

REDES DE PETRI APLICADAS A LA SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CONSUMIDORES EN ESCENARIOS CONCURRIDOS

Juan-Ignacio Latorre-Biel

Institute of Smart Cities. Universidad Pública de Navarra. Campus Arrosadía. 31006 Pamplona,
juanignacio.latorre@unavarra.es

Emilio Jiménez Macías

Departamento de Ingeniería Eléctrica. Universidad de la Rioja, Av. de la Paz, 93, 26006 Logroño,
emilio.jimenez@unirioja.es

Eduardo Martínez Cámara y Mercedes Pérez de la Parte

Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de la Rioja, Av. de la Paz, 93, 26006 Logroño,
eduardo.martinez@unirioja.es, mercedes.perez@unirioja.es

Resumen

El modelado y la simulación del comportamiento humano es una cuestión que ha sido abordada por medio de diferentes enfoques, entre los que pueden destacarse algunas metodologías basadas en agentes. En este contexto, el uso del formalismo de modelado de redes de referencia permite disponer de información detallada sobre el estado completo del sistema modelado y de los agentes en cualquier instante de la simulación. En la presente contribución se describe una aplicación de este formalismo al modelado y la simulación del comportamiento de los clientes potenciales en entornos comerciales con elevada concurrencia de público. En el marco de la red de referencia considerada, una red del sistema proporciona el contexto físico en el que los clientes, modelados por medio de las redes de marcas, desarrollan su actividad. La metodología propuesta, basada en el uso del formalismo mencionado, presenta una gran flexibilidad y una aplicabilidad potencial a muy diversos entornos, tales como supermercados, grandes superficies e incluso el comercio electrónico.

Palabras clave: Redes de Petri, reference nets, simulación social, simulación del comportamiento del consumidor.

1 INTRODUCCIÓN

El modelado del comportamiento humano en muy diversos entornos ha sido objeto de una activa e intensa labor investigadora. Describir el comportamiento de personas individuales, requiere la consideración de diversos factores que influyen en la

toma de decisiones, así como la integración de un factor de aleatoriedad, para incorporar aquellos aspectos del comportamiento humano que no queden reflejadas, con la suficiente precisión, en el modelo utilizado.

Por otra parte, la validación de los modelos desarrollados, a partir de datos reales, presenta un reto importante y muy conveniente.

Además, el diseño y la operación de muchos sistemas de interés, podrían mejorar significativamente si el factor humano es integrado satisfactoriamente en el modelo del sistema. Por ejemplo, el desarrollo de planes efectivos de evacuación de personas, en caso de emergencia, en edificios de pública concurrencia, podrían mejorar si se realizase satisfactoriamente un estudio de simulación del comportamiento individual y social de éstas.

La integración del comportamiento humano ha sido implementada en el modelado de sistemas complejos, siguiendo diferentes enfoques. Los sistemas multiagente (SMA) permiten abordar el modelado de sistemas complejos, compuestos por una variedad de entidades autónomas, capaces de evolucionar e interactuar en cierto entorno. [4] presenta los principales componentes, tanto de un SMA como de un agente individual. Por otra parte, un agente inteligente, es capaz de desarrollar actividades con el propósito de alcanzar un objetivo predefinido [2].

[2] describe un formalismo basado en las redes de Petri para modelar SMA, con el propósito de evaluar las propiedades estructurales de un SMA. En esta referencia, los SMA se describen como sistemas de eventos discretos (SED) y las redes de Petri constituyen un paradigma que ha sido aplicado satisfactoriamente al modelado de SED. [5] presenta

una aplicación de las redes de Petri coloreadas (CPN) para comprobar y validar SMA.

La interacción de un cierto número de agentes permite reproducir algunos comportamientos sociales, tales como el flujo bidireccional, formación de colas y dinámicas de grupos [9]. [10] describe la implementación de un sistema basado en agentes para diseñar políticas urbanas basadas en la participación ciudadana. Los agentes se encuentran modelados por medio de marcas con atributos en una CPN, que representa un área urbana en la que se pretende aplicar dichas políticas.

[1] propone la descripción del escenario de una operación militar, en la que el factor humano se simula por medio de agentes inteligentes. Las interacciones entre individuos, incluida la colaboración, se simula por medio de agentes inteligentes. [6] propone el marco cognitivo de agentes peatones, como un modelo humano para la ayuda en la toma de decisiones, apropiada para la planificación de trayectorias de personas, por medio de metodologías basadas en heurísticas.

[7] sugiere el uso de una red de Petri para desarrollar una herramienta para la toma de decisiones basada en simulación, para la optimización de tráfico en una red viaria. [8] presenta un modelo basado en el formalismo de las redes de referencia, para describir una planta de fabricación en el marco de Industria 4.0, en la que los diferentes productos están representados por medio de redes de Petri, al igual que la línea de producción propiamente dicha. En este trabajo de investigación, se demostró satisfactoriamente que el modelo podía incluir algunas características de Industria 4.0, tal y como los productos inteligentes, los sistemas ciberfísicos y la virtualización.

En este trabajo de investigación, se propone un desarrollo basado en el paradigma de las redes de Petri, las redes de referencia [3, 12], con el objetivo de integrar una descripción formal simplificada del comportamiento humano y social en el modelo de un sistema complejo.

La principal contribución de este trabajo es proponer el uso de este formalismo basado en las redes de Petri, para modelar el comportamiento humano y social, así como establecer unas líneas maestras para implementar este enfoque y presentar una aplicación sencilla, para ilustrar el procedimiento y mostrar algunos resultados.

En el apartado 2 se discute el formalismo a aplicar y el procedimiento de implementación. En el apartado 3, se describe el caso de estudio. La discusión de resultados se aborda en el apartado 4. El apartado 5

muestra las conclusiones. La presente contribución concluye con las referencias bibliográficas mencionadas en el texto.

2 FORMALISMO DE MODELADO

Las redes de Petri constituyen un paradigma compuesto por una familia de lenguajes formales, capaces de describir la estructura y el comportamiento de sistemas de eventos discretos, incluyendo algunas características, tales como la concurrencia, el paralelismo y la competición por recursos compartidos. [11] aporta una excelente introducción a este paradigma.

Las redes de Petri, a diferencia de otros formalismos capaces de representar sistemas de eventos discretos, proporciona una representación explícita del estado del sistema (la población y el escenario en la presente aplicación) en cualquier instante de la evolución del sistema. Este hecho facilita el análisis del comportamiento del sistema para comprender las causas que permiten alcanzar los objetivos que se desea alcanzar o las situaciones que se pretende evitar.

Algunos elementos de las redes de Petri son los nodos y los arcos dirigidos. Los nodos pueden ser de dos tipos: los lugares, que permiten representar las variables de estado del sistema, y las transiciones, que están relacionadas con la evolución de los estados del sistema. Los valores de las variables de estado, que determinan el estado del sistema, se denomina marcado y está compuesto por las marcas contenidas en cada lugar.

Las marcas, constituyen la población del sistema y, en la presente contribución, representarán, entre otros, los humanos involucrados en la descripción del sistema.

Las redes de referencia, constituyen un formalismo perteneciente al paradigma de las redes de Petri, que ha sido desarrollado bajo un enfoque de las redes dentro de redes (nets-within-nets). En las redes de referencia, se considera el modelo de un entorno de operación, llamado red de sistema, en el que la población, en este caso de humanos, actúa.

Una representación simplificada de los humanos asocia una cierta dinámica a su comportamiento, que cada instante de tiempo puede vincularse a un estado propio, que evoluciona según la ocurrencia de eventos (transcurso del tiempo o interacción con otros humanos, otros componentes del sistema o el entorno). En este contexto, las redes de referencia muestran características apropiadas para representar apropiadamente ciertas peculiaridades del

comportamiento humano, puesto que las marcas, en este formalismo, son instancias a redes de Petri con su propio estado y su propia evolución.

Este tipo de red, llamado red de marca, es, en cierto modo autónomo y se le puede dotar de mecanismos para que pueda tomar sus propias decisiones. Además, el modelado de la población y su entorno por medio de un lenguaje formal, como las redes de Petri, permite conocer el estado detallado del sistema complejo, formado por el entorno y cada elemento de la población, en cada instante de la simulación.

Como consecuencia, un análisis estructural y de prestaciones, así como una adquisición de conocimiento referente a la estructura y al comportamiento del sistema puede ser abordada.

3 CASO DE ESTUDIO

3.1 METODOLOGÍA A APLICAR

El enfoque propuesto en esta contribución, está orientado al modelado de sistemas complejos, en los que el factor humano es decisivo en la evolución del propio sistema. En particular, el ámbito de aplicación de esta propuesta consiste en el desarrollo de un sistema de ayuda a la decisión sobre decisiones operativas e incluso de diseño de instalaciones comerciales, en base a la respuesta prevista, por medio de la simulación, por parte de los potenciales clientes, cuyo comportamiento es modelado por unas reglas básicas implementadas en una red de Petri.

La metodología propuesta, permite simular diferentes configuraciones del sistema de estudio, comparar los resultados de cada simulación, teniendo en cuenta los objetivos que se desea alcanzar y determinar así, qué configuración es la más recomendable. En particular, es posible calcular los parámetros de calidad, que caracterizan el resultado de la simulación del sistema, para cada configuración, pudiendo así cuantificar la bondad de cada una de las decisiones simuladas.

Esta metodología puede ser aplicada a una variedad de casos de estudio, tales como grandes superficies comerciales, lugares turísticos, estaciones de tren o autobús, aeropuertos, instituciones educativas, edificios de oficinas, redes urbanas o de carreteras, etc. Dependiendo de la naturaleza del escenario, la población del modelo puede estar compuesta por peatones, conductores de bicicleta, motocicletas, automóviles, pilotos de avión, etc. o una combinación de varios tipos.

Más en concreto, un individuo, siguiendo este enfoque, se puede considerar una entidad, creada aleatoriamente, con características particulares, capaz

de solicitar servicios, tales como transporte, transacciones comerciales, acceso a cierto lugar, etc. Además, un individuo puede ser caracterizado por un cierto conjunto de atributos, tales como conocimiento del entorno, personalidad (colaboradora, egoísta, etc), tenacidad (capacidad de mantener los objetivos originales o facilidad para cambiar de idea en función de las circunstancias), etc.

Por otra parte, una marca, puede representar un solo individuo de la población o varios de ellos (una familia en un centro comercial, que puede consumir un cierto número de recursos, en lugar de uno solo). Una vez seleccionados el entorno y la población, deben identificarse las variables de decisión. De acuerdo a ellas, es posible definir las configuraciones alternativas del sistema objetivo, como posibles soluciones de la toma de decisiones,

Para cada una de las configuraciones alternativas seleccionadas, se puede desarrollar una simulación. Como resultado de la simulación, es posible calcular cierto número de parámetros, tal y como la tasa de utilización de ciertos recursos, el grado de consecución de los objetivos individuales de la población, o el tiempo requerido por la población para alcanzar dichos objetivos.

Esta metodología permite mejorar el conocimiento que se tiene sobre el sistema y comprobar las consecuencias de las decisiones antes de implementarlas en un sistema real.

3.2 SISTEMA DE INTERÉS

En esta sección se describirá el sistema de interés en el que se va a aplicar la metodología propuesta. Se va a proceder a abordar el modelado y simulación de un centro comercial, en un periodo de tiempo en el que cuenta con una elevada concurrencia de público.

En el centro comercial considerado, hay un conjunto de áreas comunes, consistentes en escaleras, ascensores, puertas de acceso, etc.

Por otra parte, el centro comercial cuenta con una serie de tiendas individuales, cada una de las cuales está dotada de una zona de exhibición, con un aforo limitado, y una zona de pago, caracterizada por un acceso secuencial de los usuarios.

El modelo del centro comercial, todavía sin añadir la población del mismo, desarrollado por medio del formalismo de las redes de referencia, constituye la red del sistema.

Además de la red del sistema, el modelo completo incluye las redes de marca, cada una de ellas

representando un miembro de la población del centro comercial.

La población del modelo del centro comercial se ha clasificado en dos grupos de personas:

a) Consumidores, que buscan un producto para adquirir. Estas personas pueden operar de tres formas diferentes:

a.1) En el caso de que encuentren el producto que buscan y puedan adquirirlo, terminan con la satisfacción como resultado.

a.2) Si, al llegar a la tienda objetivo, ésta está llena. Abandonan el centro comercial sin comprar. En este caso el resultado es la insatisfacción del cliente.

a.3) Si el cliente no encuentra el producto que está buscando, abandonará el centro comercial con la insatisfacción como resultado. El cliente puede no encontrar un producto por varios motivos: el producto se ha agotado o no está disponible en la tienda visitada.

b) Visitantes, que recorren las instalaciones sin intención de comprar ningún producto. Estas personas pueden actuar de dos maneras:

b.1) Pueden visitar las tiendas, tomando su tiempo, con lo que el resultado es satisfactorio para ellas.

b.2) Pueden encontrarse con una tienda llena, de modo que el resultado será de insatisfacción.

3.3 MODELO CON REDES DE REFERENCIA

El modelo de una tienda individual, consta de una red de sistema, representando el establecimiento comercial propiamente dicho, mostrado en la figura 1 y las redes de marcas, que representan un cliente potencial y un visitante del establecimiento, mostrados, respectivamente en la figura 2 y figura 3.

La red de sistema, representada en la figura 1, consta de una serie de subredes, nombradas como T1 a T6 que se detallan a continuación:

T1: Subred que genera redes de marca, representando personas, de acuerdo a un patrón aleatorio.

T2: Subred que completa la generación de personas, clasificándolas como clientes potenciales o como visitantes a la tienda.

T3: Comprobacion de que el aforo de la tienda está completamente ocupado.

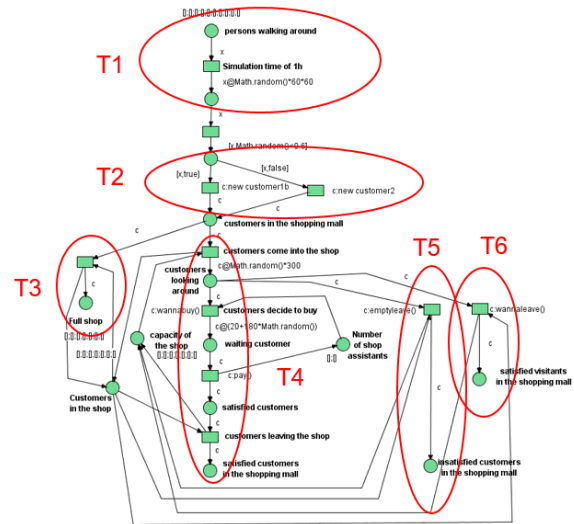


Figura 1: Red de sistema del establecimiento comercial.

T4: Subred que recorre el cliente que encuentra el producto que busca y lo adquiere.

T5: Subred vinculada con el cliente que no encuentra el producto que estaba buscando.

T6: Subred que está asociada al visitante que no tiene intención de adquirir un producto, pero invierte su tiempo en la tienda y puede impedir, entre tanto, que un cliente entre en la misma si el aforo está completo.

Por otra parte, la red de marca que representa a un cliente potencial, aparece representada en la figura 2.

Esta red, consta de varias subredes, entre las que destacan las siguientes:

C1: Subred que representa al cliente potencial, que encuentra el producto que estaba buscando y lo adquiere.

C2: Subred que representa al cliente potencial, que no encuentra el producto deseado y, por lo tanto, abandona la tienda con un nivel bajo de satisfacción.

4 SIMULACIÓN

4.1 SIMULACIÓN DE UNA TIENDA

En este caso se ha realizado una simulación de 2h de tiempo virtual para una tienda con un aforo de 7 personas. Se ha considerado que cada persona pasa en la zona de exhibición de la tienda un tiempo variable aleatorio. Además, se ha considerado que el tiempo de pago es de 2 minutos, sin considerar el tiempo de espera en la fila de cajas.

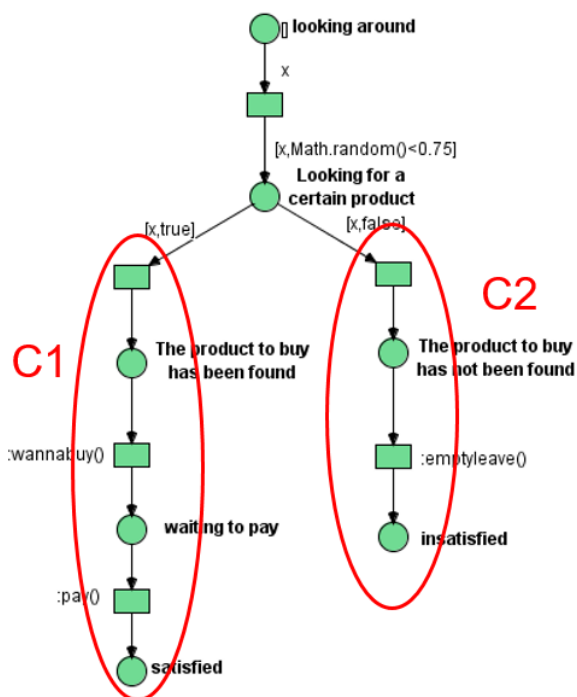


Figura 2: Red de marca de un cliente potencial.

Se han realizado diversas simulaciones, considerando periodos de diferente afluencia, desde 10 hasta 250 personas con interés en visitar la tienda. Por otra parte, se ha considerado una variable de decisión, como es el número de personal atendiendo a las cajas. Se han simulado casos desde 1 cajero hasta 4.

En la figura 3, puede observarse el porcentaje de potenciales clientes que no entran a la tienda por encontrarse el aforo lleno, para diferentes números de cajas abiertas y diferente nivel de concurrencia de público. Se observa que, a partir de una caja abierta, no hay diferencias significativas en el mencionado porcentaje.

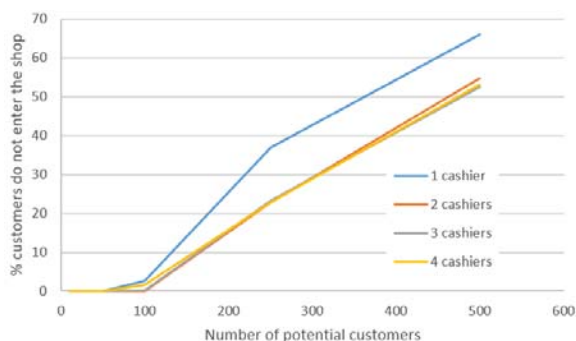


Figura 3: % de personas por encima del aforo.

En la figura 4 se muestra el porcentaje de clientes que adquieren un producto, en función del número de cajas abiertas y del nivel de concurrencia de público.

Para una concurrencia baja de público, hay diferencias importantes en función del número de cajas, aunque no hay una relación proporcional entre el número de cajas abiertas y el porcentaje de clientes que adquieren un producto. Para una concurrencia elevada de público, los resultados son más afines a la figura 1, según los cuales, si se abre más de una caja, aumenta el porcentaje de clientes que compran un producto, pero no hay diferencias importantes para 2, 3 o 4 cajas abiertas.

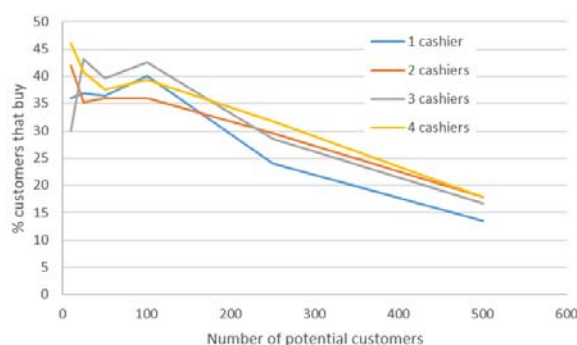


Figura 4: % de clientes que adquieren un producto.

A partir de las simulaciones realizadas y los resultados de éstas, es posible decidir el número de cajas abiertas, en función del nivel de concurrencia de público, para maximizar el nivel de ventas. Estas conclusiones, pueden adaptarse a otros comercios, con diferentes aforos, tiempo medio de permanencia de las personas en la zona de exhibición, tiempo medio de pago, etc.

4.2 SIMULACIÓN DE UN CENTRO COMERCIAL

En el modelo correspondiente a un centro comercial, se han integrado 15 modelos de tienda, como los descritos en el apartado anterior, 5 plantas, 2 ascensores, así como zonas comunes para acceder a las diferentes tiendas.

Los potenciales clientes presentan una “lista de la compra” con diferentes probabilidades de estar interesados en adquirir un producto en la tienda *n*-ésima. Además, tienen capacidad para navegar por el centro comercial, con el propósito de visitar las tiendas que cada uno de ellos desea.

En la figura 5, puede observarse cómo el tiempo de permanencia de los clientes en el centro comercial depende del interés de éstos en adquirir un producto, de que ese interés se vea satisfecho pudiendo adquirirlo, así como del nivel de concurrencia de público en el centro comercial. Este resultado es una muestra de información que puede obtenerse de la simulación completa de un centro comercial. Podrían repetirse diferentes simulaciones para tiendas con

diferentes aforos, cajas abiertas, ubicación de tiendas en plantas, número de ascensores, etc. De modo que es posible usar dicha información como ayuda en la toma de decisiones tanto estructurales como operativas relativas al centro comercial.

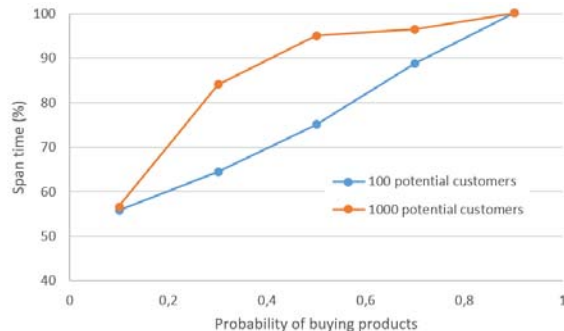


Figura 5: Tiempo de permanencia de los clientes en un centro comercial.

5 CONCLUSIONES

En esta contribución se ha mostrado la aplicabilidad del formalismo de las redes de referencia, derivadas del formalismo de las redes de Petri, para implementar un sistema multiagente para modelar y simular el comportamiento de clientes y visitantes en locales comerciales con diferentes niveles de concurrencia.

Como una de las principales conclusiones, se puede reducir el tiempo y el coste en la toma de decisiones relativa a la definición de la estructura y la operativa del centro comercial. De esta forma se puede minimizar el riesgo, por medio del análisis de las consecuencias de las decisiones a través de la simulación, sin necesidad de implementarlas en el centro comercial real.

Se ha visto cómo las redes de referencia permiten modelar los efectos complejos de grupos importantes de personas, representadas con modelos sencillos de redes de marcas, contribuyendo a salvar las dificultades inherentes en el modelado y simulación de la mente humana.

Las redes de referencia constituyen una herramienta prometedora para representar entes autónomos que pueden tomar sus propias decisiones y proporcionar información sobre el nivel individual de cumplimiento de los objetivos de cada uno de ellos, incluyendo el nivel de satisfacción, cuando estas redes de marcas representan clientes de una instalación comercial.

Como líneas futuras de desarrollo cabe mejorar los modelos en redes de marcas para integrar comportamientos humanos más complejos. También se pueden mejorar las prestaciones de los modelos como ayuda a la toma de decisiones, por medio de la incorporación de un mayor número de variables de decisión. Finalmente, esta metodología podría aplicarse a un rango más amplio de casos de estudio, lo que proporcionaría una visión más amplia de la utilidad y efectividad de la metodología propuesta.

Agradecimientos

La investigación descrita en la presente contribución se enmarca en el proyecto de investigación “Modelos sostenibles y Analítica del Transporte en Ciudades Inteligentes”, PID2019-111100RB-C22, financiada por el Ministerio de Ciencia e Innovación.

English summary

PETRI NETS APPLIED TO THE SIMULATION OF CUSTOMER BEHAVIOR IN BUSY SCENARIOS

Abstract

Modeling and simulation of human behavior is a topic that has been considered from different approaches, as they are different methodologies based on agents. In the frame of this approach, the use of the formalism of reference nets, may provide with detailed information about the complete state of the modeled system and the agents at any stage of the simulation process. An application of this modeling formalism is described, leading to simulations of potential customers' behavior in crowded shopping malls. In the frame of the reference nets, the system net models the physical context, where the customers, modeled by token nets, develop their activity. The proposed methodology shows large flexibility and potential applicability to very different environments, such as shops, supermarkets, shopping malls, as well as e-commerce.

Keywords: Petri nets, reference nets, social simulation, simulation of customer behavior.

Referencias

- [1] Bruzzone, A., Massei, M., Longo, F., Poggi, S. Human Behavior Simulation for Complex Scenarios Based on Intelligent Agents. In

- proceedings of the 2014 Spring Simulation Multi-Conference (SpringSim'14). April 13 - 16, 2014, Tampa, FL, USA
- [2] Celaya, J.R., Desrochers, A.A., Graves, R.J., (2009) Modeling and Analysis of Multi-agent Systems using Petri Nets. *Journal of Computers*, Vol. 4, No. 10, October 2009
- [3] Cristini, F., & Tessier, C. (2012). Nets-within-Nets to Model Innovative Space System Architectures. In S. Haddad, & L. Pomello (Eds.), *PETRI NETS 2012*, LNCS 7347, (pp. 348–367). https://doi.org/10.1007/978-3-642-31131-4_19
- [4] Ferber, J., (1995) *The Multi-agent Systems to Collective Intelligence*, Inter Editions, Paris, pp. 33– 47.
- [5] Gonçalves, E., Machado, R., Rodrigues, B., & Addamatti, D. (2022) CPN4M: Testing Multi-Agent Systems under Organizational Model Moise+ Using Colored Petri Nets, *Applied Sciences*, 12(12), 5857.
- [6] Holman, C. A Cognitive Human Behavior Model for Pedestrian Behavior Simulation. PhD thesis. University of Greenwich, 2015.
- [7] Latorre-Biel, J.I., Faulin, J., Jiménez, E., Juan, A.A. Simulation Model of Traffic in Smart Cities for Decision-Making Support: Case Study in Tudela (Navarre, Spain). In E. Alba et al. (Eds.): *Smart-CT 2017*, LNCS 10268, pp. 144–153, 2017.
- [8] Latorre-Biel, J.I., Faulin, J., Juan, A.A., Jiménez, E. Petri Net Model of a Smart Factory in the Frame of Industry 4.0. *IFAC PapersOnLine* 51-2 (2018) 266–271.
- [9] Pan, X., Han, C., Law, K.H., Latombe, J.C., (2015) A Computational Framework to Simulate Human and Social Behaviors for Egress Analysis. Technical report TR219. University of Stanford.
- [10] Piera, M.A.; Ginters, E., (2013) Validation of Agent-Based Urban Policy Models by means of State Space Analysis. In proceedings of the 8th EUROSIM Congress on Modelling and Simulation. Cardiff, United Kingdom, 2013.
- [11] Silva M. (1993) Introducing Petri nets. In: Di Cesare F (ed.) *Practice of Petri nets in manufacturing*, pp.1–62. Chapman & Hall. London.
- [12] Valk R., (2004). Object Petri Nets. Using the Nets-withinNets Paradigm. In Desel J., Reisig W., and Rozenberg, G. (eds.), *Advances in Petri Nets: Lectures on Concurrency and Petri Nets*, volume 3098 of *Lecture Notes in Computer Science*, pp. 819-848. SpringerVerlag, 2004.

© 2022 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution CC-BY-NC-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>).

