

Procedimiento para el desarrollo de un modelo conceptual para la simulación del proceso de un pequeño aserradero

Héctor Darío Enriquez*, Cristian Ramón Ayala

Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Misiones (UNaM), Oberá, Misiones, Argentina.
e-mails: enriquez@fio.unam.edu.ar, cristian.ayala@fio.unam.edu.ar

Resumen

El desarrollo de un modelo conceptual es una etapa clave en un proyecto de simulación, al actuar como vínculo entre el sistema real y la representación computacional, facilitando la validación, credibilidad del modelo y la comunicación en el desarrollo del proyecto. En este trabajo se presenta un procedimiento estructurado utilizado en la especificación de un modelo conceptual destinado a simular el proceso productivo de un pequeño aserradero ubicado en el centro de la provincia de Misiones, Argentina. El objetivo de la simulación es determinar configuraciones operativas que maximicen tanto la producción semanal de madera aserrada como la producción semanal por operario. El procedimiento incluyó la definición de objetivos, la identificación de variables de respuesta y factores experimentales, el establecimiento de alcances y nivel de detalle del modelo. El resultado es un modelo conceptual documentado que describe cada elemento del sistema, explicitando decisiones de modelado, incluyendo los supuestos y simplificaciones, con sus justificaciones. Esta metodología puede aplicarse a procesos industriales similares, aportando una herramienta replicable para proyectos de simulación orientados a la mejora de la eficiencia operativa.

Palabras Clave –Simulación por eventos discretos, Modelo conceptual, Investigación operativa, Aserradero

1 Introducción

La provincia de Misiones posee alrededor de 30% del total de la superficie forestal del país, siendo la actividad forestal y maderera una de las tres principales actividades económicas de la provincia [1, 2, 3]. No obstante, en Misiones existen numerosos aserraderos de pequeña escala que presentan oportunidades de mejora en sus procesos productivos.

El sector industrial se constituye con dos subsectores: la industrialización primaria, que procesa madera en rollo para obtener madera aserrada, también madera laminada y chips; y la industrialización secundaria, en la cual se fabrican muebles, aberturas, molduras, envases de madera, entre otros productos con diferente valor agregado [1, 2, 4]. La producción del sector industrial en Misiones se compone principalmente de productos de industrialización primaria, como madera aserrada (73%). Le siguen productos de segunda transformación o remanufactura (21%), como molduras y pisos. Los productos con alto valor agregado, como muebles y aberturas, representan solo el 4%, y el 2% corresponde a otros artículos de bajo valor agregado, como pallets y cajones [1, 3]

En la provincia existen alrededor de 700 aserraderos; la mayoría son pequeños y micro establecimientos (en torno al 91%), luego se encuentran empresas medianas (7%) y pocas empresas grandes (2%) [2, 3, 5, 6]. La distribución de los aserraderos muestra mayor concentración en las zonas oeste y centro de la provincia, existiendo en esta última el 48% de los establecimientos [1, 6].

*Autor en correspondencia.

Entre los inconvenientes que pueden observarse en muchos aserraderos pequeños de Misiones, se destacan el bajo valor agregado de sus productos, el bajo rendimiento de sus procesos ya que parte importante de la materia prima se pierde en forma de residuos, y la menor productividad por empleado en comparación con los procesos de empresas de mayor tamaño [1, 3, 6]

Para estudiar un sistema de manufactura, puede experimentarse directamente sobre el sistema o utilizarse un modelo. A menudo se utilizan modelos matemáticos, por razones de costo, tiempo, riesgos, cuestiones éticas, o simplemente cuando la experimentación real no es posible [7, 8, 9]. Los modelos matemáticos pueden ser analíticos o de simulación. Dada la complejidad de muchos sistemas de manufactura, la simulación suele ser la herramienta más adecuada [7, 10, 11].

La simulación consiste en crear un modelo matemático en un programa de computadora que describa el comportamiento del sistema de interés, proceder a evaluar numéricamente el modelo y realizar experimentos para obtener datos que permitan estimar el comportamiento del sistema real [7, 8, 9, 12]. Entre los diferentes tipos de simulación, para el diseño y análisis de sistemas de manufactura la simulación por eventos discretos es una de las técnicas más utilizadas [10, 11, 13]. En procesos de aprovechamiento de madera, tanto en aserrío como en productos manufacturados, en el mundo se vienen utilizando modelos de simulación desde hace más de cinco décadas; como ejemplos se encuentran [14, 15]. Sin embargo, en la provincia de Misiones se encuentran relativamente pocos antecedentes de simulación de procesos de aserrado y remanufactura, como [16, 17, 18].

La metodología general de la simulación sigue un proceso compuesto por tres macro-fases [19]: conceptualización, programación y análisis. La conceptualización o elaboración del modelo conceptual consiste en decidir “qué” modelar. Se basa en un conjunto de supuestos sobre los componentes y estructura del sistema, además de hipótesis sobre los parámetros de entrada del modelo; implica cierto grado de abstracción y simplificación de las operaciones reales del sistema [7, 19, 20, 21, 22]. Un modelo conceptual es independiente del software; no obstante, es una representación del modelo de simulación. Un modelo conceptual documentado provee múltiples beneficios, entre ellos: reduce la probabilidad de requisitos ausentes, ambiguos, inconsistentes o incorrectos, como también retrabajos durante el proyecto; constituye una guía para la validación y verificación; ayuda a una mayor credibilidad del modelo; facilita el desarrollo del modelo computacional; facilita la comunicación entre quienes estén involucrados en el proyecto de simulación [7, 19, 20, 22].

Es importante reconocer la diferencia entre la descripción de un sistema y un modelo conceptual. La descripción del sistema concierne al “dominio del problema”, describe el problema y los elementos del mundo real que se relacionan con él. El modelo conceptual pertenece al “dominio del modelo,” ya que representa las partes de la descripción del sistema incluidas en el modelo de simulación, con cierto nivel de abstracción y detalle. La correspondencia entre un modelo y el sistema real depende de cuan correctos sean los supuestos del modelo, mientras que las simplificaciones se relacionan con la exactitud de la representación. Finalmente, un modelo no es

una reproducción exhaustiva del mundo real, sino una representación simplificada desarrollada para un propósito específico [22].

De acuerdo con Robinson [22], no se encuentra un estándar para expresar modelos conceptuales de simulación por eventos discretos. Sin embargo, en la práctica se recurre a diversos formalismos, como diagramas de flujo de procesos, redes de Petri, entre otros. Asimismo, Robinson [22] facilita un marco que orienta la elaboración de modelos conceptuales.

A continuación, se presenta el proceso para definir los componentes de un modelo conceptual para el proceso de aserrado de una empresa ubicada en Oberá, Misiones. La empresa produce y comercializa madera aserrada, machimbres, tirantería y otros productos de remanufactura. La principal materia prima es pino proveniente de plantaciones de la zona. El proceso comienza con el ingreso de la madera en rollo desde una playa de trozas. Luego se realiza el aserrado principal mediante dos tipos de sierra: una sierra de tipo gemela y una sierra de carro, en las cuales se efectúan los primeros cortes longitudinales. Las basas o “panes” obtenidos son reaserrados en una sierra múltiple. Los costaneros o costeros que se obtienen como productos secundarios se procesan en una recuperadora. Las piezas resultantes de las actividades anteriores se ajustan a su ancho y largo definidos utilizando una canteadora y despuntadora respectivamente. Posteriormente pasan a una mesa de clasificación, donde manualmente se estiban y se agrupan en paquetes de diferentes escuadrías. Finalmente, estos paquetes son trasladados hacia otros sectores para el secado y remanufactura.

Este trabajo se enmarca en un proyecto de investigación en la Facultad de Ingeniería de la UNaM (FI-UNaM), cuyo objetivo general es modelar y simular procesos de producción de pequeños aserraderos de la zona centro de provincia de Misiones, para obtener configuraciones que permitan aumentar su productividad y eficiencia. Se plantea que es posible obtener un modelo representativo de los procesos productivos de estas pequeñas empresas. Se busca contribuir con el desarrollo de un modelo conceptual para el caso seleccionado, utilizando un procedimiento estructurado.

2 Metodología

Se adoptó un enfoque cuantitativo con alcance correlacional para conducir la investigación [23], partiendo de la hipótesis de que es posible establecer una relación representativa entre un modelo y los procesos productivos de pequeños aserraderos de la región en estudio, y que a partir de dicha relación pueden hallarse configuraciones que mejoren tanto la productividad como la eficiencia de estos sistemas.

Respecto al diseño de la investigación, se optó por realizar estudios de casos múltiples [23], considerando como unidades o casos pequeños aserraderos de la zona en estudio. Para la concreción de cada estudio de caso, se ha escogido el proceso propuesto por Law [7, 20], que se resume en los siguientes pasos: 1) formulación del problema, objetivos y plan de proyecto; 2) definición del modelo conceptual; 3) recolección de datos; 4) construcción del modelo computacional; 5)

validación y verificación; 6) diseño, ejecución y análisis de experimentos; 7) elaboración de conclusiones y recomendaciones para la toma de decisiones.

Para la definición de los elementos del modelo conceptual, se siguió el marco orientador propuesto por Robinson [22], que indica los siguientes pasos: a) comprender la situación problemática; b) determinar los objetivos del proyecto; c) identificar los outputs/variables de respuesta del modelo; d) identificar los inputs/factores experimentales del modelo; e) determinar el alcance y el nivel de detalle del modelo. Las suposiciones y simplificaciones se determinan a lo largo del proceso. Las orientaciones propuestas por Robinson [22] no necesariamente siguen una secuencia estricta, siendo además esperable que ocurran iteraciones entre estos pasos y el resto de las etapas del proyecto de simulación.

3 Resultados

La descripción de los elementos del modelo conceptual se presentan en las tablas siguientes (tablas 1 a 5). Respecto a la definición del sistema, quedó comprendido entre el ingreso de la materia prima hasta la clasificación y armado de paquetes. Los supuestos y simplificaciones se detallan en las justificaciones de los alcances y detalles del modelo (tablas 4 y 5).

Tabla 1 – Objetivos del proyecto

Proyecto: Simulación y mejora de una línea de producción de aserradero
Objetivos:
<i>Objetivo organizacional:</i>
• Alcanzar mayor productividad y eficiencia
<i>Objetivos de modelado:</i>
• Respecto a la configuración actual, determinar configuraciones para obtener mayor cantidad de madera aserrada por semana y mayor cantidad de madera aserrada por operario por semana

Tabla 2 – Outputs/ respuesta del modelo

Outputs para determinar la consecución de los objetivos:
• Volumen semanal de madera aserrada [m³/semana] • Rendimiento del proceso = (volumen de madera aserrada/volumen de materia prima procesada) x 100 [%] • Productividad por operario= (volumen de madera aserrada/número de operarios activos en el proceso) [m³/operario/semana] • Incremento de producción respecto a otra configuración [%] • Incremento de productividad por operario respecto a otra configuración [%]
Outputs para determinar las razones de la no consecución de los objetivos:
• Nivel de desperdicios [%] • Utilización de centros de trabajo [%] • Tasa de utilización por operario [%] • Cantidad de piezas en proceso [u] o [m³] • Tiempo de ciclo por troza [min/u] • Cantidad de trozas procesadas [u/semana]

Tabla 3 – Inputs/factores experimentales del modelo

Factores experimentales:
• Cantidad de operarios asignados por centro de trabajo • Asignación de tareas por operario • Cantidad de máquinas simultáneas activas • Prioridad entre máquinas simultáneas activas • Velocidad o capacidad de operación [m/min]

Tabla 4 - Alcances del modelo

Componente:	Incluir/Excluir:	Justificación:
<i>Entidades:</i>		
• Madera en rollo (trozas)	Incluir	Forman parte del flujo principal de entidades
• Productos en proceso (semielaborados); terminados (tablas); paquetes de productos terminados	Incluir	Ídem.
• Subproductos (costaneros)	Incluir	Una parte de los subproductos se reaprovecha
• Piezas elaboradas o semielaboradas no conformes	Incluir	Para determinar volumen de desperdicios
• Otros descartes	No incluir	Simplificación: no se cuantifican costaneros no aprovechables, aserrín, puntas, etc.
<i>Actividades:</i>		
Aserrado principal (sierra gemela y sierra de carro); reaserrado (sierra múltiple); canteado; despuntado; recuperación de costaneros	Incluir	Actividades fundamentales del proceso. Se relacionan con los outputs del modelo y factores experimentales
Clasificación y armado de paquetes	Incluir	Ídem. Simplificación: se representa como una sola actividad
Movimientos y transportes en el proceso	Incluir	Simplificación: se representan solo aquellos cuyos tiempos sean significativos y/o impliquen el trabajo de uno o más operarios
Reprocesos de piezas elaboradas o semielaboradas no conformes	No incluir	Suposición: no se realizan reprocesos de piezas no conformes
Secado y remanufactura	No incluir	Se encuentran fuera de los límites del sistema
Tareas de mantenimiento; puesta a punto	No incluir	No se detalla el mantenimiento ni causas de paradas. Simplificación: se aplica un factor de eficiencia [%]
Recuperación de aserrín, virutas y otros descartes	No incluir	Se encuentra fuera de los límites del sistema

Tabla 4 (continuación) - Alcances del modelo

Componente:	Incluir/Excluir:	Justificación:
<i>Colas:</i>		
• Cola antes del aserrado principal (sierra gemela y sierra de carro)	No incluir	Simplificación: se adopta arribos ilimitados para la materia prima; ingresa cuando se necesita en el proceso, sin distribución ni horarios
• Colas antes de sierras múltiple, canteadora, despuntadora, recuperadora, clasificación y armado de paquetes	Incluir	Necesarias para ubicar piezas en proceso antes de la actividad. Se relacionan con outputs del modelo
• Depósitos de piezas elaboradas o semielaboradas no conformes	No incluir	Simplificación: se reemplaza por un único punto de salida de entidades, para cuantificar desperdicios
• Cola para secado y remanufactura	No incluir	Simplificación: se reemplaza por un punto de salida de entidades, para cuantificar paquetes terminados
<i>Recursos:</i>		
• Operarios	Incluir	Necesarios para la ejecución de las actividades. Se relacionan con outputs del modelo y factores experimentales

Tabla 5 - Detalles del modelo

Componente:	Detalle:	Incluir /Excluir:	Justificación:
<i>Entidades:</i>			
• Madera en rollo (trozas)	Cantidad: 1 entidad = 1 unidad	Incluir	Se requiere para caracterizar atributos de cada troza
	Patrón de arribos: arribos ilimitados	Incluir	Simplificación: la materia prima ingresa cuando se necesita en el proceso, sin distribución ni horarios
	Atributos	Incluir: diámetro	Requerido para determinar el rendimiento. Supuesto: las trozas son relativamente homogéneas respecto a su longitud. Simplificación: no se consideran otros factores como curvatura, nudos, entre otros
	Ruteo	Incluir: ruteo por atributos	La sierra gemela y la de carro procesan diferentes tipos de troza
• Productos en proceso; terminados; paquetes de productos terminados; costaneros; piezas no conformes	Cantidad: 1 entidad = 1 lote	Incluir	Reduce la carga computacional. Simplificación: Los tiempos de proceso no varían según tipo de pieza, dimensiones o escuadría
	Atributos	Incluir	Se requiere para caracterizar tipo de pieza elaborada o semielaborada, dimensiones o escuadrías, y cantidad de piezas por lote
	Ruteo	No incluir	No se aplican decisiones de ruteo basada en los

Tabla 5 (continuación) - Detalles del modelo

Componente:	Detalle:	Incluir /Excluir:	Justificación:
<i>Actividades:</i>			
• Aserrado principal	Cantidad: una máq. de cada tipo	Incluir	Cada máquina tiene sus propias características. Es un factor experimental
	Transformación ingreso/egreso de entidades	Incluir	Cada entidad (rollo) se transforma en diferentes productos intermedios (pan y tablas) y costaneros
	Tiempo de ciclo: distribución de probabilidad	Incluir	Cada máquina tiene su propio tiempo de procesamiento. Simplificación: no varía según tipos de entidades
	Ruteo	Incluir	Según tipo de pieza intermedia o costaneros, hacia la actividad o salida que corresponda
	Recursos	Incluir	Requeridos para la operación de cada máquina
	Desperdicio: piezas no conformes	Incluir	Simplificación: se considera un factor de desperdicio [%]
	Mantenimiento; puesta a punto	No incluir	Simplificación: se incluye un factor de eficiencia [%]
• Reaserrado; canteado; despuntado; recuperación de costeros, clasificación y armado de paquetes	Nivel de detalles equivalente a la actividad anterior	Incluir	Justificaciones análogas a las presentadas en la actividad anterior. Para la Clasificación y armado de paquetes se especifica la capacidad de entidades que pueden procesarse. Simplificación: en la recuperación de costaneros se obtiene un solo tipo tabla
• Movimientos y transportes en el proceso	Duración de movimiento	Incluir	Simplificación: Solo se representan movimientos significativos, mediante duración media. Otros casos: se considera movimiento instantáneo
	Recursos	Incluir	Simplificación: solamente operarios en los casos que corresponda, sin otros recursos como carretillas, montacargas, etc.
	Distancias	No incluir	Simplificación: se representan solo duraciones
<i>Colas:</i>			
Para sierras múltiple, canteadora, despuntadora, y recuperadora,	Cantidad	Incluir	Un almacenamiento antes de cada actividad. Simplificación: No se separa entidades según atributos
	Capacidad	No incluir	Simplificación: no se consideran limitaciones físicas

clasificación y armado de paquetes	Disciplina	Incluir	de espacio Simplificación: las entidades se procesan según el orden en que llegan
------------------------------------	------------	---------	--

Tabla 5 (continuación) - Detalles del modelo

Componente:	Detalle:	Incluir /Excluir:	Justificación:
<i>Recursos</i>			
• Operarios	Cantidad	Incluir	Operarios para cada actividad. Simplificación: se consideran grupos de operarios (no se individualizan)
	Turnos	Incluir	Para definir turnos con diferente asignación y número de operarios. Se relaciona con factores experimentales
	Asignación	Incluir	Poder representar diferentes asignaciones de operarios. Se relaciona con outputs y factores experimentales
	Nivel de experiencia/ritmo	No incluir	Simplificación: no se consideran diferencias entre operarios
	Tiempos muertos/pausas	No incluir	Simplificación: se trabaja con un factor de disponibilidad [%]

4 Conclusiones

Este trabajo presenta un procedimiento de modelado conceptual para la simulación de un pequeño aserradero ubicado en la zona centro de la provincia de Misiones, estableciendo una estructura clara para precisar los alcances y detalles del modelo, reduciendo ambigüedades y mejorando la trazabilidad de las decisiones de modelado.

El procedimiento desarrollado permite representar el funcionamiento del aserradero con un nivel de abstracción y de complejidad acordes a los objetivos de análisis. Entre las entidades se incluyen las piezas elaboradas o semielaboradas no conformes, para cuantificar desperdicios y tener una mejor estimación de indicadores de rendimiento.

El modelo conceptual, como paso intermedio entre la descripción del problema-sistema real y su implementación computacional, aporta beneficios, independientemente de la formalización y del software que se utilice, contribuyendo a la validez y credibilidad del modelo de simulación, y también a la comunicación entre las personas involucradas en el proyecto.

Esta metodología es replicable en otros casos, como también a procesos de otras industrias, para la modelización conceptual previa a la simulación y optimización. Los resultados que se presentan forman una base de comparación para futuros trabajos.

Como líneas de investigación futuras, pueden mencionarse la validación empírica y calibración del modelo, la extensión del alcance del modelado para otros objetivos, y la aplicación a otras empresas para evaluar su potencial de generalización.

Referencias

- [1] Ministerio de Agroindustria, «Censo nacional de aserraderos,» marzo 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-forestal-forestal/forestal-industria/estadisticas.php>. [Último acceso: 8 agosto 2024].
- [2] D. Broz, D. Rossit, D. Rossit y A. Cavallín, «The Argentinian forest sector: opportunities and challenges in supply chain management,» *Uncertain Supply Chain Management*, vol. 6, pp. 375-392, 2018.
- [3] E. M. Spavento, G. D. Keil y N. Raffaeli, «Situación foresto-industrial en Argentina,» de *Industrialización de la madera. Transformación mecánica y química: tecnologías y puesta en valor sustentable*, G. D. Keil, E. M. Spavento y N. Raffaeli, Edits., La Plata, Editorial de la UNLP, 2022, pp. 8-34.
- [4] A. Teischinger, M. Gronalt y D. Sandberg, «Introduction to wood industries,» de *Springer Handbook of Wood Science and Technology*, P. Niemz, A. Teischinger y D. Sandberg, Edits., Cham, Springer, 2023, pp. 1077-1096.
- [5] N. C. Tañski, L. Báez y C. Clérici, «Small and medium sized timber enterprises capable of exporting,» *Visión de Futuro*, vol. 5, nº 1, pp. 1-19, 2006.
- [6] M. A. Volpe, M. Frechero, A. I. Casoni, M. E. Gauchat, H. Fassola, A. M. Lupi y A. Acevedo, «Análisis de pre-factibilidad para desarrollar un proceso de conversión de residuos de madera de pino,» agosto 2022. [En línea]. Disponible: <https://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/12928>. [Último acceso: 8 agosto 2024].
- [7] A. M. Law, *Simulation modeling and analysis*, Quinta ed., New York: New York, 2015.
- [8] W. D. Kelton, N. B. Zupick y N. J. Ivey, *Simulation with Arena*, Séptima ed., New York: McGraw Hill, 2024.
- [9] D. Ríos Insúa, S. Ríos Insúa, J. Martín Jiménez y A. Jiménez Martín, *Simulación. métodos y aplicaciones*, Segunda ed., México: Alfaomega, 2009.
- [10] D. Elizandro y H. Taha, *Performance evaluation of industrial systems: discrete event simulation in using Excel/VBA*, Segunda ed., Boca Raton: CRC Press, 2012.
- [11] M. F. Yegul, F. S. Erenay, S. Striepe y M. Yavuz, «Improving configuration of complex production lines via simulation-based optimization,» *Computers & Industrial Engineering*, vol. 109, p. 295–312, 2017.
- [12] D. Mourtzis, M. Doukas y D. Bernidaki, «Simulation in manufacturing: review and challenges,» *Procedia CIRP*, vol. 25, pp. 213-229, 2014.
- [13] A. Negahban y J. S. Smith, «Simulation for manufacturing system design and operation: literature review and analysis,» *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, nº 2, pp. 241-261, 2014.
- [14] H. W. Reynolds y C. J. Gatchell, «Sawmill simulation: concepts and computer use,» *USDA Forest Service Research Note NE- 100*, pp. 1-5, 1969.
- [15] J. E. Aune, «System simulation - a technique for sawmill productivity analyses and designs,» *The Forestry Chronicle*, vol. 50, nº 2, pp. 66-69, 1974.
- [16] G. J. Olsson, M. H. Aranda, I. Santelices Malfanti y J. C. Michalus, «La simulación como herramienta útil para las pequeñas y medianas empresas,» de *34° Jornadas Argentinas de Informática e Investigación Operativa*,

Simposio de Investigación Operativa, Rosario, Sociedad Argentina de Informática e Investigación Operativa (S.A.D.I.O.), 2005, pp. 1-12.

- [17] G. B. Woitschach, «Análisis del sistema de almacenamiento de una industria maderera por medio de simulación,» de *Jornadas científico-tecnológicas*, Posadas, Editorial Universitaria de la Universidad Nacional de Misiones, 2013, p. 89.
- [18] H. D. Enriquez y S. F. Kolodziej, «Simulación y optimización de sistema de manufactura con criterios económico y ambiental,» *Revista Ingeniería Industrial*, vol. 17, nº 1, pp. 37-54, 2018.
- [19] L. Chwif , J. Banks, J. P. De Moura Filho y B. Santini, «A framework for specifying a discrete-event simulation conceptual model,» *Journal of Simulation*, p. 1–11, 2012.
- [20] A. M. Law, «How to build valid and credible simulation models,» *Proceedings of the 2019 Winter Simulation Conference*, pp. 1402-1414, 2019.
- [21] J. Banks, J. S. Carson II, B. L. Nelson y D. M. Nicol, *Discrete-event system simulation*, Quinta ed., Harlow: Pearson, 2014.
- [22] S. Robinson, «A tutorial on simulation conceptual modeling,» *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference*, pp. 565-579, 2017.
- [23] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado y M. d. P. Baptista Lucio, *Metodología de la investigación*, Sexta ed., México: McGraw-Hill, 2014.