

Santiago Aguirre Mayorga,
Carlos Alberto Parra Rodríguez
*Departamento de Ingeniería Industrial,
Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá
(Colombia)*

<{saguirre,carlos.parra}@javeriana.edu.co>

Mejoramiento de procesos con técnicas de minería de procesos, simulación y optimización: Caso de estudio

1. Introducción

Para realizar un análisis integral de los procesos de negocio no basta con una sola metodología o herramienta. La minería de procesos provee herramientas para el diagnóstico y análisis de procesos, pero debe ser complementada con otras metodologías y técnicas como por ejemplo la simulación para poder construir modelos basados en la ejecución real del proceso y poder probar las diferentes alternativas de rediseño de los procesos antes de ponerlas en práctica.

La simulación y la optimización se han usado más que todo en procesos de producción y logística donde las rutas del proceso están predefinidas y se puede construir un modelo del proceso. En procesos de servicio, como por ejemplo procesar una queja, se pueden presentar muchas variaciones o rutas del proceso dependiendo del tipo de queja, por lo que es importante partir de analizar la bitácora de eventos del sistema de información para llegar a tener un modelo real del proceso de forma que la simulación se pueda realizar sobre este modelo y no sobre una versión idealizada del proceso.

La simulación puede beneficiarse de gran manera de la minería de procesos porque ésta le puede proporcionar los parámetros necesarios para construir el modelo del proceso a simular (proceso de ejecución real, tiempos de ejecución, tiempos de espera, distribución del arribo de nuevos casos, etc.) y esto se ve demostrado en los casos donde se combina minería de procesos con simulación [1][2][3].

2. Rediseño de procesos combinando minería de procesos, simulación y optimización

Para ilustrar la forma como las herramientas de modelamiento, simulación y optimización se pueden usar para la gestión y mejoramiento de procesos, se desarrolla un caso de estudio de rediseño de un proceso de abastecimiento, enmarcado en la metodología de rediseño de procesos del enfoque de BPM (*Business Process Management*) [4].

A continuación, presentamos las fases de la metodología enumerando actividades, herramientas y técnicas:

■ **Planeación del Proyecto.** En esta etapa se determina la oportunidad de mejora, se realiza un análisis de brechas entre el desempeño actual y el desempeño esperado y se determi-

Resumen: Este artículo presenta un caso de estudio donde se combinaron herramientas de minería de procesos, simulación y optimización para la mejora de un proceso. La minería de procesos proporcionó herramientas para el diagnóstico de los problemas del proceso y para encontrar los principales cuellos de botella y la simulación permitió determinar y evaluar las principales alternativas de mejora para su posterior implantación. Por otro lado, la optimización a través del Data Envelopment Analysis permitió encontrar la eficiencia relativa de los proveedores del proceso. Con esto se logró combinar diferentes herramientas para lograr los objetivos de mejora de procesos.

Palabras clave: Análisis de procesos, minería de datos, minería de procesos, rediseño de procesos, simulación.

Autores

Santiago Aguirre Mayorga es Ingeniero Industrial por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia) y *Magíster* en Ingeniería Industrial por la Universidad de los Andes (Uniandes – Colombia). Actualmente, es candidato a PhD. en Ingeniería por la Pontificia Universidad Javeriana, y trabaja como Profesor Asociado del Departamento de Ingeniería Industrial de dicha universidad. Es además consultor en el tema de *Business Process Management* (BPM) en diversas organizaciones.

Carlos Alberto Parra Rodríguez es Ingeniero Electrónico por la Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá (Colombia) y *Magíster* en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de los Andes (Uniandes – Colombia). Posee un DEA "*Diplome d'Etudes Approfondies*" en Informática Industrial y es Doctor por la *Université Paul Sabatier* de Toulouse (Francia). Trabaja como Profesor Titular y Director del Doctorado en Ingeniería de la Pontificia Universidad Javeriana. Entre sus temas de investigación se encuentra la inteligencia aplicada a procesos.

nan los objetivos, alcance, cronograma y equipo de proyecto.

■ **Análisis de Procesos (AS-IS).** En esta etapa se analizan detalladamente el proceso y sus oportunidades de mejora, se determinan los problemas y se analizan las causas.

■ **Rediseño de Procesos (TO-BE).** En la etapa de rediseño se evalúan las diferentes alternativas de mejoramiento de los procesos.

■ **Implantación.** Finalmente, se implantan los cambios y se evalúa el proyecto con respecto a sus objetivos.

Estas fases se aplicaron en el caso de estudio que se explica a continuación.

3. Caso de estudio: proceso de compra de bienes

El caso de estudio se desarrolló sobre un proceso de compra de bienes de una institución universitaria¹ donde se procesan aproximadamente 15.000 solicitudes de compra anualmente con un presupuesto estimado de 50 millones de dólares. El normal funcionamiento de la Universidad y sus proyectos dependen de la eficiencia con la que el Departamento de Suministros tramite los bienes y servicios requeridos por lo que en 2009 se

implantó un sistema integrado de información como soporte a este proceso.

3.1. Etapa de Planeación del Proyecto

3.1.1. Determinación de la oportunidad de mejora

A pesar de tener el soporte de un sistema integrado de información, este proceso de compras de bienes y servicios ha venido presentando problemas e inconvenientes que le restan eficiencia como son el exceso de control y aprobaciones del proceso así como la dificultad con el manejo de los documentos asociados, lo que hace que algunos pedidos se demoren más de lo esperado.

3.1.2. Análisis de brechas del proceso

En el diagrama de la **figura 1** se presentan las principales brechas de desempeño y de capacidades del proceso y las herramientas a usar en el análisis y mejoramiento.

3.1.3. Determinación de los objetivos del proyecto

El proyecto de rediseño de procesos tiene los siguientes objetivos:

■ Disminuir los tiempos de respuesta para lograr que el 70% de los pedidos se entregue en menos de 1 mes.

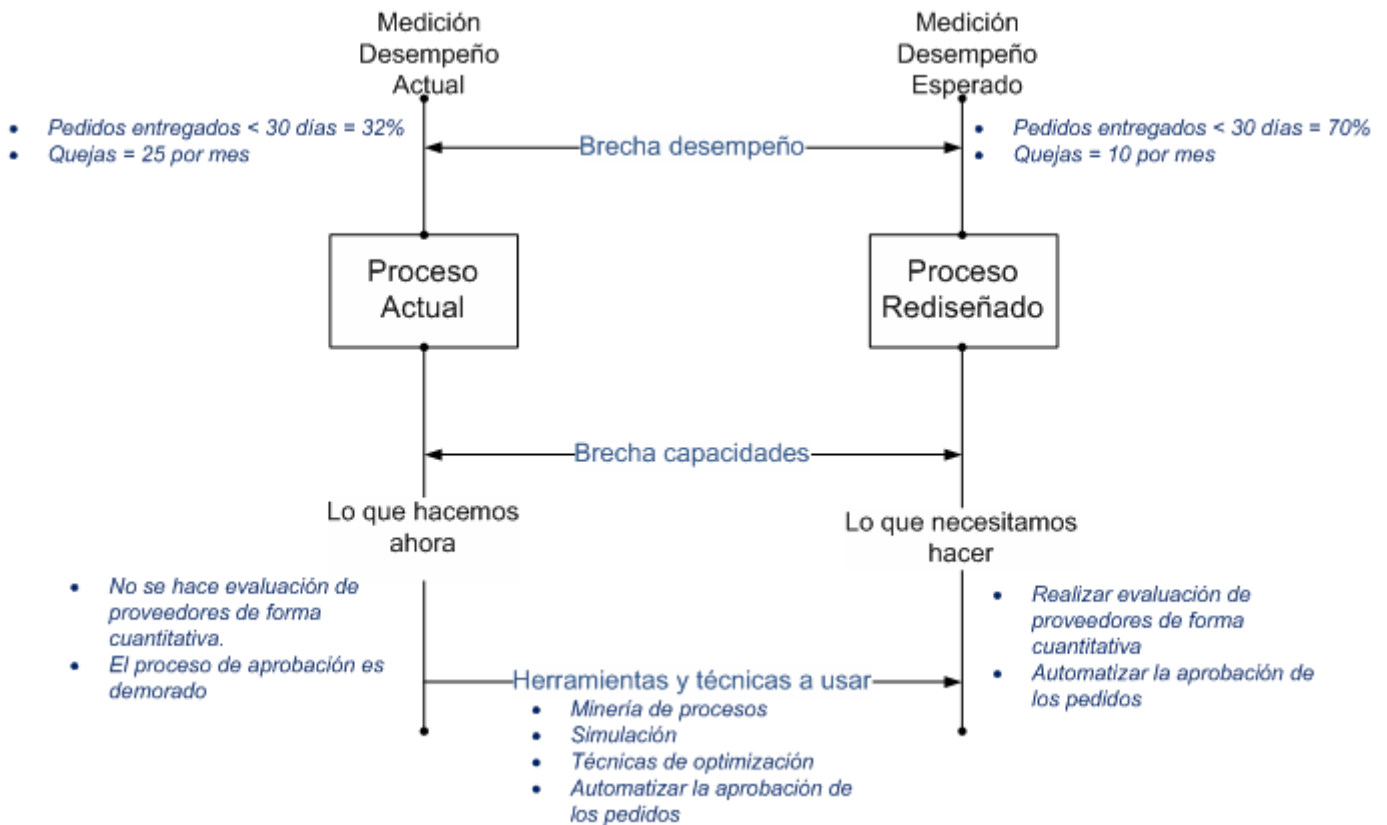


Figura 1. Análisis de brechas del proceso de compras.

- Disminuir las quejas de los usuarios a un máximo de 10 por mes.
- Generar mayores ahorros a la Universidad a través de una adecuada evaluación de los proveedores.

3.2. Etapa de Análisis de Procesos (AS-IS)

3.2.1. Extracción y análisis de la bitácora de eventos

Para la fase de análisis del proceso (AS-IS) se requiere extraer la bitácora de eventos del sistema de información donde se encuentran los datos con respecto a las actividades del proceso, los responsables, la fecha y hora de inicio y finalización de cada actividad, e información con respecto a cada solicitud de compra como el producto a comprar, el departamento solicitante y el proveedor, entre otros.

Este registro contiene el histórico de 1 año correspondiente a 15.091 registros. Una vez

obtenido el registro se procede a analizar la calidad de la información, en busca de datos perdidos y atípicos, para lo cual se puede usar la utilidad de análisis de datos perdidos de un paquete estadístico como SPSS².

Después de realizar la depuración de casos con datos perdidos y atípicos la base se redujo a 8.987 casos con 56 variables.

3.2.2. Descubrimiento del modelo real del proceso

A través de la aplicación de algoritmos de la minería de procesos como *alfa mining* [5], *heuristic mining* [6] o *genetic mining* [7], es posible descubrir de forma automática el modelo real del proceso utilizando la funcionalidad del software ProM o Disco.

El modelo de ejecución real del proceso se puede representar en una red de Petri, con la notación BPMN (*Business Process Modeling*

Notation) o UML (*Unified Modeling Language*), entre otras. La minería de procesos utiliza en sus aplicaciones las redes de Petri, debido a sus fundamentos matemáticos, lo que permite aplicar técnicas de análisis, y a que soporta características de los procesos como es la concurrencia [8]. Adicionalmente, se pueden usar las redes de Petri coloreadas (CPN) dada su capacidad de expresividad y de simulación en paquetes como CPN Tools [2].

En la figura 2 se presenta el proceso de modelado en una red de Petri. Por su parte, en la tabla 1 se presentan los principales hallazgos del descubrimiento del proceso.

3.2.3. Análisis de los indicadores de desempeño

De la bitácora de eventos del sistema se pueden extraer y analizar algunos indicadores de desempeño del proceso como son los

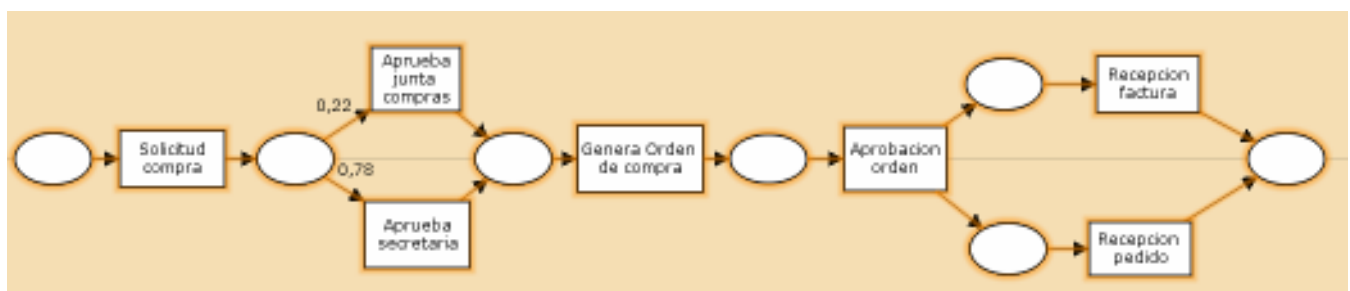


Figura 2. Proceso de abastecimiento representado en una red de Petri.

“ La simulación puede beneficiarse de gran manera de la minería de procesos porque ésta le puede proporcionar los parámetros necesarios para construir el modelo del proceso a simular ”

Hallazgos del descubrimiento del proceso

Existe un bucle (*loop*) entre la solicitud de compra y la aprobación por parte de la junta (en promedio se reprocesan el 24% de los casos que pasan a la junta de compras). Del total de los pedidos de bienes, el 22% pasa por la junta de compras.

El 100% de las órdenes de compra son aprobadas sin necesidad de modificaciones.

Tabla 1. Hallazgos de la fase descubrimiento del proceso.

tiempos por actividad y la productividad del personal.

En la **tabla 2** se presentan los tiempos de ciclo de cada actividad del proceso, los cuales se distribuyen de forma normal con su respectiva media y desviación estándar.

Para analizar los tiempos de ciclo de las compras asignadas a cada comprador se procedió a realizar un análisis donde se relacionó la variable tiempo de ciclo total con el comprador, tal como podemos observar en el diagrama de caja y bigotes mostrado en la **figura 3**.

Los principales hallazgos del análisis de indicadores de desempeño se encuentran documentados en la **tabla 3**.

3.2.4. Diagnóstico y análisis de los problemas

Para realizar un diagnóstico más detallado

Tiempo	Descripción	Tiempos W (en días) P (en minutos)
Tiempo elaboración solicitud	P: Tiempo para la elaboración de la solicitud en el sistema.	P: N(15,5)
Tiempo aprobación Junta	W: Tiempo entre la creación de la solicitud y el inicio de la aprobación de la junta. P: Tiempo de aprobación de los pedidos en la junta.	W: N(5,6) P: N(180,60)
Tiempo aprobación Secretaría	W: Tiempo entre la creación de la solicitud y el inicio de la aprobación por las secretarías de la facultad o de cargos directivos. P: Tiempo de aprobación de un pedido por las secretarías o cargos directivos.	W: N(14, 12) P: N(8, 5)
Tiempo elaboración orden de compra	W: Tiempo entre la finalización de la aprobación y el inicio de la elaboración de la orden de compra. P: Tiempo para la elaboración de la orden de compra en el sistema.	W: N(5, 3) P: N(10,8)
Tiempo aprobación orden de compra	W: Tiempo entre la finalización de la elaboración de la orden de compra y el inicio de su aprobación. P: Tiempo para aprobar la orden de compra en el sistema.	W: N(8, 4) P: N(12,10)
Tiempo de recepción	W: Tiempo desde el envío de la orden de compra al proveedor hasta la recepción del bien. P: Tiempo para realizar la entrada de la mercancía en el sistema.	W: N(25, 31) P: N(30,15)

Tabla 2. Descubrimiento de los tiempos reales de ejecución y espera de las actividades.

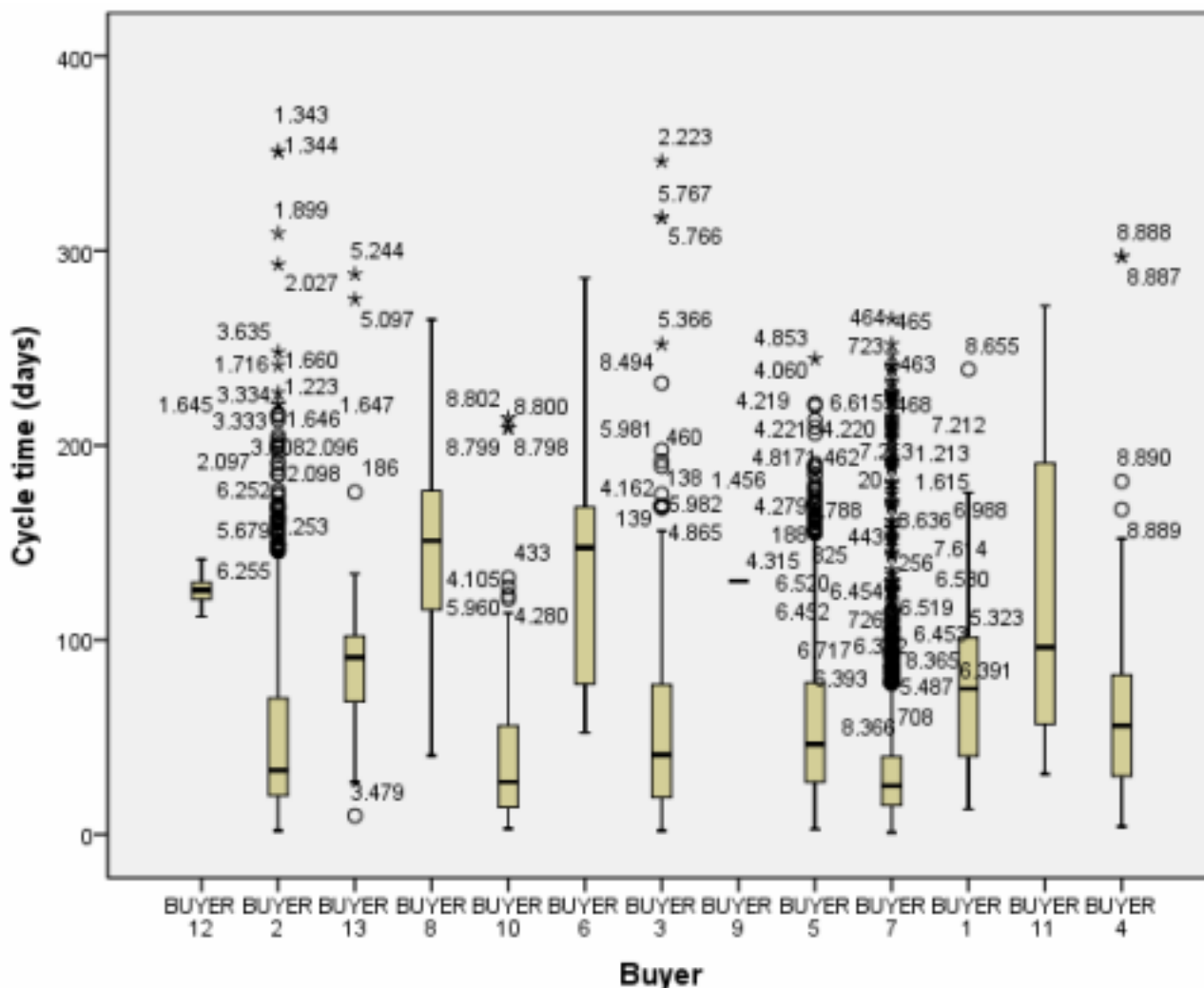


Figura 3. Tiempos de ciclo por comprador.

Hallazgos del análisis de indicadores

El proceso más demorado a nivel interno es la aprobación de la solicitud de compra por la secretaría de las facultades o por los cargos directivos de las unidades del gobierno central, lo que se constituye el cuello de botella del proceso.

Únicamente el 32% de los pedidos se entregan en menos de 30 días. El tiempo medio del ciclo del proceso es en promedio 50 días con una desviación estándar de 28 días.

Las compras de importación son en promedio 3 veces más demoradas que una compra nacional. El tiempo mínimo requerido para una importación son 40 días.

Gran parte de la variabilidad del tiempo de ciclo del proceso se ve explicada por el comprador (persona en el Departamento de Suministros) que gestiona cada solicitud.

Tabla 3. Hallazgos de la fase de análisis de indicadores.

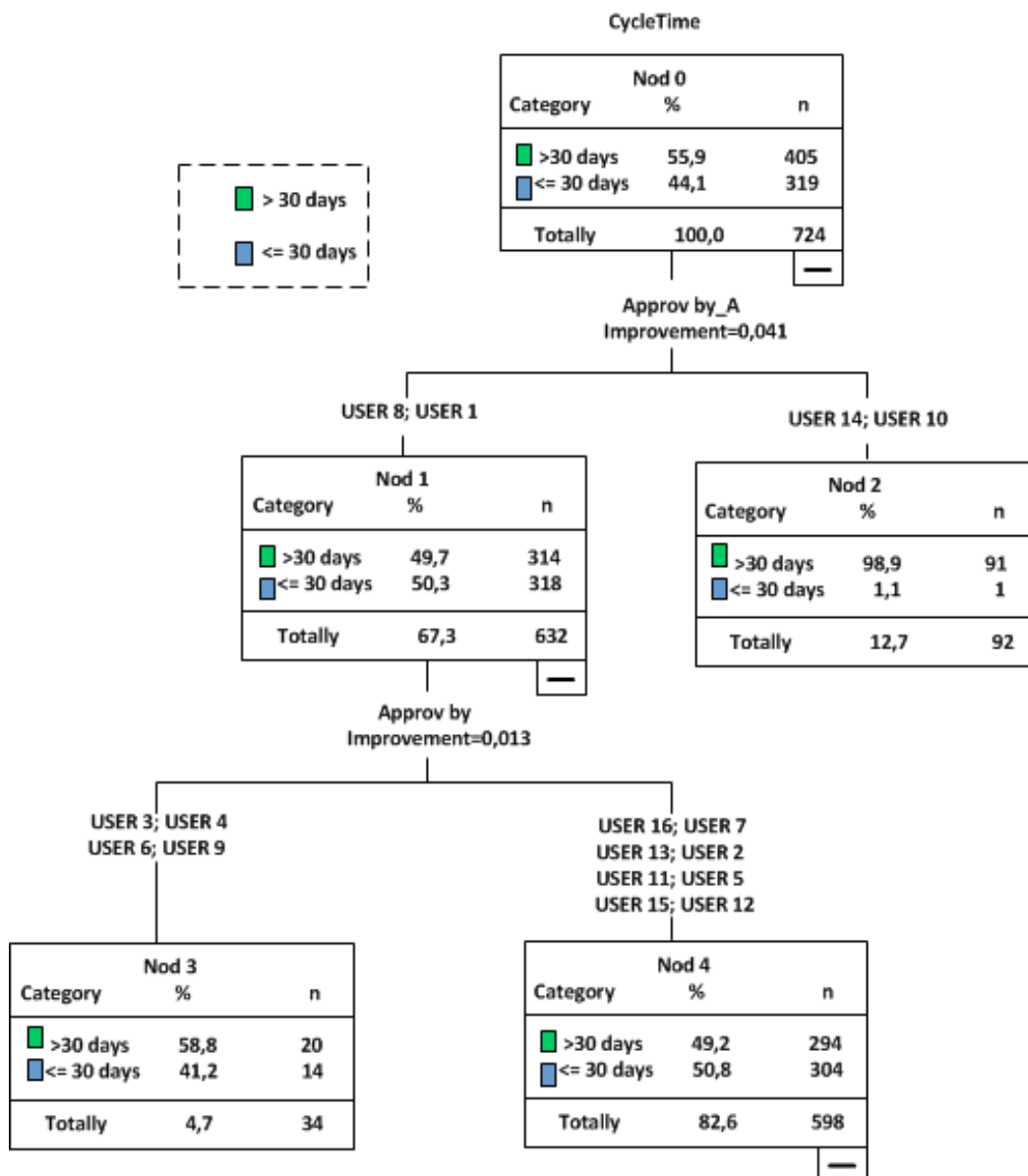


Figura 4. Árbol de decisión para el diagnóstico del proceso.

del subproceso de aprobación de la solicitud de compras por parte de la secretaria o de los cargos directivos, se realizó un análisis con árboles de decisión donde se encontró que cuando la solicitud de compra debe ser aprobada por los cargos del nodo 2, la probabilidad de que el pedido llegue antes de 30 días es del 1%. Cuando los aprobadores son los del nodo 1, la probabilidad de recibir el pedido en menos de 30 días aumenta a un 50% (ver figura 4).

El resumen de los principales hallazgos de esta etapa se muestra en la tabla 4.

3.2.5. Análisis de las causas de los problemas

Para el análisis de las causas del problema trabajamos sobre una espina de pescado, donde los involucrados en la ejecución del proceso determinaron las principales causas de la demora en la aprobación de las solicitudes. En la figura 5 se presenta este análisis.

En la tabla 5 se presentan los principales hallazgos de esta etapa.

3.3. Etapa de Rediseño de Procesos
3.3.1. Determinación de las alternativas de mejora

Una vez determinadas las causas de los problemas en el proceso se determinaron las alternativas de mejora. Para evaluar el impacto que tienen algunas de estas alternativas se usó la simulación, según se detalla en la tabla 6.

Hallazgos del diagnóstico y análisis

La persona que aprueba la solicitud de compra tiene una incidencia importante en la probabilidad de recibir el pedido antes de 30 días.

Tabla 4. Hallazgos de la fase de diagnóstico y análisis.

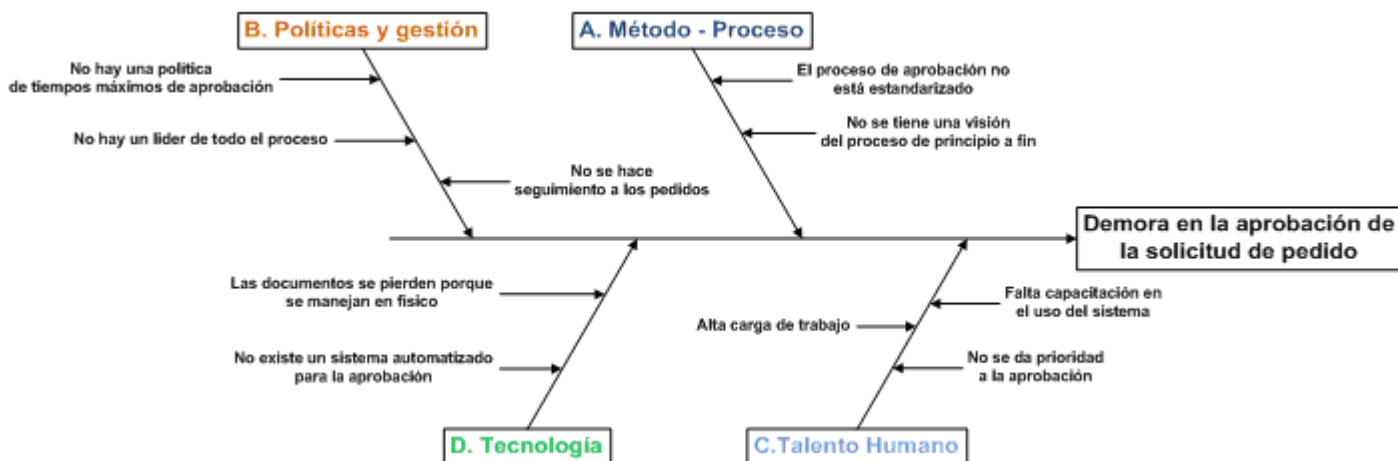


Figura 5. Diagrama de espina de pescado con la determinación de las principales causas de demora.

Hallazgos de las causas de los problemas
Una de las principales causas de la demora en la aprobación es que los documentos físicos que se manejan en el proceso muchas veces se pierden por la manipulación y transporte entre las diferentes dependencias.
La falta de un sistema automatizado para la aprobación de las compras hace que el proceso sea difícil de controlar.
No existe una política que determine un tiempo máximo para la aprobación de las solicitudes de compra.
Debido a su alta carga de trabajo, algunos cargos directivos no le dan prioridad a la aprobación de las compras.

Tabla 5. Hallazgos de la fase de análisis de causas.

Alternativa de mejora	Explicación
1. Eliminar el proceso de la aprobación de la orden de compra.	De los 8.987 casos analizados, ninguna orden de compra fue rechazada por lo que es un control que puede ser eliminado.
2. Establecer una política de tiempo máximo de aprobación de la solicitud	Establecer una política donde las secretarías, junta de compras y cargos directivos de la universidad tengan un máximo de 5 días para aprobar las solicitudes de compra.
3. Automatizar el proceso de aprobación de la solicitud de compra	Implantar un sistema BPMS para automatizar el proceso de aprobación de la solicitud, donde se manejen todos los documentos en forma digital. Este sistema genera alarmas cuando una solicitud de compra no se ha aprobado en cierto tiempo.

Tabla 6. Alternativas de mejora de la fase de rediseño de procesos.

“ A través de la aplicación de algoritmos de la minería de procesos como *alfa mining*, *heuristic mining* o *genetic mining*, es posible descubrir de forma automática el modelo real del proceso utilizando la funcionalidad del software ProM o Disco ”

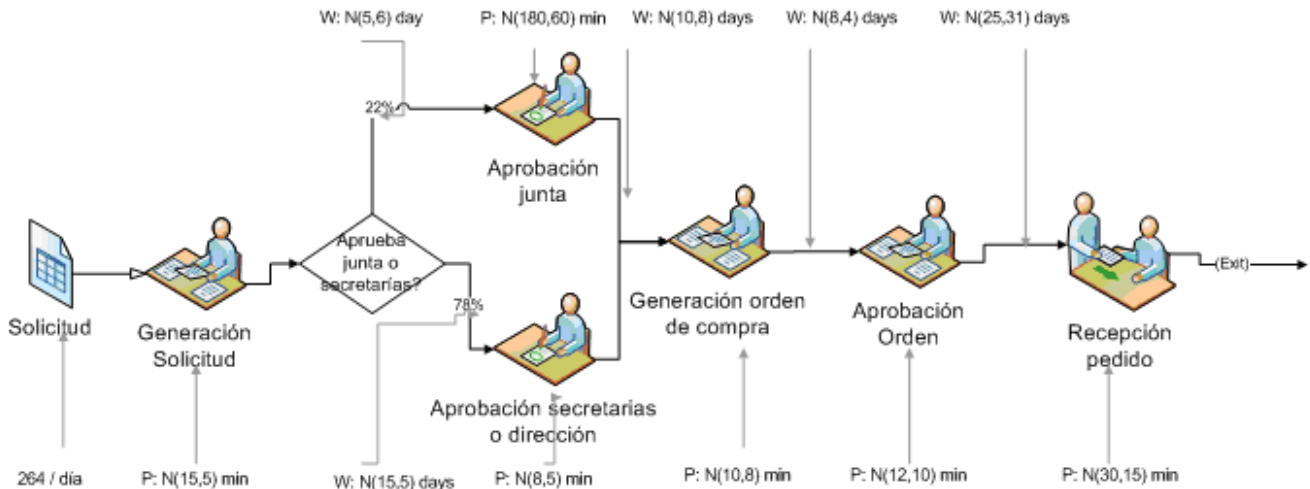


Figura 6. Modelo de simulación del proceso de compras de bienes.

3.3.2. Generación del modelo a simular

Se generó un modelo de simulación basado en el proceso descubierto referido en la sección 3.2.2 y con los datos de tiempos calculados con el análisis de la bitácora de eventos del sistema de información (ver tabla 2). En la figura 6 se presenta el modelo de la simulación, ejecutado en la herramienta *Process Modeler*.

Se realizó la simulación de 4.224 pedidos y el tiempo promedio fue de 50,72 días.

3.3.3. Simulación y evaluación de las alternativas de mejora

Mediante la simulación se evaluaron los siguientes escenarios que corresponden a las alternativas de rediseño del proceso:

- Escenario 1: Eliminar el proceso de aprobación de la orden de compra.

- Escenario 2: Establecer una política de tiempo máximo de aprobación de la solicitud de 5 días por parte de la junta o secretarías.

- Escenario 3: Escenario 1 + Escenario 2. En la tabla 7 se resumen los hallazgos de la simulación.

En esta fase se realiza un análisis coste-beneficio de cada una de las alternativas para poder soportar la toma de decisiones.

3.3.4. Optimización

En la fase de análisis de brechas del proceso (sección 3.1.2) se identificó que uno de los problemas del proceso de abastecimiento es que no se realiza una evaluación cuantitativa de los proveedores, por lo que no se dispone de la información para tomar decisiones de selección de un proveedor o de clasificar a los proveedores de acuerdo con su eficiencia.

Data Envelopment Analysis (DEA) es una técnica que utiliza la programación matemática para hallar la eficiencia relativa de los proveedores y esta ha sido aplicada para la evaluación y selección de proveedores [9][10]. Con esta técnica se pueden evaluar los proveedores con respecto a los tiempos de entrega, devoluciones por no conformidad y nivel de calidad de los productos teniendo en cuenta el precio del producto.

En la tabla 8 se presenta un ejemplo de la evaluación de 4 proveedores con respecto a tiempo, devoluciones y precio. El indicador de eficiencia evaluó como mejor al proveedor 3.

Al realizar un análisis de sensibilidad se pudo comprobar que si el proveedor 3 disminuye el porcentaje de entregas a tiempo del 98% al

Hallazgos de la simulación

Escenario 1: Si se elimina el paso de aprobación de la orden de compra se puede disminuir el tiempo a 43 días en promedio.

Escenario 2: Si se estable un tiempo máximo para la solicitud de compra de 5 días el tiempo se disminuye a 40 días en promedio.

Escenario 3: Si se elimina el paso de aprobación de la orden de compra y se establece un tiempo máximo de aprobación de la solicitud de 5 días se disminuye el tiempo a 35 días en promedio.

Tabla 7. Hallazgos de la fase de simulación.

	1 / Devoluciones	% Devoluciones	Entrega a tiempo	% Entrega a tiempo	Precio	Peso salidas	Peso entradas	Eficiencia
Proveedor 1	0,13	8%	0,90	90%	100	0,86	0,95	0,90
Proveedor 2	0,20	5%	0,95	95%	105	0,90	1,00	0,90
Proveedor 3	0,50	2%	0,98	98%	98	0,93	0,93	1,00
Proveedor 4	0,25	4%	0,92	92%	101	0,88	0,96	0,91
Peso	0,00011		0,95238		0,00952			

Tabla 8. Calificación de los proveedores con DEA.

	1 / Devoluciones	% Devoluciones	Entrega a tiempo	% Entrega a tiempo	Precio	Peso salidas	Peso entradas	Eficiencia
Proveedor 1	0,13	8%	0,90	90%	100	0,94	0,95	0,99
Proveedor 2	0,20	5%	0,95	95%	105	0,99	1,00	0,99
Proveedor 3	0,50	2%	0,85	85%	98	0,89	0,93	0,95
Proveedor 4	0,25	4%	0,92	92%	101	0,96	0,96	1,00
Peso	0,00000		1,04555		0,00952			

Tabla 9. Análisis de sensibilidad de la calificación de proveedores con DEA.

Hallazgos de la optimización

Mediante técnicas como *Data Envelopment Analysis (DEA)* se puede usar la programación matemática para hallar la eficiencia relativa de los proveedores para evaluarlos con respecto al precio, tiempos de entrega, devoluciones por no conformidad y nivel de calidad de los productos.

Tabla 10. Hallazgos de la fase de Optimización.

85% su eficiencia se ve afectada como se muestra en la **tabla 9**.

En la **tabla 10** se presentan los principales hallazgos de la optimización.

4. Conclusiones

Las técnicas de minería de procesos, simulación y optimización se pueden combinar con el objetivo de analizar y mejorar procesos de negocio. Éstas son herramientas complementarias que usadas en conjunto permiten el diagnóstico, análisis y rediseño de los procesos basados en datos reales de ejecución del proceso.

La minería de procesos provee técnicas para el descubrimiento del modelo real de ejecución del proceso y actualmente existen aplicaciones que soportan este análisis como son Disco y ProM, las que proveen herramientas gráficas de análisis, visualización y animación de los procesos. Las técnicas tradicionales de la minería de datos como árboles de decisión permiten predecir el desempeño en los procesos basados en encontrar las variables que inciden en los tiempos de ciclo.

La simulación se beneficia en gran manera de la aplicación previa de las técnicas de minería

de procesos, dado que ésta le puede proporcionar los parámetros y datos que son necesarios para la construcción del modelo de simulación basado en los datos de ejecución real del proceso. La simulación permite probar diferentes escenarios con respecto a las alternativas de mejora del proceso antes de su implementación, por lo que constituye una herramienta valiosa para la toma de decisiones.

Referencias

- [1] A. Rozinat. *Process Mining: conformance and extension*. PhD. Thesis. Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2010.
- [2] A. Rozinat, R. Mans, M. Song. Discovering simulation models. *Information Systems*, 34, pp. 305-327, 2009.
- [3] L. Maruster, L. Van Beest. Redesigning business processes: a methodology based on simulation and process mining techniques. *Knowledge and Information Systems*, 21, pp. 267-297, 2009.
- [4] P. Harmon. *Business Process Change*. Morgan Kaufmann, Burlington, 2007.
- [5] W.M.P. Van der Aalst, A. Weijters, L. Maruster. Workflow mining: discovering process models from event logs. *IEEE Transactions on*

Knowledge and Data Engineering 16(9): pp. 1128-1142, 2004.

[6] A. Weijters J. Ribeiro. *Flexible heuristics miner*. BETA working Paper Series, Eindhoven University of Technology, Eindhoven, 2010.

[7] A. Medeiros, A. Weijters, W.M.P. Van der Aalst. Genetic process mining: An Experimental Evaluation. *Data mining and Knowledge Discovery* 14(2): pp. 245-304, 2007.

[8] C. Stahl. *Modeling Business Process: A Petri Net-Oriented Approach*. The MIT Press, Cambridge, 2011.

[9] Y. Chen. Structured Methodology for supplier selection and evaluation in a supply chain. *Information Sciences*, 181, pp. 1651-1670, 2011.

[10] M. Zeydan, C. Colpan, C. Cobanoglu. A combined methodology for supplier selection and performance evaluation. *Expert Systems with Applications* 38, pp. 2741-2751, 2011.

Notas

¹ Algunos datos del caso de estudio han sido modificados por motivos de privacidad y para ejemplificar la aplicación de las herramientas.

² <<http://es.wikipedia.org/wiki/SPSS>>.