



## **SIMULADOR PARA EL APOYO AL PROCESO DE MEJORAMIENTO CONTINUO DE PYMES CON TOC**

**Hector Cadavid, Jaime Diaz, Gerardo Ospina**  
(Escuela Colombiana de Ingeniería)

*Resumo: Una gran parte de las pequeñas y medianas empresas Colombianas han mostrado, de acuerdo con cifras oficiales, unos muy bajos índices de supervivencia tras sus primeros años de creación. Esto es especialmente grave dado que dichas empresas son las que proveen la mayor parte del empleo formal del país, poniendo también en perspectiva los efectos futuros de los nuevos tratados de libre comercio. Considerando la urgencia de brindarle a los empresarios Colombianos herramientas que les permita mejorar la productividad de sus empresas para afrontar mejor la competencia extranjera, en este artículo se presenta una herramienta de simulación de procesos de manufactura diseñada específicamente para ayudar a la transferencia de la metodología de mejoramiento continuo TOC (teoría de restricciones) a la pequeña y mediana empresa, y a mitigar uno de los mayores riesgos asociados a esta tarea: la resistencia al cambio.*

*Palavras-chaves: Gestão; Qualidade; Fornecedor; Engenharia; Suprimento; Construção; Petróleo; Gás.*

## Introducción

La dinámica de los mercados mundiales ha hecho que el Estado Colombiano se vaya integrando, a través de los tratados de libre comercio (TLC), a la globalización de la economía. Sin embargo, a pesar de todos los beneficios que esto conlleva para las naciones involucradas, es claro que la competencia entre productores del primer mundo como Estados Unidos, y los del tercer mundo, como Colombia, es muy desigual, principalmente por la falta de acceso de estos últimos a las tecnologías, información y conocimiento requeridos para ser igual de eficientes que sus competidores extranjeros (Stiglitz, 2006) . Un atenuante importante para el reto que representan los TLCs a las PyMES Colombianas, es el hecho de que antes de la entrada en vigencia de algunos de los de mayor impacto proyectado, como el Estados Unidos, ya se tenía evidencia de la vulnerabilidad de este tipo de empresas, ya que para 2011, según Franco et al. (2013) se tuvo una tasa de cierre de empresas (respecto al número de empresas creadas) del 52% (39.327 contra 75.349) .

Considerando que las PyMEs Colombianas representan aproximadamente el 96% del total de empresas nacionales, y generan de cerca del 66% del empleo a nivel nacional (Montoya et al., 2010), es urgente que desde diferentes sectores del país, en especial el académico, se brinden herramientas que permitan a la pequeña y mediana empresa Colombiana reducir su brecha -en cuanto a capacidad productiva se refiere- con sus competidores extranjeros. Aunque hay muchas factores que se deben trabajar para apoyar a los empresarios (facilidad de acceso a créditos para mejorar la tecnología, mejoramiento de la infraestructura vial, etc), un punto clave que se debe atacar es la poca experiencia y falta de habilidad gerencial de muchos de éstos (Silva et al., 2014) . Particularmente, resultaría estratégico que las pequeñas y medianas empresas pudieran apropiarse y aplicar las metodologías de mejoramiento productivo ampliamente probadas en las grandes empresas como lo son 6-Sigma, Lean y TOC (Theory of Constraints).

Para tal fin, en este artículo se describe una herramienta de simulación de procesos de manufactura diseñada para apoyar la incorporación de la teoría de restricciones en empresas manufactureras, enfocada a mitigar la resistencia al cambio de los empresarios (causada por la incertidumbre y los posibles riesgos de la toma de decisiones gerenciales) al permitir proyectar los efectos de los cambios en las políticas que afecten el trabajo dentro de la planta.

Esta herramienta contempla, a nivel conceptual, un modelo computacional de simulación de manufactura basado en sistemas multiagente, y a nivel aplicado, una implementación de dicho modelo, una herramienta de análisis de los resultados de la simulación, y un esquema de aplicación que sugiere cómo apoyarse en la herramienta para enriquecer los pasos de enfoque de TOC. A diferencia de herramientas similares, en los que se ha venido aplica la simulación por computador a los problemas de la industria, y en particular los de las manufactureras, la aquí descrita permite:

- Asistir en la construcción del flujo de los procesos de manufactura, en especial para aquellas empresas en las que por el número de puestos de trabajo y referencias producidas, los mismos son complejos de ser identificados.
- Apoyar la identificación de posibles restricciones dentro de los procesos de manufactura, siguiendo los criterios de TOC.
- Evaluar el impacto de las decisiones gerenciales con diferentes flujos, políticas, o programaciones de planta, sin necesidad de manipular directamente la herramienta de simulación.

El resto de esta artículo se estructura de la siguiente manera: en la sección 1 se hace una breve descripción de los fundamentos de la teoría de restricciones. En la sección 2 se describe la situación de las PyMEs Colombianas en la actualidad y las problemáticas que dificultan la transferencia de metodologías como TOC a las mismas. En la sección 3 se describen las generalidades del modelo de simulación, la herramienta de análisis, y la guía sugerida para usarla en una metodología TOC. En la sección 4 se describe el enfoque metodológico utilizado para llegar al modelo y a la herramienta de simulación. Finalmente, se describen los resultados obtenidos mediante el caso de estudio trabajado, las conclusiones y el trabajo futuro proyectado.

## **1. Teoría de restricciones**

TOC, o teoría de restricciones, es una metodología de mejoramiento continuo desarrollada para mejorar las ventajas competitivas de una empresa, tales como la relación costo/beneficio, la calidad de los productos, o el cumplimiento de los tiempos de entrega (Kasemset, 2011). Para lograr esto, la metodología plantea definir el sistema productivo de la empresa como una serie de procesos interdependientes que trabajan juntos para un objetivo común (que será, generalmente, producir cada vez más unidades que realmente representen dinero), y hace un símil de dichos

procesos a una cadena de eslabones, en la que su resistencia (o en este caso su desempeño) será, a lo sumo, igual a la resistencia del eslabón más débil (Eliyahu y Goldratt, 1993).

En el caso particular de los sistemas de manufactura, TOC considera como el eslabón más débil a aquellos procesos que relentizan la velocidad de producción a través del sistema (es decir, los cuellos de botella). Con el fin de optimizar este cuello de botella -o restricción-, el autor de TOC, Eliyahu y Goldratt (1993) planteó un proceso de mejoramiento continuo basado en la aplicación sistemática de cinco pasos de enfoque:

1. Identificar la restricción. En el caso de los sistemas de manufactura, será aquel proceso (o puesto de trabajo) que limita la velocidad total de la producción.
2. Explotar la restricción. Mejorar, con la menor cantidad de inversión posible, el proceso que es restricción, de manera que éste pueda alcanzar su máxima capacidad.
3. Subordinar la restricción. Una vez la restricción funciona a su máxima capacidad, los procesos que la anteceden son ajustados para que trabajen al ritmo de ésta, lo cual, aunque puede llegar a restringir las eficiencias individuales, finalmente beneficia la productividad global del sistema.
4. Elevar la restricción. En caso de que el desempeño del sistema -visto como un todo- aún no sea satisfactoria, se busca lograr capacidad adicional para la restricción mediante cambios más grandes, tales como la reorganización de los procesos, o las inversiones en máquinas o recursos humanos adicionales.
5. Volver al primer paso. Al ser estos unos pasos de enfoque para un proceso de mejoramiento continuo, una vez se han superado las limitaciones de la restricción el desempeño global del sistema es reevaluado para buscar la nueva restricción, para igualmente explotarla, subordinarla, y elevarla.

A pesar de tener ya más de dos décadas, la vigencia de la teoría de restricciones se hace evidente por los trabajos académicos que se siguen documentado al rededor del mejoramiento de ámbitos productivos (Xu y Xu, 2010; Kohli y Gupta, 2010; Gupta y Sharma, 2013), e incluso en ámbitos de otra naturaleza, tales como procesos administrativos gubernamentales (Knaggs et al., 2012), o procesos de negocio BPM (Rhee et al., 2010). En el contexto Colombiano, igualmente se ha documentado la efectividad de dicha metodología cuando ha sido aplicada en la pequeña y mediana industria nacional (Gonzalez et al., 2003; Calvachi Prieto et al., 2013).

## 2. Competitividad de las PyMES y el contexto de los TLC

El paro agrario Colombiano del año 2013, producto de una iniciativa popular de miles de campesinos enormemente afectados por los TLC, es una clara radiografía de cómo se puede llegar a agudizar el conflicto social Colombiano en la medida que estas políticas de liberalización comercial sigan golpeando a la industria y al agro (Forero y Urrea, 2013; Salcedo et al., ).

Este claro detrimento del sector agrícola, sumado al fenómeno del desplazamiento forzado por el conflicto interno Colombiano, conduce a otra problemática nacional: los altos índices de desempleo en el sector urbano. Los altos niveles de migración desde el sector rural han llevado a la creación de grandes zonas marginales en las ciudades, en donde sus habitantes deben resignarse a una vida de condiciones precarias, debido a que las fuentes de trabajo disponibles resultan siendo insuficientes (Perez Correa y Perez Martinez, 2012).

Dado que mejorar las estadísticas de la tasa de creación y de tiempo de vida de las PyMEs (entre otras) es esencial para reducir las tasas de desempleo en el sector urbano, es muy importante identificar las causas para fenómenos como la proporción de creación y cierre de PyMEs documentada en 2011, donde aproximadamente, en un mismo año, por cada dos empresas consolidadas se cerró una (Franco et al., 2013).

Según la fundación para el desarrollo sostenible de Colombia FUNDES (Rodriguez, 2003), aunque las PyMEs Colombianas por lo general son creadas por personas que tienen un excelente conocimiento del oficio al rededor del cual gira la empresa, las mismas tienen un conocimiento y unas habilidades en gestión eminentemente empíricas, limitadas a su experiencia del quehacer del día a día. Según Franco et al. (2013), como resultado de lo anterior, y de que las empresas son creadas principalmente para resolver las necesidades económicas urgentes, éstas nacen con baja competitividad, sin estrategias y sin una visión a largo plazo que les permita -a pesar del amplio mercado que se puede explotar a nivel nacional- perdurar en el tiempo. Adicionalmente, según Silva et al. (2014), los gerentes de la PyMEs muchas veces no tienen los elementos técnicos para realizar buenas negociaciones en cuanto a precios y plazos de entrega se refiere, lo que los puede llevar a círculos viciosos como el de la figura 1, en el que el empresario, intentando subsistir el día a día, termina endeudándose cada vez más, hasta llegar a la quiebra.



**Figura 1: Círculo de endeudamiento por mal manejo de los plazos de entrega.**

Considerando lo anterior, en donde la falta de habilidades y herramientas gerenciales de los empresarios se puede ver como posible causa de la alta tasa de mortalidad de las empresas, la pregunta que dio origen a este proyecto es: por qué las metodologías de gestión como TOC (u otras relacionadas, como 6-Sigma y Lean), cuya efectividad ha sido demostrada en grandes empresas Colombianas ("Colombiana Venus", 2012;"El mejor secreto", 2012), y cuyo enfoque es mejorar a partir de la capacidad instalada (es decir, sin mayores inversiones adicionales) no han tenido una mayor difusión ni aplicación en las PyMEs de este país? .

De lo expuesto anteriormente, se puede asociar este fenómeno -en parte- a la simple falta de formación y de conocimiento en temas gerenciales de los empresarios Colombianos. Sin embargo, en el caso de los empresarios que sí tienen acceso a este conocimiento, se debe resaltar *la resistencia al cambio* como un factor que restringe las posibilidades de mejoramiento de sus empresas, de acuerdo con lo expuesto por autores como Soriano y SaberPlus (2008), y a la experiencia propia como consultor TOC de uno de los coautores de este artículo. A su vez, como posibles causas de la resistencia al cambio, el presente trabajo considera dos posibles causas: la incertidumbre y los eventuales riesgos a los que se ven sometidos los empresarios al momento de tomar decisiones basado en metodologías como las antes mencionadas.

### **3. Modelo computacional de simulación**

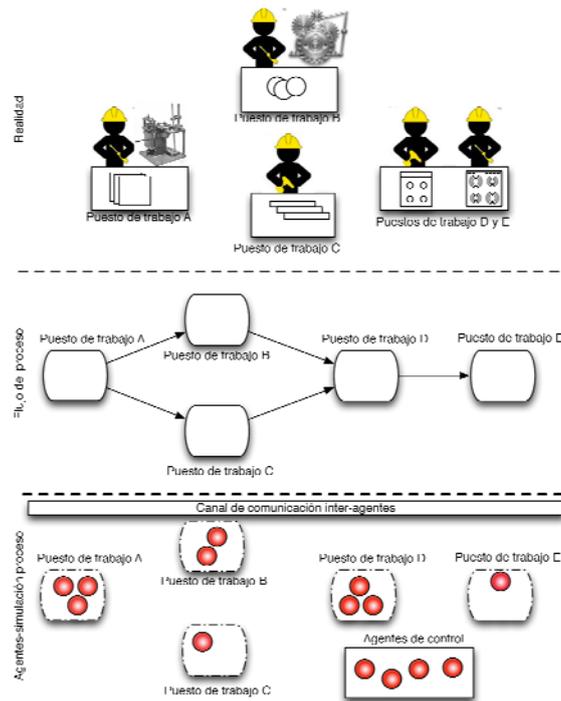
El modelo computacional de simulación planteado para lograr la identificación de los efectos de la toma de decisiones gerenciales en un determinado proceso de manufactura, se basa en el principio de los sistemas multiagente. En este se plantea un sistema computarizado de múltiples agentes o entidades que interactúan entre sí -con cierto grado de autonomía e inteligencia-, dentro de un mismo ambiente (Davidsson, 2001), y que tienen conocimiento de cómo responder a determinados

tipos de eventos. Dentro de los beneficios propios de los sistemas multiagente que motivaron su uso para el presente proyecto se encuentran:

- La naturalidad que ofrece para modelar el sistema a ser simulado (Sumari y cols., 2013). Esto resulta fundamental teniendo en cuenta que se esperaba que el modelo computacional se pudiera generar a partir de los datos de la realidad con la menor intervención humana posible.
- La posibilidad de explotar más la capacidad de cómputo de la máquina que realice la simulación, a través de la paralelización, ya que por definición los agentes funcionan de forma concurrente (Ferscha y Tripathi, 1998; Davidsson, 2001). La naturaleza concurrente de los sistemas multiagente ofrece, por un lado, una mejor expectativa de desempeño, y por el otro, facilitar su escalabilidad (eventualmente mejorar el desempeño de la simulación incorporando más máquinas).
- El poder usar plataformas de sistemas multiagente más orientadas al desempeño que a la presentación, con lo que se podrán realizar simulaciones más grandes y complejas, en un menor tiempo (sin que el usuario tenga que estar atento a la simulación como tal).

Tal como se muestra en la figura 2, y basado en lo planteado en trabajos previos (Ruiz et al., 2006; Vokvrinek et al., 2005), la simulación de un proceso de manufactura se plantea en términos de un conjunto de agentes que, individualmente o en grupo, representan algunos de los componentes de un flujo de un proceso, el cual a su vez corresponde a la situación identificada dentro de una planta de manufactura.

En el ejemplo ilustrado, un puesto de trabajo, compuesto por un empleado y una máquina, puede representarse por dos o más agentes que responden a diferentes eventos propios de este tipo de puesto, como por ejemplo, la recepción de pedidos, las respuestas a solicitudes de materia prima, un fallo reportado en la máquina, la inasistencia del operario, el cambio en el desempeño del operario a causa de la manera como es pedido, etc. Una vez los agentes son definidos e iniciados, éstos, a través de su propio protocolo de comunicaciones, empiezan a interactuar entre sí, de manera que a medida que el tiempo simulado avanza, el comportamiento esperado en la realidad para el proceso emerge.



**Figura 2: De la realidad a la simulación: de la realidad se infiere un flujo del proceso. Posteriormente, se construye el conjunto de agentes que representará los diferentes componentes dicho proceso (personas, máquinas, etc), además de otros agentes propios del simulador, encargados de realizar diferentes tareas propias de la simulación.**

La implementación del modelo de sistemas multiagente planteado anteriormente se realizó adaptando éste a los conceptos de la plataforma JADE (F. Bellifemine et al., 2008; F. L. Bellifemine et al., 2007), los cuales incluyen: la forma de definir el comportamiento de los agentes, los canales y protocolos de comunicación, y la forma creación y puesta en ejecución del sistema de agentes.

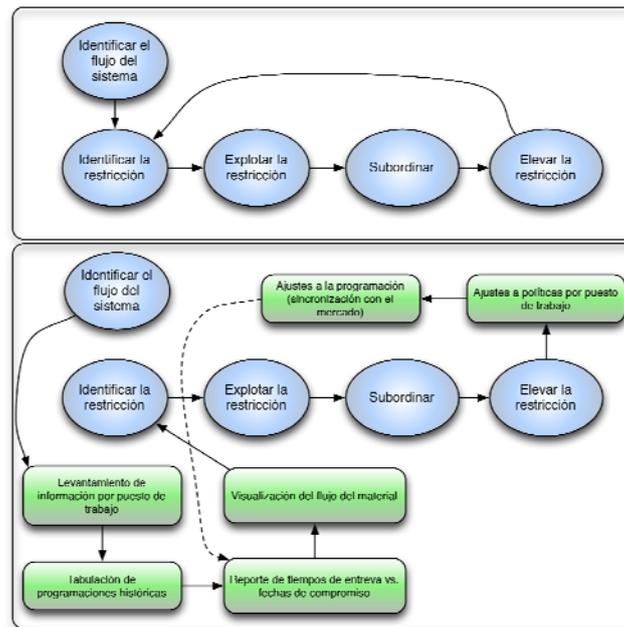
#### 4. Herramienta de simulación

La herramienta de simulación desarrollada busca, a partir del modelo computacional de simulación antes descrito, ofrecer una serie de funcionalidades que permita ayudar a superar los aspectos relacionados con la resistencia al cambio de los empresarios Colombianos mencionados anteriormente: la incertidumbre de los efectos de las decisiones gerenciales, y el riesgo que implica poner a prueba las mismas en una planta en plena producción. Por esto, y considerando los pasos de enfoque de la teoría de restricciones, se plantea el esquema de integración de tecnología-metodología de la figura 3, en los que sin perder la esencia de estos pasos, se incorpora un

conjunto de elementos que permitirán, por un lado, simplificar la labor de las consultorías con TOC, y por el otro, mitigar la resistencia al cambio al proveer los elementos de predicción y de análisis ante diferentes escenarios del mercado.

De esta manera, y considerando las funcionalidades provistas por la herramienta, se plantea integrar a los pasos de enfoque de un proceso de mejoramiento continuo con TOC:

- La identificación automática del flujo de los procesos a partir de la información que se obtenga desde cada puesto de trabajo. Esto resultaría especialmente beneficioso cuando los procesos son demasiado complejos para ser fácilmente identificados de forma analítica, o cuando los procesos no han sido documentados, y en su lugar están dispersos en el conocimiento de cada operario.
- La proyección del proceso antes identificado frente a diferentes escenarios del mercado para la generación de reportes de tiempos de entrega vs. fechas de compromiso. Dicha proyección, que consiste en identificar a través de la simulación cuando se cumplirán ciertas ordenes de producción (para una configuración de proceso determinada), inicialmente se aplicaría sobre los datos históricos de ventas (o programaciones de planta) de años anteriores. Con esto, se validaría la proximidad entre la simulación y realidades pasadas, para así identificar ajustes requeridos para los datos usados por la simulación. Posteriormente estas proyecciones permitirán explorar efectos de decisiones como: cambios en jornadas de trabajo, cambios en las políticas de 'setup' (cambio en la configuración de una máquina para trabajar con otra referencia), o la inclusión de nuevos recursos dentro del proceso.
- La visualización del comportamiento de los flujos de material de los diferentes puestos de trabajo a través del tiempo. A partir de una determinada configuración de los procesos de la planta, y un escenarios de mercado, se puede revisar gráficamente cómo se comportarían los diferentes recursos de la planta a través del tiempo, y cómo varía en éstos el volumen de sus trabajos en proceso (WIP). Con esto, se apoyaría el proceso de identificación -por ejemplo- de recursos que pudieran ser cuellos de botella, o de recursos con más capacidad de la realmente requerida que pudieran entrar a apoyar a otros procesos.



**Figura 3: Articulación de las herramientas del simulador con los pasos de enfoque de TOC.**

A continuación, se describe la funcionalidad lograda para cada uno de estos en la herramienta de simulación propuesta.

### ***Levantamiento de información por puesto de trabajo .***

Con el fin de apoyar la identificación de los flujos de los procesos de manufactura, la herramienta aquí presentada incluye una plantilla estándar para el levantamiento de información, orientada a definir qué labores se realizan en cada puesto de trabajo y con qué recursos. Para que este levantamiento de información no requiera de la curva de aprendizaje que siempre traen consigo las nuevas tecnologías, y así permitir que incluso desde la misma empresa se diligencie esta información, la plantilla se basa en una hoja de cálculo convencional, asistida por unas macros que se encargan del proceso de validación.

En la figura 4 se muestra parte de la información levantada para la empresa de manufactura utilizada como caso de estudio. De esta manera se levanta la información de cada puesto de trabajo (que son fáciles de identificar por el jefe de planta o por el mismo operario), aún sin conocer exactamente los flujos de los procesos de los que hacen parte.

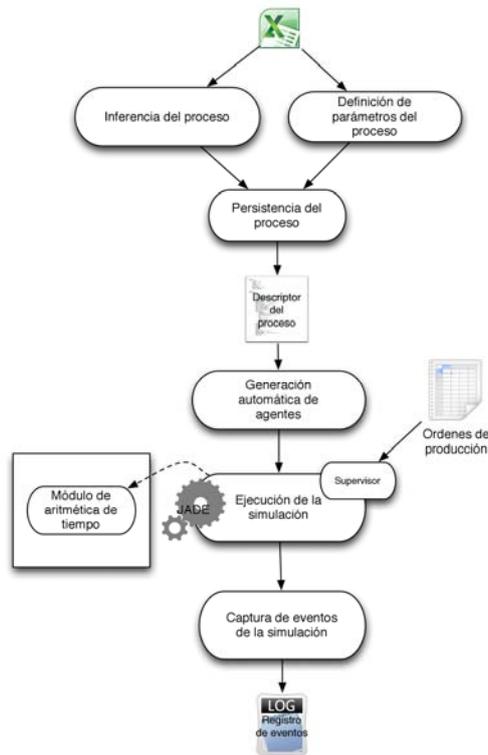
3	REF	MAQ	TPF	RRHH	ROUTS	NPROC	REFSUB	DEPS	WIP
4	REFERENCIA	RECURSO - MAQUINARIA	TIEMPO PROMEDIO FALLOS (hor)	RECURSO - RECURSO HUMANO	RECURSO-OUTSOURCINGPROV	NOMBRE PROCESO	REFERENCIA SUBPRODUCTO	DEPENDENCIAS(INSUMOS)	CANTIDADES WIP-INVENTARIO
5	P-814	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		DEFORMAR TORNILLO	DTO-5/16 2		9,790
6	P-814	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		ENSAMBLAR CUERPO/TO	E_C_TO_REPO	IC_LCR-C14, BJTC_T, ZRPOF	0
7	P-814	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		ENSAMBLE CUERPO/PALA	E_C_PA	IC_LCR-C14	0
8	P-814 N	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		DEFORMAR TORNILLO	DTO-5/16 2		0
9	P-814 N	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		ENSAMBLAR CUERPO/TO	E_C_TO_REM-3	IC_LCR-C14, BJTC_T, ZRPOF	0
10	P-814 N	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		ENSAMBLE CUERPO/PALA	E_C_PA	IC_LCR-C14, ZPA_LCR-C14	0
11	RT-40	BAUTAR	0.10	VICENTE RODRIGUEZ		DEFORMAR TORNILLO	DTO-5/16 2		0
12	BO-10 G	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		CORTAR PASADOR	CP_ACR-3/32		153,120
13	BO-16 G	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		CORTAR Y VICELAR PASA	CVP_ACR-5/32		92,120
14	ES-90	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		DOBLAR CUERPO	DC_LCR-C16	AC_LCR-C16	71,820
15	ES-95	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		DOBLAR CUERPO	DC_LCR-C14	AC_LCR-C14	0
16	ES-100	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		DOBLAR CUERPO	DC_LCR-C14	AC_LCR-C14	48,816
17	ES-120	COFUR	0.10	FRANK ALVAREZ		DOBLAR Y EMBUTIR CUER	AEC_LCR-C14	TT_LCR-C14	0

Figura 4: Hoja de cálculo usada para el levantamiento de información (sólo se muestran las primeras columnas para efecto de su legibilidad).

### Reporte de tiempos de entrega vs. fechas de compromiso.

Usando como insumo la información de cada puesto de trabajo, y el detalle de las órdenes de producción que se quieren simular (incluyendo la fecha de cumplimiento requerida por las mismas), el proceso descrito en la figura 5 muestra cómo se genera un reporte de los eventos, que según la simulación, ocurrirán hasta la finalización de dichas órdenes, lo cual contempla:

- Inferir los flujos del proceso de manufactura a partir de la información suministrada de cada puesto de trabajo, considerando las dependencias dadas por los insumos requeridos en cada uno de estos.
- Generar una instancia del modelo de simulación descrito anteriormente y ponerlo a correr hasta que se completen las órdenes de producción.
- Capturar el resultado final de la simulación, y todos los eventos intermedios (tales como los movimientos de materia prima, tiempos de producción de cada pieza intermedia, etc).



**Figura 5: Simulación de las órdenes de producción, a partir de los flujos de procesos inferidos.**

A partir del resultado de la simulación, la interfaz de la figura 6 muestra la información consolidada de cual -de acuerdo con la simulación y con los datos suministrados- sería aproximadamente el desfase entre las fechas de compromiso de las órdenes de producción y las fechas efectivas en las cuales éstas finalmente se cumplirían.

FECHA	REFERENCIA	CANTIDAD	FECHA ESTIMADA DE F...	FECHA REAL DE FINALI...	DELTA TIEMPO(HORAS)
01/01/2014	BO-10 G	17009	16/02/14 19:28:05	01/03/14 08:46:57	301
01/01/2014	BO-16 G	11680	16/02/14 20:37:47	05/03/14 03:30:06	390
01/01/2014	ES-90	18282	11/02/14 05:11:07	26/02/14 11:49:11	366
01/01/2014	ES-95	17022	14/02/14 15:53:25	28/02/14 03:06:46	323
01/01/2014	ES-100	16460	14/02/14 19:41:00	26/02/14 11:25:15	279
01/01/2014	ES-120	12748	16/02/14 19:15:00	01/03/14 20:16:42	313
01/01/2014	R-10	4467	17/02/14 03:36:34	08/03/14 11:02:18	463
01/01/2014	P-814	12835	16/02/14 18:24:20	06/03/14 04:24:16	417
01/01/2014	P-814 N	15061	14/02/14 17:34:52	28/02/14 00:36:43	319
01/01/2014	RT-40	1498	11/02/14 10:53:36	27/02/14 11:47:35	384
01/01/2014	RPL-10 N	253	14/02/14 21:00:38	28/02/14 18:22:19	333
01/01/2014	RP-30	7608	17/02/14 07:36:42	02/03/14 16:28:31	320
01/01/2014	SB-20	14648	16/02/14 08:59:27	06/03/14 22:11:15	445
01/01/2014	SBC-20	1313	10/02/14 19:32:13	25/02/14 00:13:10	340

**Figura 6: Reporte final de la simulación: tiempos de entrega estimados por la simulación vs. fechas de compromiso.**

### Visualización de flujos de materiales.

La herramienta de simulación incluye una interfaz de visualización que integra dos elementos: el flujo de los procesos inferido a partir de la información suministrada de los puestos de trabajo y los eventos registrados durante la simulación, de acuerdo con lo descrito en la figura 7. Con esta interfaz, además de poder explorar las dependencias y los flujos de cada referencia (ver figura 8), es posible visualizar la dinámica de los mismos a través del tiempo.

Con el fin de facilitar la identificación de los recursos que requieren de una especial atención dentro de la planta, esta interfaz permite la integración de alarmas visuales asociadas a valores estadísticos calculados para cada referencia procesada por cada puesto de trabajo. En el ejemplo de la figura 9 se muestra la interfaz de usuario configurada para mostrar alertas en amarillo y rojo de acuerdo a un volumen de inventario de los mismos (donde se alerta con rojo cuando los niveles son muy bajos). Una configuración alternativa permitiría alertar también, con colores, la proporción entre el volumen de WIP (trabajo en proceso) de un subproducto 'x' de un puesto de trabajo "A" y el volumen de WIP de un subproducto 'y', de un puesto de trabajo "B", que requiere a 'x' para su fabricación. En este caso, la alerta podría significar dos cosas: uno, que el puesto de trabajo "A" tiene demasiada capacidad, y está creando un inventario de piezas innecesariamente alto (que en términos de TOC sería un 'amortiguador' con una capacidad superior a la realmente requerida), o dos, que "B" por alguna razón (física o administrativa) es, potencialmente, una restricción del proceso.

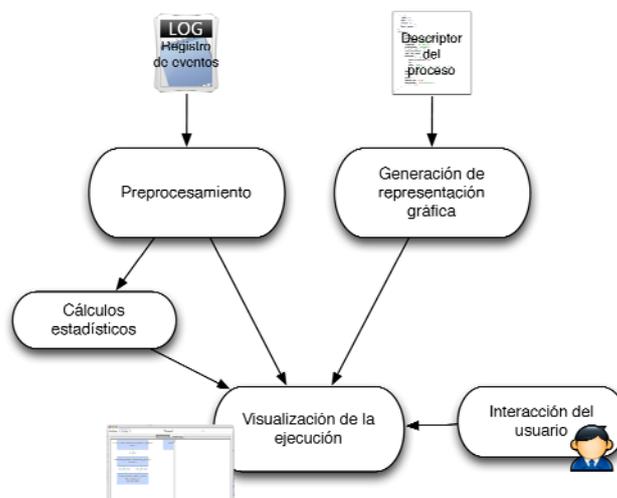


Figura 7: Generación de la visualización dinámica de la simulación.

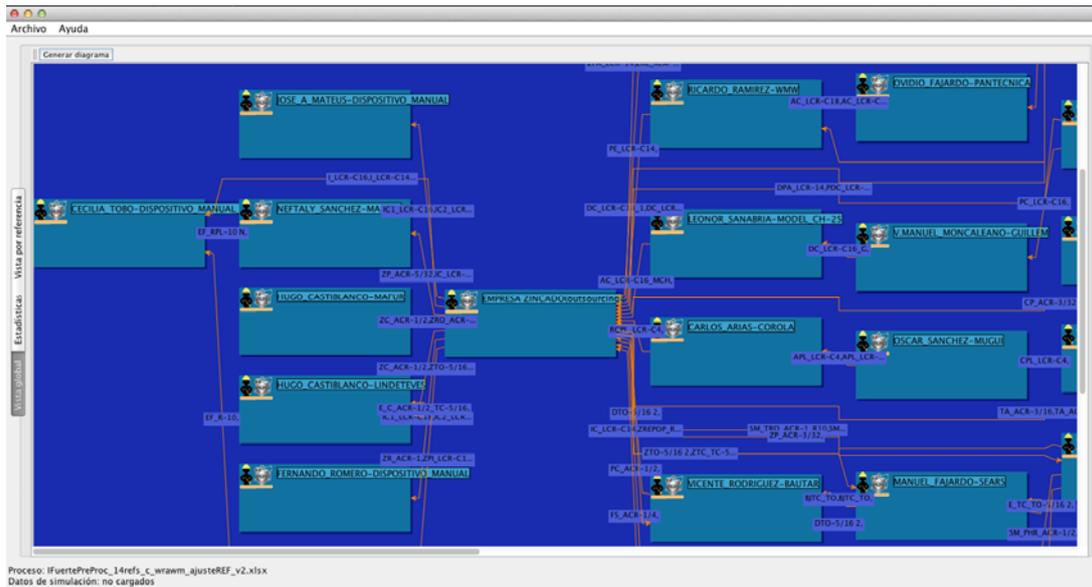


Figura 8: Visualización de todos los flujos de la planta.

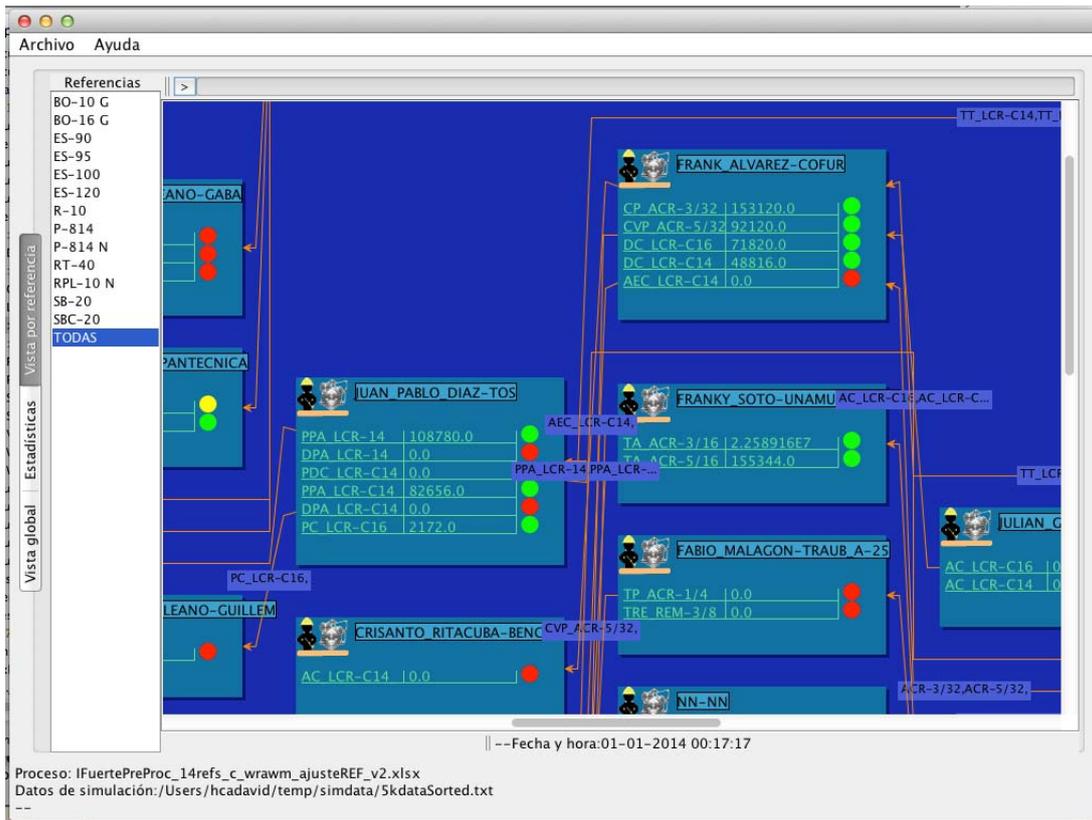


Figura 9: Visualización del flujo de material entre los puestos de trabajo a través del tiempo, incluyendo alertas visuales.

## 5. Metodología

El resultado del trabajo acá descrito puede considerarse como producto de una investigación de carácter aplicado, basado en un trabajo de campo. Igualmente, es resultado de un ejercicio de trabajo interdisciplinario entre profesores del programa de Ingeniería de Sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería y un profesor catedrático del programa de Administración de esta misma institución, quien también se desempeña como consultor certificado TOC.

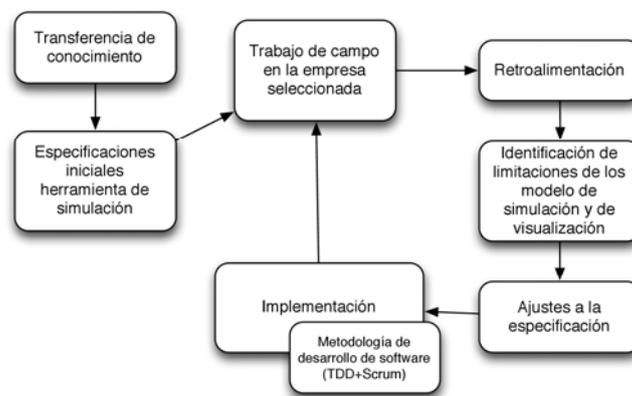
Aunque en una primera etapa del proyecto se contó con varias empresas manufactureras comprometidas para realizar un trabajo de campo, posteriormente fue necesario concentrar el trabajo en sólo una de estas (una empresa Bogotana productora de herrajes metálicos), dado que por su alta complejidad, además de requerir mucha dedicación, se consideró como un caso que contendría a muchos otros casos menos complejos. Dicha complejidad, está dada principalmente por :

- El número de referencias manejadas por la empresa son cerca de doscientas, y el número de empleados involucrados en su producción es de cerca de 60 personas. En el contexto del modelo de simulación planteado, este es un escenario en el que, por el número de agentes requeridos, se pone realmente a prueba el desempeño del simulador.
- La velocidad con la que se crean algunas de las referencias es del orden de segundos, lo que exige al modelo de simulación utilizar una escala de tiempo muy pequeña que es, por el número de eventos generados (del orden de millones por cada puesto de trabajo en sólo un par de meses), costosa computacionalmente.



**Figura 10: Piezas de trabajo en proceso de la empresa productora de herrajes metálicos. Algunas piezas son fabricadas a una tasa del orden de miles de unidades por día, y los inventarios como el de la imagen son del orden de millones de unidades.**

La metodología de trabajo utilizada para llegar a la versión actual del simulador, se sintetiza en la figura 11. Partiendo del conocimiento del consultor TOC, se llegaron a las especificaciones iniciales de cual sería un simulador que realmente apoyara la transferencia de TOC a las PyMES, teniendo en cuenta los factores de resistencia al cambio antes mencionados. Posteriormente, mediante un trabajo consecutivo con la empresa, se ha dado una evolución de cada uno de los componentes de la simulación: el esquema de captura del proceso, el esquema de simulación, y el esquema de análisis del resultado de la misma. Dentro de las labores que implican la implementación de los ajustes requeridos para el simulador se ha seguido una metodología de desarrollo de software basada en SCRUM y en las prácticas de desarrollo guiado por pruebas.



**Figura 11: Metodología de trabajo (aún en marcha) para el desarrollo y evolución del simulador.**

## Trabajos relacionados

Como herramientas relacionadas, se pueden mencionar los paquetes de software orientados a la simulación de procesos (entre ellos los de manufactura) tales como ProModel<sup>1</sup>, Vensim<sup>2</sup>, y AnyLogic<sup>3</sup> que corresponden a los modelos de simulación basados en eventos discretos, sistemas dinámicos, y sistemas multiagente respectivamente.

El paquete AnyLogic podría considerarse como una de las mejores opciones en lo que a simulación se refiere. Sin embargo, ni esta, ni las otras dos alternativas mencionadas cumplirían con lo que se planteó para el presente proyecto, dado que:

<sup>1</sup> <http://www.promodel.com/products/processsimulator/>

<sup>2</sup> <http://vensim.com/>

<sup>3</sup> <http://www.anylogic.com/>

- En el caso de las herramientas basadas en sistemas dinámicos, la complejidad para modelar un sistema -en especial cuando es grande- es muy alta (Sumari y cols., 2013).
- Se quería que la herramienta desarrollada no requiriera de un entrenamiento especializado para su uso. En el caso de herramientas como las mencionadas, éstas están orientadas por una interfaz de usuario que tiene una curva de aprendizaje bastante alta, en especial si se ofrece a usuarios no muy familiarizados con el manejo de herramientas de software. La herramienta desarrollada contempla, como se menciona anteriormente, un módulo que se encarga de la inferencia (a partir de datos tabulados en una hoja de cálculo) y la generación del flujo que será simulado, de manera que la curva de aprendizaje es mínima,
- Dado que herramientas como las mencionadas están muy orientadas a la representación gráfica de la simulación, realizar proyecciones para periodos muy largos de tiempo, como meses o años, requeriría de mucho tiempo de ejecución de la simulación (y de atención por parte del usuario a la interfaz gráfica de la herramienta). Esto es aún más evidente cuando las actividades simuladas utilizan operaciones realizadas en fracciones de tiempo del orden de minutos o segundos.
- Se espera poder dar acceso a la herramienta de simulación -en el marco de un servicio de consultoría- a través de un mecanismo de arrendamiento bajo la figura de Software como Servicio. Herramientas como las mencionadas, sólo permiten su uso a través de su interfaz de usuario estándar, lo que haría imposible contemplar su uso bajo este mecanismo.

## Conclusiones y trabajo futuro

La herramienta de simulación acá descrita permitirá que los empresarios entiendan mejor el funcionamiento de su empresa, y que visualicen y validen fácilmente las bondades de las decisiones gerenciales que resultan de un proceso de mejoramiento basado en metodologías como TOC. A la fecha de creación de este artículo la herramienta está siendo utilizada para asistir formalmente el trabajo de consultoría con TOC a la empresa de fabricación de herrajes antes mencionada, para lo cual se han realizado simulaciones, inicialmente, con la información de las 20 referencias que, según el análisis del gerente, representan cerca del 80% de los ingresos.

Es de resaltar que por la complejidad de los procesos de estas 20 referencias, las mismas requirieron diligenciar cerca de 350 filas en la hoja de cálculo usada para ingresar los detalles de cada puesto de trabajo. Esto mismo, con herramientas de simulación como las mencionadas la sección de trabajos relacionados, además de requerir un entrenamiento para quien levanta la

información (o contar con un experto para hacerlo), habría tomado varias veces el tiempo destinado al trabajo con la hoja de cálculo, considerando que hubiera sido necesario identificar los flujos completos, plasmar y conectar cada recurso, e incluso organizar gráficamente los elementos para que los mismos resulten legibles. Por otro lado, a pesar de que aún no se han realizado las pruebas con la totalidad de referencias de la empresa en mención (cerca de 200), con las realizadas hasta ahora se han dado indicios de un muy buen desempeño (a lo sumo un par de minutos para simular la fabricación de cientos de miles de piezas, que en la escala de tiempo real toma varios meses).

Aunque este trabajo tiene como propósito facilitar la incorporación de TOC a la pequeña y mediana empresa, dado que sus especificaciones y funcionalidad están orientadas a articularse con esta metodología de mejoramiento continuo, el mismo sería igualmente aplicable como una herramienta general de apoyo a la toma de decisiones, en particular aquellas relacionadas con cómo programar la planta ante una determinada proyección de comportamiento del mercado. Para esto se tiene proyectado continuar con la evolución del software a través del trabajo de campo con otras empresas manufactureras cuyos procesos contemplen aspectos aún no considerados por el modelo de simulación propuesto.

Por otro lado, y aprovechando los acercamientos que se han logrado con agrupaciones de PyMEs Colombianas como ACOPI<sup>4</sup>, se espera que este proyecto, en un futuro cercano, redunde en un servicio al que puedan acceder los empresarios en el marco de un servicio de consultoría con TOC.

## **Agradecimientos**

Los autores agradecen el apoyo de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito en el desarrollo de esta fase del proyecto con recursos de la convocatoria interna de investigación de la vigencia 2012-2013.

## **Referencias**

---

<sup>4</sup> Asociación Colombiana de Mediana y Pequeña Industria

- Bellifemine, F., Caire, G., Poggi, A., y Rimassa, G. (2008). JADE: a software framework for developing multi-agent applications. lessons learned. *Information and Software Technology*, 50(1), 10–21.
- Bellifemine, F. L., Caire, G., y Greenwood, D. (2007). *Developing multi-agent systems with JADE* (Vol. 7). Wiley. com.
- Calvachi Prieto, B. N., Gonzalez Vargas, F. A., y cols. (2013). Teoría de las restricciones (TOC): modelo de gestión gerencial para el crecimiento productivo de las pymes en colombia. caso aplicado a CIDMA SAS.
- Colombiana venus prepara su primer envío de zapatos a EE. UU. <http://www.portafolio.co/negocios/colombiana-venus-prepara-su-primer-envio-zapatos-ee-uu>. (2012). Descargado de <http://www.portafolio.co/negocios/colombiana-venus-prepara-su-primer-envio-zapatos-ee-uu>
- Davidsson, P. (2001). Multi agent based simulation: beyond social simulation (pp. 97-107). Springer Berlin Heidelberg.
- Eliyahu, M., y Goldratt, J. C. (1993). *La meta. un proceso de mejora continua*. España, Ediciones Díaz de Santos, SA.
- El mejor secreto de las empresas exitosas. <http://www.dinero.com/gestion/articulo/el-mejor-secreto-empresas-exitosas/158770>. (2012). *Dinero.com*. Descargado de <http://www.dinero.com/gestion/articulo/el-mejor-secreto-empresas-exitosas/158770>
- Ferscha, A., y Tripathi, S. K. (1998). Parallel and distributed simulation of discrete event systems.
- Forero, L., y Urrea, D. (2013). Colombia y TLC: entre la movilización y el conflicto. *Ecología política*(46), 129–133.
- Franco, W., Patricia, S., y cols. (2013). La competitividad de las pymes frente al TLC. enfrentando los riesgos del siglo XXI.
- Gonzalez, J. A., Ortegon, K., y Rivera, L. (2003). Desarrollo de una metodología de implementación de los conceptos de TOC (teoría de restricciones), para empresas colombianas. *Estudios Gerenciales*.
- Gupta, S., y Sharma, M. (2013). TOC-based TQM implementation: a case study of automotive supplier. *International Journal of Intercultural Information Management*, 3(4), 344–359.
- Kasemset, C. (2011, septiembre). A review on quality improvement and theory of constraints (TOC). En *Quality and reliability (ICQR), 2011 IEEE international conference on* (pp. 327 – 330). doi: 10.1109/ICQR.2011.6031735
- Knaggs, C., Pollard, S., y Wang, W.-l. (2012, septiembre). Applying theory of constraints in administrative process: An experiment from the U.S. government. En *Management science and engineering (ICMSE), 2012 international conference on* (pp. 2012 –2020). doi: 10.1109/ICMSE.2012.6414447
- Kohli, A. S., y Gupta, M. (2010). Improving operations strategy: Application of TOC principles in a small business. *Journal of Business & Economics Research (JBER)*, 8(4). Descargado de <http://journals.cluteonline.com/index.php/JBER/article/view/713>

- Montoya, A., Montoya, I., y Castellanos, O. (2010). Situación de la competitividad de las pyme en Colombia: elementos actuales y retos. *Agronomía Colombiana*.
- Perez Correa, E., y Perez Martinez, M. (2012). El sector rural en Colombia su crisis actual. *Cuadernos de desarrollo rural*(48).
- Rhee, S.-H., Cho, N., y Bae, H. (2010). Increasing the efficiency of business processes using a theory of constraints. *Information Systems Frontiers*. Descargado de <http://dx.doi.org/10.1007/s10796-008-9145-9> doi: 10.1007/s10796-008-9145-9
- Rodriguez, A. G. (2003). *La realidad de la pyme colombiana: desafío para el desarrollo*. Programa Mejoramiento de La Ial Fundes Colombia.
- Ruiz, N., Giret, A., y Botti, V. (2006, septiembre). Towards an agent-based simulation tool for manufacturing systems. En *Emerging technologies and factory automation, 2006. ETFA '06. IEEE conference on* (pp. 797 –804). doi: 10.1109/ETFA.2006.355417
- Salcedo, L., Pinzon, R., y Duarte, C. (s.f.). El paro nacional agrario: un análisis de los actores agrarios y los procesos organizativos del campesinado Colombiano.
- Silva, J. M., y cols. (2014). El impacto de las pymes frente al tratado de libre comercio entre Colombia y los estados unidos de américa.
- Soriano, Claudio L. “Los Cinco Pecados Capitales de las PYMES”. Saber Plus, S. L. Disponible en <https://jcvalda.wordpress.com/2009/06/09/los-cinco-pecados-capitales-de-las-pymes/> Consultado el 10 de Marzo de 2014
- Stiglitz, J. E. (2006). *Como hacer que funcione la globalización*.
- Sumari, S., Ibrahim, R., Zakaria, N. H., y Ab Hamid, A. H. (2013). Comparing three simulation model using taxonomy: System dynamic simulation, discrete event simulation and agent based simulation. *International Journal of Management Excellence*, 1(3), 54–59.
- Vokrinek, J., Pavlivcek, D., y Smerak, R. (2005). Simulation of manufacturing processes using multi-agent technology. *Intelligent Production Machines and Systems*, 461 — 466.
- Xu, J., y Xu, X. (2010, mayo). Theory of constraints: A review of its applications in supply chain management. En *E-business and e-government (ICEE), 2010 international conference on* (pp. 4977 –4980). doi: 10.1109/ICEE.2010.1250