

2. ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN OPERATIVA

LA TEORÍA DE JUEGOS Y LOS PROBLEMAS DE DISTRIBUCIÓN DE COSTES-BENEFICIOS EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

Joaquín Sánchez Soriano

Departamento de Estadística, Matemáticas e Informática

Centro de Investigación Operativa (CIO)

Universidad Miguel Hernández de Elche

Antes de adentrarnos en las conexiones entre la teoría de juegos y los problemas típicamente de ingeniería, dedicaremos unas líneas a dar una breve visión de lo que es y lo que significa esta materia. La teoría de juegos puede definirse como la disciplina económico-matemática que estudia el comportamiento de los individuos, usualmente llamados jugadores, en situaciones en las que existe un problema de conflicto de intereses, tales situaciones se denominan juegos. El análisis se enfoca, habitualmente, desde la suposición de que todos los individuos inmersos en la situación de conflicto de intereses son inteligentemente racionales, esto es, que optimizan su función de utilidad y, además, que son capaces de hacer inferencias sobre los razonamientos que todos los demás pudieran hacer sobre la situación.

Como puede apreciarse la denominación de la disciplina puede llevar a confusión, siendo el objeto de la misma mucho más ambicioso que lo que a primera vista refleja el nombre. No obstante, no es difícil encontrarse en la literatura y en la prensa frases como el juego de la guerra o el juego de los negocios o el juego de la vida, entre otras expresiones, y, desde luego, todas estas situaciones involucran un comportamiento más o menos estratégico y no se consideran en absoluto triviales o simplemente recreativas, sino que implican decisiones de cierta importancia. Por lo tanto, la denominación teoría de juegos puede considerarse plenamente acertada y aceptada desde este punto de vista más literario.

Desde el que podría considerarse el primer trabajo en teoría de juegos (Zermelo, 1913) no han transcurrido todavía ni 100 años y mucho menos tiempo si consideramos como inicio de esta interesante disciplina la publicación del clásico “Theory of Games and Economic Behavior” (von Neumann y Morgenstern, 1944), pero en este “corto” periodo de tiempo las aplicaciones de la teoría de juegos a los más diversos campos del conocimiento

han sido notables, especialmente, en el campo de la teoría económica. Otras disciplinas que también se han beneficiado de las aportaciones de la teoría de juegos son la ciencia política, la biología evolutiva, la ciencia de la computación, la estadística, las matemáticas, la contabilidad, la psicología social, el derecho y distintas ramas de la filosofía tales como la epistemología y la ética. Pero también la teoría de juegos ha estado presente en problemas y proyectos de ingeniería como en lo sucesivo de este artículo se presentará.

En un proyecto o sistema de ingeniería se pueden distinguir a grosso modo tres grandes partes o fases. Por un lado, está el diseño del sistema, en el cual se especifican los elementos que lo componen, sus características técnicas y cómo se relacionan entre ellos. Por otro lado está la parte económica, en la cual se detallan los costes del sistema (incluyendo costes de mantenimiento, puesta en marcha, etc.) y los beneficios económicos que de él se prevén obtener, si éste es el caso. En esta parte se incluiría cómo se financia el sistema y/o cómo se reparten los beneficios, en el caso de que haya más de un agente involucrado en el proyecto/sistema de ingeniería. Y, por último, se tendría la fase de puesta en marcha o implementación del sistema.

A la vista de lo descrito en el párrafo anterior, cuando hay más de un agente involucrado en el sistema, es obvio que la teoría de juegos tiene sus posibilidades de aplicación a la hora de repartir los costes y/o los beneficios. De hecho en la literatura podemos encontrar ejemplos de ello y existe en teoría de juegos toda una línea de investigación, que bajo la denominación inglesa de cost sharing (reparto de costes), aborda este tipo de cuestiones en general.

En muchos casos una buena y convincente regla de reparto de costes y/o beneficios puede ser clave para que un proyecto finalmente alcance la tercera

fase del proyecto: su puesta en marcha. Desacuerdos entre las partes involucradas en las formas de financiar los costes o repartir los beneficios de un proyecto pueden ser un handicap insalvable que condenen al olvido un beneficioso proyecto. En este punto la teoría de juegos puede ser fundamental para salvar las diferencias que existan entre los agentes.

A continuación se presentan algunos ejemplos ilustrativos de proyectos de ingeniería en los que, o bien, surgió la necesidad de aplicar, implícita o explícitamente, la teoría de juegos, o bien, la teoría de juegos podía haber jugado o todavía puede jugar un papel fundamental para la resolución del problema o la mejora, en base a criterios de justicia y equidad usuales en teoría de juegos, de la solución propuesta.

“The Tennessee Valley Authority (TVA) Problem” (Ransmeier, 1942)

El río Tennessee es una corriente situada en sureste de los EE.UU. El Muscle Shoals es un tramo de 37 millas del río que tiene una caída de 133 pies lo que lo hace idóneo para la generación de energía eléctrica. En 1917, durante la Primera Guerra Mundial, debido a las necesidades energéticas de los EE.UU. para la producción de munición se decidió la construcción de una presa (Presa Wilson), una planta eléctrica y dos plantas para la producción de nitratos en la mencionada zona, pero todas estas obras fueron finalizadas una vez acabada la Guerra.

Finalizada la contienda mundial, entre los poderes públicos y privados surgió la controversia de cómo utilizar adecuadamente los recursos construidos. Pero no fue hasta 1933 cuando el Congreso creó la Tennessee Valley Authority (TVA) para gestionar un extenso programa para el desarrollo económico de la región.

Entre las líneas de actuación que utilizó la TVA se encontraba el control de agua que incluía la navegación, el control de caudal y el desarrollo de la producción de energía. Como consecuencia de las controversias entre el sector público y el privado y las diferencias económicas de unos y otros, el TVA tuvo que enfrentarse al problema de repartir los costes de la construcción de la Presa Wilson y otros proyectos de construcción de presas entre cinco objetivos: navegación, control de caudal, generación de energía, defensa nacional y producción de ferti-

lizantes.

Se analizaron numerosos métodos para llevar a cabo esta distribución de costes, pero el problema fundamental era elegir una distribución que fuese equitativa y defendible. En Driessen (1988) podemos encontrar un análisis de algunos de los métodos que fueron estudiados y considerados por la TVA.

“The Sydsvatten Company” (Young et al. 1982; Young, 1994 (in Handbook of Game Theory, vol. 2 Capítulo 34))

La región de Skane al sur de Suecia está compuesta por 18 municipios, de los cuales el más populoso es Malmö. En la década de los cuarenta, algunos de ellos, incluyendo a Malmö, se unieron para formar una mancomunidad para la gestión del agua en la región, que fue conocida por la Sydsvatten Company. Cuando la demanda de agua creció, la Sydsvatten Company incrementó la presión para incrementar la oferta a largo plazo e incorporar nuevos municipios a la mancomunidad. En la década de los setenta la Sydsvatten Company invitó a un grupo del International Institute for Applied Systems Analysis (que incluía investigadores en el campo de la teoría de juegos) para analizar cómo podía repartirse el coste de la expansión del sistema entre los municipios participantes. Así, este grupo estudió el sistema existente en la década de los setenta y cuál sería la demanda estimada para la década de los ochenta. Una vez establecido el coste de la expansión y distinguiendo entre costes directos y conjuntos, el problema que se planteaba era cómo dividir los costes entre los municipios participantes en la mancomunidad. Obviamente, para repartir estos costes se podría recurrir a asignaciones de tipo proporcional a algún parámetro, población, demanda,... pero estos tipos de reparto no eran del todo satisfactorios. Por ello, este grupo de técnicos recurrió a la teoría de juegos cooperativos para la asignación de costes entre municipios. La primera dificultad que se encontraron fue el número de coaliciones sobre las que tenía que estar definida la función característica, $2^{18} = 262.144$, lo cual es claramente inabordable. Para simplificar hicieron uso de la información histórica que poseían, la cual les indicaba que se podían considerar ciertos subgrupos en base a asociaciones pasadas, proximidad geográfica y redes de canalización ya existentes. De este

modo, se redujo a 6 grupos de municipios el estudio, que los llevaba a dos etapas en el reparto: la primera la asignación de la co-financiación a cada uno de los grupos, y una segunda de reparto dentro de cada uno de ellos. Las asignaciones del coste que el grupo de técnicos propuso para su aplicación, valorando distintos criterios de reparto del coste entre los seis grupos, fueron las habituales de proporcional a la demanda y a la población junto con otras procedentes de la teoría de juegos como el valor de Shapley (Shapley, 1953) y el nucleolo (Schmeidler, 1969). De la comparación de todas ellas se podía comprobar que el procedimiento, tan extendido en ingeniería y en muchos otros campos profesionales, de repartir el coste de una operación pública proporcionalmente al número de habitantes de las poblaciones (región o área geográfica) provocaba agravios comparativos entre ellas, en el sentido de que unas subsidiaban a otras.

“The Terrestrial Flight Telephone System (TFTS)” (van den Nouweland et al. 1996)

El TFTS es un servicio telefónico público para pasajeros de aviones en el cual las conexiones telefónicas son establecidas por radiocomunicación a una estación terrestre cercana, desde donde las conexiones son dirigidas al destino utilizando la red existente. Por lo tanto, para llevar a cabo el TFTS es necesario que estaciones terrestres sean construidas y que se incorporen sistemas de comunicación en los aviones. Este servicio telefónico resultaría atractivo económicamente si es suficientemente extendido, por tanto tendría que haber un gran número de aviones que lo ofertasen y, además, las zonas donde uno pudiese utilizarlo fuesen suficientemente grandes. Por ello, para acometer este novedoso servicio varios operadores internacionales deberían cooperar. Un grupo de operadores europeos decidieron cooperar y localizar estaciones terrestres para dar cobertura a Europa, de tal forma que los solapamientos serían mínimos. Por supuesto los beneficios que se generarían dependerían del número de aviones que lo tuviesen instalado y que desean prestar este servicio. El servicio sería ofrecido a las compañías aéreas por un distribuidor. Y los beneficios que se generarán por el TFTS deberían ser distribuidos entre los participantes. Los operadores de telefonía europeos habían decidido cuál sería la configuración de la red de las esta-

ciones y que cada operador financiaría la construcción de las estaciones ubicadas en su país. Sin embargo, los operadores no se ponían de acuerdo sobre la forma de distribuir los beneficios generados por el TFTS entre los participantes. Sobre la mesa de negociación hubo varias propuestas sobre las que no se ponían de acuerdo, algunas de ellas las habituales de proporcionalidad a algún parámetro. Una aproximación alternativa al problema consistió en estudiar la situación desde la perspectiva de la teoría de juegos. Una vez que se tuviera el juego que describía la situación existían numerosos conceptos de solución que proporcionarían distribuciones aceptables de los beneficios. Cuál de estas soluciones utilizar dependía de las características específicas del problema y de los requerimientos que se le exigieran a la distribución. En cualquier caso, en contraste con los métodos de proporcionalidad habituales, las soluciones de la teoría de juegos no sólo estaban basadas en las características individuales de los agentes, sino que también se basaban en consideraciones acerca de las posibles coaliciones (enfoque cooperativo del problema). Por lo tanto, el único elemento que faltaba por introducir en el modelo era qué papel jugaban los aparatos a instalar en los aviones. Este papel debía ser recogido por la función característica que describiera la situación.

Para comenzar a definir el juego lo primero que necesitaron conocer era quiénes eran los jugadores que participaban en él. En la situación del TFTS había varias partes implicadas, a saber, los operadores de telefonía nacionales, el proveedor del servicio TFTS y las aerolíneas. Se realizaron dos suposiciones para llegar a comprender quiénes eran los jugadores. En primer lugar se supuso que si un operador nacional de un determinado país que no invertía en estaciones de comunicaciones, entonces el proveedor del servicio no invertiría en aparatos en aviones pertenecientes a compañías con sede en dicho país. Esta suposición parecía razonable puesto que en Europa los viajes no son excesivamente largos y los aviones invierten mucho tiempo dentro de su propio país de origen, por lo tanto, invertir en tales compañías no resultaría rentable. Entonces, consideraron como jugadores a los países cuyos operadores de telefonía nacionales participaban en el proyecto del TFTS. La segunda suposición que hicieron fue que cada país invertía tanto en las estaciones como en los aparatos a instalar en

los aviones de las compañías aéreas con sede en su país. Con estas hipótesis, se estaba asumiendo, implícitamente, que el proveedor del servicio era cada país.

Una vez determinado quiénes eran los jugadores se definió la función característica del juego teniendo en cuenta que la contribución de un determinado país consistía de dos partes. Por una parte, las llamadas telefónicas que eran realizadas desde aviones que sobrevuelan el país, y por otra parte, las llamadas que eran realizadas desde aviones que pertenecen al país. En consecuencia, se observaba que los beneficios obtenidos podían ser asignados bien a un único país o bien a dos países de una forma natural. Una vez definido el juego se observó que poseía unas propiedades que lo hacían fácilmente manejable y a partir de él se propuso una solución (el valor de Shapley que a su vez coincidía con el nucleolo y el valor de Tijs (Tijs, 1981)) que distribuía los beneficios de forma coalicionalmente estable.

Determinación de tasas para el uso de infraestructuras ferroviarias (Fagnelli et al, 2000, Norde et al, 2002)

Con el objeto de dinamizar el sector ferroviario europeo la Comunidad Europea aprobó la Directiva 440/91 (posteriormente modificada por la Directiva 12/2001) cuya aplicación implicaba la separación entre la gestión de las infraestructuras ferroviarias y las operaciones de transporte por tren en los distintos países de la Unión Europea. Con ello se perseguía la liberalización del transporte por ferrocarril para facilitar la entrada de nuevos operadores (públicos o privados) y con ello fomentar la competencia, que se entendía como favorable para mejorar la eficiencia del sistema y los consiguientes beneficios para el usuario, tanto de tipo económico como de calidad de servicio.

Esta separación entre las infraestructuras y el transporte por tren propiamente dicho conduce a tres preguntas. En primer lugar, cómo se conceden las licencias para operar en el sistema (Directiva 18/95 de la Comisión Europea, modificada por la Directiva 13/2001). En segundo lugar, cómo y cuándo se utilizan las infraestructuras por parte de los diferentes operadores con licencia. Y, en tercer y último lugar, cómo se financia la construcción y mantenimiento de las infraestructuras. Esta última pregunta lleva al problema de cómo asignar

el coste, mediante tarifas y/o cánones por su utilización, a los operadores del sistema de transporte ferroviario. Otras directivas de la Comisión Europea que abordan los problemas anteriores son las Directivas 14/2001 y 16/2001. En el caso particular de España, la aplicación de las Directivas Europeas al sistema ferroviario español se encuentran recogidas en la Ley 39/2003, de 17 de noviembre, del Sector Ferroviario.

En este caso, uno puede fácilmente observar que la teoría de juegos tiene capacidad para ayudar a responder a la tercera de las cuestiones planteadas en el párrafo anterior. Por un lado, su utilización tendría sentido en la parte correspondiente a financiación de los proyectos de ingeniería civil dirigidos a la construcción de nuevas infraestructuras y su mantenimiento. Y, por otro lado, como parte de los proyectos de ingeniería dirigidos a establecer el mantenimiento de las infraestructuras ya existentes, también en la parte correspondiente a su financiación.

Para el análisis de este tipo de situaciones desde la perspectiva de la teoría de juegos se definió un juego cooperativo, denominado juego de costes de infraestructuras, que resultaba ser la suma de un juego del aeropuerto (Littlechild y Owen, 1973) y un juego de costes de mantenimiento. El primero de esos juegos está relacionado con la construcción de infraestructuras (y el coste fijo del mantenimiento) y el segundo, como su propio nombre indica, con el mantenimiento (el coste variable del mantenimiento) de las mismas. Dada la estructura de los juegos de infraestructura, estos tienen la misma descomposición como la suma de los dos juegos antes mencionados, incluso cuando se considera que las infraestructuras ya existen y sólo es necesario evaluar el mantenimiento. A partir de ese juego se pueden obtener reglas de reparto conocidas como el valor de Shapley, el nucleolo o el valor de Tijs, así como otras que se pudieran definir ad hoc para este tipo de situaciones, con el fin de determinar las posibles tarifas y/o cánones de uso y compararlas con las que realmente se implementen.

El problema de la conexión de aldeas de un ayuntamiento gallego a un embalse de agua (Bergantiños y Lorenzo, 2003a, 2003b y 2004)

En un valle gallego había problemas con el su-

ministro de agua en algunas aldeas que componían el ayuntamiento del valle. Éstas informaron al ayuntamiento y le solicitaron soluciones al problema de abastecimiento que padecían. El ayuntamiento tomó cartas en el asunto y construyó depósitos de agua en cada aldea conectados a un embalse. El coste de estas infraestructuras fue completamente sufragado por el propio ayuntamiento. Asimismo, decidió que el acceso al agua sería gratuito, pero los costes de conexión de cada casa al depósito correspondiente correrían a cargo de sus aldeanos. Finalmente, una vez finalizada la obra de conexión, el ayuntamiento pasaría a ser el propietario y responsable del mantenimiento de todo el sistema de abastecimiento de agua.

Hasta aquí todo fue bien. Pero surgió un problema en cada aldea no todos sus habitantes tenían los mismos intereses y, por lo tanto, no existía acuerdo en cómo llevar a cabo las obras y si deseaban participar todos. En este sentido, los habitantes de una aldea no alcanzaron acuerdos para realizar las conexiones de sus casas al correspondiente depósito de agua. Así, en un primer momento se conectaron todos aquellos que quisieron, algunos directamente, otros cooperaron para reducir costes. Pero hubo un grupo de aldeanos que no se conectó inicialmente.

Una vez en marcha el sistema de abastecimiento se observó que funcionaba bien, y la mayoría de los aldeanos que no se habían conectado en primera instancia solicitaron al ayuntamiento su conexión, obviamente de la forma más beneficiosa para ellos. Ello llevó a disputas entre los vecinos ya conectados y los que deseaban conectarse, dado que los primeros se sentían agraviados y pensaban que los segundos debían compensarles parte de los gastos en los que ellos habían incurrido y los segundos, obviamente, discrepaban de ese sentimiento. Finalmente, el ayuntamiento decidió conectarlos pagando solo su coste de conexión, porque todo el sistema era suyo y, por lo tanto, de uso común.

Como apuntan Bergantiños y Lorenzo, quizá, el ayuntamiento no supo anticipar esta segunda, y sucesivas, conexiones. Al menos, en un principio, no habían dicho nada sobre esa posibilidad.

En cualquier caso, el análisis de esta situación para comprender el comportamiento estratégico de los agentes (aldeanos) involucrados fue llevado a cabo por Bergantiños y Lorenzo desde la perspectiva de la teoría de juegos no-cooperativos. Los re-

sultados que obtienen son muy interesantes por dos razones: primero porque el enfoque es desde un punto de vista no-cooperativo en vez del usual enfoque cooperativo de los problemas anteriores, segundo porque permite que en situaciones similares se diseñen mecanismos que eviten el conflicto. Una vez más la participación de la teoría de juegos podría haber evitado enfrentamientos innecesarios.

El problema de los Sistemas Coordinados de Transporte (Sánchez-Soriano et al., 2002)

Un problema común que podemos encontrar es la definición de sistemas coordinados de transporte, en el sentido de que existen diversos agentes con intereses “comunes” en un determinado transporte y deciden establecer un mecanismo que les permita compartir gastos, y con ello, la reducción de costes derivados del transporte. Un caso particular es el transporte de pasajeros desde distintas ciudades a un destino común. Éste es el caso abordado para la situación particular del transporte de los estudiantes universitarios en la Provincia de Alicante desde sus ciudades a las sedes de sus dos Universidades. La idea parte del hecho de que en la provincia de Alicante existen diversas asociaciones de estudiantes y entidades, de distintas áreas geográficas de la provincia, que organizan el transporte de los estudiantes universitarios desde sus áreas de influencia a las universidades. Asimismo, las propias autoridades comunitarias, provinciales y locales están interesadas en que este sistema funcione lo más eficientemente posible por el impacto social positivo que ello conlleva, por ello, en muchos casos, aportan subvenciones a las organizaciones estudiantiles y entidades para la organización de este transporte. El problema que surge es que, a primera vista, la cooperación entre todas las partes permitiría disminuir los costes, y, por lo tanto, reducir el precio del billete que pagan los estudiantes, pero dicha cooperación no existía.

En Sánchez-Soriano et al (2002) se estudia la determinación de los precios de los billetes de autobús y las subvenciones necesarias para que pueda establecerse un sistema coordinado de transporte (universitario) en un área, particularizando en la Provincia de Alicante. Abordando este complejo problema mediante teoría de juegos. Tras analizar el problema consideraron una estructura arborescente para representar las rutas de autobuses so-

bre la que se definieron juegos que resumían la información relevante del problema. Introdujeron dos nuevas clases de juegos: (a) juegos de autobuses en árboles y (b) juegos de autobuses en tramos. A partir de ellos determinaron analíticamente el menor valor para el cual la distribución igualitaria está en el núcleo aditivo (resp. multiplicativo) de cada uno de los juegos de autobuses en tramos que pueden construirse en una ruta tipo árbol, dado que estos juegos tienen el núcleo vacío en general. A partir de los resultados anteriores y agregándolos convenientemente, obtuvieron analíticamente el precio del billete de autobús y la cuantía de la subvención necesaria para que pudiera establecerse la cooperación entre las partes. Por lo tanto, se aportó una metodología basada en la teoría de juegos que permitía a las propias instituciones públicas dirigir las subvenciones para conseguir un sistema de transporte en el que estuviesen integradas todas las partes presentes en el problema. Por lo tanto, una vez más, la teoría de juegos aporta ideas y métodos que podrían facilitar, de utilizarse, la consecución de acuerdos de cooperación en un problema tan complejo como el diseño de un sistema de transporte.

Los ejemplos anteriores son tan sólo algunos ejemplos, que podemos encontrar en la literatura, que proporcionan una muestra de la potencial aplicabilidad de la teoría de juegos en los problemas de distribución de costes/beneficios que pueden surgir en determinados proyectos de ingeniería. Ello invita a esperar un futuro esperanzador en el desarrollo del denominado Game Practice (Práctica de la teoría de juegos). Dentro de la ingeniería podemos encontrar más aplicaciones de esta fascinante disciplina, como son los sistemas multi-agente, pero ello queda para otra ocasión.

Referencias y Bibliografía

- G. Bergantiños y L. Lorenzo (2003a). A non-cooperative approach to the cost spanning tree problem. *Mathematical Methods and Operations Research* 59:393-403.
- G. Bergantiños y L. Lorenzo (2003b). Non-cooperative cost spanning tree games with budget restrictions. *Mimeo*.
- G. Bergantiños y L. Lorenzo (2004). Optimal equilibria in the non-cooperative game associated with cost spanning tree problems. *Annals of Operations Research* (forthcoming).
- T. Driessen (1988). *Cooperative Games, Solutions, and Applications*. Kluwer Academic Publishers.
- V. Fragnelli, I. García-Jurado, H. Norde, F. Patrone, S. Tijs (2000). How to share railways infrastructure costs? In F. Patrone, I. García-Jurado, S. Tijs (eds.), *Game Practice: Contributions from Applied Game Theory*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 91-101.
- S.C. Littlechild & G. Owen (1973). A simple expression for the Shapley Value in a Special Case, *Management Sciences* 20:370-372.
- M.A. López, J. Sánchez-Soriano (2002). La Teoría de Juegos: Una aproximación científica a los conflictos de interés, en: *El mundo de las matemáticas y las matemáticas del mundo*, editor: F.R. Fernández. Publicaciones de la Universitat de Barcelona e-UMAB, págs. 135-157.
- H. Norde, V. Fragnelli, I. García-Jurado, F. Patrone, S. Tijs (2002). Balancedness of infrastructure cost games. *European Journal of Operational Research* 136:635-654.
- J.S. Ransmeier (1942). The Tennessee Valley Authority: a Case Study in the Economics of Multiple Purpose Stream Planning. The Vanderbilt University Press, Nashville, Tennessee.
- J. Sánchez-Soriano (1999). La Teoría de Juegos. *Boletín de la Sociedad Española de Estadística e Investigación Operativa*, vol. 15(Dic.):3-8.
- J. Sánchez-Soriano, N. Llorca, A. Meca, E. Molina, M. Pulido (2002). An Integrated Transport System for Alacant's Students. UNIVERCITY. *Annals of Operations Research*, vol. 109, núm. 1-4, pp. 41-60.
- L.S. Shapley (1953). A Value for N-person Games, Contributions to the Theory of Games II, H.W. Karlin y A.W. Tucker, editores, Princeton, Princeton University Press, págs. 307-317.
- D. Schmeidler (1969). The Nucleolus of a Characteristic Function, *SIAM Journal of Applied Mathematics*, 17:1163-1170.

- M. Suzuki & M. Nakayama (1976). The Cost Assignment of the Cooperative Water Resource Development: A Game Theoretical Approach. *Management Science*, 22:1081-1086.
- S.H. Tijs (1981). Bounds for the Core and the τ -value, in: *Game Theory and Mathematical Economics*, eds.: O. Moeschlin and D. Pallaschke. N.H. Publishing Company, Amsterdam, The Netherlands.
- S.H. Tijs & G. Otten (1993). Compromise Values in Cooperative Game Theory. *Top*, 1:1-51.
- S.H. Tijs & R. Branzei (2004). Cases in Cooperation and Cutting the Cake. *Working Paper 2004-108 CentER*. Tilburg University. -
- A. van den Nouweland, P. Borm, W. Van Golstein Brouwers, R. Groot Bruinderink & S. Tijs (1996). A Game Theoretic Approach to Problems in Telecommunication. *Management Science* 42:294-303.
- VV. AA. Handbook of Game Theory with Economic Applications, Vols. 1 y 2, editores: R.J. Aumann y S. Hart. N.H. Elsevier Science Publishers, 1992 (vol. 1) y 1994 (vol. 2).
- J. von Neumann & O. Morgenstern (1944). Theory of Games and Economic Behavior. Princeton University Press, (ed. 1992).
- H.P. Young, N. Okada & T. Hashimoto (1982). Cost Allocation in Water Resources Development. *Water Resources Research*, 18:463-475.
- E. Zermelo (1913). Über eine Anwendung der Mengenlehre auf die Theorie des Schachspiels. *Proceedings of the International Fifth Congress of Mathematicians*, Cambridge 1912, Vol. II. Cambridge: Cambridge University Press.

3. ARTÍCULOS DE APLICACIÓN

APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA SEIS SIGMA PARA EL ANÁLISIS DEL PROCESO DE DEFINICIÓN DE PLANES DE MEJORA DE LA SATISFACCIÓN DEL CLIENTE

Julio Santiago González Jiménez

Black Belt de ENUSA Industrias Avanzadas S.A.

ENUSA Industrias Avanzadas, S.A. (www.enusa.es) está participada al 60% por la Sociedad Estatal de Participaciones Industriales (SEPI) y al 40% por el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). Centra su actividad principal en el abastecimiento de combustible a las centrales nucleares, ocupándose del suministro de las materias primas y de su procesado hasta la obtención del combustible, que finalmente se introduce en el núcleo de los reactores nucleares.

Desde hace algunos años, ENUSA ha diversificado su actividad industrial introduciéndose, a través de la creación de un grupo de empresas filiales, en campos tales como la esterilización e higienización de productos por el sistema de ionización mediante electrones acelerados, la fabricación y distribución de radio fármacos para la medicina nuclear, la fabri-

cación y suministro de materiales cerámicos para la elaboración de piezas de altas prestaciones, la logística de materiales especiales, etc.

Antecedentes

Ninguna empresa con objetivos de beneficio podrá sobrevivir a largo plazo sin clientes que elijan los productos ofertados frente a los de la competencia. Por ello, conocer su satisfacción es una parte fundamental de la estrategia y táctica empresarial para garantizar una relación duradera con el cliente. Tomando como elementos básicos de satisfacción la calidad, el precio y el servicio, la medida de estos elementos y su análisis posterior nos permitirá implantar planes de actuación adecuados para consolidar puntos fuertes y mejorar los débiles, constituyendo así una actividad prioritaria de gestión, sobre todo en su vertiente comercial.

En el caso de ENUSA los métodos más utiliza-