencias no se verifican un día de la semana particular donde el edificio  $e_j$  es utilizado durante la tarde para actividades de extensión universitaria que producen mucho ruido e interfieren en el dictado de clases.

Otra limitación de nuestro enfoque está relacionada con el escaso soporte que brinda para extender el sistema de manera tal que el agente *Cátedra* pueda explicar o justificar al usuario los motivos por los cuales una alternativa fue seleccionada. La teoría de votación brinda un medio para obtener resultados con ciertas propiedades formales garantizadas pero no es clara la forma de traducir los pasos involucrados para obtener estos resultados en una explicación que sea intuitivamente comprensible para el usuario. Estas falencias pueden ser extendidas en general a otros enfoques basados en conceptos del área microeconómica y la teoría de juegos. Este aspecto es analizado más detalladamente en [16] donde se plantean distintos enfoques basados en *argumentación* para subsanar estas limitaciones.

Un aspecto que no hemos abordado aún es la manera en que las preferencias del usuario son incorporadas en el agente *Cátedra*. Si bien esta tarea es realizada actualmente en forma manual por el usuario, nada impide que las preferencias puedan ser adquiridas automáticamente por el agente mediante alguna forma de *aprendizaje de máquina* [8], como es usual en el diseño de *agentes de interfaz* [4]. Una posibilidad en este caso, es recurrir a técnicas de aprendizaje supervisado clásicas, y obtener los datos de entrenamiento a partir de la observación del comportamiento del usuario cuando elige en forma manual las aulas o bien cuando acepta o rechaza las propuestas realizadas por el agente. Considerando el formato de las preferencias, otra posibilidad consiste en la aplicación de técnicas de *aprendizaje por refuerzo* [15, 6] y permitir que el agente aprenda a partir de los refuerzos

(penalizaciones o recompensas) que recibe del usuario cada vez que realiza una acción. En nuestro caso, las funciones a aprender serán aquellas vinculadas a las preferencias del usuario, es decir, las funciones  $P_{D_i}$  correspondientes a cada dimensión y la función de preferencia entre dimensiones  $P_D$ .

Nuestro trabajo futuro está orientado a incorporar estas formas de aprendizaje en el agente contando inicialmente con un conjunto de preferencias que puede ser obtenido de un *conjunto de preferencias por defecto* razonable [13] o bien de la información recibida de otros agentes con características similares [4]. Este conocimiento inicial, será actualizado posteriormente a partir de las interacciones del usuario con el sistema. Otra extensión posible consiste en permitir que el usuario incorpore reglas de meta-control expresadas en un lenguaje *cuasi-natural* donde especifique los casos excepcionales que no deben ser considerados de acuerdo a las preferencias utilizadas en el proceso de votación. De esta manera, el conjunto de alternativas podría ser refinado en la etapa previa a la votación y se atenuaría el problema de los casos excepcionales que mencionamos previamente.

## 8. Reconocimientos

En memoria del Dr. Raúl Gallard por el que siempre mantendremos el mayor de los respetos, afecto y gratitud.

## Referencias

- [1] K. J. Arrow. *Social choice and Individual Values*. New Haven: Cowles Foundation, second edition, 1963.
- [2] V. Conitzer and T. Sandholm. Universal voting protocol tweaks to make manipulation hard. In *IJCAI*, 2003.
- [3] E. Ephrati and J. S. Rosenschein. Deriving consensus in multiagent systems. *Art. Intelligence*, 87(1-2):21–74, 1996.
- [4] M. Errecalde and G. Aguirre. Una propuesta para integrar agentes de interfaz, aprendizaje y sistemas multiagentes. In *Proceedings del Segundo Encuentro Nacional de Computación*, México, 1999.
- [5] M. Errecalde, G. Aguirre, and F. González. *Un sistema multiagente para la distribución de aulas*. LIDIC, 2004. Reporte Técnico. URL: [http://www.lidic.unsl.edu.ar/publicaciones/info\\_publicacion.php?id\\_publicacion=94](http://www.lidic.unsl.edu.ar/publicaciones/info_publicacion.php?id_publicacion=94).
- [6] M. Errecalde, M. L. Crespo, and C. Montoya. Aprendizaje por refuerzo: Un estudio comparativo de sus principales métodos. In *Proceedings del Segundo Encuentro Nacional de Computación*, México, 1999.
- [7] A. Mas-Collel, M. D. Whinston, and J. R. Green. *Microeconomic Theory*. Oxford University Press, 1995.
- [8] T. M. Mitchell. *Machine Learning*. McGraw-Hill, 1997.
- [9] D. M. Pennock, E. Horvitz, and C. L. Giles. Social choice theory and recommender systems: Analysis of the axiomatic foundations of collaborative filtering. In *AAAI/IAAI*, pages 729–734, 2000.
- [10] P. Pirjanian, H. I. Christensen, and J. A. Fayman. Application of voting to fusion of purposive modules: An experimental investigation. *Robotics and Automation*, 23:253–266, 1998.
- [11] J. K. Rosenblatt. *DAMN: A Distributed Architecture for Mobile Navigation*. PhD thesis, CMU, 1997.
- [12] T. W. Sandholm. Distributed rational decision making. In G. Weiss, editor, *Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence*, chapter 5, pages 201–258. The MIT Press, 1999.
- [13] S. Sen, T. Haynes, and A.Ñeeraj. Satisfying user preferences while negotiating meetings. *International Journal of Human-Computer Systems*, 1997.
- [14] P. D. Straffin. *Topics in the theory of voting*. The UMAP expository monograph series, 1980.
- [15] R. S. Sutton and A. G. Barto. *Reinforcement learning: an introduction*. The MIT Press, 1998.
- [16] M. Wooldridge. *An introduction to multiagent systems*. John Wiley and Sons, LTD, 2002.