

Simulación-optimización de un centro de distribución logístico basado en Flexsim®: Un caso de estudio

Juan P. Castellón Torres, Msc Industrial Engineering¹, Guillermo A. Duarte Suárez, BEng Industrial Engineering², Andrés S. García Álvarez, BEng Industrial Engineering³ and Diego A. Herrera Burgos, BEng Industrial Engineering⁴
^{1,2,3,4}National University of Colombia, Colombia, jpcastrellont@unal.edu.co, gduartes@unal.edu.co, asgarciaa@unal.edu.co, daherrerabu@unal.edu.co

Abstract– The current model introduces an approach to identify the best arrangement of operators and resources for a distribution center. The model takes into account variability in orders, deliveries and arrivals as well as internal processing. Through an event based simulation some performance measures such as service levels, throughput and lead time are tested and finally a linear optimization is released to get the minimum cost without neglecting a previously defined required performance.

Keywords- simulation, optimization. logistics, operations research, distribution center, deliveries.

I. INTRODUCCIÓN

El rápido crecimiento y aumento de la competencia son características del entorno que aluden a cualquier empresa, promoviendo el desarrollo de *core* empresariales basados en la calidad, eficiencia y eficacia.

Parte de este desarrollo tiene origen en la necesidad de tomar buenas decisiones con un bajo riesgo y apoyado en herramientas de bajo costo, incrementando los indicadores clave de desempeño como el retorno sobre la inversión. Las herramientas de apoyo más usadas en los sistemas productivos corresponden a la simulación y la optimización, las cuales se han desarrollado a lo largo de los años, permitiendo llegar a niveles de detalle aceptables para la proposición de soluciones.

El nivel de detalle con el que gozan estas herramientas hoy en día, ha llevado a que los costes computacionales puedan llegar a ser demasiado altos, por lo cual la integración de las dos herramientas podría representar una reducción de estos costes y la posibilidad de hallar una solución más eficiente.

En este paper, se trabajará uno de los problemas más comunes en los sistemas productivos, el cual consiste en la asignación de recursos, este tiene como objetivo buscar la mejor alternativa de asignación de operarios y máquinas, bajo criterios establecidos previamente.

El desarrollo de la solución está regido por el uso del software Flexsim®, integrando las herramientas de simulación y optimización bajo el concepto de simulación híbrida, reduciendo así la cantidad de experimentos a desarrollar en el software y proponiendo un modelo de solución para el problema.

La simulación híbrida o la simulación basada en optimización es un campo en el cual se integran los métodos de optimización dentro de los análisis de la simulación, lo que

permite la solución de problemas de optimización más grandes en tiempos aceptables. [1]

Este paper está compuesto por introducción, revisión del estado del arte, descripción del problema, análisis del sistema y datos de entrada, desarrollo del modelo, resultados y conclusiones.

II. ESTADO DEL ARTE

La herramienta de simulación se ha convertido en una potente técnica usada para el soporte de toma de decisiones [2], además de permitir obtener un análisis digital y en casos como Flexsim® un desarrollo 3-D [3]. A pesar del avance tecnológico, que se ha evidenciado a lo largo de la última década, aplicar los métodos de la simulación puede llegar a implicar un gasto de tiempo computacional muy alto, además de una lenta respuesta para posibles variaciones o réplicas futuras.

En el contexto de las redes de suministro, las técnicas de la simulación y optimización han jugado un papel importante para la administración (o manejo) no sólo de los agentes únicos (o unitarios – single) sino también de la red extendida a los productores, consumidores y participantes involucrados en la planificación de actividades [4]. Las aplicaciones de este enfoque denominado Supply Chain Management, se han fundamentado en la programación lineal, la programación estocástica, la programación dinámica, la simulación en sus paradigmas de eventos discretos, dinámica de sistemas y agentes, entre otras técnicas de la investigación de operaciones [5].

Las relaciones cada vez más complejas entre las organizaciones, en el marco del Supply Chain Management, han motivado en la comunidad académica el desarrollo de nuevas áreas de investigación en la simulación y optimización, que migren del análisis de unidades productivas aisladas, hacia la optimización global de los costos, tiempos y capacidades de las operaciones logísticas en redes de suministro [6]. Sin embargo, existen aún brechas en el conocimiento, tales como la ausencia de modelos de redes de suministro que consideren la naturaleza perecedera de los productos [7], la convergencia de método de simulación y optimización en el análisis de sistemas de múltiples interrelaciones y la inclusión del componente estocástico de los sistemas en modelos exactos [8].

Uno de los puntos focales de las redes de suministro son los centros de distribución logísticos, que constituyen instalaciones modernas, centros empresariales de flujo de negocios, flujo de material y flujo de información [9], en estos se planifica el esquema de operación de distribución, mediante la programación efectiva de los recursos operativos relevantes.[10]

La distribución apropiada de recursos y operarios en un centro de distribución logístico es una tarea de planeación, la cual puede ser compleja y sensible en la estrategia financiera de la empresa. En caso de no estimar todos los parámetros requeridos con el nivel de detalle suficiente, pueden resultar en valoraciones negativas de las medidas de desempeño como pérdidas económicas, nivel de servicio de entregas insatisfecho, nivel de servicio de recepción insatisfecho, costos excesivos, etc.

La simulación per se ofrece la estimación de variables de respuesta en intervalos de confianza para el estado del sistema en estados estacionarios o transientes [11], niveles de productos individuales para fluctuaciones de demanda sujeto a las restricciones de capacidad del centro de distribución.[12] Este problema se puede solucionar por métodos analíticos o por simulación dependiendo del nivel de complejidad que se evidencia en el problema. La simulación se usa preferentemente cuando una solución analítica no puede proveer valores apropiados para la evaluación de desempeño. [13]

Sin embargo, las pruebas o experimentos de variaciones de recursos en tiempo real suelen ser costosas o inviábiles debido a las condiciones iniciales del problema, además de ser muy poco flexibles, por ende, los métodos de simulación suelen ser usados para planear, diseñar, analizar y transformar un centro de distribución logístico [14]. sin embargo, para encontrar el nivel óptimo de operación se han desarrollado algoritmos que involucran modelos de optimización en la simulación lo que se denomina simulación - optimización [15].

De acuerdo con [16], la simulación-optimización provee una aproximación estructurada para determinar los valores óptimos de parámetros de entrada, donde el óptimo es medido por una función de variables de salida asociadas al modelo de simulación.

Conceptualmente se tiene un modelo de simulación por eventos discretos con p parámetros determinísticos de entrada $\Psi \equiv (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p)$ y con q variables estocásticas de salida $Y \equiv (y_1, y_2, \dots, y_q)$ donde $Y = Y(\Psi)$.

El objetivo consiste en minimizar $F(\Psi) = E[C(Y)]$, donde $C(Y)$ combina las q variables de salida en una única variable estocástica de salida.

En este paper, se desarrolló el problema por medio del software Flexsim®, el cual es descrito como una herramienta que ayuda a ingenieros y planeadores a tomar decisiones inteligentes en el diseño y operación de un sistema, [10] además este tipo de problemas es pensado como un sistema de

eventos discretos [17]. El modelo de simulación tiene como variable de desempeño $C(Y)$ el costo de la operación así como el nivel de servicio, teniendo como parámetros de entrada $\Psi \equiv (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_p)$ los valores óptimos en la configuración de los recursos para la operación del centro logístico.

La construcción de modelos de Flexsim® consisten en cinco pasos básicos según Oleskow-Szlapka, desarrollar un layout, conexiones entre objetos, detalle de los objetos, correr el modelo y revisión del output. [3] Sin embargo, en este paper se desarrollaron pasos adicionales, soportados por la metodología de diseño de experimentos propuesta por Montgomery y métodos de optimización. Esto con el objetivo de desarrollar experimentos bajo un proceso robusto que sea afectado en forma mínima por fuentes de variabilidad externas. [18]

III. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La determinación del número de recursos y trabajadores asignados a un sistema productivo es una decisión que tiene implicaciones directas en los costos y los ingresos.

La simulación surge como una herramienta idónea para evaluar el comportamiento del sistema en el largo plazo y permite observar el cambio marginal en las medidas de desempeño establecidas ante la variación de los recursos.

Lo anterior, ofrece una gran versatilidad a la hora de evaluar escenarios, pero plantea el reto de encontrar un arreglo de recursos que optimice las medidas de desempeño de interés para la toma de decisiones.

Un enfoque de simulación híbrida donde se pruebe una cantidad n de escenarios y mediante técnicas de optimización se encuentre el **i-ésimo** escenario que optimice la función objetivo definida, constituye una técnica valiosa para la toma de decisiones.

En el presente caso de estudio se realiza un análisis para estimar el número óptimo de operarios requeridos para llevar a cabo la operación de un centro de distribución manteniendo niveles de servicio superiores al 90%.

La distribución interna del centro de distribución (CEDI) corresponde a zonas de recepción y despacho, zonas de almacenamiento temporal, zonas de almacenamiento, zonas de alistamiento de pedidos y zonas de almacenamiento temporal de pedidos.

El flujo de productos al interior del CEDI comienza y termina con las zonas de recepción y despacho las cual tienen la capacidad de atender hasta 11 vehículos al mismo tiempo, en estas zonas se realiza la recepción y revisión de órdenes de compra. Luego, los operarios encargados de realizar el transporte desde la zona de recepción a la zona de almacenamiento temporal se encargarán del transporte de las órdenes, desde la zona temporal, deberán ser organizados y clasificados en la zona de estantes.

Así mismo los pedidos que se van generando al CEDI, deberán ser despachados, y los operarios realizarán el transporte entre la zona de almacenamiento y la zona de

almacenamiento temporal, desde allí serán llevados a la zona de alistamiento donde serán clasificados según el pedido recibido. Por último serán transportados a la zona de almacenamiento temporal de pedidos y allí deberán esperar hasta que sea atendido un vehículo de despacho con óptimas condiciones para transportar los productos.

La Fig. 1 presenta una aproximación del layout del centro de distribución, enfocada a cantidades y capacidades de las diferentes zonas.

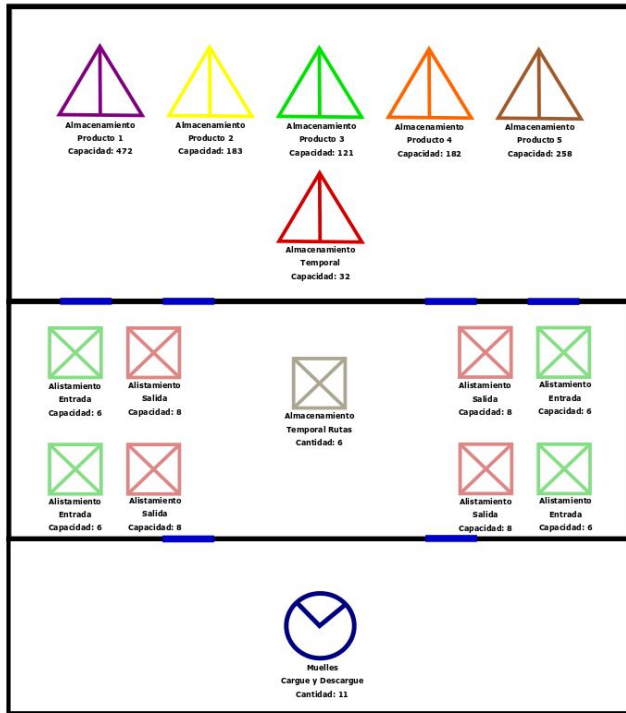


Fig. 1 Aproximación del layout del centro de distribución (CEDI).

En cuanto a los parámetros, el CEDI recibe 5 tipos de productos en pallets de 40 cajas y envía pedidos mixtos que oscilan entre 14 y 33 cajas.

Se cuenta con información acerca del tiempo entre arribos de los vehículos de proveedores y distribuidores, así como información de la proporciones de pallets y cajas que se mueven por tipo de producto.

La Tabla I presenta un resumen de la información suministrada al software, para el análisis de la operación del CEDI.

TABLA I
PARAMETROS DE RE AL SOFTWARE

Actividad	Parámetro
Revisión de las órdenes de compra	Distribución uniforme U (1 min , 2 min)
Velocidad de tránsito en puertas	7 km/h
Parqueo	Distribución uniforme U (1 min , 3 min)
Niveles de las estanterías	5 niveles
Costo por operario	830 und
Costo por montacarguista	2170 und
Costo por transpallet	535 und
Costo por puerta automática	2100 und
Nivel de servicio mínimo en recepciones	85%
Nivel de servicio mínimo en despachos	90%
Zonas de alistamiento de pedidos	24
Zonas de almacenamiento temporal	16 zonas

Con esta información se deben estimar los parámetros de la simulación que son de vital importancia para tener una visión aproximada del funcionamiento del CEDI en el largo plazo.

IV. ANÁLISIS DEL SISTEMA Y DATOS DE ENTRADA

A. Supuestos

Para el correcto desarrollo del modelo se hace necesario contemplar los siguientes supuestos:

- Se asume una política FIFO para establecer la prioridad de las distintas tareas.
- Existe disponibilidad suficiente de pallets para llevar a cabo las operaciones dentro del CEDI.
- Se asume un modelo estándar de trabajador que tiene disponibilidad completa durante los horarios de la jornada que se le asigna. El ritmo de trabajo y la productividad no se asocia al trabajador sino se contempla en la variabilidad de la duración de las tareas.

- iv. El transporte de los pedidos en la zona de precámara está sujeto a la regla “shortest distance”, es decir, los operarios de los transpallets llevan los pedidos a la zona más cercana disponible.
- v. No hay muelles especializados para cargue o descargue, se utilizan siguiendo una política “First Available – Primero disponible”, mientras que los camiones siguen una política FIFO.
- vi. Los montacargas retiran el producto de las estanterías de manera aleatoria, siguiendo las tareas que se le asignan para satisfacer los pedidos.
- vii. Los operarios tienen asignadas tareas especializadas asociadas a su rol y no pueden realizar otras funciones, por ejemplo, los operarios encargados de realizar tareas de alistamiento no pueden efectuar ni la revisión de radiofrecuencia, ni tareas que impliquen el uso de transpallets o montacargas.

B. Modelado Conceptual

El correcto flujo de operaciones dentro del centro de distribución (CEDI) representa uno de los factores más importantes para obtener resultados adecuados y lo más cercano a un futuro escenario posible. Es por esta razón que se hace necesaria la construcción de un modelo conceptual que logre ilustrar claramente el movimiento del material dentro del sistema. Para ello se elaboró un esquema utilizando el lenguaje BPMN, dividiendo la operación en secciones y asumiendo tres departamentos generales involucrados en el proceso, la organización encargada de los transportes, el área administrativa y el CEDI; como se puede apreciar en la Anexo. 1.

C. Analisis de Informacion Primaria

El tratamiento y análisis estadístico apropiado de la información, como entradas y salidas del sistema, es otro de los factores primordiales para que el modelo pueda responder a varios escenarios con la suficiente confiabilidad sobre la variabilidad del comportamiento de los datos. Para llevar a cabo este cometido, se estructuró el análisis en varias fases que serán detalladas a continuación.

1) *Preparación y Depuración de los Datos:* Se revisó y organizó la información proporcionada de manera tal que las tendencias y detalles de los datos fueran observables fácilmente y que el procesamiento de estos se adecuara a los requerimientos del Software ExpertFit®. Para ello se empleó Excel® y librerías de manejo de listas en Python® (Pandas y NumPY).

2) *Análisis de los Datos:* Corresponde al ajuste de los datos a una distribución que permita predecir la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno o pronosticar su frecuencia. Se hace necesario el procedimiento para proyectar el funcionamiento del CEDI a un horizonte mayor a los 24 días de información con los que se contaba. La identificación de fenómenos tuvo en cuenta:

- Llegada de los vehículos proveedores a los muelles.

- Llegada de los vehículos de despacho a los muelles.
- Distribución del tipo de pallet en los vehículos proveedores.
- Selección de los pallets para llevar a la zona de alistamiento de pedido.
- Organización de los pedidos.

3) *Criterios de Selección de las Distribuciones:* La selección de una distribución particular que permita modelar alguna entrada al sistema sigue dos pautas. La primera, obedece a la similitud de las distribuciones observada a partir de las pruebas de bondad y ajuste con un nivel de confianza del 95% para la llegada de camiones con producto desde la fábrica y la llegada de camiones de despacho para el transporte de producto a los diferentes puntos de venta, según el P-P plot de la Fig. 2 y el histograma de densidad de la Fig. 3 respectivamente. La segunda, el cumplir con una evaluación de la relación entre los datos obtenidos con las distribuciones después de realizar varias corridas, y los datos de media y desviación estándar obtenidos en el análisis de entrada. Lo anterior permite validar la similitud entre los datos históricos y los datos de entrada al software, pero al mismo tiempo otorga la suficiente variabilidad para simular el sistema en un horizonte de tiempo mucho mayor.

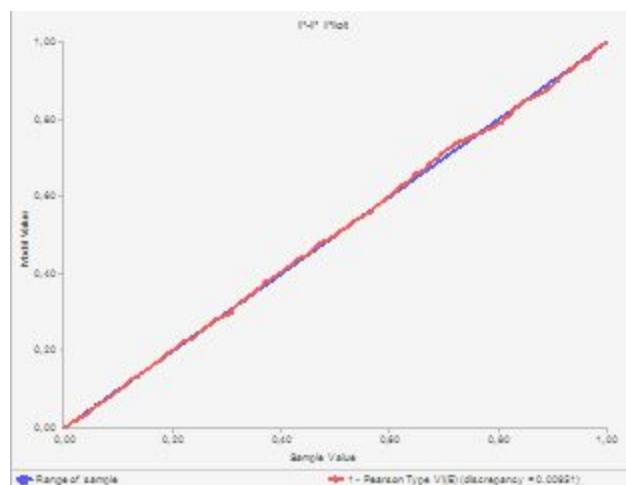


Fig. 2 P-P plot distribución Pearson tipo VI(E) contra tasa de llegada de camiones desde la fábrica.

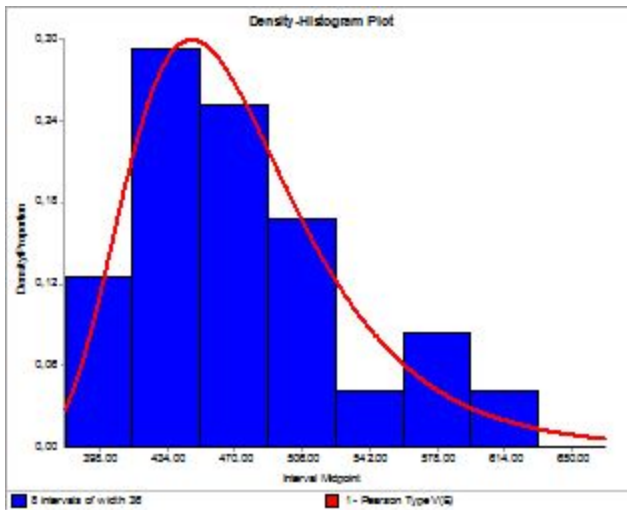


Fig. 3 Histograma de densidad distribución Pearson tipo V contra tasa de llegada camiones de despacho a puntos de venta.

- Llegada de los vehículos proveedores a los muelles:* Para determinar la distribución que sigue la llegada entre camiones se calculó el tiempo entre arribos de los mismos. Este tiempo se calculó en segundos para los 24 días de la muestra suministrada. Luego de organizar y analizar los datos se seleccionó la distribución que cumple a cabalidad los criterios estadísticos expuestos en la anterior sección, los hallazgos se resumen en la Tabla II.

TABLA II
RESUMEN DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO ENTRE ARRIBOS

Número de observaciones	755
Observación mínima [segundos]	1
Observación máxima [segundos]	8150
Media [segundos]	852.74303
Mediana [segundos]	543
Coefficiente de variación [segundos]	1.14066
Asimetría estadística [segundos]	2.88501
Distribución seleccionada	Pearson Tipo VI (0.23577;5394,49;1.05255;7.66361)

- Llegada de los vehículos de despacho a los muelles:* Para determinar la distribución que se deriva a partir de la llegada entre camiones de despacho se asumieron llegadas fijas (a las 9:00 AM y a la 1:00 PM), para todos los camiones a ser atendidos. Se observó que el modelo tiene un mejor ajuste si se emplean los datos de la mañana y de la tarde por separado, pues en términos generales en la tarde se presentan menos arribos. Las distribuciones del número de camiones que llegan en cada jornada se construyen a partir de los 24 días de muestra suministrados y los hallazgos se resumen en la Tabla III y la Tabla IV.

TABLA III
RESUMEN DEL NÚMERO DE ARRIBOS DE CAMIONES DE DESPACHO (AM)

Número de observaciones	24
Observación mínima [Segundos]	23
Observación máxima [Segundos]	37
Media [Segundos]	30,6666667
Mediana [Segundos]	31
Varianza [Segundos]	12,31884
Coefficiente de variación [Segundos]	0,11445
Asimetría estadística [Segundos]	-0,3486
Distribución seleccionada	Beta(9,5 ; 40,4 ; 11,3 ; 5,2)

TABLA IV
RESUMEN DEL NÚMERO DE ARRIBOS DE CAMIONES DE DESPACHO (PM)

Número de observaciones	24
Observación mínima [Segundos]	10
Observación máxima [Segundos]	29
Media [Segundos]	19,58333
Mediana [Segundos]	20
Varianza [Segundos]	27,38406
Coefficiente de variación [Segundos]	0,26722
Asimetría estadística [Segundos]	-0,25452
Distribución seleccionada	Beta(2,4 ; 31,6 ; -0,5 ; 1,2)

- Distribución y selección de los pallets y organización de los pedidos:* Para estos fenómenos se optó por incluir distribuciones empíricas debido a la poca fiabilidad en el ajuste de las distribuciones de probabilidad. El rechazo obtenido en las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, Anderson Darling y Chi Cuadrado se suma a la dificultad de garantizar datos fiables sin comprometer algunos límites del sistema como la capacidad de 10 pallets en los camiones, el alistamiento de 6 pallets para despachar y la distribución de los pallets seleccionados en los 8 pedidos. La distribución empírica permite obtener nuevos valores a partir de los ya observados respetando sus frecuencias y, por tanto, cumple con el requisito de favorecer la extensión del análisis del funcionamiento del CEDI a un horizonte superior a 24 días. La Tabla V presenta la distribución empírica para la distribución del tipo de pallet en los vehículos proveedor y para la selección de los pallets a llevar a la zona de alistamiento de pedidos.

TABLA V
DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO EN CAMIONES DE RECEPCIÓN Y DESPACHO

	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Tipo de Producto Proveedores	55,35%	10,25%	9,98%	9,66%	14,77%
Tipo de Producto Despachos	41,51%	16,19%	8,49%	16,57%	17,25%

- Manejo de inventarios:* El buen manejo de los inventarios constituye un pilar fundamental para garantizar el nivel de servicio adecuado, controlar los riesgos, responder ante variaciones en la demanda y mantener los costos controlados. En este punto se hace necesario diagnosticar el estado actual de los inventarios, estimar el inventario inicial apropiado y corregir las deficiencias que puedan afectar el nivel de servicio. La comparación de los datos de pedidos y suministro de producto se realiza mediante el contraste de la llegada promedio de productos frente a la salida de productos, como se puede apreciar en la Tabla VI.

TABLA VI
DISTRIBUCIÓN DE PRODUCTO EN CAMIONES DE RECEPCIÓN Y DESPACHO

	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Llegadas (Pallets/día)	174	32	31	30	46
Despachos (Pallets/día)	125	49	26	50	52
Balance (Pallets/día)	49	-17	5	-20	-6

Se puede observar, que existe un desbalance en la proporción de pallets que llegan y que son despachados. Esto se debe a una sobreestimación de la demanda del producto 1 y el producto 3, que elevó la proporción de pallets pedidos para estos productos afectando así el suministro de los demás.

Las estimaciones actuales pueden conducir en el largo plazo a un sobre-inventario de pallets de los dos productos ya mencionados; y a un desabastecimiento de los productos 2, 4, 5. Esto incide directamente en el aumento del costo de mantenimiento de inventario y puede reflejar un impacto negativo en el nivel de servicio.

- Inventario inicial diario y stock de seguridad:* El análisis de la gestión de inventarios no es contemplada en su totalidad dentro de este escrito debido a que no es su objetivo principal, además de que no se cuentan con los datos suficientes para el reajuste de las tasas manejadas por la organización. Por esta razón, se asume un inventario inicial diario que permita tener disponibilidad de producto completa para poder responder con los niveles de servicio apropiados, es decir, contar con los productos suficientes para satisfacer la demanda diaria sin producir demoras en el suministro de productos por exceso de inventarios. En este sentido, se estimó un inventario inicial diario que respondía a las cantidades que equilibraran las llegadas y los despachos. Del mismo modo, se incluyó un stock de seguridad (IS) que permite evitar la rotura de stocks, traducida directamente en un desabastecimiento de la demanda diaria (D). El stock de seguridad requiere

del tiempo habitual entre entregas (EH) igual a 0,00986971 días y el tiempo entre entregas con retraso (ER) igual a 0,0943287; mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$IS = EH \times D + (ER - EH) \times D = ER \times D. \quad (1)$$

Los cálculos del balance, el stock de seguridad y el inventario inicial diario se presentan en la Tabla VII.

TABLA VII
INVENTARIO INICIAL DIARIO PARA LA OPERACIÓN DEL CEDI

	Producto 1	Producto 2	Producto 3	Producto 4	Producto 5
Balanceo (Pallets/día)	0	17	0	20	6
Stock de Seguridad (Pallets/día)	12	5	3	5	5
Inventario Inicial Diario (Pallets/día)	12	22	3	25	11

V. DESARROLLO DEL MODELO

La metodología empleada para la determinación de la combinación óptima de operarios se presenta en la Fig. 4.

A. Simulación en flexsim

La simulación del modelo se realizó empleando el software Flexsim© que permite una implementación, con add-ins muy visuales, de modelos por eventos discretos. El software, además, tiene un apartado de análisis de datos donde se aproximaron los datos de entrada a distribuciones de probabilidad (como se detalla en el numeral anterior) y una sección para realizar diseños de experimentos y optimización de las variables de la simulación.

La Fig. 5 ilustra el modelo construido en el software Flexsim©.



Fig. 5 Modelo en 3D de la simulación en Flexsim®

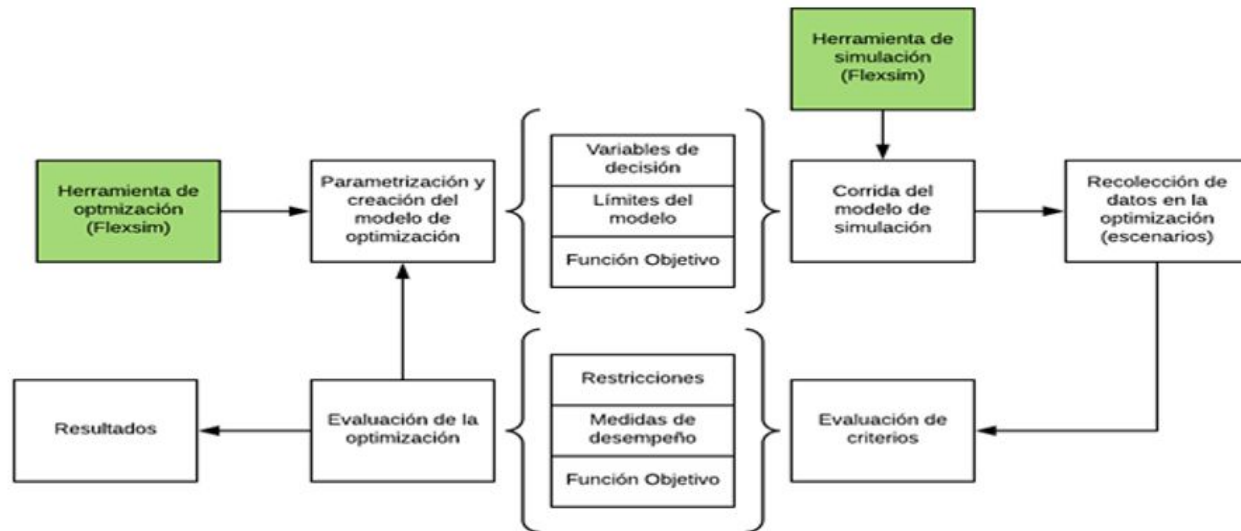


Fig. 4 Metodología empleada para la determinación de la combinación óptima de empleados. Adaptado de: Angelidis, E., Bohn, D., & Rose, O. (2013, December).

La optimización del software se realizó empleando varias corridas que se usaron para acotar los límites de las variables de decisión. Esto con el fin de reducir el porcentaje de escenarios simulados que no cumplieran con las restricciones y así poder comparar el mayor número de escenarios factibles posibles de acuerdo con el nivel de servicio y las restricciones. Cada escenario se testea realizando un número de corridas que permita obtener un nivel de confianza del 95%. La ecuación 1 explica el procedimiento para obtener el número de corridas mínimo por escenario para un nivel de confianza de un 95%.

$$\left(\frac{t_{1-\frac{\alpha}{2}, R-1} S}{\varepsilon}\right)^2 \leq R; \text{ Dónde } R \text{ es el número de corridas por escenario [2]}$$

$$(t_{0.975; 18-1} \times 2)^2 \leq 18$$

Así se obtiene un número de corridas equivalente a 18 para un nivel de confianza del 95%, asumiendo un error de estimación del 50% de la desviación estándar, que es aceptado por los teóricos de la estadística bayesiana.

B. Medidas de desempeño

- Nivel de servicio:
 - Nivel de servicio de recepciones: está definido esencialmente por la relación entre la cantidad de camiones atendidos y la

cantidad de camiones generados en un día de trabajo.

$$\text{Nivel de servicio} = \frac{\text{Camiones atendidos}}{\text{Camiones generados}} \times 100$$

- Nivel de servicio de despachos: está definido por la relación entre la cantidad de pedidos que son despachados en el camión y los pedidos generados durante el horario laboral.

$$\text{Nivel de servicio} = \frac{\text{Pedidos despachados}}{\text{Pedidos generados}} \times 100$$

C. Optimización en Flexsim

La optimización se construyó con el objetivo de hallar el costo óptimo por concepto de personal y recursos. En tabla VIII se presentan las variables de decisión, medidas de desempeño y restricciones consideradas para la elaboración del modelo de simulación.

TABLA VIII
PARÁMETROS DE LA OPTIMIZACIÓN

Enunciado	Unidades	Descripción
Medidas de desempeño		
Número de recepciones de camiones de suministro	Camiones/24 días	Permite conocer cuántos camiones pretenden ingresar productos al CEDI.
Número de recepciones de camiones de despacho	Camiones/24 días	Permite conocer cuántos camiones pretenden despachar productos del CEDI.
Número de camiones de suministro no atendidos	Camiones/24 días	Permite conocer la cantidad de camiones de suministro que no son atendidos al final del día
Número de camiones de despacho no atendidos	Camiones/24 días	Permite conocer la cantidad de camiones de despacho que no son atendidos al final del día
Variables de decisión		
Número de montacarguistas (NM)	Número de recursos	Permite evaluar el comportamiento del sistema ante sus variaciones
Número de operarios de revisión y recepción (NR)	Número de recursos	
Número de operarios de alistamiento de pedidos (NA)	Número de recursos	
Número de operarios de transpallets (NT)	Número de recursos	
Número de puertas en la sección de precámara (NPP)	Número de recursos	
Número de puertas en la cámara de frío (NPC)	Número de recursos	
Restricciones		
Nivel de servicio de camiones de suministro mayor a 85%	$\frac{\text{Camiones atendidos}}{\text{Camiones generados}} \geq 0.85$	Se requiere atender a más de un 85% de los camiones de suministro que llegan
Nivel de servicio de camiones de despacho mayor a 90%	$\frac{\text{Pedidos despachados}}{\text{Pedidos generados}} \geq 0.90$	Se requiere atender a más de un 90% de los camiones de despacho que llegan

Con base a los datos anteriores la ecuación 3 presenta la función objetivo de la simulación.

$$\text{Min } F.O. = \$2170 \times NM + \$830 \times (NR + NA + NT) + \$535 \times NT + \$2100(NPP + NPC) \quad (3)$$

A partir de la simulación se obtuvieron los siguientes resultados.

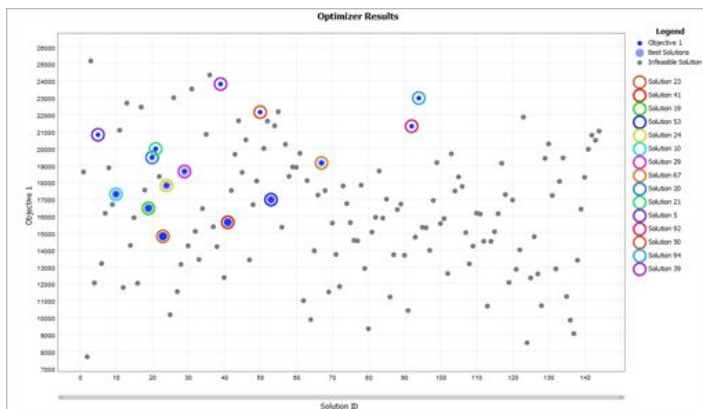


Fig. 6 Optimización en Flexsim®

VI. RESULTADOS

A. Comparación de alternativas

Luego de evaluar más de 1080 escenarios posibles para obtener de la optimización 144 escenarios que cumplan con las medidas de desempeño sobre el nivel de servicio esperado para las llegadas y despachos, se acotó a 11 escenarios

factibles que presentaban el menor costo. La rigurosidad de esta selección se basó en una prueba de hipótesis para garantizar que no existiera diferencia significativa entre los camiones no atendidos promedio y los mínimos requeridos. Para ello, se empleó el método de comparación de alternativas múltiple de Bonferroni que realiza pruebas de hipótesis entre todos los escenarios en comparativas pareadas.

El método para la comparación de múltiples alternativas de Bonferroni trata de examinar múltiples intervalos de confianza para una medida de desempeño en diferentes configuraciones (escenarios) con el fin de contrastar la viabilidad del rendimiento de una alternativa contra otras; y en general, entre todas. A lo largo del método la desigualdad se mantiene sin importar si se utilizan muestras independientes o CRN (Common Random Numbers). Con respecto a la medida de desempeño escogida para este análisis, cuando se realiza la comparativa, si el intervalo para la diferencia de medias de los escenarios contiene al 0, no hay una diferencia significativa entre sus resultados, si es un intervalo menor a 0, se dice que el escenario a comparar presenta un rendimiento mejor que el escenario base; y finalmente, si el valor del intervalo es superior a 0, el escenario a comparar presenta un rendimiento menor al escenario base. En este sentido se encontró que con los 11 escenarios óptimos, no poseen una diferencia significativa en cuanto a su rendimiento según las diferentes configuraciones. Además, se encontró que dentro del número de corridas para obtener un intervalo de confianza apropiado, los escenarios 1 y 7 se descartarían por inculmplir con el nivel de servicio esperado para despachos. La alternativa 2 supone una ligera mejora con respecto a la alternativa 4, y es esto sumado a su bajo coste lo que supone su elección como el escenario más apropiado que cumple con el servicio dentro del CEDI.

La Tabla IX presenta los escenarios factibles que se contemplan en la comparación para la determinación del mejor escenario.

B. Selección de alternativa

La alternativa escogida abarca las siguientes características:

- *6 puertas.* Se deben instalar dos puertas en la pre-cámara y cuatro en la cámara de frío. Costo asociado: 12600 USD/mes.
- *5 operarios de transpallet.* Encargados de transportar productos dentro del CEDI. Costo asociado: 6825 USD/mes.
- *4 operarios de revisión.* Encargados de la revisión de los productos que llegan y salen. Costo asociado: 3320 USD/mes.
- *4 operarios de alistamiento.* Cada uno asignado a una zona de armado de pedidos específica. Costo asociado: 3320 USD/mes.

TABLA IX
ESCENARIOS FACTIBLES EN TÉRMINOS DE COSTO Y NIVEL DE SERVICIO

	Transpallet	Montacargas	Supervisión	Alistamiento	Nivel de servicio despacho	Nivel de servicio suministro	Costo
Escenario 1	5	1	3	4	89,87%	100,00%	27405
Escenario 2	5	1	4	4	91,72%	100,00%	28235
Escenario 3	5	1	5	4	90,85%	100,00%	29065
Escenario 4	5	2	3	4	90,09%	99,86%	29575
Escenario 5	5	3	3	4	90,31%	100,00%	31745
Escenario 6	5	2	6	4	91,94%	100,00%	32065
Escenario 7	5	3	4	4	89,65%	100,00%	32575
Escenario 8	5	3	5	4	90,74%	100,00%	33405
Escenario 9	5	4	4	4	90,74%	100,00%	34745
Escenario 10	5	4	5	4	92,48%	100,00%	35575
Escenario 11	5	4	6	4	92,16%	100,00%	36405

- *1 montacarguista.* Asignado para desempeñar esta tarea por toda la jornada. Costo asociado: 2170 USD/mes.

Cabe aclarar que se hizo la selección de 6 puertas automáticas, basado en un análisis de la utilización de los nodos conectados a las puertas. Se evidencia que en la precámara las dos puertas laterales se encontraban totalmente inutilizadas, mientras las 6 puertas restantes presentaban niveles altos de utilización y era claramente observable su importancia en el flujo de los operarios de transpallets, evitando represamientos o bloqueos. Por otro lado, se eligieron 4 operarios para la zona de alistamiento que se definieron por la configuración propia del layout, asignando un operario por zona de armado de pedidos. No se consideró necesario asignar más, pues el ritmo de trabajo de esta zona es superior a la tasa de arribos de camiones de despacho por lo que con 4 operarios es suficiente para satisfacer la demanda, siempre y cuando se cuente con los recursos disponibles en otras zonas que se determinaron en los análisis anteriores.

VII. CONCLUSIONES

La simulación-optimización ofrece una gran ventaja para llegar a soluciones factibles en problemas complejos, donde las medidas de desempeño no son triviales y requieren de varias corridas en un simulador para obtener resultados confiables. La replicabilidad del modelo permite introducir tanto aumentos como disminuciones súbitas en la demanda. Del mismo modo, asimila correctamente modificaciones en la forma de operar dentro del CEDI. Este factor da robustez y añade valor a la simulación híbrida realizada, mostrándose

como una herramienta de gran confiabilidad para la toma de decisiones.

La mejor distribución de recursos, en cuanto a los operarios que ejecutan las distintas labores dentro del CEDI, se determinó con base en los datos de salida obtenidos al final de las cuantiosas corridas en los distintos escenarios, alternando el número de operarios con un límite máximo en cada cargo dentro del modelo. Para ello, la metodología de comparación de múltiples alternativas de Bonferroni con niveles de confianza del 95%, más un análisis lógico sobre el costo total de la asignación; brindó el valor que mejor se ajustaba al requerimiento del problema.

Finalmente, se aclara que para el adecuado funcionamiento del modelo, es necesario contar con una política apropiada de inventarios en cuanto a los pedidos realizados con respecto a las órdenes despachadas. Si este factor no se tiene en cuenta, se pone en riesgo la satisfacción de la demanda y la disponibilidad de capacidad dentro del almacén, pues podría presentarse un escenario a largo plazo con exceso o déficit de algún producto.

AGRADECIMIENTOS

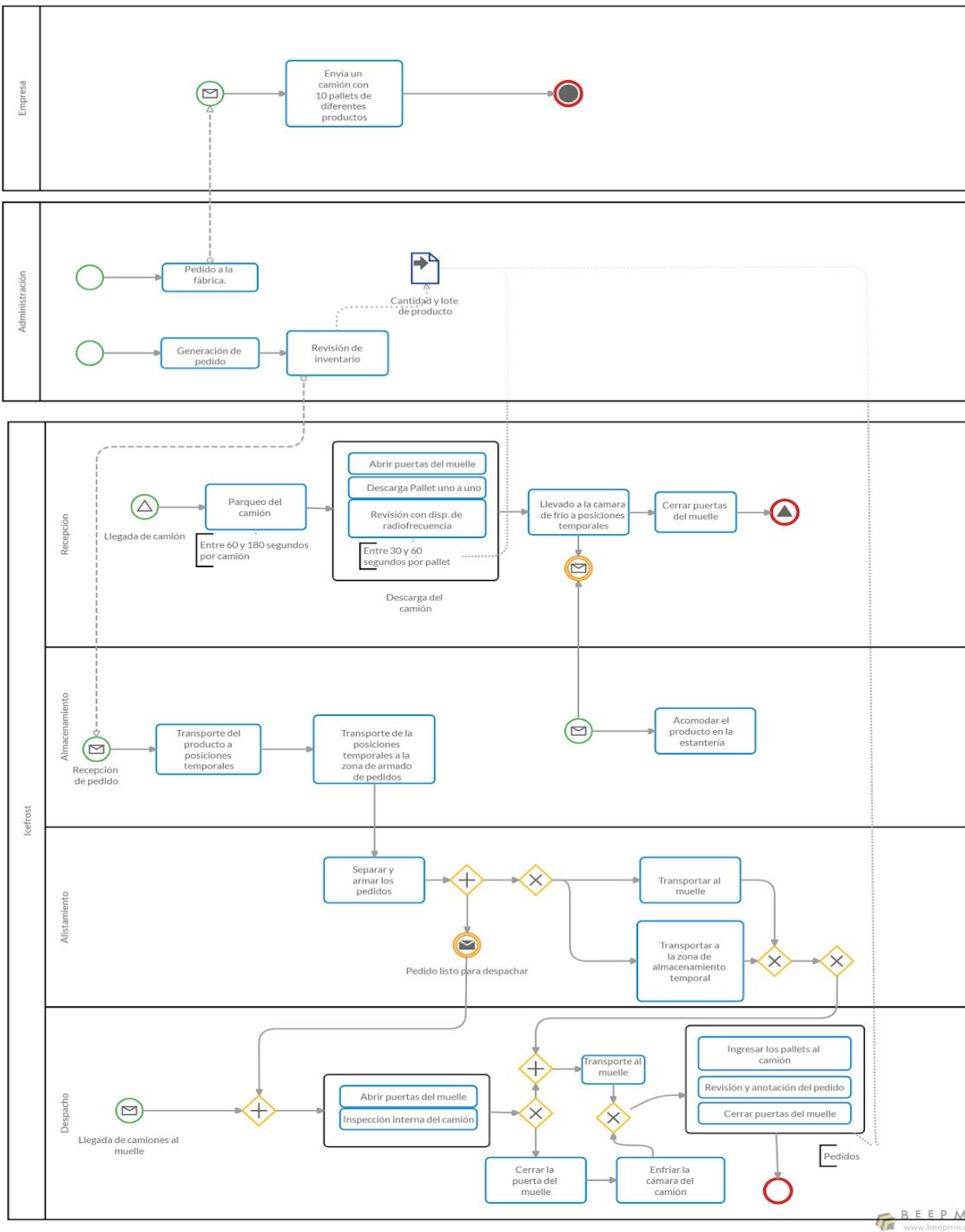
Se desea hacer un especial agradecimiento a los patrocinadores y personal a cargo del X Concurso Latinoamericano de Simulación en Logística Flexsim®, por su compromiso con las universidades y la educación de la región, por ser los principales motivadores en el desarrollo del proyecto; y por haber suministrado los insumos necesarios para la adaptación y solución del modelo.

REFERENCIAS

- [1] Nikolopoulou, A., & Ierapetritou, M. G. (2012). Hybrid simulation based optimization approach for supply chain management. *Computers and Chemical Engineering*, 47,

- 183–193.
<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2012.06.045>
- [2] Terzi, S., & Cavalieri, S. (2017). Simulation in the supply chain context: a survey. *IEEE*, 3.
- [3] Stachowiak, A., & Oles, J. (n.d.). The Use of Computer Simulation in Warehouse Automation, 285–293. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-00557-7>
- [4] Rosa, F. (2011). Strategies for the Agro-food Sector (Vol. 1, pp. 340–359). Innsbruck-Igls, Austria.
- [5] Hiller, Frederick & Lieberman, Gerald (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. Edición 9. McGraw Hill / Interamericana de Editores. México.
- [6] Simchi-Levy, David. Chen, Xin. Bramel, Julien. (2013). *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management*. Springer Series in Operations Research and Financial Engineering. Springer Science & Business Media. Estados Unidos.
- [7] Akkerman, R., Farahani, P., & Grunow, M. (2010). Quality, safety and sustainability in food distribution: a review of quantitative operations management approaches and challenges. *OR Spectrum*, 32(4), 863–904.
- [8] Johnson, M. & Smilowitz, K. (2011). Community – Based Operations Research. *International Series in Operations Research & Management Science*. Vol. 167, 37 - 65.
- [9] Shiwang, H. (2010). Study on Logistics Simulating and Optimizing of Distribution Center. 2010 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 314–317. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2010.5585299>
- [10] Piao, H., & Yao, X. (2017). Simulation and Optimization of the Cross-Docking Operation Scheme of Logistics In the case of decathlon yanjiao logistics center, 0–5.
- [11] Law, Averill M. *SIMULATION MODELING AND ANALYSIS*. Fifth Edition, 2013. McGraw Hill.
- [12] Byrne, M. D., & Bakir, M. A. (1999). Production planning using a hybrid simulation — analytical approach, 59, 305–311.
- [13] Ke, W., & Xuejie, W. (2014). Simulation Optimization Research on Logistics Distribution Center Picking Operation, (Lemcs).
- [14] Sormaz, D., & Malik, M. (2019). Hierarchical simulation modeling of distributions centers. *Winter Simulation Conference*, 3.
- [15] Lee, E., & Farahmand, K. (2010). Simulation of a base stock inventory management system integrated with transportation strategies of a logistic network. In 2010 Winter Simularion Conference (pp. 1934–1945).
- [16] James Swisher, Paul Hyden, Sheldon Jacobson & Lee Schruben. (2000). A SURVEY OF SIMULATION OPTIMIZATION TECHNIQUES AND PROCEDURES. *Winter Simulation Conference*.
- [17] Zhu, X., Zhang, R., Chu, F., He, Z., & Li, J. (2014). A Flexsim-based Optimization for the Operation Process of Cold- Chain Logistics Distribution Centre, 12(April), 270–278. [https://doi.org/10.1016/S1665-6423\(14\)72343-0](https://doi.org/10.1016/S1665-6423(14)72343-0)
- [18] Montgomery, D. (2004). *Diseño y análisis de experimentos* (Limusa Wil).

Anexo 1.



Anexo. 1 Modelado conceptual en lenguaje BPMN, Fuente: BeepmN