

Desarrollo e implementación de simulación de eventos discretos para líneas de producción del termómetro Yolikan®.

Darío Bringas Posadas^b
Celso Eduardo Cruz González^b
Said Eduardo Romero Quiroz^a
Antonio Trejo Morales^b
Carlos Alfredo Catalán Catalán^b

^a Instituto Tecnológico Superior de Xalapa (ITSX). Sección 5A Reserva Territorial S/N, Santa Bárbara, 91096 Xalapa-Enríquez, Ver., México.

Correo electrónico:

207001167@itsx.edu.mx

^b Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI). Av. Pie de la Cuesta No. 702, Desarrollo San Pablo, 76125 Santiago de Querétaro, Qro., México. Correo electrónico:

ecruz@cidesi.edu.mx

dario.bringas@cidesi.edu.mx atrejo@cidesi.edu.mx

carlos.catalan@cidesi.edu.mx

Resumen

Existen ciertos factores a considerar cuando se planifica un sistema de producción, como la cantidad de locaciones a necesitar, la capacidad que estas tendrán para almacenar las entidades y el tiempo empleado para llevar a cabo su funcionamiento. Se cuenta con diferentes *softwares* que son de mucha utilidad para tener cierto conocimiento sobre estos factores; entre ellos, se encuentra ProModel®, el cual permite crear una simulación del sistema de producción. Este tiene la finalidad de poder visualizar el proceso que se lleva a cabo y poder detectar algunos fallos dentro del proceso, así como encontrar una forma de optimizarlo, ya sea en cuanto al tiempo o la cantidad de entregables obtenidos.

Palabras clave: Entidades, locaciones, optimización, simulación.

Abstract

There are certain factors to consider when planning a production system, such as the number of locations to be needed, the capacity they will have to store the entities and the time required to carry out its operation. There are different softwares that are very useful to have some knowledge about these factors; among them is ProModel®, which allows to create a simulation of the production system. The purpose of this software is to visualize the process being carried out and to be able to detect some failures within the process, as well as to find a way to optimize it, either in terms of time or the amount of deliverables obtained.

Key words: Entities, locations, optimization, simulation.

Artículo arbitrado

Recibido:
15 de octubre de 2022

Aceptado:
07 de noviembre de
2022

Introducción

En la actualidad, existe una fuerte tendencia hacia el desarrollo de sistemas de manufactura para la cuarta revolución industrial (4Ri). Dicho término, fue acuñado en 2011 por el economista Klaus Schwab, fundador del Fondo Económico Mundial. Este concepto define la fabricación informatizada, que combina avanzadas técnicas de producción con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones y la vida de las personas (Repsol Co.).

El desarrollo tecnológico, no está fuera de incorporarse a la 4Ri, así como, lograr una mayor eficiencia en los desarrollos, concibiéndolos desde el punto de vista de la 4Ri. En ese sentido, centros de investigación como el CIDESI, **están migrando ordenadamente hacia dicho enfoque (Pineda, 2019)**. Por tal motivo, el conocimiento de diversas áreas, estratificación y planeación de sistemas de manufactura bajo la ANSI-ISA 95 (ISA95. Enterprise-Control System Integration.) puede ser eficaz en el enfoque digital de la manufactura.

Una de las herramientas más importantes que permite analizar el diseño y la operación de diversos sistemas o procesos complejos es la simulación. En ese sentido Robert E. Shannon (Coss, 1994), define el término “simulación” como “el proceso de diseñar y desarrollar un modelo computarizado de un sistema o proceso y conducir diversos experimentos con el propósito de comprender el comportamiento del sistema y poder

evaluar diversas estrategias con las cuales se puede operar el sistema” (p.12)

Para Thomas H. Naylor (Coss, 1994), la simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Similar a la definición anterior, H. Maisel & Gnugnoli (Coss, 1994), definen el concepto de simulación como una técnica para realizar experimentos en una computadora digital. Dichos experimentos, involucran ciertos tipos de modelos matemáticos y lógicos que describen el comportamiento de sistemas de negocios, económicos, sociales, biológicos, físicos entre otros.

Akerman (2018) realizó la implementación de tecnologías de información en talleres de trabajo bajo en enfoque I4.0 empleando la norma ANSI-ISA 95. En su trabajo de investigación, concluye que, para implementar un sistema I4.0 en un taller de trabajo, es necesario crear primero la plataforma de tecnologías de información. En ese sentido, pondera en nivel de relevancia la implementación de las normas que rigen el proceso, la automatización y conexión a la red (IoT, uso de nube, etc), planeación de la planta por mencionar algunos. Así, mediante la arquitectura del sistema informático, es posible la generación de una planta inteligente.

Alcacer & Cruz-Machado (2019) explican que, en los casos de industria 4.0, los flujos físicos serán mapeados en plataformas digitales de manera continua. Por lo tanto, se generará un nivel superior de automatización ya que muchos sistemas y *softwares* permitirán las comunicaciones de la fábrica con las últimas tendencias de las tecnologías de

la información. Bajo ese enfoque, todo será inteligente y este impacto disruptivo en las empresas manufactureras permitirá el paradigma del ecosistema de fabricación inteligente. Así, la Industria 4.0 sería el punto de inflexión hacia el final de las aplicaciones centralizadas convencionales.

Gajšek et al. (2019) investigaron el uso del modelo de madurez-evento discreto para la simulación y la implementación de la Industria 4.0. Los investigadores, proponen una nueva metodología que combina el modelo de madurez Industria 4.0 y herramientas de simulación de eventos discretos en el caso de empresa productora de acero con posibilidad de generalización. En ese sentido, combinar las herramientas en el primer paso evalúa el nivel actual de madurez para la Industria 4.0. Finalmente, en el segundo paso, considera las fortalezas y debilidades de los posibles escenarios para la transición a un mayor nivel de madurez.

Para De Paula et al. (2020) la simulación es una tecnología clave para desarrollar modelos de planificación y exploración para optimizar la toma de decisiones, así como el diseño y las operaciones de sistemas de producción complejos e inteligentes. También, podría ayudar a las empresas a evaluar los riesgos, los costos, las barreras de implementación, el impacto en el rendimiento operativo y la hoja de ruta hacia la Industria 4.0. Estos resultados se debieron a que identificaron 10 enfoques basados en simulación y 17 principios de diseño de Industria 4.0. Además, un análisis cruzado de conceptos puede capturar los principios de diseño de la Industria 4.0 y respaldar la

investigación del fenómeno. Finalmente, sugieren que la simulación híbrida y el gemelo digital son los principales enfoques basados en la simulación en el contexto de la Industria 4.0.

Erikkson & Hendberg (2021), presentaron una simulación de eventos discretos como una herramienta para la toma de decisiones en la fabricación I4.0. A lo largo del estudio, los datos de producción, como los tiempos de procesamiento, se recopilaron y analizaron para el modelado de simulación de eventos discretos. Se destaca la complejidad de introducir la simulación de eventos discretos como una nueva herramienta para la toma de decisiones (con base en datos).

El objetivo de este trabajo es el desarrollo de un modelo de simulación sobre líneas de producción con enfoque a eventos discretos (estaciones, entidades y distribuciones de probabilidad), para que, una vez que el modelo haya sido desarrollado y probado, se pueda llevar a cabo dentro un sistema de manufactura de un producto, en este caso el termómetro Yolikan®.

Metodología

Generación de datos aleatorios

En la primera etapa de este trabajo, se realizó un flujograma de proceso para una simulación de eventos discretos con tiempos ideales por estación de trabajo en una línea de producción y seguido de esto, una generación de datos aleatorizados. Lo anterior se realizó con la finalidad de obtener la estadística descriptiva y las distribuciones de probabilidad de estaciones de trabajo. Los datos aleatorizados para cinco

operaciones (de un sistema de producción), se generaron mediante la aplicación de Microsoft Excel®. Finalmente, se procedió a la asignación de tiempos a cada estación.

En este trabajo, se empleó la herramienta ProModel® versión estudiantil para la generación de la simulación de los eventos discretos. En ese sentido, se identificaron las locaciones, procesamiento, las entidades, llegadas, y las distribuciones de probabilidad. Así mismo, lograr realizar un balanceo de línea adecuado para obtener los mejores tiempos de operación.

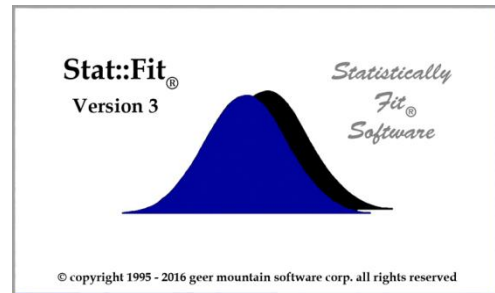
El modelo de simulación es generado con la finalidad de ser utilizado en un ejemplo real sobre un producto denominado Yolikan® desarrollado por el CIDESI® durante la pandemia de COVID-19.

Los datos derivados de la simulación recibieron un tratamiento estadístico mediante las pruebas de bondad de ajuste denominadas Chi-cuadrada, Kolmogorov Smirnov y Anderson Darling, mediante el *software* incorporado en la herramienta de simulación ProModel® versión estudiantil denominado StatFit®.

Por último, se realizó la construcción de un *layout* basado en el análisis previo, asignando espacios de trabajo y distribución de las áreas reforzado por la simulación de eventos discretos implementados.

Figura 1

Software estadístico



Nota. La imagen representa al Software estadístico incorporado en ProModel para análisis. Fuente: Elaboración propia.

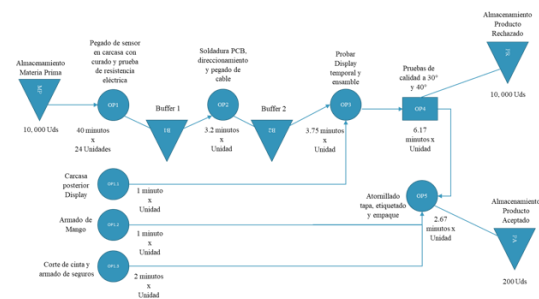
Resultados

Flujograma de proceso de la línea de producción

Se construye el flujograma de proceso de la línea de producción con base a los tiempos de operaciones de cada locación (estación de trabajo).

Figura 2

Diagrama de flujo del modelo



Nota. Este diagrama de flujo lineal de operaciones es para la identificación simbólica de las operaciones. Fuente: Elaboración propia.

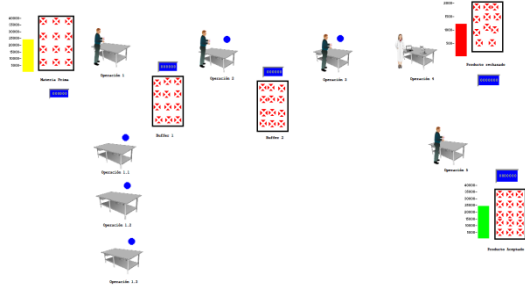
Locaciones

Se establecen las locaciones del modelo (ver Fig. 3), definiendo el almacén de

materia prima, las estaciones que procesarán las entidades, el área de inspección y el área de producto terminado y no aceptado.

Figura 3

Esquema gráfico para layout



Nota. Representación esquemática de la distribución de las estaciones de trabajo. Elaboración propia.

Entidades y arribos

Se define la materia prima (entidades) que será procesada en la línea de producción para llegar como producto final (arribos).

Seguido de esto, se asigna nombre a cada entidad y una representación gráfica de cada elemento que está contenido en su respectiva estación de trabajo.

Tabla 1

Entidades establecidas para la simulación

No.	Descripción	Representación grafica
1	Carcasa	
2	CarPosterior	
3	Mango	
4	Seguro	
5	Ensamble	
6	Empaque	

Nota. La tabla muestra las entidades que se requieren para llevar a cabo la simulación de eventos discretos. Fuente: Elaboración propia.

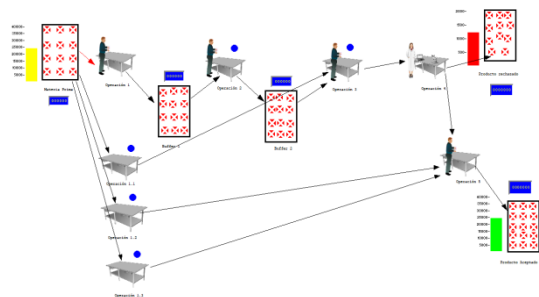
Procesamiento

Se define la lógica de las operaciones mediante una ruta de procesamiento y asignación de los tiempos de operaciones ideales.

Se considera una zona de inspección con un porcentaje de confianza, respecto del tiempo de 90% y un restante 10% a producto rechazado.

Figura 4

Rutas de procesamiento



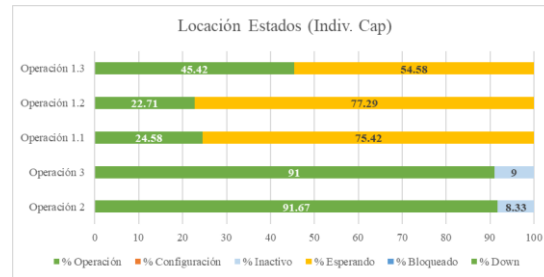
Nota. Se presenta las rutas del procesamiento para cada estación de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de termómetros Yolikan obtenidos

De acuerdo con los tiempos ideales de operación mostrados en el flujograma de proceso (Fig. 2) se obtiene una producción de 108 unidades aceptadas y 6 rechazadas en una jornada laboral de 8 horas.

Porcentajes de estatus de cada locación

Se muestra los resultados de la simulación con los tiempos ideales de cada operación, esto da como resultado los porcentajes del estatus que presenta la capacidad individual por estación de trabajo.



Nota. La gráfica muestra los diferentes estatus que se pueden obtener con tiempos ideales en las operaciones. Elaboración propia.

Asignación de datos aleatorios

Con base en los resultados anteriores, donde se consideraron tiempos ideales, se procede a la generación de tiempos aleatorizados para obtener la estadística descriptiva y las distribuciones de probabilidad de cada estación. La Tabla 1 muestra los 30 datos generados mediante aleatorización.

Para una mejor aproximación numérica se recomienda la recolección de datos mediante la implementación de un estudio de tiempos y movimientos mediante el uso de cronómetro.

Tabla 2

Capacidad individual de las locaciones con tiempos ideales

Nombre	Tiempo (Min)	% Operación	% Inactivo	% Esperando
Operación 2	480	91.67	8.33	0.00
Operación 3	480	91.00	9.00	0.00
Operación 1.1	480	24.58	0.00	75.42
Operación 1.2	480	22.71	0.00	77.29
Operación 1.3	480	45.42	0.00	54.58

Tabla 3

Generación de tiempos aleatorizados respecto de un tiempo ideal

No.	Operación 1	Operación 2	Operación 3	Operación 4	Operación 5
1	43.00	4.28	4.46	6.92	3.39
2	40.12	3.76	3.39	6.90	3.18
3	42.51	4.96	4.82	7.75	2.75
4	39.59	5.77	6.27	6.23	2.98
5	42.59	3.47	4.06	6.42	2.40
6	39.78	3.14	4.71	6.96	3.74
7	39.10	4.71	6.04	7.61	3.81
8	39.32	5.64	6.70	7.08	2.59
9	40.39	4.61	4.10	7.89	2.96
10	41.30	4.24	4.30	7.34	3.10
11	41.67	3.37	5.45	6.34	3.49
12	39.44	5.76	5.96	6.39	3.81
13	42.80	5.20	5.18	7.26	2.00
14	39.05	5.64	4.94	7.24	3.22
15	40.12	4.49	4.87	6.39	2.37
16	40.94	4.58	4.31	7.26	2.61
17	40.21	5.55	6.06	7.02	3.73
18	41.37	3.82	6.36	7.81	2.83
19	42.94	4.14	7.00	7.47	2.31
20	41.07	4.34	3.47	7.42	3.52

Nota. En la tabla se identifica el tiempo de operación por estación, así como su porcentaje de operación de acuerdo a tiempos ideales. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados gráficos de la simulación se muestran a continuación:

Figura 5

Representación gráfica de los resultados obtenidos en tiempos ideales

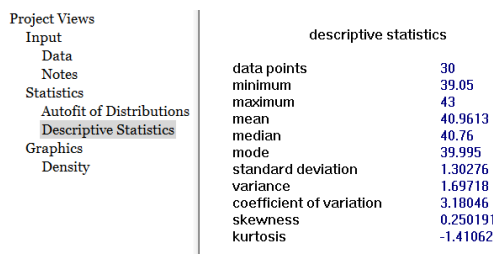
21	40.02	5.42	3.50	6.39	3.30
22	39.91	5.99	5.42	6.26	3.28
23	41.66	5.96	6.14	7.94	2.92
24	39.91	5.44	3.24	6.99	2.09
25	42.96	3.23	5.52	7.61	2.03
26	40.58	5.50	5.31	6.37	3.84
27	41.83	3.39	6.68	7.64	3.15
28	42.08	3.13	6.19	7.54	2.98
29	39.83	4.24	6.08	6.24	2.01
30	42.75	4.52	6.88	7.15	3.27

Nota. La tabla muestra los tiempos aleatorizados para cada estación de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

Como se puede apreciar en la Tabla 3, cada estación de trabajo cuenta con su respectivo tiempo variable de acuerdo con la aleatorización obtenida previamente. Los datos obtenidos para cada estación son capturados en el programa StatFit, incorporado en *software* ProModel® versión estudiantil y así obtener las estadísticas descriptivas de los datos de cada estación de trabajo.

Figura 6

Datos de estadística descriptiva obtenidos de la estación 1



Nota. La figura muestra la estadística descriptiva para treinta datos aleatorizados respecto al tiempo de operación. Fuente: Elaboración propia.

Una vez recabada la información anterior, se busca obtener la distribución de probabilidad que más se ajuste. Se puede apreciar que la distribución uniforme presenta mejor rango de aceptación.

Figura 7

Distribuciones de probabilidad no rechazadas

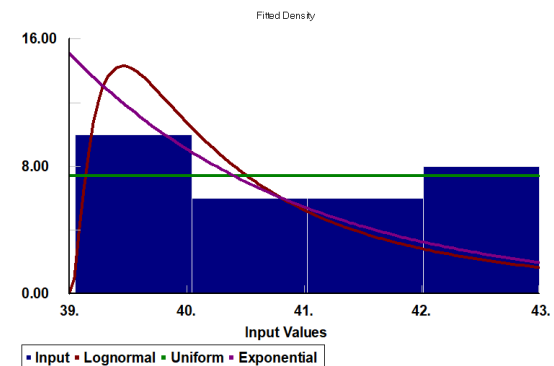
distribution	rank	acceptance
Uniform(39, 43)	100	do not reject
Lognormal(39, 0.312, 1.05)	30.1	do not reject
Exponential(39, 1.96)	26.8	do not reject

Nota. Se muestran las diferentes distribuciones de probabilidad que se ajustan a los datos de la operación 1. Fuente: Elaboración propia.

Las curvas de densidad para cada distribución de probabilidad obtenida de acuerdo con los datos aleatorizados de la primera estación se muestran a continuación:

Figura 8

Curvas de densidad de cada distribución de probabilidad



Nota. En este gráfico se muestran las tres diferentes formas de curvas de densidad que se ajustan a los tiempos de la operación 1. Fuente: Elaboración propia.

Cantidad de termómetros Yolikan obtenidos, implementado distribuciones de probabilidad

De acuerdo con los tiempos variables por la aleatorización, como se muestra en la Tabla 3, se obtiene una producción de 82 unidades aceptadas y 3 rechazadas en una jornada laboral de 8 horas.

Porcentajes de estatus de cada locación con tiempos variables

Se muestra los resultados de la simulación con los tiempos variables de cada operación, lo que resulta en porcentajes de estatus que presenta la capacidad individual por estación de trabajo.

Tabla 4

Capacidad individual de las locaciones con tiempos variables

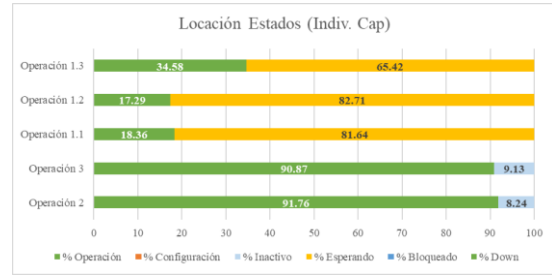
Nombre	Tiempo (Min)	% Operación	% Inactivo	% Esperando
Operación 2	480	91.76	8.24	0.00
Operación 3	480	90.87	9.13	0.00
Operación 1.1	480	18.36	0.00	81.64
Operación 1.2	480	17.29	0.00	82.71
Operación 1.3	480	34.58	0.00	65.42

Nota. En la tabla se identifica el tiempo de operación por estación, así como su porcentaje de operación de acuerdo a tiempos aleatorizados. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados gráficos de la simulación con variabilidad se muestran a continuación:

Figura 9

Representación gráfica de los resultados obtenidos en tiempos variables



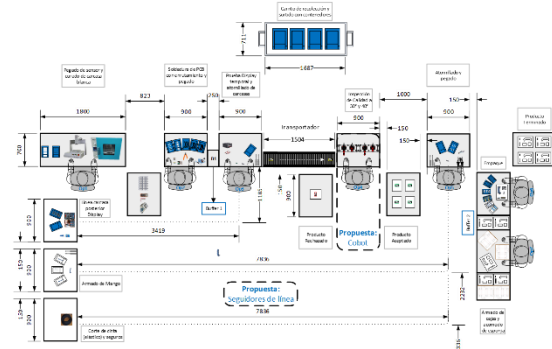
Nota. La gráfica muestra los diferentes estatus que se pueden obtener con tiempos aleatorizados en las operaciones. Fuente: Elaboración propia.

Construcción de layout

De acuerdo con lo anterior, la distribución de las estaciones de trabajo se puede establecer de la forma siguiente:

Figura 10

Layout de la línea de producción



Nota. El layout muestra la distribución de las estaciones de trabajo con sus respectivas distancias acotadas. Fuente: Elaboración propia.

Discusión

A partir de la simulación realizada en tiempo ideal con un porcentaje de probabilidad de 90 % en la zona de aceptación y un 10 % en la de rechazo respecto del tiempo, se obtienen 108 unidades aceptadas y 6 unidades rechazadas. Por otro lado, al implementar la variabilidad de los datos se obtienen 82

unidades aceptadas y 3 rechazadas, lo que resulta en una disminución de producción de unidades en la zona de aceptación de un 24.07 %; mientras que para la zona de rechazo, disminuye en un 50 %. La información adicional se puede consultar en García et al.

Para el caso de la simulación de esta línea de producción, se puede decir que la cantidad de piezas producidas de manera ideal disminuye debido a la variabilidad de los datos. Estos se presentan con una frecuencia en cada estación, y se comportan de acuerdo con una distribución de probabilidad uniforme.

Los datos obtenidos en cada operación por estación de trabajo oscilan conforme las fronteras inferior y superior de los tiempos mínimos y máximos detectados y recopilados de las pruebas reales, llevadas a cabo en el CIDESI®

Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede concluir que:

Existe una disminución de producción de unidades al aplicar la variabilidad de tiempos de un 25.43%, aproximadamente 29 unidades por jornada laboral, ya que de manera ideal se está considerando que el producto aceptado y rechazado den un total de 114 unidades mientras que, aplicando las distribuciones de probabilidad se obtiene un total de 85 unidades.

El desarrollo y la implementación de los modelos de simulación con eventos discretos para líneas de producción nos permitirá entender el comportamiento de los datos obtenidos del proceso de

producción, así como el desempeño que tiene dicha línea de producción para cumplir con las expectativas puestas en el modelo.

Agradecimientos

Al Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial (CIDESI) por su participación en el programa de verano de investigación a través del programa “Delfín”.

Referencias

Åkerman, M. (2018). *Implementing shop floor IT for Industry 4.0*. Chalmers Tekniska Hogskola (Sweden).

Alcácer, V., & Cruz-Machado, V. (2019). Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. *Engineering science and technology, an international journal*, 22(3), 899-919.

Auxiliares, S. A. Y. (s. f.). ASA, CONACYT y CIDESI desarrollan módulos de simulación de vehículos para suministro de combustible. gov.mx. <https://www.gob.mx/asa/prensa/asa-conacyt-y-cidesi-desarrollan-modulos-de-simulacion-de-vehiculos-para-suministro-de-combustible>

Simulador virtual interactivo de gliders submarinos. (s. f.). <https://centroconacyt.mx/objeto/simulador/>

CIDESI. (2021, 17 noviembre). ▷ Servicios Tecnológicos **[CIDESI]** . CIDESI | Generando valor a través del conocimiento. <https://www.cidesi.com/site/servicios/>

Bú, R. C. (1994). *Simulación: un enfoque práctico*. Editorial Limusa.

de Paula Ferreira, W., Armellini, F., & De Santa-Eulalia, L. A. (2020). Simulation in industry 4.0: A state-of-the-art review. *Computers & Industrial Engineering*, 149, 106868.

Eriksson, K., & Hendberg, T. (2021, May). A case study initiating discrete event simulation as a tool for decision making in I4. 0 manufacturing.

In *International Conference on Decision Support System Technology* (pp. 84-96). Springer, Cham.

Gajsek, B., Marolt, J., Rupnik, B., Lerher, T., & Sternad, M. (2019). Using maturity model and discrete-event simulation for Industry 4.0 implementation. *International Journal of Simulation Modelling*, 18(3), 488-499.

Dunna, E. G., Reyes, H. G., & Barrón, L. E. C. (2006). *Simulación y análisis de sistemas con ProModel*. Pearson Educación.

Chen, D. (2005). Enterprise-control system integration—an international standard. *International journal of production research*, 43(20), 4335-4357.

¿Qué es la Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0? | Repsol. (2022, 27 octubre). REPSOL. <https://www.repsol.com/es/energia-innovacion/energia-futuro/tecnologia-innovacion/cuarta-revolucion-industrial/index.cshtml>

Pineda Castillo, J. C. (2019). PROGRAMA DE TRABAJO 2019-2024 CIDESI. <https://www.cidesi.com/site/programa-de-trabajo-2019-2024-cidesi/>.