

SIMULACIÓN EN EDUCACIÓN MILITAR: INCENTIVANDO EL APRENDIZAJE DEL MANTENIMIENTO A TRAVÉS DE LA TECNOLOGÍA

TENIENTE CORONEL HÉCTOR REYES CAMPAÑA¹
NICOLÁS AGUAYO QUIROZ²

Resumen: *este artículo está enfocado a incentivar el aprendizaje, entendimiento y desarrollo de modelos mediante la técnica de simulación con aplicación a la función mantenimiento. Representar un sistema y predecir los eventos futuros asociados, son una de las características más relevantes que posee la simulación. Realizar una simulación requiere previamente el desarrollo de un modelo que sea una representación del sistema que desea ser estudiado. Existen distintas técnicas y herramientas para la elaboración de modelos representativos, una de ellas son las Redes de Petri (PN),³ la que funciona de manera adecuada en la simulación de eventos discretos y aleatorios de un sistema o procesos.*

Palabras clave: *modelación, simulación, proceso, redes de Petri, predicción.*

Abstract: *this article is focused on encouraging the learning, understanding and development of models through the simulation technique with application to the maintenance function. Representing a system and predicting the associated future events are one of the most relevant features of simulation. Carrying out a simulation previously requires the development of a models that is a representation of the system that wishes to be studied. There are different techniques and tools for the elaboration of representative models, one of them is Petri Nets (PN), which works adequately in simulation of discrete and random event of a system or processes.*

Keywords: *modeling, simulation, process, Petri nets, prediction.*

-
- 1 Oficial de Ejército del Servicio de Material de Guerra, Licenciado en Ciencias Militares, Ingeniero Politécnico Militar, Magíster en Gestión de Activos de la Universidad Federico Santa María y PhD in Maintenance and Reliability; Nottingham University, Reino Unido. Actualmente se desempeña como jefe del Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D) de la División de Mantenimiento (DIVMAN) del Ejército de Chile. hector.reyez@ejercito.cl.
 - 2 Ingeniero de Ejecución en Mecánica de la Universidad de Santiago de Chile (USACH). Actualmente se desempeña como ingeniero en Ciencia de Datos en el Departamento de Ingeniería, Investigación y Desarrollo (DI2D) de la División de Mantenimiento (DIVMAN) del Ejército de Chile. n.aguayoquiroz@gmail.com.
 - 3 PN del inglés Petri Nets (Redes de Petri).

INTRODUCCIÓN

Para realizar estudios y obtener resultados sobre problemas asociados a procesos y sistemas complejos, existe una metodología, de las más utilizadas, basada en los ensayos de prueba y error. Este método en general demanda una gran cantidad de recursos, además de tiempo y dinero, gastos que cualquier organización intenta minimizar. Por esta razón en la Segunda Guerra Mundial, los matemáticos John von Neumann⁴ y Stanisław Ulam,⁵ con el fin de disminuir los recursos utilizados para definir el comportamiento de los neutrones, estudios relacionados con el desarrollo de la bomba atómica, crearon el método Monte Carlo,⁶ permitiendo simular la conducta de estas partículas.

Desde este punto, la simulación por computadora ha avanzado de manera exponencial y hoy en día se encuentra al alcance de todas las personas, con variados métodos y propósitos, pudiendo desarrollar infinidad de estudios en diversos tipos de sistemas complejos con distintas características.

En el ámbito de la educación militar, la simulación es una técnica que presenta grandes ventajas y potencial, debido a que permite observar la manera en que puede variar un sistema a través de un modelo desarrollado en función del tiempo. De este modo, a través de la enseñanza mediante la simulación, según indican Andreu, García y Mollar⁷ *“los estudiantes están en contacto directo con lo que van a aprender en lugar de simplemente pensar en ello”*, lo que permitiría a alumnos de ingeniería politécnica militar, involucrarse y observar directamente como varía el modelo representativo del sistema.

En general, el desarrollo de los modelos que serán utilizados para representar diferentes situaciones son elaborados en base a algoritmos que indicarán los pasos por los cuales el sistema o proceso va transcurrir con el objetivo de obtener información significativa mediante las muestras de datos generadas.

Este artículo es un tutorial introductorio para el desarrollo de modelos de sistemas o procesos con el objeto de ser representados y simulados en algún *software* que cumpla los requerimientos deseados. Los militares o civiles interesados en leer este trabajo podrán obtener el conocimiento necesario para comenzar a desarrollar el modelo de un sistema y en particular familiarizarse con la herramienta de modelación gráfica llamada Redes de Petri (PN), la que permite la fabricación de modelos mediante redes que simulan el comportamiento de un sistema o proceso, considerando PN de sistemas o procesos desde las redes básicas de PN hasta redes más complejas utilizando sus diferentes extensiones.

4 Matemático húngaro-estadounidense (1903-1957).

5 Matemático polaco (1909-1984).

6 Método de simulación utilizado para calcular la probabilidad de ocurrencia de algún evento en particular.

7 ANDREU Andrés, María A.; GARCÍA Casas, Miguel & MOLLAR García, Miguel *“La simulación y juego en la enseñanza-aprendizaje”*. *Cuadernos Cervantes*, 34-38, 2005.

SIMULACIÓN

Una simulación es una técnica que sirve para realizar análisis en diferentes sistemas con distintos grados de complejidad, a través de la variación experimental del modelo del sistema simulado para obtener y comparar diferentes comportamientos.⁸

Para un mejor entendimiento, son definidos los términos “sistema” y “modelo” de acuerdo con lo estipulado por Law y Kelton:⁹

- Un sistema se define como un conjunto de entidades que interactúan entre ellas para completar un objetivo específico.
- Un modelo es la representación del sistema, la cual puede ser matemática, gráfica o ambas. Si el sistema es lo suficientemente simple, es posible optar por un modelo matemático que entregue una solución exacta, es decir analítica. Para sistemas más complejos, como en la vida real, se opta por realizar simulaciones, pues no es posible obtener verdaderas soluciones con modelos analíticos.

Por lo tanto, para poder simular es necesario la creación de un modelo, pero para desarrollarlo antes hay que realizar un algoritmo. Un algoritmo es, como indica Oviedo,¹⁰ “una serie de pasos organizados que describe el proceso que se debe seguir, para dar solución a un problema específico”. Con ellos es posible resolver el problema siguiendo una serie de pasos y no se puede avanzar al siguiente, mientras no se resuelva el actual.¹¹

Con el algoritmo ya realizado, lo que sigue es el desarrollo del modelo que represente los pasos indicados. Este modelo debe poseer las características necesarias para cumplir los objetivos que el algoritmo plantea y es sugerido que sea lo más detallado posible.

Una problemática de las simulaciones es conocer cuándo es eficiente detenerlas y que entreguen información significativa y de confianza. Una manera es mediante la convergencia de los resultados obtenidos haciendo un arreglo matemático entre ellos. Otra forma de detener la simulación es determinar un número de simulaciones máximas que permitan la entrega de datos confiables.

A través de la simulación es posible estudiar y predecir lo que podría ocurrir en el futuro en algún sistema, por lo tanto, incorporar la simulación de modelos que asemejen la realidad y puedan dar un mejor entendimiento al estudiante de ingeniería militar, es de gran ayuda en el aprendizaje.

8 DOOLEY, Kevin. “Simulation research methods,” Companion to Organizations, Joel Baum (ed.), London: Blackwell, 2002, pp. 829-848.

9 LAW, Averill M. & KELTON, W. David. *Simulation Modeling & Analysis*. New York: McGraw-Hill, 1991.

10 OVIEDO, Alexander. *Diseño Estructurado de Algoritmos*. Sincelejo, Colombia, 2004.

11 GÓMEZ, Luis A. “Algoritmos”. *Vida Científica. Boletín Científico de la Escuela Preparatoria No. 4*, 5(10), 2017. Obtenido de <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/2575>.

A continuación, se detalla la herramienta de modelación gráfica y matemática denominada redes de Petri. Esta herramienta tiene un amplio margen para crear modelos y puede abordar áreas muy diferentes como, por ejemplo, modelos para una línea de producción manufacturera o modelos para representación de procesos de mantenimiento, por nombrar algunos.

REDES DE PETRI (PN)

La definición que Tadao Murata¹² utiliza para referirse a las redes de Petri (PN) es “una herramienta de modelación gráfica y matemática utilizada para describir y estudiar sistemas caracterizados como concurrentes, asíncronos, distribuidos, paralelos, no deterministas y/o estocásticos”. Estas redes fueron creadas por Carl Adam Petri en el año 1962 y, desde entonces, distintas variaciones y extensiones han sido desarrolladas, como, por ejemplo, las redes de Petri estocásticas, redes de Petri temporizadas o las redes de Petri coloreadas.

Representación gráfica PN

Las redes de Petri clásicas u ordinarias son representaciones bipartitas que relacionan los lugares con las transiciones y viceversa.¹³ Estas redes están representadas gráficamente por los componentes indicados en la Figura 1:

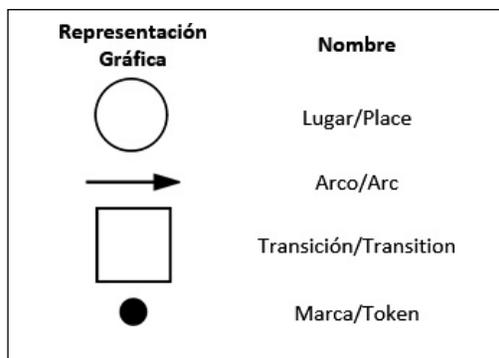


Figura N° 1: Representación de los componentes básicos de una red de Petri.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura N°1 es posible observar los componentes básicos de una red de Petri. Estos se pueden definir de la siguiente manera:

12 MURATA, Tadao. *Petri Nets: Properties, analysis and applications*. Proceedings of the IEEE, 1989.

13 BAUSE, Falko & KRITZINGER, Pieter. *Stochastic Petri Nets*. Lengerich, Germany, 2002.

- Lugar/Place: un lugar es representado mediante círculos o elipses, los cuales pueden contener los *tokens*. Sirven para indicar una condición o un objeto del sistema modelado.
- Marca/Token: un *token* es representado como un punto. Indica el valor específico de la condición o el objeto que se encuentra en un lugar.
- Transición/Transition: es simbolizada mediante rectángulos, los que representan alguna actividad que cambia el valor del *token*.
- Arco/Arc: los arcos se representan como flechas. Especifican una conexión entre los lugares y las transiciones.

Definición matemática de una Red de Petri

En el apartado anterior fue definido lo que es una red de Petri y cuál es la finalidad de estas, pero solo fue explicado el método gráfico de las mismas, no así la representación matemática que poseen. Matemáticamente, las PN pueden definirse, en base a lo estipulado por Murata,¹⁴ Sanders¹⁵ y por Reyes,¹⁶ como un conjunto de cinco elementos principales, es decir, una quintupla como se indica en la ecuación (1):

$$PN = (P, T, A, W, M_0) \quad (1)$$

En la ecuación (2) es indicado el conjunto P , que es el conjunto de lugares, donde $\{p_1, p_2, \dots, p_m\}$ representa un conjunto finito de lugares y conjuntos no vacíos:

$$P = \{p_1, p_2, \dots, p_m\} \quad (2)$$

La ecuación (3) presenta el conjunto T , el cual es un conjunto de transiciones, donde $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ representan el conjunto finito de transiciones y conjuntos no vacíos:

$$T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\} \quad (3)$$

La ecuación (4) presenta el conjunto de arcos A . Estos representan la dirección del flujo de los *tokens* desde los lugares hacia transiciones y viceversa:

$$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P) \quad (4)$$

W es una función de arco. Esta función indica la cantidad de *tokens* que circularán a través cada arco de la red. Esta función es representada en la ecuación (5):

$$W \in [A \rightarrow \{1, 2, \dots, j\}] \quad (5)$$

14 MURATA, *op. cit.*

15 SANDERS, M. J. *Petri Net Modelling Using Constraints*. Melbourne, Australia: Monash University, Faculty of Information Technology, 2004.

16 REYES Campaña, Héctor. *Generalised Fleet Maintenance Modelling*. Nottingham, Inglaterra: University of Nottingham, 2018.

M_0 señala los *tokens* iniciales de la red. Indica la cantidad de *tokens* en o los lugares de entrada. M_0 es presentada en la ecuación (6):

$M_0 \in [P \rightarrow \{0, 1, \dots, k\}]$	(6)
--	-----

La ecuación (7) indica que los lugares y transiciones son conjuntos disjuntos, es decir, sus conjuntos no tienen elementos en común:

$P \cap T = \emptyset$ y $T \cap P = \emptyset$	(7)
---	-----

La forma de ilustrar las redes de Petri de manera matemática es realizando una matriz que indique como fluyen los *tokens* a través de los lugares y transiciones que posee la red. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se observa una red de Petri y su respectiva representación matricial.

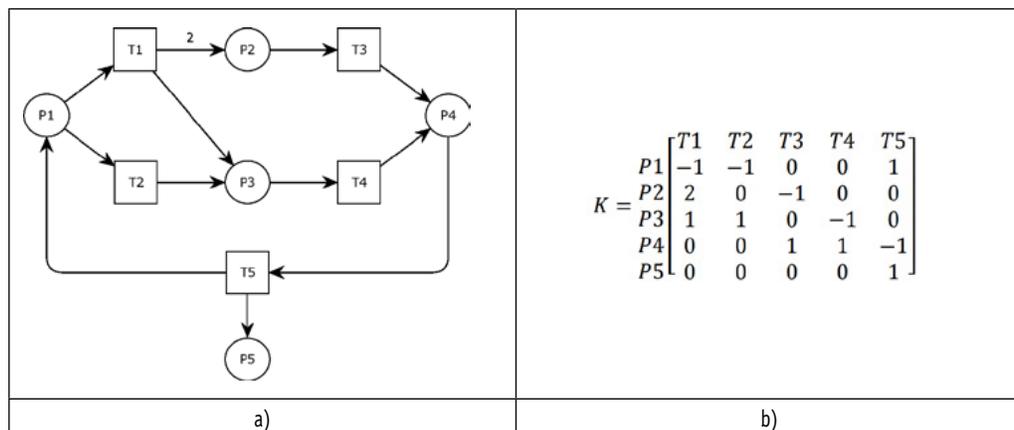


Figura N° 2: a) Red de Petri y b) Representación matricial.
Fuente: elaboración propia.

La Figura N° 2.a) muestra una red de Petri, en la Figura N° 2.b) se observa la representación matricial de la misma red. Las filas de la matriz dan muestra de los lugares ($P1, P2, P3, P4, P5$) mientras que las columnas lo hacen con las transiciones ($T1, T2, T3, T4, T5$).¹⁷

Con la matriz presentada en la Figura 2.b), es posible observar cómo se comportan los *tokens* a través de la red de Petri. Por ejemplo, si vemos la columna “ $T1$ ” es posible distinguir que esta transición adquiere un *token* desde el lugar “ $P1$ ”, además transfiere dos *tokens* al lugar “ $P2$ ” y uno al lugar “ $P3$ ”.

17 STAINES, Anthony. *Ordinary Petri Net Matrices*. Malta: Department of Computer Information Systems, Faculty of ICT, University of Malta, 2018.

Utilizando la misma red observada en la Figura N°2.a), considerando un estado inicial $M_0 = (1 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0)^T$, es decir, los lugares "P1" y "P4" tienen un *token* en el inicio o antes de que comience la simulación. Las transiciones que realizarán un proceso cuando transcurran los *tokens* por los arcos para llegar al siguiente lugar, son representadas por el siguiente vector $u = (1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 1)^T$. Entonces, al habilitar las transiciones, los *tokens* quedarán en otro lugar, el que será según la ecuación (8):

$M = M_0 + K * u$	(8)
-------------------	-----

Donde M representa el estado final de la matriz, M_0 indica el estado inicial, K representa la PN en su forma matricial y u es el vector que indica las transiciones que se activan. Reemplazando los valores en la ecuación (8) se obtiene el nuevo estado de los *tokens* en la red, que es representado mediante la ecuación (9).

$M = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 2 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 2 \\ 2 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$	(9)
--	-----

Por lo tanto, luego de activar las transiciones "T1", "T2" y "T5", los lugares con *tokens* son "P2", "P3" y "P5", como lo indica el vector $M = (0 \ 2 \ 2 \ 0 \ 1)^T$.

EXTENSIONES DE LAS PN

Como la mayoría de las aplicaciones, las redes de Petri han evolucionado en el tiempo incorporando nuevas capacidades a través de distintas extensiones. Las extensiones más importantes y utilizadas en el desarrollo de redes que representen un sistema en particular son las indicadas en los siguientes segmentos.

Redes de Petri temporizadas

Las redes de Petri temporizadas (TPN)¹⁸ son una extensión de las PN clásicas, ya que, desde un conjunto de cinco elementos principales, se transforma a un conjunto de seis elementos principales, es decir una séxtupla que matemáticamente se muestra como indica la ecuación (10):

$TPN = (P, T, A, W, M_0, D)$	(10)
------------------------------	------

18 TPN del inglés Temporized Petri Nets (Redes de Petri Temporizadas).

Donde D es el conjunto de tiempos de retraso en las transiciones, el cual es generado cuando un *token* pasa a través de una transición.

En las TPN existen tiempos de retraso asociados a las transiciones temporizadas del sistema, los cuales pueden ser de tipo determinista cuando se modela un proceso de forma discreta, como también pueden ser de tipo estocásticos cuando se modela un proceso con tiempos de retraso generados aleatoriamente mediante algún tipo de distribución estadística.¹⁹

Es posible observar un ejemplo de una TPN determinista en la Figura N°3 presentada a continuación:

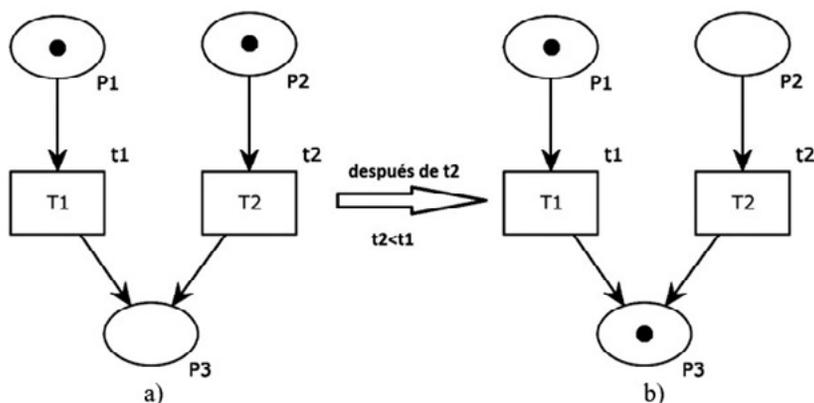


Figura N° 3. TPN Determinista.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 3.a) se observa que los lugares "P1" y "P2" tienen un *token* y las transiciones "T1" y "T2" son temporizadas. Luego de transcurrido un tiempo t_2 en la transición "T2", el *token* que se encontraba en el lugar "P2" pasa por la transición y llega al lugar "P3", como es posible apreciar en la Figura N° 3.b). Eventualmente, cuando transcurra un tiempo t_1 , el *token* alojado en "P1" llegará a "P3".

Por otro lado, la Figura N° 4 muestra una red con la misma configuración a la presentada en la Figura 3, pero en esta ocasión los tiempos de retraso de cada transición son aleatorios y formados por una distribución estadística. En este caso los tiempos de retraso t_1 y t_2 serán una muestra de la distribución normal, con medias σ_1 y σ_2 , y desviaciones estándar S_1 y S_2 respectivamente. La transición que contenga el menor tiempo de retraso será la que logre hacer circular primero el *token* hasta "P3". A razón de la aleatoriedad presente es que es una red de Petri estocástica.

19 ALLA, Hassane & DAVID, René. *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Berlín, Springer, 2010.

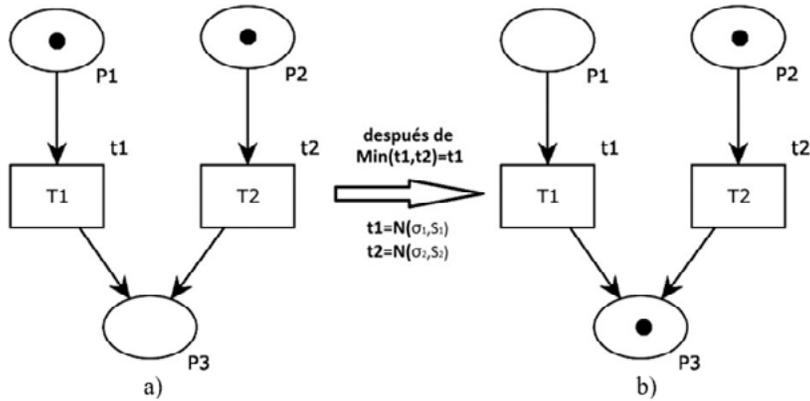


Figura N° 4: TPN Determinista.
Fuente: elaboración propia.

Redes de Petri jerárquicas

Las redes de Petri jerárquicas (HPN)²⁰ son una variación de las PN. Las HPN poseen las mismas características que las PN, pero permiten modelar procesos que son demasiado largos y complejos mediante la creación de subprocesos o subredes desde una porción de la red principal y de esta manera generar una mejor visualización de todo el proceso.²¹ Un ejemplo de este tipo de redes se realiza a través de la PN que aparece en la Figura 2.a) la que es transformada en una HPN como se muestra en la Figura N°5.

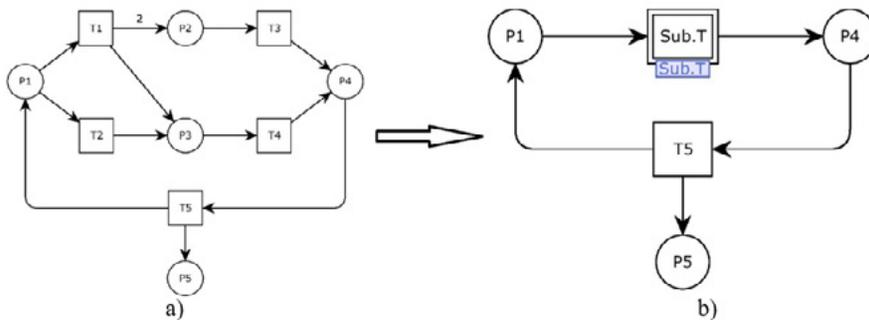


Figura N° 5: a) PN Clásica, b) HPN.
Fuente: elaboración propia.

20 HPN del inglés Hierarchical Petri Nets (Redes de Petri Jerárquicas).

21 SCHNEEWEISS, Winfrid. Petri Net Picture Book. Hagen, Alemania: LiLoLe, 2004.

En la Figura N° 5 es posible observar la transformación de una PN a una HPN. La Figura 5.a) muestra una PN en la cual las transiciones “T1”, “T2”, “T3” y “T4” y los lugares “P2” y “P3” son una porción de la red principal que fueron reemplazados por una subred “Sub.T” indicada en la Figura N°5.b). Dentro de esta red (“Sub.T”), se encuentra el proceso entre “T1”, “T2”, “P2”, “P3”, “T3” y “T4”, por lo que ahora estos elementos son una subred de la red principal.

Matemáticamente las HPN se definen de la siguiente manera como indica la ecuación (11):

$HPN = (P, T, A, W, M_0, Sub.T)$	(11)
----------------------------------	-------------

Donde $Sub.T \subseteq T^{22}$ y $Sub.T$ es un conjunto finito de subredes.

Redes de Petri coloreadas

Las redes de Petri coloreadas (CPN)²³ son una extensión de las PN, la cual combina las capacidades de esta última con las capacidades de un lenguaje de programación de alto nivel.²⁴ La principal diferencia entre las CPN y las PN es que las primeras pueden alojar *tokens* con diferentes características entre sí en cada lugar y, por lo mismo, en la misma red, como, por ejemplo, los distintos tipos de repuesto de unos sistemas. Al agregar más de un tipo de *token* en la red, sumado a las nuevas características agregadas a la clásica PN, permite realizar redes más robustas y eficientes sobre algún proceso o sistema. Las nuevas características permiten a las CPN, por nombrar algunas, hacer inscripciones en los arcos, las cuales condicionan el paso de *tokens*, hacen posible tener tiempos de retraso en transiciones, *tokens* con diferentes características, entre otras.

Matemáticamente las CPN, según lo estipulado por Jensen y Kristensen,²⁵ se pueden definir como el conjunto de elemento principales presentado en la ecuación (12):

$CPN = (P, T, A, W, M_0, \Sigma, C, V, G)$	(12)
--	-------------

Donde P, T, A, W y M_0 representan lo mismo que las ecuaciones (2), (3), (4), (5) y (6) respectivamente. Por otro lado, Σ representa el conjunto finito de colores y conjuntos no vacíos.

22 JENSEN, Kurt & KRISTENSEN, Lars. *Coloured Petri Nets: Modeling and Validation of Concurrent Systems*. Berlin, Alemania: Springer, 2009. ISBN: 9783642002830.

23 CPN del inglés Coloured Petri Nets (Redes de Petri Coloreadas).

24 JENSEN & KRISTENSEN, *op. cit.*

25 *Ibidem.*

C representa la función de color, es decir, se asigna un conjunto de colores a cada lugar, lo cual se indica en la ecuación (13):

$$C: P \rightarrow \Sigma \quad (13)$$

V representa un conjunto finito de variables tipo, tal que $Type(v) \in \Sigma$ para todo $v \in V$.

G representa una función de guardia, donde a cada conjunto $t \in T$ le es asignada una expresión booleana.

Una representación de una CPN es la presentada en la Figura 6, donde se muestra un proceso de combinación de colores.

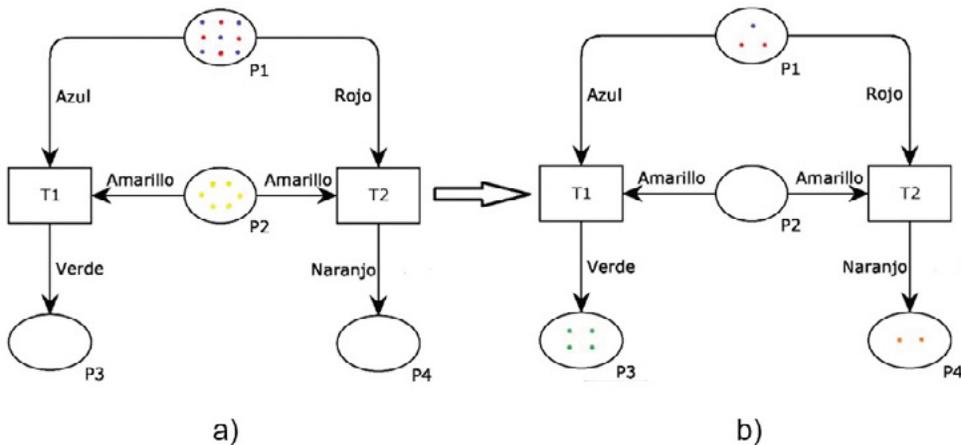


Figura N° 6. Ejemplo CPN.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura N° 6 se puede apreciar que la red tiene diferentes tipos de *tokens* en los diferentes lugares. En la Figura N° 6.a) se aprecia que los lugares "P1" y "P2" contienen *tokens*. "P1" contiene nueve *tokens*, cinco de tipo azul y cuatro de tipo rojo, mientras que "P2" contiene seis *tokens* amarillo. Debido al carácter aleatorio, cualquiera de los dos tipos de *token* saldrá de "P1". Los *tokens* de tipo rojo llegarán junto a un *token* amarillo a "T2", generando un *token* tipo naranja dirigido hacia el lugar "P4". Los *tokens* tipo azul de "P1" llegan a la transición "T1" junto con un *token* amarillo, formando un *token* tipo verde que llega al lugar "P3".

En la Figura N° 6.b) se muestra el momento cuando ya han salido de manera aleatoria seis *tokens* desde el lugar "P1" y, por ende, los seis *tokens* del lugar "P2". Al ocurrir esto, se formaron cuatro *tokens* tipo verde que llegaron al lugar "P3" y dos *tokens* tipo naranja que se encuentran en el lugar "P4".

A continuación, en la siguiente sección, es presentada una aplicación práctica para simular el tiempo de falla, empleando la herramienta descrita con anterioridad.

EMPLEO DE LA SIMULACIÓN

Las PN, como ya se indicó en la sección simulación, pueden ser utilizadas para representar diferentes sistemas. Un área específica donde pueden ser utilizadas es en la industria dedicada a la producción en serie. En estas instalaciones los ingenieros mecánicos a cargo del área de mantenimiento deben tener presente cuando comienzan a fallar los sistemas en la línea de producción y en base a ello estar preparados ante alguna falla, para tener el menor tiempo detenida la producción.

A través de la simulación con las redes de Petri es posible predecir cuándo los sistemas comenzarán a fallar. Con el fin de demostrar lo anterior, se presenta un ejercicio de una línea de producción en serie con cuatro subsistemas, "A", "B", "C" y "D", como se indica en la Figura N° 7. A través de la simulación de este sistema, es posible encontrar en cuál de los cuatro sistemas es necesario tener un mejor control.

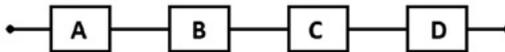


Figura N° 7: Línea de producción con 4 subsistemas.
Fuente: elaboración propia.

Como la mayoría de las aplicaciones, las redes de Petri han evolucionado en el tiempo, incorporando nuevas capacidades a través de distintas extensiones. Las extensiones más importantes y utilizadas en el desarrollo de redes que representen un sistema en particular son las indicadas en los siguientes segmentos.

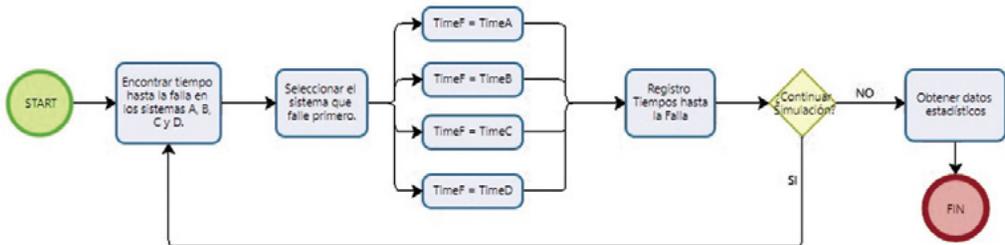


Figura N° 8: Algoritmo para encontrar los tiempos hasta la falla de los subsistemas A, B, C y D. Desarrollado en Bizagi Modeler.
Fuente: elaboración propia.

En la Figura 8 es posible observar el algoritmo para encontrar el tiempo de funcionamiento de los sistemas hasta la falla y obtener datos estadísticos que permitan realizar una evaluación del

sistema. Con el algoritmo ya realizado, es desarrollado el modelo del sistema utilizando las redes de Petri, usando en este caso específico el *software* CPN Tools. Es posible apreciar el modelo para encontrar los tiempos hasta la falla en la Figura 9 presentada a continuación.

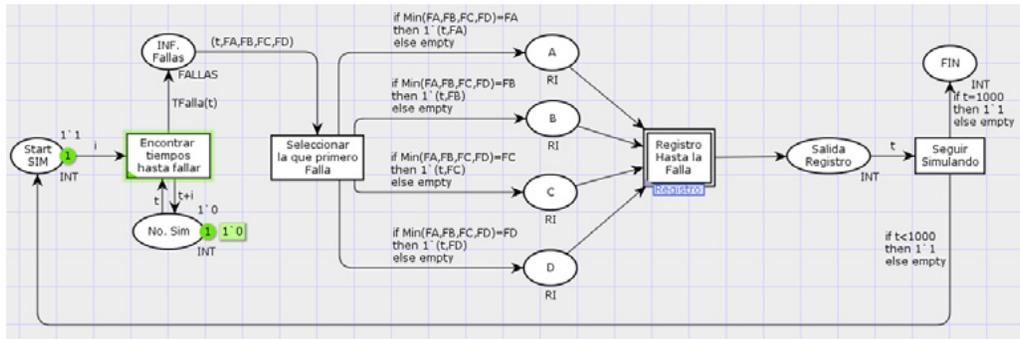


Figura N° 9: Modelo para encontrar el tiempo hasta que el sistema de línea de producción falle por alguno de los subsistemas conectados en serie. Desarrollado en CPN Tools.

Fuente: elaboración propia.

La red presentada simula, mediante el uso de *tokens*, el tiempo que el sistema conectado en serie fallará por uno de los sistemas conectados. Los tiempos hasta la falla son generados de manera aleatoria a través de distribuciones estadísticas, siendo así una red de carácter estocástico.

En la Figura N° 9 también es posible notar una subred con el nombre “Registro hasta la Falla”, la cual es posible observar en su totalidad en la Figura N°10. Esta subred tiene la función de mostrar la cantidad de veces que uno de los sistemas haría fallar a la línea de producción y en qué tiempo ocurriría este evento.

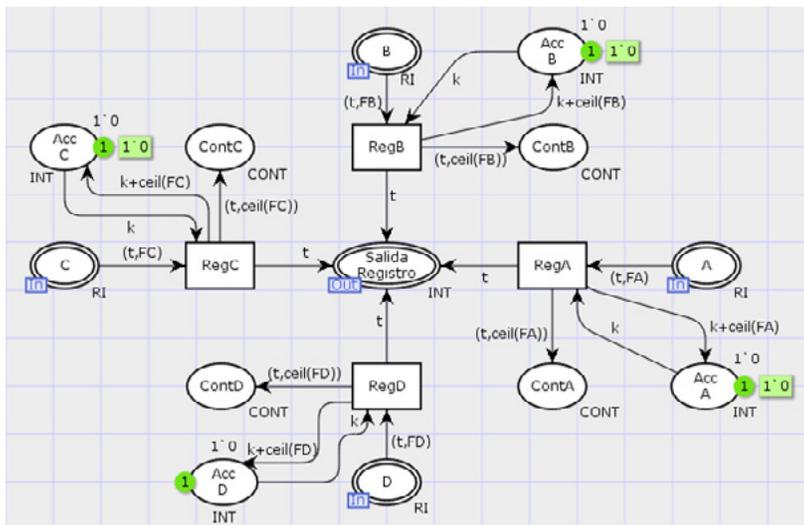


Figura N° 10: Subred de la red principal indicada en la Figura 9. Creado en CPN Tools.

Fuente: elaboración propia.

Utilizando las aplicaciones del *software*, el modelo es simulado en ciento veinte mil oportunidades con el fin de obtener resultados significativos. Estos resultados es posible visualizarlos en la Tabla N°1 observada a continuación.

SISTEMA	A	B	C	D
Tiempo total de todas las fallas (h)	624.385	1.580.763	526.854	347.054
Cantidad de fallas (u)	6.119	15.351	5.151	3.379
Promedio de horas hasta que falle el sistema (h)	102,04	102,97	102,28	102,7

Tabla N° 1 Resultados obtenidos al simular 120.000 veces.

Fuente: elaboración propia.

Los resultados indican que, para un sistema de producción en serie, todos los sistemas modelados con un tiempo de falla mediante distribución exponencial, siendo el tiempo medio de falla de 500, 200, 600 y 900 horas para los sistemas A, B, C y D respectivamente, el sistema de producción en serie deja de trabajar a las 102 horas. El orden de número de fallas de manera decreciente es B, A, C, D, por lo que, asumiendo el caso de que el costo monetario y de tiempo para reparar cada subsistema es el mismo, hay que preocuparse principalmente de mantener al subsistema B y perder menos tiempo de producción por falla. Si el caso fuese otro, es decir, los costos, tanto monetarios como de tiempo, fuesen distintos para cada subsistema, sería necesario evaluar otros factores para tomar una decisión con respecto a qué elemento de la línea de producción hay que priorizar.

SIMULACIÓN Y PEI

Un proyecto educativo institucional (PEI) se define como *“el principio ordenador de las instituciones Educativas, en él está plasmado el marco teórico bajo el cual surgen los objetivos de la institución”*.²⁶ Estos proyectos buscan los mecanismos para lograr los objetivos de la institución.

En Chile, distintos organismos gubernamentales realizan este tipo de proyectos, algunos ejemplos de ellos son las instituciones de educación, que las realizan a través del MINEDUC.

El Ejército de Chile no se queda atrás en este aspecto debido a que la Academia Politécnica Militar (ACAPOMIL), como casa de estudios superiores posee su propio PEI. La misión de esta academia radica en *“formar profesionales especialistas en ingeniería militar, desarrollando actividades docentes, de investigación y desarrollo de nivel superior”*,²⁷ y su visión es *“gestionar y desarrollar líneas de conocimiento científico tecnológico, en el área de la defensa, mediante la ejecución de proyectos de*

26 VILLARROEL, Sonia. *Proyecto Educativo Institucional Marco Legal y Estructura Básica*. Ministerio de Educación, Gobierno de Chile, 2002.

27 Ejército de Chile. *Revista Educación del Ejército de Chile* (Vol. 45). Santiago: Comando de Educación y Doctrina, División Doctrina, 2015.

investigación e innovación".²⁸ Se puede indicar que el PEI de la ACAPOMIL se encuentra fuertemente ligado a la docencia de pregrado, la que considera nuevas técnicas, herramientas y tecnologías que puedan ser utilizadas por las distintas unidades de la Fuerza Terrestre y la Fuerza Generadora.

Es entonces que la simulación cobra importancia para el Ejército de Chile, pues, a través de la simulación de sistemas es posible desarrollar planes de acción correspondientes a situaciones futuras. En el área de mantenimiento específicamente, a través de la simulación de modelos utilizando datos de información recopiladas a través de las herramientas pertinentes, es posible crear planes de mantenimiento que permitan aprovechar con mayor eficiencia los recursos y mejorar la disponibilidad de los activos de Defensa.

CONCLUSIONES

La simulación, como fue demostrado en este artículo, permite predecir en el tiempo bajo distintos escenarios. Puede ser utilizada en áreas de producción, estudios de materiales sólidos, fluidos, estudios meteorológicos, en el área de medicina, entre otras. En el área de mantenimiento en particular, permite que la gestión de activos aumente su eficiencia y optimice los recursos de la institución.

Debido a la gran cantidad de áreas en que la simulación puede ser aplicada, se necesita aumentar las competencias técnicas del personal en estas unidades de aprendizaje, pues permite entender mejor la realidad, cómo varían los resultados y predecir eventos futuros bajo distintos escenarios.

En este artículo en particular, la simulación fue abordada con la técnica de redes de Petri utilizando el *software* CPN Tools. Como fue posible apreciar en la sección 5, esta herramienta es bastante útil, flexible y permite generar planes de acción de acuerdo a los resultados obtenidos en el estudio. También permite modificar variables para observar distintas opciones. Muchas técnicas pueden realizar este tipo de funciones. En este caso fue utilizada la herramienta de PN, pues es usada en gran parte del mundo, sobre todo en países desarrollados, en cambio, en Chile, ha sido una técnica poco explorada y explotada. Además, a diferencia de otras herramientas que son más comúnmente utilizadas para este tipo de análisis, como R o Python, esta tiene una interfaz gráfica que permite explicar mejor los modelos desarrollados, facilitando tanto la enseñanza como el aprendizaje.

Para finalizar, es posible indicar que las simulaciones mediante el desarrollo de modelos matemáticos es una herramienta poderosa que permite afrontar situaciones futuras, gracias a la

28 *Ibidem*.

predicción de eventos futuros, por lo que la utilización de estas técnicas en el Ejército de Chile, el cual tiene una inmensa cantidad de activos, tiene una relevante importancia. Debido a esto, y como concuerda con el PEI de la ACAPOMIL, las técnicas de simulación matemática deben ser al menos abordadas en esta academia para que sus alumnos, al egreso, puedan hacer uso de esta con activos de la institución.

BIBLIOGRAFÍA

ALLA, Hassane & DAVID, René (2010). *Discrete, continuous, and hybrid Petri nets*. Berlín: Springer.

ANDREU, María; GARCÍA, Miguel y MOLLAR, Miguel (2005). "La simulación y juego en la enseñanza-aprendizaje". *Cuadernos Cervantes*, pp. 34-38.

BAUSE, Falko & KRITZINGER, Pieter (2002). *Stochastic Petri Nets*. Lengerich, Alemania.

DOOLEY, Kevin (2002). "Simulation research methods", *Companion to Organizations*, Joel Baum (ed.), London: Blackwell, pp. 829-848.

EJÉRCITO DE CHILE (2015). *Revista Educación del Ejército de Chile* (Vol. 45). Santiago: Comando de Educación y Doctrina, División Doctrina.

GÓMEZ, Luis (2017). "Algoritmos". *Vida Científica, Boletín científico de la Escuela Preparatoria N° 4*, 5(10). Obtenido de: <https://repository.uaeh.edu.mx/revistas/index.php/prepa4/article/view/2575>.

JENSEN, Kurt & KRISTENSEN, Lars (2009). *Coloured Petri Nets: Modeling and Validation of Concurrent Systems*. Berlín, Alemania: Springer. ISBN: 9783642002830.

LAW, Averill M. & KELTON, W. David (1991). *Simulation Modeling & Analysis*. New York: McGraw-Hill.

MURATA, Tadao (1989). *Petri Nets: Properties, analysis and applications*. Proceedings of the IEEE.

OVIEDO, Alexander (2004). *Diseño Estructurado de Algoritmos*. Sincelejo, Colombia.

REYES Campaña, Héctor (2018). *Generalised Fleet Maintenance Modelling*. Nottingham, Inglaterra: University of Nottingham.

SANDERS, M. J. (2004) *Petri Net Modelling Using Constraints*. Melbourne, Australia: Monash University, Faculty of Information Technology.

SCHNEEWEISS, Winfrid (2004) *Petri Net Picture Book*. Hagen, Alemania: LiLoLe.

VILLARROEL, Sonia (2002). *Proyecto educativo institucional. Marco legal y estructura básica*. Ministerio de Educación, Gobierno de Chile.