



**TESIS DE GRADO
EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO
DE LA LOGÍSTICA DE DISTRIBUCIÓN DE UNA
EMPRESA**

Autor: Federico Luis Miguel

**Director de Tesis:
Ing. Pedro del Campo**

2007

RESUMEN EJECUTIVO

El objeto del presente trabajo es el estudio de los procesos relativos a la logística de distribución de la empresa Tibex S.R.L., cuya sede se encuentra en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

Es de interés para la empresa encontrar el diseño óptimo de su flota de distribución (propia y subcontratada) desde el punto de vista de la reducción de costos, manteniendo el nivel de servicio en un estándar no menor al actual. Para ello se evalúan cuatro diseños alternativos, los cuales fueron discutidos y aprobados con empleados responsables de Tibex. El primero de ellos es básicamente el diseño que se emplea en la actualidad, el cual consiste en la utilización de un camión propio y flota de terceros. La segunda alternativa contempla el uso de dos camiones propios de menor capacidad, complementados con camiones subcontratados. Otra de las líneas de estudio implica la tercerización total de la logística de distribución. Por último, se encuentra la utilización de un sistema idéntico al empleado en la actualidad, con la salvedad de que el único camión propio es de menor capacidad.

Dada la complejidad del comportamiento de las distintas variables que intervienen, la imposibilidad de emplear un algoritmo matemático de optimización y la naturaleza de las reglas que rigen el sistema, para la resolución del problema se empleará la metodología de simulación de Monte Carlo, ideal para el estudio de sistemas de comportamiento estocástico. El medio a utilizar para el desarrollo de este método es la aplicación informática especializada denominada Arena, creada por la empresa Rockwell.

Después de desarrollar todos los pasos requeridos por un estudio completo de simulación, se obtienen los resultados del mismo y se someten a rigurosas pruebas de validación estadística. Con los resultados obtenidos se procede a realizar el análisis económico de las distintas alternativas, comparando todas las estructuras de costos a nivel E.B.I.T. (beneficio antes de impuestos e intereses). La conclusión principal del mismo es que la alternativa más conveniente a nivel económico es la que contempla el reemplazo del camión actual por otro de menor capacidad.

Otra línea de estudio que se desarrolla es la posible formación de una alianza estratégica con el proveedor del servicio logístico, a fin de aumentar el valor para Tibex de la opción de tercerización total. La recomendación final y solución propuesta es la de encarar una negociación con el proveedor y lograr un determinado descuento en el valor del servicio mediante la firma de un contrato, a través del cual se compartirán riesgos, se asumirán compromisos y ambas partes saldrían beneficiadas. De no prosperar este camino, se recomienda la aplicación de la alternativa de menor costo según el estudio económico, la cual se describió anteriormente.

TÍTULO: SIMULACIÓN Y ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA LOGÍSTICA DE
DISTRIBUCIÓN DE UNA EMPRESA

AUTOR: FEDERICO LUIS MIGUEL

LEGAJO: 43195

FECHA DE PRESENTACIÓN: 11/2007

EXECUTIVE SUMMARY

The purpose of the current paper is the study of the processes relative to the logistic distribution of the company Tibex S.R.L, which's headquarters are located in Buenos Aires City, Argentina.

It's within the company's concern to find the optimal design for it's distribution fleet (owned and outsourced) from the expense reduction perspective, keeping the service level within a standard at least not inferior to the current one. In order to accomplish that, four alternative designs are evaluated, which were discussed and approved with personnel in charge of Tibex. The first one is basically the design that is actually being used, which consists in the utilization of one truck owned by the company and fleet from third parties. The second alternative consists in the usage of two owned trucks with a reduced capacity, complemented with subcontracted trucks. Another of the study lines implies the complete outsourcing of the logistic distribution. At last, the utilization of a system identical to the current one is proposed, with the only difference that the owned truck has a reduced charge capacity.

Given the behavior's complexity of the different intervenient variables, the impossibility to employ a mathematical optimization algorithm and the nature of the rules which reign the system, for the resolution of the problem the Monte Carlo simulation methodology will be employed, ideal for the study of systems with stochastic behaviors. The mean to be used for the method's development is the specialized software named Arena, created by the Rockwell company.

After the development of all the required steps of a complete simulation study, the results from it are obtained and submitted to rigorous statistic validation tests. With the obtained results, the economic analysis of all the alternatives is to be done, in which all the cost's structures are compared at the E.B.I.T. (earnings before interests and taxes) level. It's main conclusion is that the most convenient alternative, from an economic point of view, is the one which considers the replacement of the actually owned truck with a smaller one.

Another developed line of study is the probable formation of a strategic alliance with the logistic service supplier, for the purpose of raising the complete outsourcing alternative's value for Tibex. The final recommendation and proposed solution is to face a negotiation with the supplier and try to achieve a certain discount in the service price by the sign of a contract, through which risks shall be shared, compromises will be assumed and both sides would result benefited. If this approach fails, the application of the alternative with the lowest expense level, resulted from the economic study, is recommended.

TITLE: SIMULATION AND ECONOMIC ANALYSIS OF THE LOGISTIC
DISTRIBUTION OF A COMPANY

AUTHOR: FEDERICO LUIS MIGUEL

ACADEMIC ID: 43195

PRESENTATION DATE: 11/2007

Descriptor Bibliográfico

El objetivo del presente estudio es el de determinar la composición óptima de la flota de distribución de una empresa denominada Tibex S.R.L., desde el punto de vista económico. La misma puede estar compuesta tanto por camiones propios como por camiones de terceros. La resolución del problema se encara mediante la simulación de la logística según el método Monte Carlo, utilizando el software especializado denominado Arena. Con el mismo se evalúan diversas alternativas y con los resultados obtenidos se realiza el estudio económico para determinar cuál es la más conveniente. Finalmente, se enriquecen las conclusiones mediante el análisis de una posible alianza estratégica a desarrollar con el proveedor con el cual se terceriza el servicio.

ÍNDICE

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN	3
1.1 Descripción de la empresa	3
1.2 Herramientas tradicionalmente utilizadas	3
1.2.1 Técnicas de gráfica, compás y regla	4
1.2.2 Modelos de simulación	4
1.2.3 Modelos heurísticos	5
1.2.4 Modelos de optimización	7
1.2.5 Modelos de sistemas expertos	8
CAPÍTULO II TEORÍA DE LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO.....	9
2.1 Simulación de procesos estocásticos	9
2.2 Método de Monte Carlo	10
2.2.1 Introducción.....	10
2.2.2 Historia	11
2.2.3 Algoritmos	12
2.2.4 Aplicaciones	13
2.2.5 Síntesis.....	13
2.3 Terminología a emplear	14
2.4 Software especializado: Rockwell Arena	16
2.4.1 Módulos utilizados en el estudio de simulación.....	17
CAPÍTULO III ESTUDIO DE SIMULACIÓN.....	19
3.1 Formulación del problema y objetivos.....	21
3.2 Recolección de información.....	21
3.2.1 Número de pedidos diarios (Q)	22
3.2.2 Distancia atribuible a cada pedido (KM).....	25
3.2.3 Cantidad pedida por cada cliente (KG)	28
3.2.4 Tiempo de viaje por pedido (T).....	30
3.3 Conceptualización y traducción del modelo.....	33
3.3.1 Descripción del proceso logístico de distribución actual	33
3.3.2 Supuestos establecidos para el modelado	34
3.3.3 Lógica del modelo en Arena.....	35
3.4 Verificación y validación.....	42
3.4.1 Verificación.....	43
3.4.2 Validación.....	45
3.5 Diseño experimental	46
3.5.1 Modelo A: situación actual	47
3.5.2 Modelo B: dos camiones de menor capacidad.....	47
3.5.3 Modelo C: tercerización total	48
3.5.4 Modelo D: un camión de menor capacidad	48
3.6 Número de corridas	49
3.7 Procesamiento y análisis de resultados.....	50
3.7.1 Resultados del modelo A	51

3.7.2 Resultados del modelo B	51
3.7.3 Resultados del modelo C.....	52
3.7.4 Resultados del modelo D.....	52
3.7.5 Costo total de tercerización	54
3.7.6 Comparación estadística	55
3.7.6.1 Prueba de Kruskal-Wallis	56
3.7.6.2 Comparación de todos los pares de medias: prueba de Tukey	56
3.7.6.3 Comparación simple de dos medias: test de Welch.....	58
3.7.7 Resultado final	59
CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO	61
4.1 Costo total modelo A	61
4.2 Costo total modelo B	62
4.3 Costo total modelo C	62
4.4 Costo total modelo D	63
4.5 Conclusión del análisis económico.....	63
CAPÍTULO V ALIANZA ESTRATÉGICA: CONTRATO DE SERVICIO	65
5.1 Negociación y formalización de la alianza.....	66
5.2 Otras consideraciones a tener en cuenta	67
5.3 Punto de negociación.....	68
5.4 Conclusión y recomendación del autor	69
BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA	71

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

Tibex S.R.L. (en adelante Tibex) es una PyME que funciona como agente distribuidor para empresas de renombre internacional, productoras de químicos de uso industrial. Es de interés de la gerencia hacer un análisis sobre la implementación de cambios operativos a fin de obtener mejoras a nivel económico y en su productividad (sin disminuir el nivel de servicio) en lo relacionado a la flota de distribución de sus productos. Esto se traduce específicamente en la obtención el mix óptimo entre flota propia y tercerizada (o el volcado por completo hacia uno de los dos extremos), involucrando conceptos que aumentan la complejidad del análisis como el grado de utilización de los recursos (capacidad del camión por ejemplo), condicionamientos especiales para ciertos tipos de clientes o de pedidos, movimientos internos entre almacenes, etc.

Además del análisis operativo y de costos de las diferentes alternativas de operación, entra en juego un análisis en el que se debe considerar la posibilidad y las distintas formas de implementar un contrato de servicio para las alternativas donde exista tercerización, factor que aumenta el grado de complejidad del análisis.

En la actualidad, la empresa maneja un mix de flota propia (un camión) y tercerizada (según la demanda y naturaleza de los pedidos) y emplea un sistema de zonas para las cuales se planean las entregas según una asignación arbitraria de días.

A diferencia del tradicional análisis determinístico que se suele emplear para la resolución este tipo de problemáticas, en este proyecto se atacará la situación como un proceso estocástico, en el cual la principal variable fluctuante será la demanda de los distintos productos a entregar. La principal técnica a aplicar para la resolución de la primera etapa del trabajo es la simulación de Monte Carlo, mediante la utilización del software especializado cuyo nombre es Arena. Con los resultados obtenidos se procederá a la realización del estudio económico mediante la comparación de las distintas alternativas y, por último, de la mano con este estudio, se discutirá sobre la posibilidad de establecer un acuerdo comercial con la empresa proveedora de servicios logísticos, para mejorar y dar un estudio más completo sobre los diferentes caminos a seguir.

1.2 HERRAMIENTAS TRADICIONALMENTE UTILIZADAS

Existen diversos métodos para el estudio y resolución de las distintas problemáticas que se presentan a la hora de tomar decisiones en el campo de

la logística, en su más amplia definición. A continuación, se describen algunos de ellos.

1.2.1 Técnicas de gráfica, compás y regla

Este es un nombre general que se refiere a una amplia variedad de técnicas intuitivas apoyadas por un nivel relativamente bajo de análisis matemático. Sin embargo, los resultados no necesariamente son de baja calidad. El buen juicio, experiencia y un buen entendimiento del diseño de red permiten que un individuo genere diseños satisfactorios. Pueden tomarse en cuenta factores subjetivos, excepciones, costos y restricciones, muchos de los cuales no pueden representarse mediante el modelo matemático más elaborado. Esto enriquece el análisis y con seguridad puede hacer que los diseños se lleven a cabo en forma directa.

Los métodos utilizados para apoyar este tipo de análisis pueden parecer rudimentarios en el mundo computarizado actual. Las gráficas estadísticas, las técnicas de mapeo y las comparaciones de hojas de cálculo son solo algunas de las técnicas que pueden utilizarse.

1.2.2 Modelos de simulación

Los modelos de simulación están representados por dos tipos: 1) simulación determinista y 2) simulación estocástica o Monte Carlo. Los simuladores deterministas son esencialmente calculadores del costo, donde se entregan los valores de las variables estructurales al modelo, y a su vez calcula los costos, estadísticas de servicio y otra información relevante. Por otro lado, los simuladores estocásticos intentan emular eventos reales (patrones de pedidos, tiempos de entrega del transporte, niveles de inventario en el tiempo dentro de un canal de distribución, etc.) utilizando distribuciones de probabilidad para representar la incertidumbre en el tiempo de los eventos y el nivel de las variables del evento. Las simulaciones deterministas se utilizan típicamente para evaluar el diseño de la red actual de una compañía de modo que pueda establecerse un “caso base” contra el cual puedan compararse los diseños optimizados de red. Los simuladores estocásticos se utilizan para mostrar los resultados de desempeño de los métodos de control de inventario, de selección de servicio de transporte, de políticas de servicio al cliente, etc. Los simuladores estocásticos manejan efectivamente la dimensión de tiempo de la planeación de la cadena de suministros, en tanto que los simuladores deterministas se utilizan en conjunto con el diseño espacial de redes.

La simulación de la red por lo general implica replicar las estructuras de costos, restricciones y otros factores que representan la red de manera razonable. Esta

replicación por lo general se realiza mediante relaciones matemáticas, las cuales con frecuencia son de naturaleza estocástica. Además, el procedimiento de simulación por lo regular es nada más ni nada menos que la técnica para realizar experimentos de muestreo sobre el modelo del sistema. Es decir, se representa una configuración de red particular al modelo de simulación que luego proporcione los costos y otra información relevante para la operación del diseño del sistema. Al repetir el experimento muchas veces sobre el mismo diseño y con otros se generan estadísticas que son útiles para realizar comparaciones entre las opciones de diseño. Debido a la complejidad de las relaciones del modelo y a la cantidad de información manejada en las simulaciones, por lo general se realizan en una computadora. La manipulación de la simulación en vez del sistema real se realiza por conveniencia.

Las simulaciones se han utilizado para tratar prácticamente con todo problema de planeación en logística. Hace algunos años, Shycon utilizó una simulación (determinista) para ayudar a ubicar almacenes. Andersen Consulting (ahora Accenture) ha utilizado la técnica (de simulación estocástica) para analizar el flujo del producto a través de múltiples niveles de ubicación de instalaciones con el propósito de responder preguntas relacionadas con los niveles de inventario, nivel de producción y tiempos de los flujos dentro del canal de suministros y distribución. Power y Cross investigaron los efectos de los incentivos comerciales sobre el desempeño logístico utilizando la simulación. Existen muchos otros ejemplos.

En su mayor parte las simulaciones son hechas a la medida del problema particular que se analiza. Aunque existen algunos simuladores que de manera específica manejan problemas logísticos, pueden crearse muchos otros simuladores con la ayuda de lenguajes de simulación general. Varios de estos lenguajes ahora incluyen una característica gráfica en la que es posible animar en tiempo simulado la acción de los flujos de productos y niveles de inventario en una pantalla de video para una interpretación más fácil de los resultados.

La simulación estocástica es el método de elección cuando es esencial un detalle sustancial en una descripción compleja del problema, cuando existen elementos estocásticos y cuando no es crítico encontrar la solución óptima matemáticamente. Los profesionales sitúan a la simulación como la técnica cuantitativa más frecuentemente utilizada en segundo lugar, sólo después a la estadística.

1.2.3 Modelos heurísticos

Los modelos heurísticos son un tipo de mezcla entre el realismo en la definición de un modelo que puede obtenerse mediante los modelos de simulación, y la búsqueda de las soluciones óptimas obtenidas por los modelos de

optimización. Generalmente alcanzan una amplia definición del problema, pero no garantizan soluciones óptimas para el mismo. Los modelos se construyen alrededor del concepto de heurística que se puede definir como un proceso abreviado de razonamiento que busca una solución satisfactoria en vez de una óptima. La Heurística, que reduce el tiempo invertido en la búsqueda de la solución a un problema, incluye una regla o procedimiento computacional, que restringe el número de alternativas con base en el proceso análogo humano de prueba y error para alcanzar soluciones aceptables a los problemas para los cuales no se encuentran disponibles algoritmos de optimización.

La modelación heurística es un modelo práctico para algunos de los problemas logísticos más difíciles. Es útil cuando se desea que el modelo busque una mejor solución, pero se comprometerían demasiadas cosas si se intentara resolver el problema por métodos de optimización. Con frecuencia utilizamos la heurística en la planeación, donde ésta puede presentarse como principios o conceptos. Ejemplos de reglas heurísticas podrían ser:

- Los sitios más probables para almacenes son aquellos que se encuentran en los centros de mayor demanda o alrededor de ellos.
- Los clientes que deben ser abastecidos directamente desde los puntos de origen y no a través de un sistema de almacenes son aquellos que pueden adquirir en cantidades de cargas completas de vehículos.
- Un producto debe almacenarse si el diferencial de los costos de transportación entre el desplazamiento de entrada y el de salida justifica el costo de almacenamiento.
- Los artículos dentro de una línea de productos que son mejor manejados por procedimientos justo a tiempo, en vez de por medios de control estadístico de inventarios, son aquellos que muestran la menor variabilidad en su demanda y en sus patrones de tiempos de espera.
- El siguiente almacén para agregarse a un sistema de distribución es el que muestre los mayores ahorros de costos.
- Los clientes más costosos desde un punto de vista de distribución son aquellos que compran en pequeñas cantidades y que están ubicados al final de las vías de transportación.
- Las cargas de transportación económicas se construyen al consolidar cargas de volumen pequeño en cargas de vehículo completo, comenzando con los clientes más remotos sobre la red de distribución y combinando las cargas a lo largo de una línea hacia el punto de origen.

Reglas como las de la lista anterior pueden ser programadas en un modelo, a menudo un programa de software de computadora, en busca de la solución lógica de estas reglas.

1.2.4 Modelos de optimización

Los modelos de optimización se fundamentan en procedimientos matemáticos precisos para evaluar alternativas y garantizan que se habrá encontrado la solución óptima (la mejor alternativa) al problema según se propuso en forma matemática. Es decir, se puede demostrar matemáticamente que la solución generada es la mejor. Muchos de los modelos deterministas de la investigación de operaciones o de la ciencia administrativa son de este tipo. Estos incluyen programación matemática (programación lineal, no lineal, dinámica o entera); de enumeración; modelos de secuenciación; distintos modelos dominados por cálculo; y modelos de reemplazo de equipo. Se han generalizado muchos modelos de optimización y están disponibles como paquetes de software para computadora.

Algunas ventajas del método de optimización se listan a continuación:

- Se garantiza que el usuario tendrá la mejor solución posible para un conjunto dado de supuestos e información.
- Muchas estructuras complejas pueden manejarse en forma correcta.
- Se realiza un análisis más eficiente, ya que todas las alternativas se generan y se evalúan.
- Se pueden efectuar comparaciones una y otra vez, ya que se garantiza la mejor solución para cada una.
- Los ahorros de costos o utilidades entre una solución óptima y una generada en forma heurística pueden ser importantes.

Aunque estas son importantes ventajas, los modelos de optimización también tienen sus desventajas. La principal es que, a medida que se incrementa la complejidad del problema, los tiempos de procesamiento del mismo podrían no ser compatibles con la velocidad de respuesta requerida. Con frecuencia, el realismo de la descripción del problema debe considerarse en un balance contra el tiempo de resolución. Incluso así, se debería utilizar un modelo de optimización limitado dentro de un modelo heurístico, donde la optimización resuelva parte del problema. Por otro lado, los modelos de optimización que involucran programación matemática (un tipo importante en la planeación de redes) con frecuencia incluyen heurística para guiar el proceso de solución y para limitar el tiempo de resolución, ya que no pueden garantizar que se

encontrará la solución sin enumerar todas las posibles alternativas con el inaceptable tiempo de ejecución.

1.2.5 Modelos de sistemas expertos

Cuando un problema de planeación, como un diseño de red, se resuelve muchas veces en una variedad de situaciones, es probable que el responsable de la planeación desarrolle un entendimiento acerca de cómo se resuelve el problema. Tal entendimiento y habilidad, si se puede capturar en la configuración de un modelo o sistema experto, puede utilizarse para generar soluciones de mayor calidad en general que el anteriormente obtenido con solo el uso de los métodos de simulación, heurísticos o de optimización. En definitiva, un sistema experto es un programa de computadora artificialmente inteligente que resuelve problemas a un nivel de experto utilizando el conocimiento y la lógica de solución de problemas de expertos humanos.

Los sistemas expertos presentan varias ventajas distintivas sobre los sistemas de planeación convencional:

- Pueden procesar tanto información cualitativa como cuantitativa, permitiendo que factores críticos subjetivos, como el criterio del ámbito directivo, puedan fácilmente ser parte del proceso de decisión.
- Pueden procesar información indeterminada y proporcionar soluciones con solo información parcial, lo que permite que se resuelvan problemas más complejos y sin estructura.
- Proporcionan soluciones más rápido y a un menor costo al utilizar sólo la mínima información necesaria para resolver un problema.
- Utilizan la lógica de resolución de problemas del experto, la cual permite que el encargado de la logística mejore fácilmente sus capacidades de tomar decisiones.
- Proporcionan conocimiento transportable, duplicable y documentable.

CAPÍTULO II TEORÍA DE LA SIMULACIÓN DE MONTE CARLO

Ahora que ya se ha repasado de forma global las distintas herramientas y metodologías que se suelen emplear para encontrar soluciones a problemáticas en el campo de la logística (y muchos otros), se procede a profundizar un poco más sobre las metodologías elegidas para estudiar el caso propuesto que atañe a la empresa Tibex particularmente.

2.1 SIMULACIÓN DE PROCESOS ESTOCÁSTICOS

La simulación es la imitación de un sistema o un proceso del mundo real durante un período de tiempo. Involucra la generación de una historia artificial y la observación de esa historia artificial para deducir conclusiones de las características operativas del sistema real que representa.

La simulación es continua cuando el estado de las variables cambia en forma continua a través del tiempo. En el caso de la simulación discreta, el estado de las variables cambia sólo en punto discretos a través del tiempo debido a la ocurrencia de eventos (cambio de la evolución de las variables se da por eventos que modifican el estado del sistema). En las figuras 2.1.1 y 2.1.2 se visualizan mejor estos conceptos.

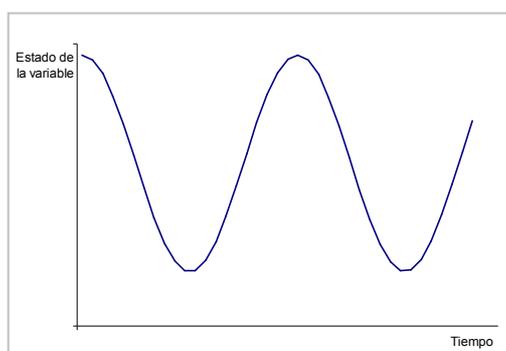


Figura 2.1.1. Simulación continua.

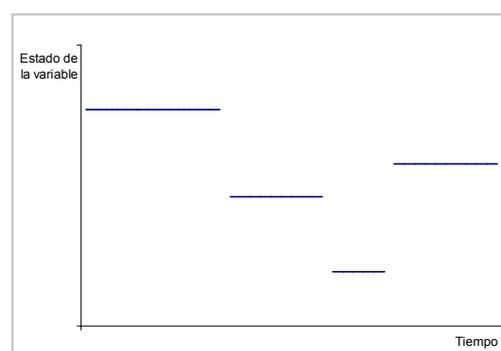


Figura 2.1.2. Simulación discreta.

Cabe remarcar que ningún sistema es completamente continuo o discreto. En el caso de estudio que motiva el presente trabajo, se podrá apreciar que las variables evolucionarán de forma discreta respecto del tiempo.

Ventajas de la simulación:

- Flexibilidad para modelar los procesos tal como son.

- Permite introducir el factor probabilística y reglas de decisión.
- Salidas gráficas ayudan a la mayor comprensión de los resultados.
- Puede ser la única alternativa en sistemas complejos.
- Permite controlar la velocidad del transcurso del tiempo.
- Se sucedieron grandes avances en los paquetes de software para simulación (más simples, herramientas estadísticas, etc.).

Desventajas de la simulación:

- Se obtienen resultados aproximados.
- Requieren de capacitación en la herramienta a utilizar.
- Los resultados pueden ser a veces difíciles de interpretar.
- A veces requiere de mucho tiempo.

2.2 MÉTODO DE MONTE CARLO

Los métodos de Monte Carlo abarcan una colección de técnicas que permiten obtener soluciones de problemas matemáticos o físicos por medio de pruebas aleatorias repetidas. En la práctica, las pruebas aleatorias se sustituyen por resultados de ciertos cálculos realizados con números aleatorios. Es un tipo de simulación en el que se asignan distribuciones probabilísticas a las variables de entrada y se obtiene una distribución de probabilidad para la salida.

2.2.1 Introducción

Bajo el nombre de Método Monte Carlo o Simulación Monte Carlo se agrupan una serie de procedimientos que analizan distribuciones de variables aleatorias usando simulación de números aleatorios.

El Método de Monte Carlo da solución a una gran variedad de problemas matemáticos haciendo experimentos con muestreos estadísticos en una computadora. El método es aplicable a cualquier tipo de problema, ya sea estocástico o determinístico.

Generalmente, en estadística, los modelos aleatorios se usan para simular fenómenos que poseen algún componente aleatorio. Pero en el método Monte Carlo, por otro lado, el objeto de la investigación es el objeto en sí mismo, un suceso aleatorio o pseudo-aleatorio se usa para estudiar el modelo.

A veces la aplicación del método Monte Carlo se usa para analizar problemas que no tienen un componente aleatorio explícito; en estos casos, un parámetro

determinista del problema se expresa como una distribución aleatoria y se simula dicha distribución.

La simulación de Monte Carlo también fue creada para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos, para lo cual se utilizaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, utilizando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas, los cuales son usados para resolver ciertos problemas estocásticos y determinísticos donde el tiempo no juega un papel importante.

2.2.2 Historia

El método fue llamado así por el principado de Mónaco, capital del juego de azar, al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944, a partir del desarrollo de la computadora. Sin embargo hay varias instancias (aisladas y no desarrolladas) en muchas ocasiones anteriores a dicho año.

El uso real de los métodos de Monte Carlo como una herramienta de investigación, proviene del trabajo sobre la bomba atómica durante la Segunda Guerra Mundial. Este trabajo involucraba la simulación directa de problemas probabilísticos de hidrodinámica concernientes a la difusión de neutrones aleatorios en material de fusión. Aún en la primera etapa de estas investigaciones, John von Neumann y Stanislaw Ulam refinaron esta curiosa ruleta rusa y los métodos de división. Sin embargo, el desarrollo sistemático de estas ideas tuvo que esperar el trabajo de Harris y Herman Kahn de 1948.

Aproximadamente en el mismo año, Fermi, Metropolis y Ulam obtuvieron estimadores para los valores característicos de la ecuación de Schrödinger para la captura de neutrones a nivel nuclear.

Alrededor de 1970, los desarrollos teóricos en complejidad computacional comenzaron a proveer mayor precisión y relación para el empleo del método Monte Carlo. La teoría identifica una clase de problemas para los cuales el tiempo necesario para evaluar la solución exacta crece exponencialmente con Monte Carlo. La cuestión a ser resuelta era si Monte Carlo podía o no estimar la solución al problema con una adecuación estadística acotada a una complejidad temporal polinomial. Karp (1985) muestra esta propiedad para estimar en una red plana multiterminal con arcos fallidos aleatorios. Dyer (1989) utiliza Monte Carlo para estimar el volumen de un cuerpo convexo en el espacio Euclidiano M-dimensional. Broder (1986), Jerrum y Sinclair (1988) establecen la propiedad para estimar la persistencia de una matriz o, en forma equivalente, el número de aciertos perfectos en un grafo bipartito.

2.2.3 Algoritmos

El algoritmo de Simulación Monte Carlo crudo o puro se fundamenta en la generación de números aleatorios por el método de transformación inversa, el cual se basa en las distribuciones acumuladas de frecuencias. Dicho algoritmo contempla los siguientes pasos:

- Determinar las variables aleatorias y sus distribuciones acumuladas.
- Generar un número aleatorio uniforme entre cero y uno.
- Determinar el valor de la variable aleatoria para el número generado de acuerdo a las clases que se tenga.
- Calcular media, desviación estándar y realizar el histograma.
- Analizar resultados para distintos tamaños de muestra.

Otra opción para trabajar con Monte Carlo, cuando la variable aleatoria no es directamente el resultado de la simulación o se tienen relaciones entre variables, es la siguiente:

- Diseñar el modelo lógico de decisión.
- Especificar distribuciones de probabilidad para las variables aleatorias relevantes.
- Incluir posibles dependencias entre variables.
- Muestrear valores de las variables aleatorias.
- Calcular el resultado del modelo según los valores del muestreo (iteración) y registrar el resultado.
- Repetir el proceso hasta tener una muestra estadísticamente representativa.
- Obtener la distribución de frecuencias del resultado de las iteraciones.
- Calcular media y desvío.
- Analizar los resultados.

Las principales características a tener en cuenta para la implementación o utilización del algoritmo son:

- El sistema debe ser descrito por uno o más funciones de distribución de probabilidad.

- Generador de números aleatorios: cómo se generan los números aleatorios es importante para evitar que se produzca correlación entre los valores muestrales.
- Establecer límites y reglas de muestreo para las funciones de distribución de probabilidad: se conocen qué valores pueden adoptar las variables.
- Definir cuando un valor aleatorio tiene o no sentido para el modelo a simular.
- Estimación del error: con qué error se trabaja y en qué medida es tolerable para que una corrida sea válida.
- Técnicas de reducción de varianza.
- Paralelización y vectorización: en aplicaciones con muchas variables se estudia trabajar con varios procesadores paralelos para realizar la simulación.

2.2.4 Aplicaciones

Diversas áreas en las que se aplica el método de Monte Carlo se listan a continuación:

- Criptografía.
- Densidad y flujo de tráfico.
- Diseño de reactores nucleares.
- Ecología.
- Econometría.
- Evolución estelar.
- Física de materiales.
- Métodos cuantitativos de organización industrial.
- Programas de computadora.
- Pronóstico de índices bursátiles.
- Prospecciones en explotaciones petrolíferas.
- Radioterapia contra el cáncer.
- Sistemas de colas.
- Sistemas de inventario.

2.2.5 Síntesis

El método de Monte Carlo es una herramienta de investigación y planeamiento; básicamente es una técnica de muestreo artificial, empleada para operar

numéricamente sistemas complejos que tengan componentes aleatorios o determinísticos, manteniendo tanto en la entrada como en la salida un cierto grado de incertidumbre. En Investigación Operativa, Monte Carlo es utilizado con fines experimentales, es decir, se pueden elaborar distintos modelos e ir intercambiando parámetros para estudiar cuáles serían los posibles resultados. Cuando el tamaño de las muestras es relativamente reducido, los resultados obtenidos en la simulación pueden ser muy sensibles a las condiciones iniciales.

2.3 TERMINOLOGÍA A EMPLEAR

A continuación, se listan y definen los términos tradicionalmente utilizados propios de la simulación, los cuales serán empleados a lo largo de este documento y cuya comprensión es vital para el seguimiento del mismo.

Sistema: se define como un conjunto de elementos vinculados entre sí que interactúan en el cumplimiento de una función determinada. Un sistema muchas veces se ve afectado por cambios en el entorno por lo que es imprescindible definir, según el propósito del estudio, los límites entre el sistema y su entorno.

La complejidad de un sistema está dada por el número de variables involucradas, las interrelaciones entre las mismas y la diversidad de tipos de variables y sus comportamientos. Las siguientes, son características de los sistemas complejos:

- Dinámicos: los cambios suelen darse en distintas escalas de tiempo y puede suceder que una variable que en el corto plazo se mantiene estable, en el largo plazo varíe radicalmente.
- Gobernados por el feedback: las decisiones alteran el estado del sistema causando cambios que dan origen a una nueva situación que influye en las próximas decisiones.
- No lineales: los efectos raramente son proporcionales a las causas. Múltiples factores interactúan entre sí.
- Dependientes de su historia: muchas acciones son irreversibles y condicionan la evolución futura del sistema.
- Auto-organizados: la dinámica del sistema surge espontáneamente debido a las características de su estructura interna.
- Adaptativos: las capacidades y las reglas de decisión cambian en el tiempo. Los agentes del sistema aprenden en base a la experiencia y toman decisiones con criterios distintos (no necesariamente mejores).

- No intuitivos: la causa y el efecto están separados en tiempo y espacio. Lo que a simple vista parece ser la causa, sólo es un síntoma del problema. Es difícil encontrar puntos de apalancamiento.
- Los efectos a corto plazo normalmente difieren de los efectos a largo plazo. Debido a esto, decisiones estratégicas pueden producir en principio resultados que parecieran ser negativos pero a largo plazo mejoran radicalmente las cosas.

Variables: arreglo de información necesaria y suficiente que describe la situación del sistema en determinado momento. Generalmente varían a lo largo del tiempo y están vinculadas con el propósito del estudio y el diseño del modelo.

Tipos de variables:

- Discretas y continuas
- Independientes, relacionadas y aleatorias
- Variables de estado y de flujo
- Parámetros y variables de decisión.
- Inercia, umbrales, triggers y lags.

Relaciones entre variables:

- Causa-efecto.
- Acción-reacción.
- Feedback positivo y negativo.

Entidades: objetos o componentes del sistema que requieren representación explícita en el modelo.

Atributos: son las propiedades que definen cada entidad.

Eventos: ocurrencia que altera el estado del sistema. Entre eventos, el sistema permanece inalterado.

Modelo: es una representación simplificada de un sistema que se realiza con el propósito de poder estudiarlo. Se requiere, sin embargo, el nivel de detalle

suficiente para poder obtener conclusiones válidas sobre el sistema real. Incluye todos los componentes del sistema que son relevantes para su estudio. El modelo permite estudiar el sistema sin la necesidad de que siquiera exista (es el caso en que se utiliza para diseñar un sistema).

2.4 SOFTWARE ESPECIALIZADO: ROCKWELL ARENA

Para modelizar y analizar el complejo sistema que da origen a este proyecto, se utilizó el software especializado denominado Arena, de la empresa Rockwell. Fue necesario recurrir a este tipo de aplicación debido a que herramientas de mayor simplicidad (al menos en lo que a simulación respecta) como el Excel de Microsoft, que permite generar valores aleatorios sujetos a distintas distribuciones pero con un nivel de manipulación y transformación posterior de los mismos muy limitado, resultan inadecuadas para modelar sistemas complejos.

Rockwell Arena es un software de simulación y automatización que utiliza el lenguaje de procesamiento y simulación denominado SIMAN. Arena es utilizado extensivamente para simular los procesos de una empresa, como los de una planta manufacturera, para analizar tanto su performance actual como las posibles modificaciones que podrían realizarse. Simulando un proceso en detalle, el analista puede ver los resultados de los cambios sin tener que implementarlos en tiempo real, ahorrando tiempo y recursos valiosos.

En Arena, el usuario construye un modelo experimental mediante la colocación de módulos que representan procesos o lógicas. Líneas conectoras son utilizadas para unir estos módulos y especificar el flujo de las entidades. Mientras que los módulos contemplan acciones específicas relativas a las entidades, flujo y tiempo, la representación precisa de cada módulo y entidad relativa a objetos de la vida real está sujeta al criterio del modelador. Información estadística relativa a los procesos puede ser registrada y accedida como reportes.

Arena se integra muy bien con las tecnologías de Microsoft. Incluye Visual Basic para aplicaciones de manera que los modelos puedan ser aún más automatizados en el caso de que ciertos algoritmos sean requeridos. Por otro lado, tiene soporte para importar y emitir información en formato de hoja de cálculo para Excel o bases de datos Access.

Para facilitar la visualización y la organización, los módulos están típicamente agrupados en paneles para componer plantillas. Cambiando estas plantillas, se gana acceso a todo un set distinto de capacidades de construcción y modelización. En muchos casos, módulos de diferentes paneles y plantillas pueden ser utilizados juntos en un mismo modelo.

Arena incluye animación dinámica en el mismo medio de trabajo. También provee soporte integrado, incluyendo gráficos, para algunas de las cuestiones de diseño y análisis estadístico que son parte clave de un buen estudio de simulación.

2.4.1 Módulos utilizados en el estudio de simulación

A continuación se presenta una breve reseña sobre los distintos módulos a emplear (su representación en Arena puede apreciarse en la figura 2.4.1), de manera que de no poseer conocimiento alguno sobre el programa, el lector pueda comprender y seguir las lógicas de los distintos modelos de los sistemas que más adelante se desarrollarán:

Create: este módulo es el punto de partida o entrada de las entidades en un modelo de simulación. Las mismas son creadas utilizando un calendario o basándose en tiempos entre arribos. Las entidades posteriormente abandonan el módulo para comenzar su procesamiento a través del sistema. El tipo de entidad se especifica en este módulo.

Decide: este módulo permite procesos de toma de decisiones en el sistema. Incluye opciones para tomar decisiones basadas en una o más condiciones (según un atributo, valor de una variable, tipo de entidad o una expresión lógica) o basadas en una o más probabilidades.

Assign: este módulo se utiliza para asignar nuevos valores a las variables, atributos de las entidades, tipo de entidades, etc. Asignaciones múltiples pueden realizarse a través de un solo módulo assign.

Dispose: este módulo se emplea como punto de salida para las entidades en un modelo de simulación. Las estadísticas de las mismas pueden ser recopiladas antes de que las mismas abandonen el sistema.

Batch: cumple la función de ser el mecanismo de agrupación dentro de un modelo de simulación. Lotes o tandas de entidades pueden ser agrupadas temporal o permanentemente. Las agrupaciones temporales deben ser separadas posteriormente con el módulo separate.

Se pueden agrupar entidades según un número específico de entidades entrantes o basándose en un atributo común.

Las entidades que llegan al módulo batch son ubicadas en una cola hasta que la cantidad requerida haya sido acumulada. En ese momento, una nueva entidad representativa es creada.

Delay: se utiliza para demorar una entidad por un período de tiempo predefinido. Cuando la entidad llega al módulo, la expresión del tiempo de demora es evaluado y la entidad permanece en el módulo por el período de tiempo resultante.

Separate: este módulo puede ser usado para replicar una entidad entrante en múltiples entidades o para separar un lote previamente armado en un módulo batch. Cuando se realiza esto último, la entidad representativa temporal se desecha y las entidades originales que forman el grupo son recuperadas. Cuando se duplican entidades, se realiza el número especificado de copias y a su vez la entidad original también deja el módulo y prosigue su curso en el sistema.

Hold: este módulo sirve para retener una entidad en una cola a la espera de una señal o de que se cumpla una condición especificada, o de manera permanente.

Readwrite: este módulo se utiliza para transcribir información en un dispositivo de salida, como ser la pantalla o un archivo. Los valores de los atributos, variables o expresiones listadas se escriben de acuerdo a un formato especificado.

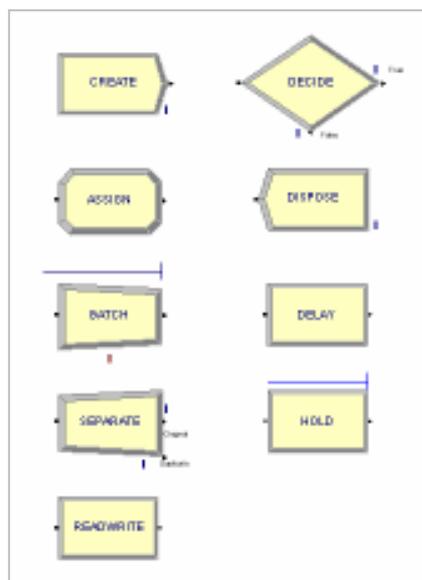


Figura 2.4.1. Módulos de Arena a utilizar.

CAPÍTULO III ESTUDIO DE SIMULACIÓN

Ya introducidos los conceptos básicos, metodologías, herramientas existentes y a utilizar, se está en condiciones de encarar el estudio de simulación con el fin de encontrar una solución a la problemática planteada, que sea compatible con los intereses de Tibex y sus capacidades, desde el punto de vista de su disponibilidad de recursos.

El estudio abarcará una serie de etapas y procedimientos, los cuales se introducen a continuación:

Formulación del problema y objetivos

Es necesario establecer claramente qué es lo que se busca con el estudio, describir la situación o problemática presente y determinar qué tipo de output o resultados se desean obtener, para poder establecer parámetros de medición y comparación.

Recolección de información

Normalmente es una de las etapas que mayor tiempo demandan en la realización de un proyecto de estas características. Esto se debe a que para poder hacer análisis e inferencias estadísticas confiables, se requiere de muestras de un tamaño considerable que servirán de input al modelo.

Esta etapa también contempla la determinación de las distribuciones probabilísticas que rigen la naturaleza del comportamiento de las variables medidas, cuyo fin último es la generación artificial de nuevas muestras con las cuales trabajar en el modelo.

Conceptualización y traducción del modelo

La conceptualización requiere de la habilidad de poder reconocer las características esenciales del problema, elegir y modificar los supuestos básicos que caracterizan al sistema y luego enriquecer y elaborar el modelo hasta obtener una aproximación que sea útil en función de los objetivos planteados. Sin embargo, la complejidad del modelo no debe exceder la requerida para cumplir con los propósitos para los cuales fue diseñado. El incumplimiento de este principio sólo derivará en una utilización excesiva de los recursos.

Por traducción del modelo se entiende la codificación del mismo para ser procesado en un formato computacional reconocible, debido al enorme caudal de información que se debe procesar. Como ya se estableció anteriormente, esto se realizará mediante el software especializado denominado Arena.

Verificación y validación

Estos dos procesos, si bien difieren conceptualmente, usualmente son desarrollados simultáneamente por el modelador. La verificación está asociada al buen desempeño de la herramienta informática. Con modelos complejos es difícil, sino imposible, traducir un modelo exitosamente en su totalidad, sin una buena medida de prueba, error y corrección. Si los parámetros de entrada y las estructuras del modelo son correctamente representados en la computadora, la verificación se da por finalizada. En su mayor parte, el sentido común se utiliza para completar esta etapa.

La validación es la determinación de que un modelo es una representación precisa del sistema real. La validación se logra generalmente a través de la calibración del modelo, un proceso iterativo que consiste en comparar el modelo con la conducta del sistema observado y usar las discrepancias entre ambos para mejorar el modelo. Este proceso se repite hasta que, a juicio del modelador, la precisión obtenida sea aceptable.

Diseño experimental

En esta etapa se plantean y simulan distintas alternativas que surgen a partir de la modificación del modelo base (que describe el sistema actual). Contempla la readaptación de la representación en el software utilizado y, finalmente, la selección y recolección de la información obtenida como output o resultado.

Número de corridas

La determinación del número de corridas se realiza a partir de el grado de precisión o variación deseados en los resultados obtenidos, y el nivel de confianza, desde el punto de vista de la probabilidad y estadística, de los mismos.

Procesamiento y análisis de resultados

Finalmente, una vez corridos todos los modelos y recopilado el output de los mismos, se estudia la información obtenida desde los diversos puntos de vista que competen a los objetivos por los cuales la simulación fue realizada.

Cabe destacar que si bien los ítems descriptos fueron presentados y se desarrollarán de forma secuencial o independiente (con el fin de dar coherencia y ayudar a la comprensión de los mismos), en la práctica esto no es así. Durante la realización del estudio todas las etapas se retroalimentan unas a otras de forma iterativa, variando sus alcances, contenidos y objetivos, desarrollándose paralelamente y de manera sistémica. A continuación, se

desarrolla en detalle la aplicación de cada una de las etapas antes mencionadas.

3.1 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA Y OBJETIVOS

La empresa en estudio, Tibex, desarrolla actualmente su logística de distribución con un camión propio, cuya capacidad nominal es de 3600 kg, y mediante la contratación de flota tercerizada. Esta última se emplea en los casos en que el peso de la carga a transportar supera a la capacidad del camión propio, o por cuestiones de cumplimiento de entregas dentro de los plazos establecidos en el nivel de servicio pactado.

Manteniendo el nivel de servicio vigente, lo que se busca es determinar si económicamente es más conveniente tercerizar la distribución en su totalidad o mantener la estructura actual.

Otra línea de estudio considera el reemplazo del camión actual por uno o más camiones de menor porte. Esta alternativa surge por el hecho de que se observa que, aunque se deba contratar a terceros por cuestiones de tiempo y distribución geográfica de los clientes, el porcentaje de utilización en peso promedio del camión propio en cada viaje es relativamente bajo. Por eso se buscaría utilizar otro rodado cuyo grado de aprovechamiento de la capacidad sea mayor y que, por su menor tamaño, valor, consumo, etc., represente una mejoría a nivel económico.

En resumidas cuentas, el objetivo del estudio de simulación es determinar la estructura de la logística de distribución que represente el menor costo, sin alterar el nivel de servicio.

Se consideró que el estudio de este problema debía realizarse a través de la simulación del mismo, por la reducida capacidad de los métodos determinísticos de incorporar las condiciones particulares y reglas que hacen a la operación de la logística de esta empresa, las cuales se desarrollarán en etapas posteriores.

3.2 RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

La toma de datos se efectuó a partir de los contenidos de las hojas de ruta correspondientes a un período de cuatro meses consecutivos. Estas hojas fueron confeccionadas tanto para el camión propio como para la flota tercerizada. En total, se recopiló información de 82 días de operación en los que se procesaron 474 pedidos.

La información contemplada se lista a continuación:

- Cantidad de destinos (pedidos) por viaje.
- Distancia total recorrida en kilómetros en cada viaje.
- Peso en kilogramos correspondiente a cada destino.
- Tiempo de viaje total y de demoras por cada destino.

A continuación se estudiará la naturaleza del comportamiento de cada una de estas variables, determinando las distribuciones probabilísticas que las rigen y que se utilizarán para generar muestras artificiales.

3.2.1 Número de pedidos diarios (Q)

La cantidad de destinos (dato observado) en cada viaje es equivalente a la cantidad de pedidos de clientes que entraron para ser procesados ese día (se profundizará más sobre esto en la etapa de conceptualización del sistema).

Normalmente el comportamiento de este tipo de variables se rige por la distribución de Poisson (discreta). La misma es utilizada para modelar un número aleatorio de eventos ocurridos en un intervalo fijo de tiempo. Si el tiempo transcurrido entre eventos sucesivos está distribuido exponencialmente, entonces el número de eventos ocurridos en un tiempo fijo tiene una distribución de Poisson. Otro uso que se le suele dar es el de modelar tamaños de lote aleatorios. Esta distribución tiene un solo parámetro, λ , que es equivalente a la media y a la varianza. La forma genérica de la distribución y su función de masa de probabilidad se muestran en la figura 3.2.1.

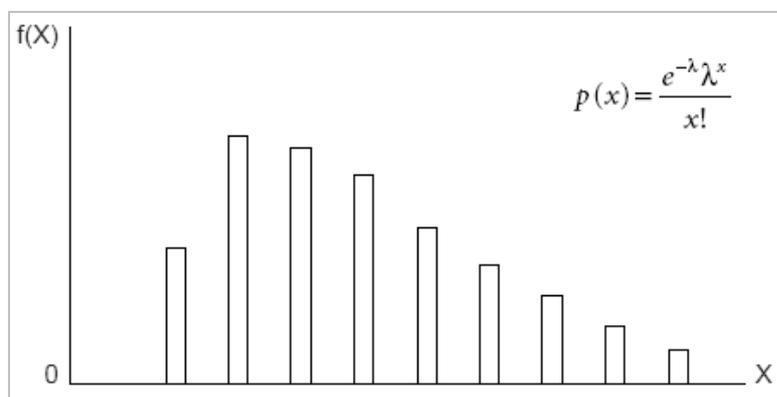


Figura 3.2.1. Forma genérica y función de masa de probabilidad de la distribución de Poisson.

El método más básico para determinar si una variable responde a un determinado comportamiento es el de comparar cualitativamente el gráfico de la distribución teórica, utilizando los parámetros calculados sobre la muestra, con el histograma de frecuencias de la misma. Para el caso de la variable pedidos, esto se vislumbra en la figura 3.2.2.

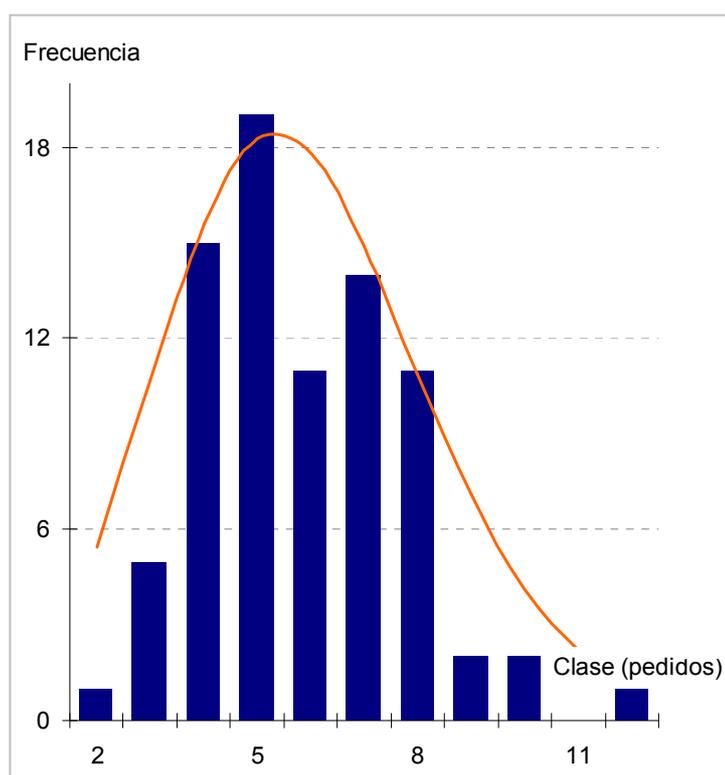


Figura 3.2.2. Histograma de frecuencias de los pedidos (Q).

Intuitivamente puede verse que el histograma se ajusta a la curva que representa el comportamiento teórico según la distribución de Poisson, lo cual es un buen indicador de que la elección de la distribución ha sido acertada. Para traducir esto y obtener una conclusión definitiva en base a un método objetivo y analítico, se emplea el test de bondad de ajuste chi-cuadrado. Este se basa en la comparación del número de observaciones obtenido contra el número esperado de observaciones.

Los pasos para la ejecución del test chi-cuadrado se listan a continuación:

- Establecer la hipótesis nula: esto es decir que la muestra a evaluar podría corresponder a una determinada distribución teórica. En nuestro caso la de Poisson.

Cálculo del estadístico (χ^2) del test chi-cuadrado a partir de la muestra. La fórmula correspondiente es la que sigue:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(O_i - E_i)^2}{E_i} \quad (3.2.1)$$

Donde:

O_i = número de observaciones en el i -ésimo intervalo o clase.

E_i = número esperado de observaciones en el i -ésimo intervalo o clase. Resulta de multiplicar la probabilidad de ocurrencia P_i , correspondiente a cada clase, y el tamaño de la muestra. Se considera una buena práctica tomar valores no menores a tres para este parámetro.

n = número de intervalos

En la tabla 3.2.1 se puede apreciar la información utilizada para realizar el histograma antes presentado y calcular el estadístico del test. El valor del parámetro λ de la muestra es de 5,85.

Clase	Frecuencia	P_i	E_i	$[(O_i - E_i)^2] / E_i$
2	1	0,05	3,99	2,24
3	5	0,10	7,78	0,99
4	15	0,14	11,38	1,15
5	19	0,16	13,32	2,43
6	11	0,16	12,99	0,30
7	14	0,13	10,86	0,91
8	11	0,10	7,94	1,18
9	2	0,06	5,16	1,94
10	2	0,04	3,02	0,35
11	0	0,02	3,00	3,00
12	1	0,01	3,00	1,33
<i>Estadístico</i>				<i>15,8</i>

Tabla 3.2.1. Resolución del test chi-cuadrado para la variable pedidos (Q).

- Al valor obtenido del estadístico se lo compara con los valores de tabla para determinar con qué nivel de confianza no se rechaza la hipótesis nula. En este caso particular se obtiene que la hipótesis nula, con un nivel de confianza cercano al 95%, no se rechaza.

Con lo observado en el histograma de frecuencias y el elevado nivel de confianza obtenido en el test, se puede concluir que el uso de la distribución de Poisson para representar el comportamiento de la cantidad de pedidos diarios de clientes, es adecuado.

3.2.2 Distancia atribuible a cada pedido (KM)

El objetivo que se busca al evaluar esta variable, es poder asignar una determinada distancia a recorrer por cada pedido realizado por los clientes. Esto se debe a que una componente del costo del transporte tercerizado es variable respecto de la distancia recorrida. Como el dato del que se dispone es la distancia total recorrida por viaje (que incluye varios destinos o pedidos), lo que se hace es dividir el kilometraje total recorrido por el número de pedidos atendidos en dicho viaje.

El primer paso para determinar qué distribución utilizar es, como se mencionó anteriormente, estudiar el histograma de frecuencias de la muestra observada. El mismo puede apreciarse en la figura 3.2.3 (junto con la curva de frecuencias acumuladas) y los valores empleados para su configuración se muestran en la tabla 3.2.2.

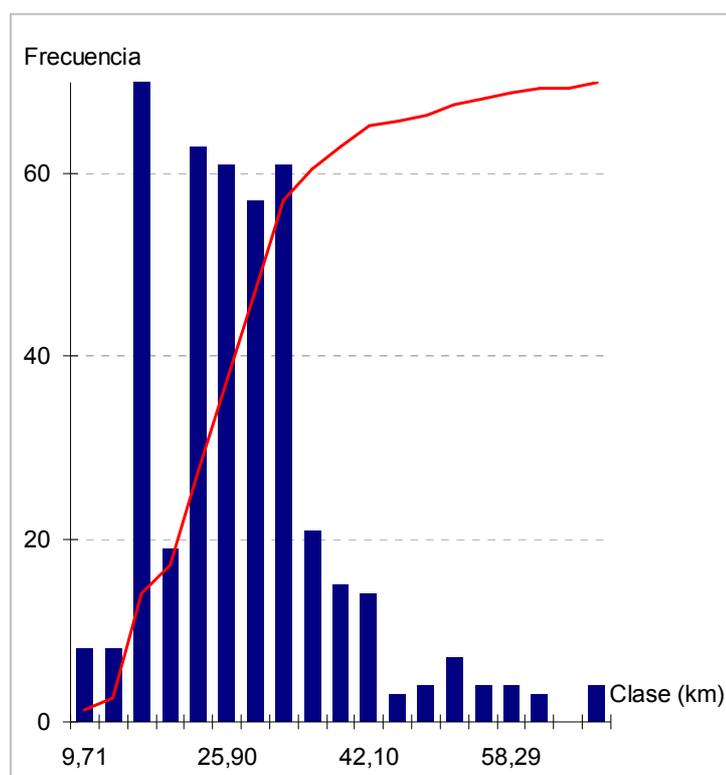


Figura 3.2.3. Histograma de frecuencias de la distancia atribuible a cada pedido (KM).

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>
9,71	8	1,88%
12,95	8	3,76%
16,19	70	20,19%
19,43	19	24,65%
22,67	63	39,44%
25,90	61	53,76%
29,14	57	67,14%
32,38	61	81,46%
35,62	21	86,38%
38,86	15	89,91%
42,10	14	93,19%
45,33	3	93,90%
48,57	4	94,84%
51,81	7	96,48%
55,05	4	97,42%
58,29	4	98,36%
61,52	3	99,06%
64,76	0	99,06%
68,00	4	100,00%

Tabla 3.2.2. Clases para el histograma de frecuencias de la distancia recorrida (KM)

Si bien puede observarse que el histograma se asemeja al de una distribución normal, esta es incompatible debido a que, naturalmente, una distancia no puede adoptar valores negativos. Determinar la distribución más adecuada para este tipo de variables es más complejo que en el caso de los pedidos diarios.

El software Arena ofrece una aplicación complementaria, denominada Input Analyzer, la cual es de gran utilidad. Uno de los principales usos de esta herramienta (y el que a su vez es de nuestro interés), es el de determinar la distribución (y el valor que adoptan sus parámetros característicos) a la que mejor se ajusta un set de observaciones o valores ingresado. El programa evalúa esto contrastando el ajuste de las principales distribuciones que se utilizan habitualmente en el campo de la estadística aplicada.

Una vez ejecutado el software se obtienen, para la variable distancia, los resultados que se muestran en la figura 3.2.4.

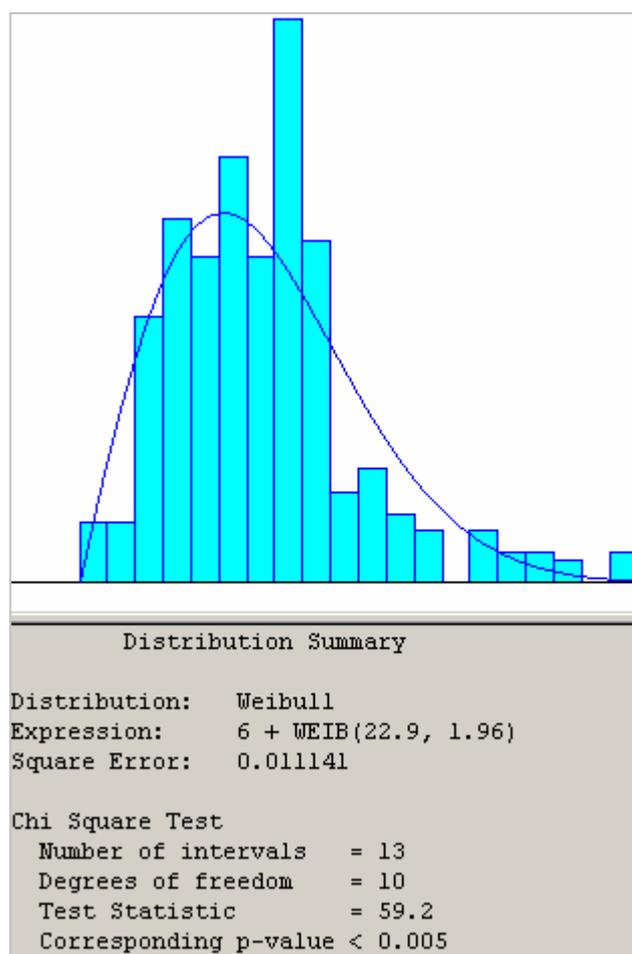


Figura 3.2.4. Resultados de evaluación del Input Analyzer para la variable distancia (KM).

El programa devuelve el histograma de frecuencias de los datos ingresados, superpuesto con la curva de la distribución elegida. En este caso se determinó que el comportamiento de la variable responde a una distribución de Weibull desplazada, y que el nivel de confianza es superior al 99,5% según el test chi-cuadrado. El histograma difiere del antes presentado debido simplemente a que el Input Analyzer toma distintos intervalos en los que evalúa las frecuencias. A su vez, el programa devuelve la expresión que debe ser ingresada en el Arena para generar los respectivos valores aleatorios bajo la distribución determinada.

La distribución de Weibull es empleada generalmente para representar distribuciones que no pueden adoptar valores negativos. Esta situación se da por lo general con distribuciones simétricas como la normal, que representa tiempos de servicio o proceso. Si la media es pequeña y el desvío suficientemente largo, muchas observaciones se acumulan en el tramo izquierdo de la distribución adquiriendo valores cercanos a cero. Esto resulta

en una distribución asimétrica. El tramo derecho puede todavía mostrar una forma clásica como la de cola derecha de una normal.

La distribución de Weibull posee dos parámetros característicos: el parámetro de forma α y el de escala, β . Dependiendo del valor de estos, la distribución puede tomar forma diversas, yendo desde una exponencial hasta una normal.

En la figura 3.2.5 se puede apreciar la forma genérica de la distribución y su función de densidad de probabilidad.

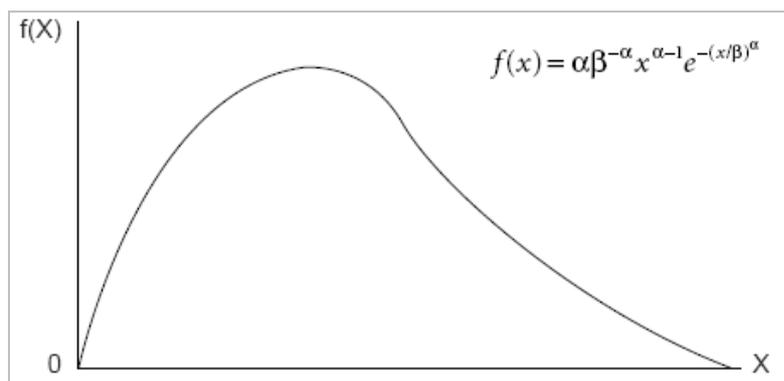


Figura 3.2.5. Distribución de Weibull.

3.2.3 Cantidad pedida por cada cliente (KG)

El estudio de esta variable es determinante debido a que es clave a la hora de definir en la operación diaria si se requerirá o no la contratación de flota a terceros y la capacidad de la misma, principal componente del costo.

Para determinar la ley del comportamiento de la cantidad de producto solicitado por cada cliente, medida en kilogramos, se procede de la misma manera que con las variables ya estudiadas. En la figura 3.2.6 puede apreciarse el histograma respectivo y la curva de frecuencia acumulada.

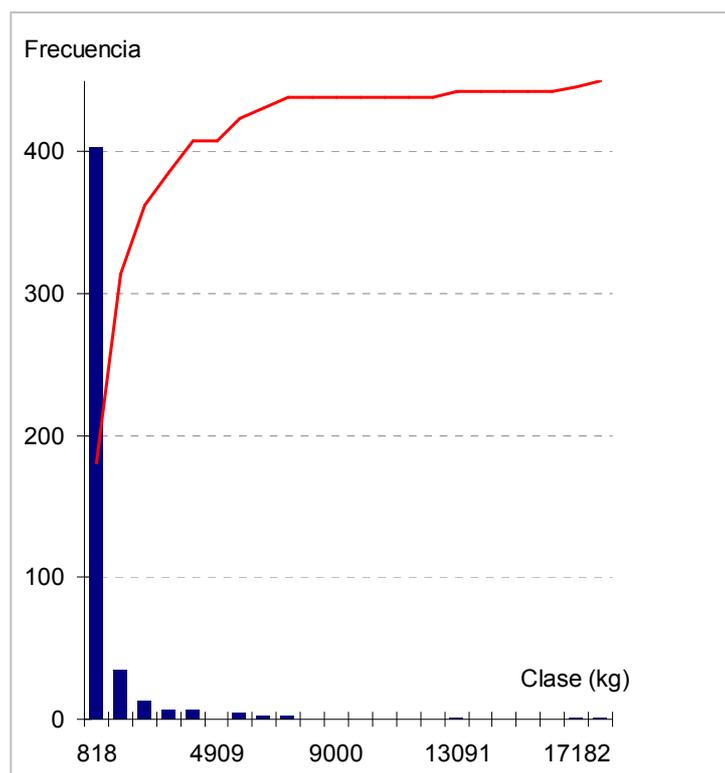


Figura 3.2.6. Histograma de frecuencias del peso de pedido (KG).

La tabla 3.2.3 resume el procesamiento de los datos utilizados para la construcción del histograma.

<i>Clase</i>	<i>Frecuencia</i>	<i>% acumulado</i>
818	403	85,02%
1636	35	92,41%
2455	13	95,15%
3273	6	96,41%
4091	6	97,68%
4909	0	97,68%
5727	4	98,52%
6545	2	98,95%
7364	2	99,37%
8182	0	99,37%
9000	0	99,37%
9818	0	99,37%
10636	0	99,37%
11455	0	99,37%
12273	0	99,37%
13091	1	99,58%
13909	0	99,58%
14727	0	99,58%
15545	0	99,58%
16364	0	99,58%
17182	1	99,79%
18000	1	100,00%

Tabla 3.2.3. Clases para el histograma de la variable peso (KG).

Nuevamente nos encontramos con una variable que no puede adoptar valores negativos. La forma del histograma se asemeja a la de una distribución exponencial, la cual es utilizada generalmente para modelar el tiempo entre la ocurrencia de eventos independientes que se suceden a una tasa de tiempo constante. Evidentemente la variable en estudio no encaja en dicha descripción, por lo cual la manera más prudente de proceder para determinar la distribución a utilizar es mediante el uso del Input Analyzer. Los resultados obtenidos se presentan en la figura 3.2.7.

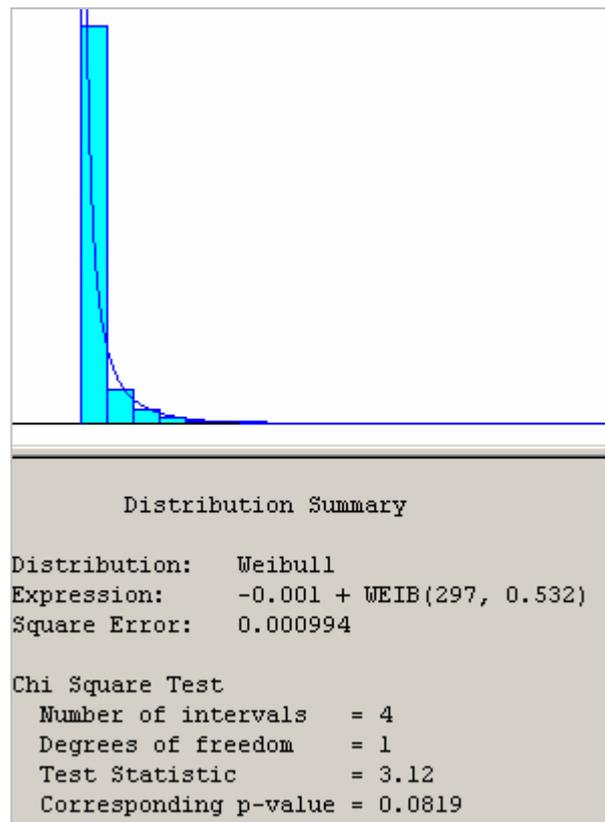


Figura 3.2.7. Evaluación del Input Analyzer para el peso del pedido (KG).

Nuevamente el programa determina que la distribución que mejor se ajusta al comportamiento de la variable es la de Weibull, con un nivel de confianza superior al 90% (según el test de bondad de ajuste chi-cuadrado).

3.2.4 Tiempo de viaje por pedido (T)

Esta variable requiere ser contemplada en el modelo de simulación, debido a que, al igual que con la distancia recorrida (KG), el valor que adopte es una componente variable del costo total de tercerización.

La información disponible en la hoja de ruta (relativo al tiempo empleado), es la duración total del viaje y las demoras puntuales de cada pedido o destino. Para asignar un único valor a cada pedido, la metodología empleada fue la de dividir el tiempo total de viaje (restándole la demora total) por el número de destinos. A ese valor se le suma el tiempo de demora correspondiente a cada pedido, en caso de haberlo.

Como se ha venido haciendo en el estudio de las variables anteriores, se presenta el histograma de frecuencias en la figura 3.2.8 y la tabla 3.2.4 con los datos que configuran el mismo.

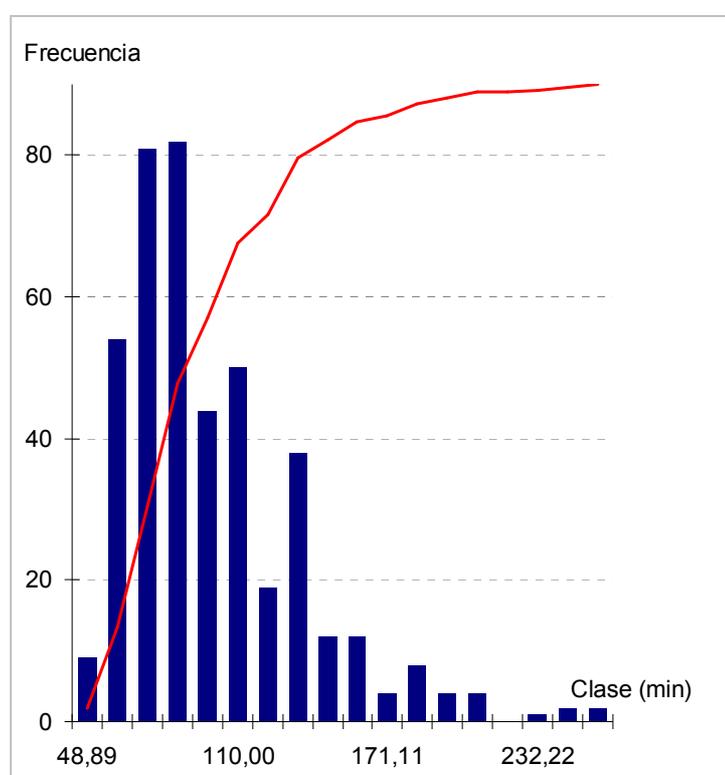


Figura 3.2.8. Histograma de frecuencias del tiempo asignado a cada pedido (T).

Clase	Frecuencia	% acumulado
48,89	9	2,11%
61,11	54	14,79%
73,33	81	33,80%
85,56	82	53,05%
97,78	44	63,38%
110,00	50	75,12%
122,22	19	79,58%
134,44	38	88,50%
146,67	12	91,31%
158,89	12	94,13%
171,11	4	95,07%
183,33	8	96,95%
195,56	4	97,89%
207,78	4	98,83%
220,00	0	98,83%
232,22	1	99,06%
244,44	2	99,53%
256,67	2	100,00%

Tabla 3.2.4. Clases para el histograma del tiempo recorrido (T)

La forma del histograma obtenido es similar al de la variable distancia (KM), por lo cual sería de esperar que de la misma manera responda a una distribución de Weibull. Sin embargo, una vez analizados los datos con el Input Analyzer, se obtiene que la distribución más apropiada es la de Erlang, con un nivel de confianza superior al 99,5% (según el test chi-cuadrado). El output del programa se observa en la figura 3.2.9.

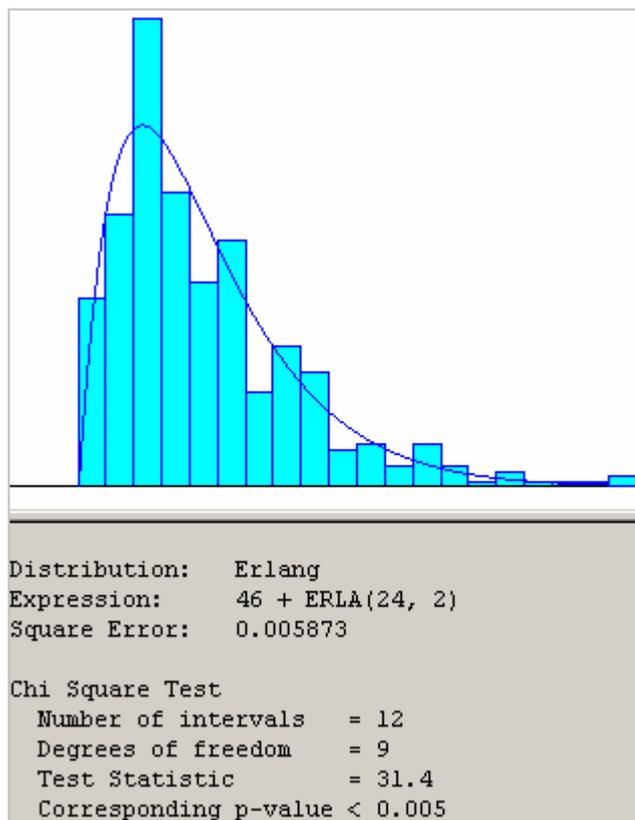


Figura 3.2.9. Evaluación del Input Analyzer de la variable tiempo asignado a cada pedido (T).

La distribución de Earlang es utilizada en situaciones en las cuales una actividad se desarrolla en sucesivas etapas y cada una de ellas posee una distribución exponencial. Otro uso frecuente es el de representar el tiempo requerido para completar una tarea, el cual es compatible con la variable en estudio. La distribución de Earlang es un caso especial de la distribución gama, en el cual el parámetro de forma, α , es un número entero (k). Posee otro parámetro, θ , que representa la escala.

Algunas de las diversas formas que puede adoptar y su función de densidad de probabilidad se presentan en la figura 3.2.10.

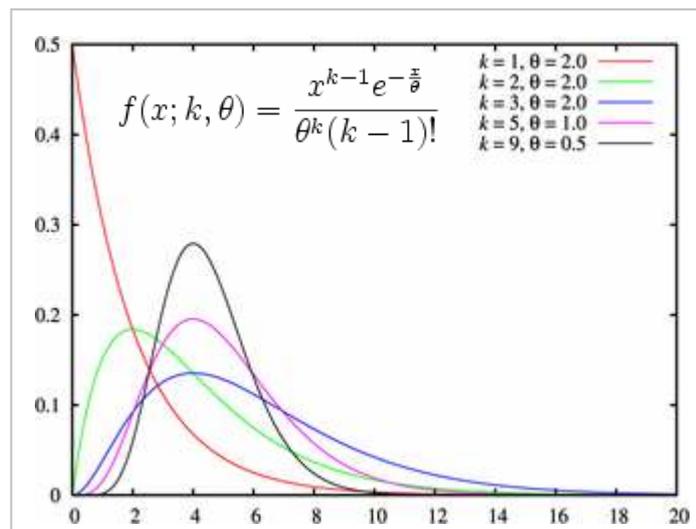


Figura 3.2.10. Distribución de Earlang.

3.3 CONCEPTUALIZACIÓN Y TRADUCCIÓN DEL MODELO

En la etapa de conceptualización, se describirá todo lo relativo al desarrollo de las actividades logísticas de Tibex en la actualidad, cuya modelización servirá de base para plantear y experimentar con otros escenarios durante el diseño experimental. Esta descripción abarcará las reglas fundamentales de la operación diaria y las simplificaciones o supuestos que se utilizarán para simular este comportamiento. Posteriormente, en la traducción del modelo, se describirá la implementación y configuración del modelo en el Arena, y se desarrollará en detalle su lógica de funcionamiento.

3.3.1 Descripción del proceso logístico de distribución actual

Tibex distribuye los productos que comercializa a una base más o menos estable de más de cien clientes, los cuales se encuentran ubicados

geográficamente en diversas zonas de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y sus alrededores. Para ello dispone de un camión cuya capacidad nominal es de 3600 kg, el cual es operado por dos empleados de la empresa encargados de su conducción y de la carga y descarga en los puntos de entrega.

Cuando la carga a transportar para un determinado pedido supera la capacidad del camión o cuando es necesario acelerar un envío para cumplir con los tiempos pactados con el cliente, se contratan camiones a una empresa proveedora de servicios logísticos. Esta utiliza vehículos cuyas capacidades nominales son de 600, 1000, 4000 y 8000 kg, y sus tarifas poseen una componente fija y dos variables (según la distancia y tiempo empleados por encima de un valor de corte), cuyo valor y tasas se incrementan con la capacidad del camión contratado.

A fin de organizar las entregas, trazar las rutas y maximizar el aprovechamiento del camión propio en cada viaje, se divide la región de entrega en 2 partes: la primera (zona denominada norte) comprende la mitad superior de la ciudad y el norte y noroeste del conurbano; la segunda (zona denominada sur) está formada por la mitad inferior de la ciudad y las zonas sur y suroeste del conurbano. En la zona norte se ubican los clientes más importantes y provienen de la misma el 65% del total de pedidos. Esta región es atendida los días lunes, martes y miércoles. En la zona sur se originan el 35% restante de los pedidos, los cuales son atendidos jueves y viernes. Los fines de semana la empresa no distribuye ni atiende pedidos.

Las entregas de los pedidos que ingresan durante un día son procesados al final del mismo, momento en que se programa el recorrido del camión propio para el día siguiente. Debido a la naturaleza de los distintos tipos de productos que se comercializan (a granel o pellets, de alta densidad) y las distintas presentaciones en las que se ofrecen, el único limitante a la hora de cargar un camión es la capacidad en peso del mismo, sin ser el volumen de la carga un factor a tener en cuenta.

3.3.2 Supuestos establecidos para el modelado

Traducir en un lenguaje informático un modelo que represente el sistema con un 100% de precisión, si no es imposible, es una tarea extremadamente compleja y la cantidad de recursos necesarios para lograrlo serían desmedidos. Por lo tanto, estableciendo una serie de supuestos fundamentales elegidos a conciencia y luego de estudiar y lograr un profundo entendimiento del sistema, se puede simplificar la complejidad de la lógica requerida por el sistema y proporcionar resultados válidos para realizar conclusiones a partir de los mismos. Los supuestos elegidos a emplear en el caso en estudio se listan a continuación:

- Cada pedido realizado por los clientes equivale a un destino o punto de entrega.
- El camión propio realizará un máximo de un viaje diario (que puede incluir múltiples destinos).
- El camión propio recibirá mantenimiento durante los fines de semana, estando disponible de lunes a viernes durante el período de estudio.
- Siempre habrá gente disponible para operar el camión.
- Los pedidos entrantes son procesados el mismo día, pero recién pueden ser despachados a partir del siguiente.
- De ser necesario, los camiones contratados serán utilizados cada día y para cada zona según los criterios que figuran en la tabla 3.3.1. Estas medidas apuntan a maximizar el nivel de servicio y minimizar el número de camiones contratados (acorde a las políticas empleadas por Tibex en la actualidad).
- Los pedidos de cada zona serán atendidos por orden de llegada, a excepción del caso particular de aquellos de la zona norte que superan los 3600 kg y son ordenados los días lunes, debido a que recién se los podrá despachar el miércoles siguiente.

	Lunes	Martes	Miércoles	Jueves	Viernes
Norte	Pedidos recibidos Miércoles, Jueves y Viernes cuyo peso es mayor que la capacidad del camión propio.	-	Pedidos recibidos Lunes y Martes cuyo peso es mayor que la capacidad del camión propio y todos aquellos que no hayan podido ser entregados entre Lunes y Miércoles por saturación del camión propio.	-	-
Sur	-	-	-	Pedidos recibidos Viernes, Lunes, Martes y Miércoles cuyo peso es mayor que la capacidad del camión propio.	Pedidos recibidos los Jueves cuyo peso es mayor que la capacidad del camión propio y todos aquellos pendientes que no hayan podido ser entregados con el camión propio el Jueves o Viernes.

Tabla 3.3.1. Utilización diaria de los camiones contratados.

3.3.3 Lógica del modelo en Arena

La traducción del sistema al medio informático es una de las etapas más complejas y de mayor dificultad de todo el estudio. Incluso con las simplificaciones de la realidad adoptadas, acotar el sistema resultante restringido a los parámetros y limitaciones de la aplicación utilizada, requiere de un profundo proceso analítico para poder contemplar todos los escenarios posibles y que el modelo responda a los mismos de manera coherente y acorde al sistema real.

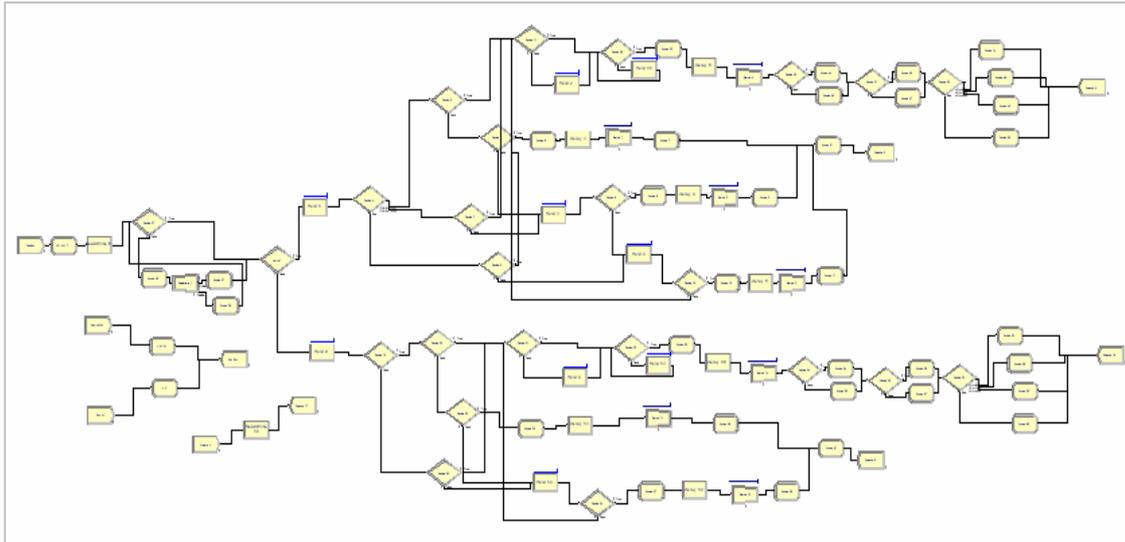


Figura 3.3.1. Visualización global del modelo en Arena.

En la figura 3.3.1 se presenta de manera global el modelo, con todos sus módulos y caminos lógicos. En la misma puede verse que existen tres unidades independientes, las cuales no están interconectadas unas con otras. Una de ellas, la mayor, es el camino principal que recorren las entidades del modelo, es decir, los pedidos de cada cliente. Los otros dos, de menor tamaño y complejidad, son sistemas auxiliares que serán explicados en detalle más adelante.

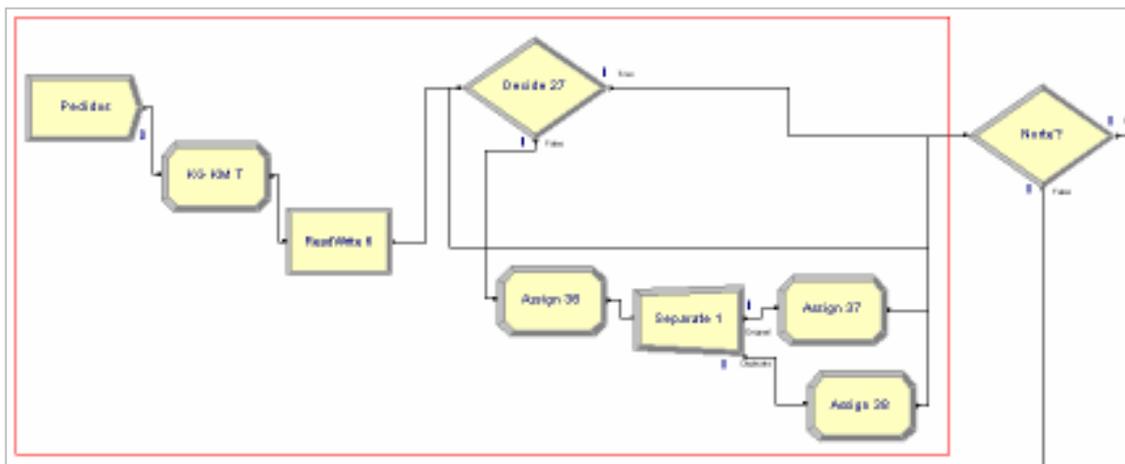


Figura 3.3.2. Punto de partida de las entidades en el modelo y asignación de atributos clave.

En la figura 3.3.2 se aprecia el primer recorrido que realizan las entidades o pedidos. Estos ingresan por el módulo create de manera constante una vez por día, al comienzo del mismo. Esto es así porque representan a los pedidos hechos por los clientes el día anterior, que comienzan su despacho a primera hora de la mañana. La cantidad de pedidos varía según la distribución de

Poisson, como se explicara anteriormente. A continuación, atraviesan un módulo assign donde se le atribuye a cada pedido por separado (acorde a las distribuciones probabilísticas estudiadas) las principales características a considerar: cantidad de producto (Q), su aporte al tiempo de viaje del camión (T) y su contribución a la distancia recorrida (KM). El siguiente módulo a recorrer es un readwrite cuyo fin es recolectar información y volcarla en una planilla de Excel para estudiar la respuesta de las distribuciones utilizadas, en la etapa de verificación y validación. Por lo tanto, no interviene propiamente en la lógica del modelo modificando el comportamiento de las entidades.

A continuación los pedidos deberán pasar por un módulo decide que evaluará si el peso del pedido excede el límite de 8000 kg (carga máxima del camión contratado). De estar por debajo de dicho límite, la entidad seguirá su camino por el conector superior. Caso contrario, seguirá el ramal inferior y atravesará un módulo assign el cual registrará en una variable de cuánto es el exceso en peso. A través de un módulo separate se creará una réplica de la entidad excedida. Se modificará el atributo peso de las mismas, asignándole a una un valor de 8000 kg y a la otra el valor restante del pedido que fuera registrado en la variable ya mencionada. Ahora, estas dos nuevas entidades se comportarán como pedidos independientes y volverán a pasar por el módulo decide inicial. La de 8000 kg seguirá su camino sin problemas y la otra la seguirá en función de cuánto haya sido el excedente (de ser superior a 8000 kg recorrerá el proceso de separación nuevamente).

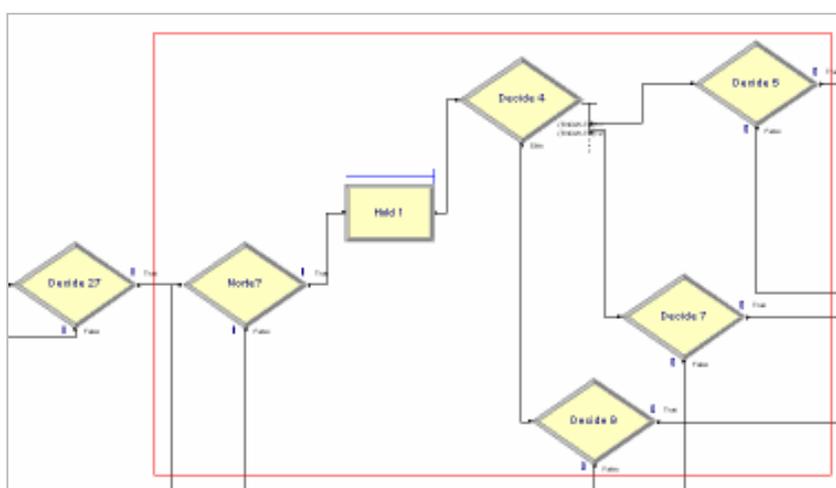


Figura 3.3.3. Comienzo del recorrido para los pedidos del norte.

La segunda etapa del recorrido (ver figura 3.3.3) comienza con un módulo decide que repartirá, según los porcentajes predeterminados, la correspondencia de los pedidos con las zonas norte y sur. Siguiendo el camino de los pedidos del norte, las entidades llegarán a un módulo hold que las

liberará únicamente los días que corresponden a la entrega de pedidos del Norte (lunes, martes y miércoles) y las retendrá los días correspondientes al sur. Una vez liberados, los pedidos pasarán por un decide que ofrece tres caminos alternativos de salida en función de qué día de la semana sea (de los correspondientes a la zona norte).

Para cada día, se sigue con otro decide que dividirá su camino en función de si el peso del pedido se encuentra por encima de la capacidad máxima de carga del camión propio (3600 kg). Los que superen el límite continuarán por la rama de salida superior, que los conducirá a la parte del modelo que contempla la utilización de camiones contratados. Los que estén por debajo seguirán con el camino que emplea al camión propio, para cada día.

El modelo reconoce qué día de la semana es a través de uno de los sistemas auxiliares antes mencionados, el cual se muestra en la figura 3.3.4.

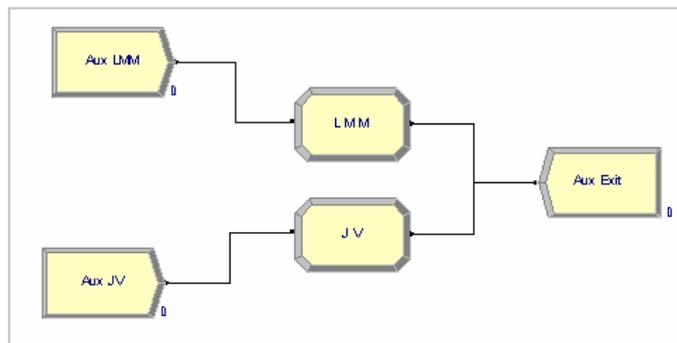


Figura 3.3.4. Modelo auxiliar para la asignación de los días.

El funcionamiento del mismo es muy simple: un módulo create emite una entidad al momento de inicio de la corrida, y pasa por un assign que modifica el valor de una variable binaria que indica si se está en los días correspondientes a la entrega de pedidos del norte o del sur. Otro create emitirá una entidad al momento de finalización de los tres primeros días de la corrida, modificando la variable binaria de la misma forma. Cada uno de los create volverá a enviar una entidad cada cinco días (ya que el modelo trabaja con semanas de cinco días). De esta manera, a través de una variable binaria se dispone en qué grupo de días se encuentra el sistema. La determinación exacta del día de la semana se realiza a través de una variable que mide el tiempo transcurrido entre el tiempo acumulado del sistema y el momento en el que se modificó la variable binaria.

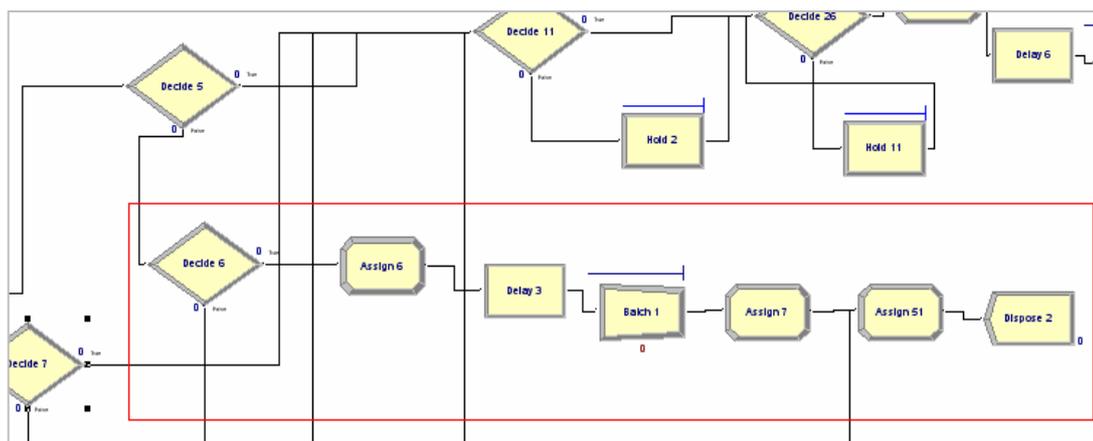


Figura 3.3.5. Circuito de los pedidos a entregar con el camión propio durante el primer día.

Siguiendo con el recorrido de las entidades dentro del modelo, en la figura 3.3.5 se destaca el camino que atraviesan los pedidos asignados al camión propio (para el primer día). En primer instancia se evalúa a través de un decide si hay capacidad remanente suficiente para cargar el pedido entrante. El primer pedido nunca tendrá inconvenientes (porque por aquí sólo pasan pedidos de peso inferior a la capacidad máxima), pero a partir del segundo esto debe ser evaluado porque la acumulación de pedidos podría exceder el límite de carga establecido. Para determinar esto el módulo decide compara la capacidad máxima del camión contra la suma del valor de una variable que almacena cuántos kilogramos se encuentran ya cargados y el peso del pedido en curso. De mantenerse por debajo de los 3600 kg, seguirá su viaje por la rama superior, pasando por un assign que modificará la variable que almacena en qué estado de carga se encuentra el camión, aumentando su valor. A continuación será detenido por una fracción de segundos en un módulo delay, que se utiliza en el modelo para permitir que lleguen juntos todos los pedidos a entregar por el camión en el día, antes de seguir al siguiente módulo. Este artilugio es necesario únicamente debido a la manera en que trabaja el Arena y no representa un proceso real del sistema, es decir, es un recurso secundario empleado por el modelador.

Finalmente, todos los pedidos a entregar en el día pasarán por un módulo batch, el cual los unirá en una única entidad cuyos valores representativos resultarán de la suma de los individuales (peso, distancia y tiempo marginal). Esta unidad representa la consolidación de pedidos del día, a entregar por el camión propio, la cual pasará por un assign cuyo fin será el de llevar a cero el valor de las variables acumulativas del camión (para su uso durante los siguientes días) y luego por otro módulo similar, que registrará en otras variables los valores de interés para el posterior estudio de los resultados. A continuación, la entidad termina su recorrido saliendo por un módulo dispose.

Volviendo al módulo decide inicial, en el caso en que el pedido evaluado superase con su ingreso la carga máxima del camión, el mismo seguirá su recorrido por la rama inferior, que lo conducirá al circuito de entrega del siguiente día (idéntico al recién descrito), con la salvedad de que primero será retenido en un módulo hold que lo liberará cuando efectivamente comience el siguiente día. En el caso particular del último día correspondiente a cada zona, si un pedido no pudiera ser cargado en el camión, este no será reenviado al primer día de la zona de la semana siguiente, sino que será entregado ese mismo día mediante su envío al recorrido de los pedidos a ser entregados por un camión contratado. Esta manera de operar responde a la política de nivel de servicio que mantiene la empresa, logrando que al final del último día de la semana, para cada zona, no queden entregas pendientes.

Luego de haber profundizado sobre la lógica y funcionamiento del modelo respecto de los pedidos asignados al camión propio, resta tratar los envíos con camión de terceros. Estos, como ya hemos visto, se nutren de los pedidos que superan los 3600 kg y de aquellos que queden rezagados para el último día de la zona, excediendo la capacidad remanente del camión propio. El tramo inicial de este recorrido se muestra en la figura 3.3.6.

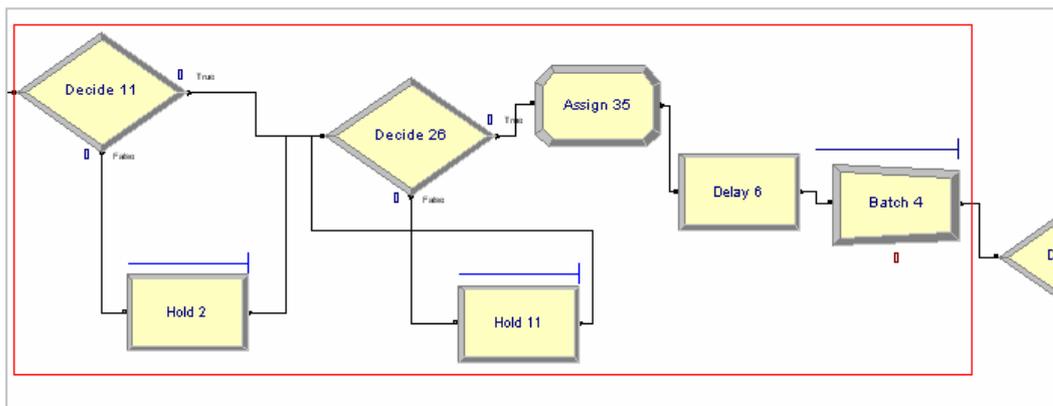


Figura 3.3.6. Recorrido pedidos a entregar con camión tercerizado (primera parte).

El primer módulo decide evalúa si el pedido en curso corresponde a aquellos que deberán ser entregados el primer día (de la zona) o el último (ver tabla 3.3.1). Los del primer día seguirán camino por la rama superior y los restantes, por la inferior. Allí serán retenidos por un módulo hold que los liberará al momento de consolidar el envío.

Paso siguiente, aparece otro decide que permite seguir camino por su rama superior mientras el consolidado de pedidos no supere los 8000 kg (carga máxima soportada por los camiones contratados). En caso de sobrepasarlo, el pedido continúa por la rama inferior donde se detendrá en un hold hasta que se despache el envío en el cual no pudo entrar y se comience a consolidar uno

nuevo. En ese momento volverá a ser evaluado en el último módulo decide mencionado y se repetirá la secuencia descrita.

Continuando con el recorrido, el paso siguiente es un módulo assign que aumenta el valor, según el peso del pedido que lo atraviesa, de la variable que representa el peso acumulado de la consolidación de pedidos a enviar en el siguiente viaje. De ahí se sigue por un delay que detiene a las entidades por un período de tiempo despreciable, para permitir que lleguen juntas al módulo batch. El mismo consolidará el pedido juntando a todas las entidades y emitiendo una sola, representativa, acumulando los valores marginales de los atributos característicos. A partir de aquí, el pedido consolidado recorrerá el tramo final del circuito del modelo, el cual está representado en la figura 3.3.7.

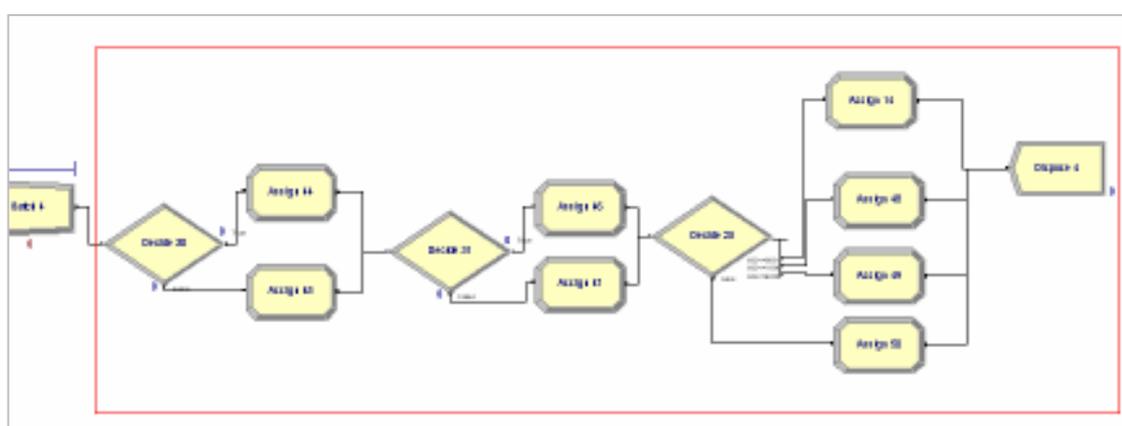


Figura 3.3.7. Recorrido pedidos a entregar con camión tercerizado (segunda parte).

La nueva unidad representativa pasará por un módulo decide que, en función de la distancia total recorrida para realizar las entregas, permitirá atravesar uno de los dos módulos assign posibles. Si los kilómetros totales superaran los cien, el assign que correspondiente modificará el valor de la distancia consolidada, computando únicamente el excedente por encima de los 100 km. Si no se superasen los 100 km, se computa un valor de cero. Esto es así debido a que por la estructura de los costos de tercerizar un envío, solo interesa el kilometraje por encima de los cien incluidos en la tarifa básica. Solo el excedente será incluido en la componente variable del precio. A continuación, se repite este esquema pero para el caso del tiempo de viaje, cuyo valor de corte es de cinco horas.

Por último, la entidad pasará por un decide que la desviará en función de si la capacidad requerida del camión correspondiente es de 600, 1000, 4000 u 8000 kg. Pasará por un assign que registrará los valores de interés en distintas variables acumuladoras, llevará a cero las variables correspondientes a la consolidación de pedido (de manera que pueda comenzar a gestarse un nuevo

envío en caso de ser necesario) y, finalmente, saldrá del modelo a través de un módulo dispose.

Un párrafo aparte merece la manera en que, a partir de la corrida de simulación, se obtiene en un archivo de texto independiente toda la información numérica correspondiente a los resultados obtenidos. Para ello se emplea el otro sistema auxiliar, antes mencionado, que se muestra en la figura 3.3.8.

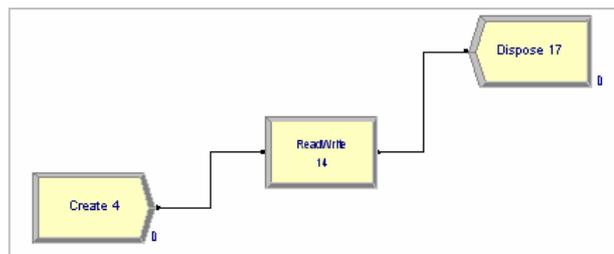


Figura 3.3.8. Modelo auxiliar para el registro de los resultados.

Básicamente, una fracción despreciable de tiempo antes que finalice la duración estipulada de la corrida, se emite una única entidad que pasará por un módulo readwrite e inmediatamente abandonará el sistema a través de un dispose. Mediante el readwrite mencionado, se transfieren al archivo de texto elegido (en una línea por corrida) los valores estipulados de las variables necesarias para procesar los resultados, e inclusive permite realizar operaciones con ellos previo al registro de los mismos.

Hasta aquí se ha explicado todo el funcionamiento y la lógica secuencial del modelo, desde el origen del pedido hasta la consolidación de un envío para el caso de la zona norte. En el caso de las entregas para la zona sur, la explicación y desarrollo son exactamente los mismos, con la salvedad de que en vez de haber tres recorridos correspondientes a los tres días de trabajo con la zona norte, hay solo dos.

3.4 VERIFICACIÓN Y VALIDACIÓN

Durante la fase de traducción del modelo, el modelador estará naturalmente interesado en asegurar que el modelo de simulación tenga todos los componentes necesarios y que el mismo efectivamente funcione. En realidad, el interés debe enfocarse en lograr no solo que el modelo pueda completar la corrida, sino en que lo haga de la manera deseada. En otras palabras, debe asegurarse que el modelo opera de la forma en que fue pensado y diseñado. Este proceso es conocido como la verificación.

La validación puede definirse como el proceso de asegurar que un modelo representa la realidad con un determinado nivel de confianza. Esto significa que el modelador intentará crear un modelo que sea razonablemente representativo del sistema real. De todas formas, por una variedad de razones, inclusive modelos minuciosamente contruidos pueden representar deficientemente la realidad. Esto significa que sin importar que tan bien el modelador piense que ha revisado y mejorado el modelo, este puede todavía no ser adecuado para conducir ningún tipo de análisis.

3.4.1 Verificación

Se siguieron diversas aproximaciones o métodos durante y después de la elaboración del modelo, a fin de verificar su correcto funcionamiento y detectar a tiempo los problemas o errores que se fueran sucediendo. A continuación se describe cada uno de ellos.

Segmentación del modelo

Un error común entre los modeladores es el de programar el sistema completo sin realizar ningún intento de probar y depurar el modelo. Estos intentos generalmente resultan en una gran carga de frustración innecesaria al momento de correrlo por primera vez. Mientras más largo y complicado sea el modelo, menos efectivos serán los intentos por remendarlo con parches de último momento, ya que los esfuerzos no estarán dirigidos a la corrección de los problemas de programación fundamentales.

Mediante la segmentación del modelo, se parte al mismo en sistemas más pequeños y simples, que son más fáciles de estudiar e interpretar. Una vez que se comprueba el correcto funcionamiento de cada una de las partes, se debe proceder a evaluar el modelo en su totalidad.

El sistema en estudio se dividió en cuatro partes fundamentales: la generación de pedidos y su respectiva asignación de atributos; la consolidación de los envíos del camión propio; la consolidación de los envíos con los camiones de terceros y la recolección de la información output del modelo para su posterior estudio. Cada una de las fases mencionadas se encaró como un sistema independiente y se fueron desarrollando a partir de una modelación inicial simple, incrementando su nivel de detalle y complejidad paulatinamente.

Animación del modelo

La animación es quizá la herramienta más efectiva a la hora de realizar una verificación básica. Poder visualizar lo que el programa está haciendo hace que sea más fácil la detección de errores en el mismo. Por otro lado, es una gran herramienta a la hora de estudiar el modelo mediante su corrida evento por

evento, método que permite observar y depurar el modelo bajo circunstancias controladas.

El Arena provee de varios complementos que permiten hacer este tipo de seguimiento. Un ejemplo son los pequeños bloques que representan a las entidades: corriendo el modelo a una velocidad razonable, puede observarse detalladamente el camino que siguen las distintas entidades, los módulos que atraviesan, su acumulación en las colas, etc. Esto fue de mucha utilidad para detectar que en algunos tramos no estaban circulando entidades con la frecuencia que, intuitivamente, era de esperarse. Lo cual era una señal de que algo no funcionaba como debía.

Otros elementos gráficos del Arena que fueron utilizados son los contadores, tanques de nivel, relojes y gráficos. Estos permitieron conocer en tiempo real los valores de distintas variables de forma cuantitativa, cualitativa y evolutiva. Los mismos pueden observarse en la figura 3.4.1.



Figura 3.4.1. Elementos gráficos auxiliares del Arena.

Recolección de información en archivos externos

El análisis de los resultados o de los valores que van adoptando las diversas variables a lo largo de la simulación, puede hacerse de manera muy rápida y para grandes cantidades de información, mediante su carga en otros formatos u archivos recopilatorios (documentos de texto, planillas de cálculo, etc.). La técnica no consiste en verificar que los valores obtenidos emulen de manera precisa al sistema real (esto es más bien parte de la validación), sino que lo que se busca es detectar parámetros que, a partir de sus características o el conocimiento de los mismos, resulten desproporcionados o incorrectos de manera intuitiva para el modelador. Esto puede hacerse para grandes cantidades de datos. Uno de los métodos empleados fue la utilización de planillas de cálculo de Excel para evaluar si diversos valores de variables se encontraban fuera de un rango preestablecido.

La gran ventaja de esta metodología frente a la de utilizar animación, es que permite evaluar un elevado número de corridas o tiempo de simulación, con mucho menor riesgo de cometer errores de apreciación por parte del modelador.

3.4.2 Validación

Es necesaria la validación del modelo en la medida que permita evitar que las limitaciones, simplificaciones y supuestos propios del modelo, no sean causantes de errores groseros que impidan representar la realidad en una medida adecuada.

A continuación se detallan los diversos rubros que han sido utilizados como base de comparación entre el modelo y el sistema real en el presente estudio de simulación, por el carácter significativo de su impacto en los resultados de interés.

Cantidad de viajes contratados

El principal componente del costo de tercerización de la logística es el monto correspondiente a las tarifas básicas, el cual es única y directamente proporcional a la cantidad de camiones contratados. Para las distintas categorías (600, 1000, 4000 y 8000 kg) y a lo largo del período estudiado, se pudo determinar que el número de camiones contratados, según las corridas del modelo, se mantiene compatible con el número que Tibex efectivamente contrata. Discrepancias iniciales en este campo motivaron una revisión global del modelo que permitió detectar algunos errores antes imperceptibles, resultando en una importante mejora del funcionamiento del mismo.

Costo total del transporte tercerizado

Si bien este rubro está muy relacionado con el punto anterior, aquí entran en juego las componentes variables del costo: el tiempo excedente a partir de las primeras cinco horas de viaje y la distancia recorrida por encima de los 100 km incluidos en el básico. En sintonía con lo observado en el sistema real, el modelo refleja valores crecientes, en promedio, en ambas categorías de la componente variable, a medida que aumenta la capacidad del camión contratado. Esto es razonable debido a que a mayor carga, es mayor el número de pedidos que pueden ser transportados, y por ende, se recorren mayores distancias. En cuanto al cálculo del costo total, el resultado obtenido, tanto en la práctica como en el modelo, son equiparables. Sobre este resultado se entrará más en detalle posteriormente cuando se desarrolle el análisis económico.

Generación de datos de entrada

Todo lo relativo al análisis de la generación de las muestras artificiales que sirven de materia prima a las transformaciones o procesos que realiza el modelo, fue extensamente cubierto y desarrollado en secciones anteriores. Todas las distribuciones utilizadas superaron el test de bondad de ajuste chi-

cuadrado y sus histogramas son un fiel reflejo de los equivalentes obtenidos a partir de las muestras recogidas en el sistema real.

Nivel de servicio

Este campo está referido al grado de cumplimiento de la esquematización por zonas y de los límites prefijados para la entrega de los pedidos. Gracias al fuerte hincapié efectuado sobre estos conceptos durante la modelación, se logró una aplicación 100% efectiva de las reglas básicas implementadas, las cuales son las mismas que se aplican en el sistema real. De esta manera, ningún pedido es entregado fuera de su grupo de días respectivo y, lo más importante, se respetan incondicionalmente los límites máximos establecidos de demora entre que se recibe un pedido y que el envío respectivo se despacha.

Porcentaje de ocupación del camión propio

Si bien esta variable no es de las más relevantes a los fines últimos del proyecto, un alto nivel de adecuación de la misma a los valores obtenidos en el sistema real, trae implícita la confirmación de que otro grupo de variables (de mayor interés para el estudio), y que el modelo en general, se desarrollan con un buen desempeño. Esto es así debido a que el valor que adopta este parámetro está fuertemente correlacionado con el de las otras variables (cantidad de viajes propios, número de camiones contratados, peso de las cargas consolidadas, etc.).

Al igual que en el sistema real, a partir del modelo se concluyó que el camión trabajó con una saturación promedio de su capacidad muy baja desde el punto de vista de la maximización del aprovechamiento del mismo, ubicándose en el orden del 60%.

Por lo expuesto hasta aquí, el buen desempeño del programa y la adecuación de los resultados obtenidos con respecto a la realidad, se puede concluir que el modelo posee precisión y credibilidad, siendo de esta manera apto para utilizarse en el estudio y obtener conclusiones sobre el sistema real.

3.5 DISEÑO EXPERIMENTAL

Una vez que el modelo de simulación del sistema real ha sido validado, la atención del modelador debe centrarse en determinar cómo diseñar modelos adicionales para realizar el análisis experimental posterior. La elección de diseños experimentales alternativos depende de los objetivos originales del

proyecto de simulación, desarrollados durante la etapa de formulación del problema.

En términos del diseño experimental, se denomina factores a las diferentes variables que impactan en el desempeño del sistema. Estas variables son controlables en la medida que el modelador pueda variar sus niveles en el modelo de simulación y, de ser posible, en el sistema real. En el presente estudio, las variables o factores a considerar son el tamaño de la flota propia y sus características, cuyo impacto sobre los niveles de requerimiento de camiones contratados es determinante.

En total, cuatro modelos se desarrollaron como alternativas posibles de continuidad para la operación de la logística de Tibex. A cada uno se le asignó una letra para diferenciarlos rápidamente de aquí en adelante, y son los que se explican brevemente a continuación.

3.5.1 Modelo A: situación actual

Una de las alternativas posibles es no implementar ningún cambio y mantener la estructura logística vigente. Esta decisión sería factible llegado el caso en que las demás opciones resulten inviables económicamente, lo cual será analizado más adelante. También podría optarse por este camino si el beneficio obtenible con otras alternativas no resultase lo suficientemente tentador como para realizar el esfuerzo de romper con la inercia que implica un cambio de procesos.

Este caso fue extensivamente desarrollado durante la fase de conceptualización y traducción, y su programa o modelo fue el que sirvió de base para realizar todos los demás.

3.5.2 Modelo B: dos camiones de menor capacidad

Esta alternativa sugiere la posibilidad de reemplazar el camión propio, cuya capacidad nominal es de 3600 kg, por dos camiones de 1700 kg cada uno. De esta manera se podría dar cobertura completa a ambas zonas de entrega los cinco días de la semana. La estructura para la utilización de camiones contratados a terceros no sufre modificaciones bajo este esquema.

Respecto al modelo programado en Arena, este sufre leves modificaciones respecto al modelo base. El principal cambio es la eliminación del primer módulo hold (ver figura 3.3.3) para los recorridos de ambas regiones, dado que su función era la de detener los pedidos cuando no se estaba en los días correspondientes a la zona de interés.

3.5.3 Modelo C: tercerización total

Esta es una de las alternativas más interesantes para evaluar y la que originalmente motivó el estudio de simulación. Bajo este esquema, desaparece por completo el concepto de camión propio. Se mantiene el esquema de zonas y sus días, de manera de mantener controlado y limitado el número de camiones a contratar en una misma jornada, sin afectar el nivel de servicio (ni positiva ni negativamente).

A nivel programación, el modelo original se vio reducido a su forma más básica, habiéndose eliminado todos los tramos correspondientes a la consolidación de envíos del camión propio. En la figura 3.5.1 puede apreciarse el nuevo modelo, quedando en evidencia su simplicidad al compararlo con el base (ver figura 3.3.1).

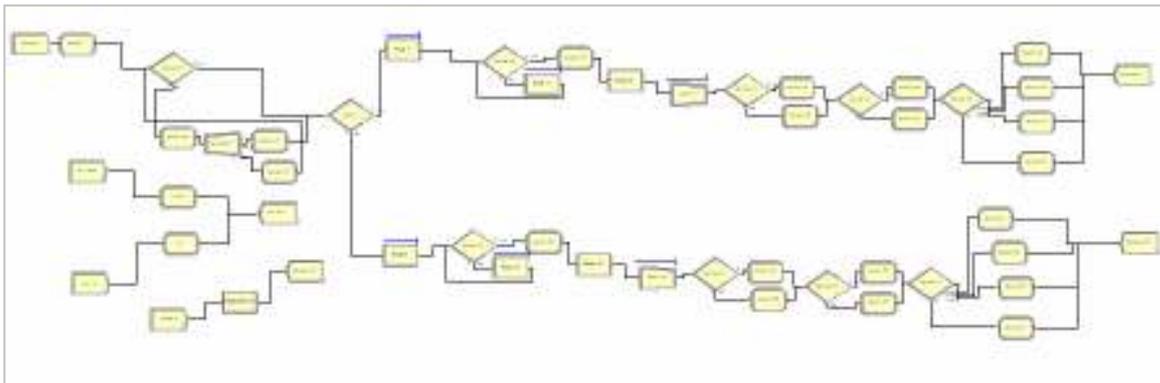


Figura 3.5.1. Modelo simplificado para la tercerización total.

3.5.4 Modelo D: un camión de menor capacidad

Aquí la premisa es reemplazar el camión propio de 3600 kg por uno solo de los de 1700 kg de capacidad. Esto se apoya en la búsqueda de lograr un mayor índice de aprovechamiento de la carga del camión y reducir los costos de operación del mismo, por ser de menor tamaño que el empleado actualmente.

En el modelo base de Arena, las únicas modificaciones que tuvieron lugar fueron los respectivos cambios del valor de la capacidad nominal del camión, en los diversos mecanismos y secuencias en las que fue empleado

Todas las alternativas hasta aquí planteadas fueron propuestas y resultaron de interés para Tibex, de manera que de antemano ninguna de ellas podría ser

descartada previamente a su evaluación y comparación con las demás opciones.

Se ha decidido utilizar corridas cuya duración total sea de dos años. Este período es lo suficientemente largo como para poder obtener un output lo suficientemente sólido (estadísticamente hablando), manteniendo tiempos de ejecución del software razonables.

3.6 NÚMERO DE CORRIDAS

La determinación del número de corridas que deben realizarse con el modelo, depende principalmente del grado de precisión o de la medida del error con que se quieren obtener los resultados, y del nivel de confianza atribuible al mismo. Existen otros factores de importancia como lo son la cantidad de parámetros sobre los que se busca acotar el error, el tiempo que implique realizar cada corrida y la variabilidad de los resultados.

Para el presente estudio, se decidió utilizar como parámetro de evaluación a las variables que miden la cantidad de camiones de terceros a contratar a lo largo de la corrida (cuya duración es de dos años). Se optó por las mismas debido a que son las de mayor representatividad respecto de la evaluación de la calidad del desempeño del modelo, y porque son las de mayor impacto a nivel económico, foco central del estudio. Por lo tanto, habiendo cuatro modelos o experimentos a evaluar y, en cada uno de ellos, cuatro tipos de camiones de terceros, se tiene un total de dieciséis variables sobre las cuales se deben realizar los cálculos.

Para trabajar sobre una misma plataforma y facilitar el procesamiento de los resultados, se decidió emplear el mismo número de corridas para todos los modelos. Por lo tanto, el número de corridas a utilizar resultará equivalente a las requeridas por la variable de mayor dispersión.

El cálculo del número de corridas es un proceso iterativo, cuyos pasos se listan y detallan a continuación:

- Determinar el orden de magnitud del error que se desea (HW en adelante).
- Determinar el nivel de confianza deseado para dicha apreciación.
- Calcular, a partir de un número de corridas inicial arbitrario, la media muestral y su intervalo de confianza al nivel fijado anteriormente.
- Si el intervalo calculado cae dentro de los límites fijados por la resta y suma del HW a la media, entonces el número de corridas utilizado es adecuado.
- Iterar aumentando el número de corridas hasta que se cumpla la condición anterior.

Para este proyecto se decidió exigir al modelo de manera rigurosa, debido a que el tiempo de ejecución de la corrida no resulta ser un factor limitante. El error o HW pactado es del 5% respecto de la media y con un nivel de confianza del 95%. Bajo estas condiciones, la cantidad de corridas necesarias para que el parámetro de mayor variabilidad obtenga un HW menor o igual al deseado, fue de 500. Se llegó a este valor partiendo de un número base de cien corridas, incrementando también de a cien. En la tabla 3.6.1 se exponen los resultados obtenidos.

Modelo	Categoría	Promedio	Desvío	N	HW deseado	HW obtenido
A	T600	5	2,59	500	0,25	0,23
	T1000	4	2,01	500	0,21	0,18
	T4000	38	6,35	500	1,91	0,56
	T8000	66	8,47	500	3,29	0,74
B	T600	8	3,05	500	0,39	0,27
	T1000	7	2,5	500	0,36	0,22
	T4000	121	9,43	500	6,05	0,83
	T8000	93	9,77	500	4,63	0,86
C	T600	136	12,62	500	6,8	1,11
	T1000	55	7,3	500	2,75	0,64
	T4000	233	12,29	500	11,66	1,08
	T8000	166	11,23	500	8,29	0,98
D	T600	15	5,12	500	0,74	0,45
	T1000	13	3,94	500	0,65	0,35
	T4000	138	10,34	500	6,92	0,91
	T8000	101	9,59	500	5,05	0,84

Tabla 3.6.1. Resultados del análisis del número de corridas.

El método de cálculo del intervalo de confianza, tiene soporte teórico en una de las varias aplicaciones del teorema central del límite, que establece que la distribución de la suma de variables aleatorias tiende a una distribución normal cuando la cantidad de variables es muy grande.

3.7 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de las corridas realizadas se obtuvieron distintos resultados para cada modelo. La gran mayoría de ellos apuntan a parametrizar la operación de los camiones contratados para posteriormente calcular sus costos. Los datos básicos que se incluyen para todos los modelos son: la cantidad de camiones contratados, el kilometraje promedio por encima del valor incluido en la tarifa básica (de 100 km), el tiempo por encima del valor de corte también incluido

(de 5 h) y el peso transportado en promedio. Todos estos valores se calcularon para cada categoría de peso de los camiones y corresponden a períodos de dos años, acorde a la duración de las corridas.

3.7.1 Resultados del modelo A

Además de las variables comunes a todos los modelos, para este se obtuvo la cantidad de viajes del camión propio y su porcentaje de ocupación promedio. Los mismos pueden apreciarse en la tabla 3.7.1.

Modelo A				
Categoría	Cantidad	Carga promedio	Distancia promedio*	Tiempo Promedio*
[KG]	[Camiones]	[KG]	[KM]	[H]
600	5	342	0	0
1000	4	798	0,44	0,05
4000	38	2736	1,21	0,12
8000	66	5897	1,70	0,14
Viajes camión propio		509		
Ocupación promedio		60%		
<i>*Diferencia entre el valor total y el incluido en la tarifa básica</i>				

Tabla 3.7.1. Resultados para el modelo A.

Acorde a lo que se observa en el sistema real y a lo mencionado durante la validación, el nivel promedio de saturación de la capacidad del camión propio en cada viaje es relativamente bajo. En concordancia con esto, puede verse que la utilización de camiones de terceros de baja capacidad es casi nula.

3.7.2 Resultados del modelo B

Para el caso del modelo que emplea dos camiones propios de 1700 kg, se agregaron la cantidad de viajes realizados y su nivel de saturación de carga promedio. Los valores figuran en la tabla 3.7.2.

Pueden observarse muy bajos niveles de aprovechamiento de la capacidad de los camiones propios. Esto se debe al hecho de que en esta alternativa, se realizan los envíos indistintamente de qué día de la semana o zona sea, por lo que hay una menor consolidación de pedidos.

Modelo B				
Categoría	Cantidad	Carga promedio	Distancia promedio*	Tiempo Promedio*
[KG]	[Camiones]	[KG]	[KM]	[H]
600	8	348	0	0
1000	7	804	0,36	0,05
4000	121	2477	0,64	0,06
8000	93	5994	1,01	0,10
Viajes camión propio Norte			507 (54% de carga)	
Viajes camión propio Sur			450 (36% de carga)	
<i>*Diferencia entre el valor total y el incluido en la tarifa básica</i>				

Tabla 3.7.2. Resultados para el modelo B.

3.7.3 Resultados del modelo C

En la tabla 3.7.3 se encuentran los resultados para el modelo de tercerización completa. En esta situación comienzan a tener un rol protagónico las variables relativas a la componente variable del costo de contratar un camión. La lógica de esto reside en que en esta alternativa, absolutamente todos los pedidos se hacen entregar por terceros, a diferencia de los otros modelos donde la tercerización es considerada un recurso para cubrir la parte minoritaria de los pedidos que el camión propio no puede satisfacer por sí mismo.

Modelo C				
Categoría	Cantidad	Carga promedio	Distancia promedio*	Tiempo Promedio*
[KG]	[Camiones]	[KG]	[KM]	[H]
600	136	244	4	0
1000	55	793	17,08	1,37
4000	233	2281	58,24	4,07
8000	166	6106	125,40	8,21
<i>*Diferencia entre el valor total y el incluido en la tarifa básica</i>				

Tabla 3.7.3. Resultados para el modelo C.

3.7.4 Resultados del modelo D

Por su parentesco, este modelo contempla las mismas variables que el base (modelo A). Los resultados, expuestos en la tabla 3.7.4, evidencian que la estrategia de reducir la capacidad del camión para lograr aumentar su tasa de aprovechamiento, habría sido efectiva. Por otra parte, se evidencia un aumento del requerimiento de camiones contratados.

Modelo D				
Categoría	Cantidad	Carga promedio	Distancia promedio*	Tiempo Promedio*
[KG]	[Camiones]	[KG]	[KM]	[H]
600	15	338	0	0
1000	13	802	0,47	0,05
4000	138	2433	1,95	0,18
8000	101	6061	7,86	0,63
Viajes camión propio		512		
Ocupación promedio		73%		

**Diferencia entre el valor total y el incluido en la tarifa básica*

Tabla 3.7.4. Resultados para el modelo D.

En la figura 3.7.1 se compara la utilización de camiones de terceros entre todas las alternativas, tanto en su cantidad como en composición. Se observa que en los modelos que contemplan el uso de camiones propios (A, B y D), la contratación de camiones de baja capacidad (600 y 1000 kg) es despreciable. Esto es razonable ya que dichos niveles de carga pueden ser cubiertos tanto por el camión propio de 1700 kg como por el de 3600 kg.

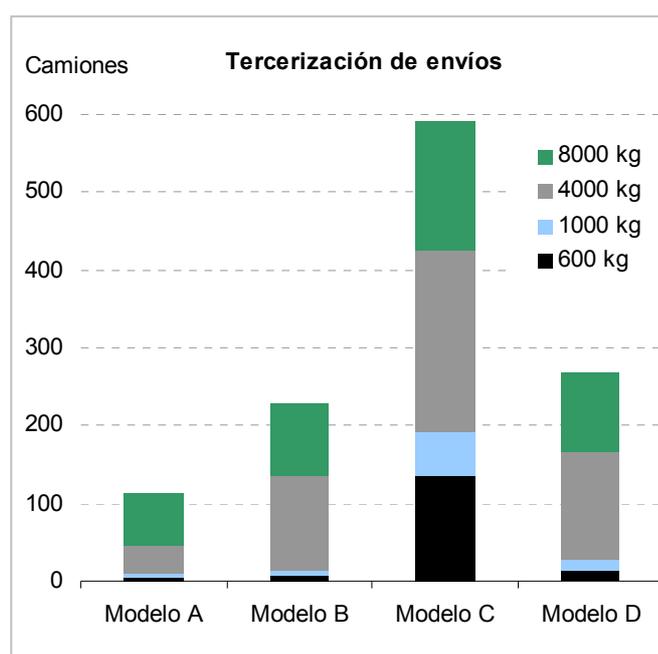


Figura 3.7.1. Comparación de los camiones utilizados en cada modelo.

3.7.5 Costo total de tercerización

Ya contando con los resultados operativos provistos por cada modelo, se está en condiciones de calcular el costo total de tercerización para cada uno de ellos. Como se mencionara en otras oportunidades, el mismo esta compuesto por una componente fija y otra variable. La parte fija es un monto básico, para cada categoría de camión, que incluye cinco horas de ocupación del vehículo y 100 km de recorrido. Una vez superados estos valores de corte, comienza a aplicarse el costo variable. El mismo aumenta de manera proporcional a los km y a las horas adicionales que se requieran para poder cumplimentar con las entregas programadas. El detalle de la estructura tarifaria se muestra en la tabla 3.7.5.

Categoría	Básico*	Variables	
		[kg]	[\$/h]
8000	290	0,9	40
4000	225	0,9	35
1000	180	0,6	28
600	140	0,6	25

Los precios no incluyen I.V.A.

**Incluye 100 km y cinco horas de viaje*

Tabla 3.7.5. Tarifas fijas y variables de tercerización.

Lógicamente, el costo de contratar un camión aumenta con la capacidad del mismo, pero no en la misma proporción. Aplicando las tarifas básicas y variables para cada modelo, finalmente se obtienen los costos totales de tercerización para el período de dos años que dura la corrida (tabla 3.7.6).

Modelo	Costo promedio (μ)	Desvío estándar (σ)	Corridas
A	29820	2965	500
B	57278	3361	500
C	252638	5751	500
D	69216	3917	500

Tabla 3.7.6. Costo de tercerización para cada modelo.

El peso de las componentes fija y variable en el costo total, para cada modelo, se muestra en la figura 3.7.2. El bajo impacto de la parte variable en los modelos A, B y D se atribuye a que, como utilizan camiones propios para la gran mayoría de los pedidos, el uso de vehículos de terceros queda relegado a

aquellos pedidos puntuales de gran envergadura, por lo que no deben realizar extensas entregas entre varios clientes en alguna de las zonas consignadas.

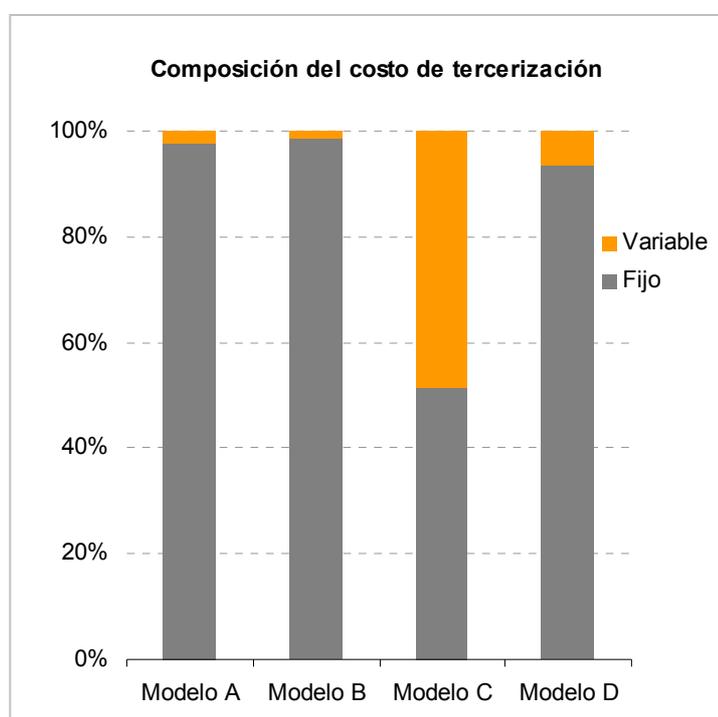


Figura 3.7.2. Comparación entre costos fijos y variables de tercerización.

3.7.6 Comparación estadística

Si bien a simple vista se puede intuir que el costo de tercerización del modelo C es mucho mayor que en la configuración actual (modelo A), esta diferencia ya no es tan contundente entre las demás configuraciones. Cuando se trabaja sobre modelos o muestras de un proceso, el método para determinar que verdaderamente existen diferencias significativas entre distintos escenarios planteados es el análisis o comparación estadística.

En este caso en particular, es de nuestro interés realizar la verificación de que efectivamente los resultados experimentales muestran que los valores representativos de cada modelo difieren, es decir, pertenecen a distintas poblaciones. Antes de poner en marcha cualquier tipo de reestructuración o cambio que implique un cierto costo, es fundamental obtener pruebas a nivel estadístico de que la información a utilizar para la toma de decisiones sea significativa, de manera de no confundir una diferencia real con un simple desvío resultante de la naturaleza estocástica de los resultados.

La primera evaluación básica a realizar es el ensayo de la hipótesis de que todas las muestras provienen de la misma población, la cual es necesario

rechazar para poder empezar a hablar de implementar cambios en los procesos de la empresa.

3.7.6.1 Prueba de Kruskal-Wallis

Se aplica esta prueba para ensayar la hipótesis $H_0: \mu_A = \mu_B = \mu_C = \mu_D$. La ventaja de este método frente a otros, como el de Fisher-Snedecor, es el hecho de que no requiere normalidad de las poblaciones, que no sería un problema en este caso, ni tampoco homocedasticidad o igualdad de varianzas, lo cual es de esperar que no se cumpla, al menos, entre todos los modelos.

El procedimiento es relativamente sencillo. Se mezclan las muestras y se ordenan los datos, jerarquizándolos de menor a mayor y asignándoles un nuevo valor, denominado rango, que equivale a su posición de orden jerárquico. Luego, para el total de N datos, se suman los rangos correspondientes a cada muestra; sean R_i ($i=1$ a p , donde p es la cantidad de muestras o, en este caso, modelos) las sumas de estos rangos. Se calcula el estadístico:

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \left(\sum_{i=1}^p \frac{R_i^2}{n_i} \right) - 3(N+1) \quad (3.7.1)$$

Para tamaños de muestra $n_i > 5$, el estadístico H tiene aproximadamente distribución Chi-cuadrado con $(p-1)$ grados de libertad. La evaluación de H sobre los resultados obtenidos para los cuatro modelos arroja un valor de 1866,52, el cual es tan elevado que permite rechazar la hipótesis nula con un orden de significancia que tiende al 100%.

A partir de la evaluación estadística de los resultados se puede afirmar, como era de esperarse intuitivamente, que las muestras no provienen de una única población. Esta conclusión es, obviamente, muy pobre ya que lo que es verdaderamente importante de discernir con más detalle es dónde se encuentran las diferencias.

3.7.6.2 Comparación de todos los pares de medias: prueba de Tukey

Este procedimiento se utiliza para ensayar todas las hipótesis $H_0: \mu_i = \mu_j$. Si bien la decisión de ensayar la significatividad de todas las parejas es tomada antes del experimento, esto no implica en modo alguno información previa ya que no se está haciendo ninguna distinción entre tratamientos y, por lo tanto, estas comparaciones deben considerarse como contrastes "a posteriori". Los mismos

requieren que previamente se rechace la hipótesis global de pertenencia a una única población, motivo por el cual se realizó la prueba de Kruskal-Wallis.

Tukey considera significativas al nivel α todas las diferencias absolutas de medias $|\bar{X}_i - \bar{X}_j|$, en el caso en que las muestras son del mismo tamaño n , superiores al valor crítico:

$$d_c = q_{1-\alpha} \frac{S}{\sqrt{n}} \quad (3.7.2)$$

Donde la variable q se denomina recorrido studentizado, el cual se obtiene de tablas. En esta expresión, S es la raíz cuadrada de la varianza residual obtenida de todo el experimento, esto es, la suma de cuadrados residual dividida por los grados de libertad del error. El cálculo de la diferencia crítica para los resultados experimentales obtenidos, para un nivel de significancia α de 0,01, arroja un valor de 814. Este es inferior a todas las diferencias entre las medias muestrales de todos los modelos, las cuales se muestran en la tabla 3.7.7.

<i>Diferencias</i>	
A - B	27458
A - C	222818
A - D	39396
B - C	195360
B - D	11939
C - D	183422

Tabla 3.7.7. Diferencias de Tukey.

A partir de estos resultados se puede concluir con un nivel de confianza, estadísticamente hablando, del 99% que todas las hipótesis nulas $\mu_i = \mu_j$ resultan rechazadas. Por ende, se confirma que las muestras provienen de poblaciones distintas, habilitándose de esta manera la posibilidad de aplicar cambios a la estructura de los procesos actuales de la empresa.

Debido a su extrema sencillez, la prueba de Tukey es ampliamente utilizada. Se considera de uso excluyente para el caso de comparaciones a posteriori de parejas de tratamientos y es indudablemente la solución más recomendable para el problema general de todas las $[p(p-1)/2]$ comparaciones de parejas posibles.

3.7.6.3 Comparación simple de dos medias: test de Welch

Otra comparación que resulta de interés para el estudio, es el de las medias del porcentaje de ocupación del único camión propio de los modelos A (el base, con camión de 3600 kg) y el D (de 1700 kg). Uno de los objetivos de una posible implementación de esta alternativa, sería el de mejorar el aprovechamiento de la capacidad del rodado en cada viaje. De los resultados experimentales podemos ver que, para las muestras tomadas, esto se cumple. Evaluando la hipótesis $H_0: \mu_D < \mu_A$, la cual se busca rechazar, se podrá ver si las mismas conclusiones que se obtuvieron para las muestras pueden extenderse a nivel poblacional.

Para una comparación simple entre dos muestras en las cuales las varianzas poblacionales son desconocidas y se estiman desiguales, la metodología a emplear es la propuesta por Welch. Para la hipótesis planteada, se tiene la variable:

$$t_{v;1-\alpha} = \frac{\bar{\delta}_c}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (3.7.3)$$

Siendo $\bar{\delta}_c$ la diferencia crítica entre las medias, S_i y n_i el desvío estándar y el tamaño para cada muestra respectivamente, la misma tiene, aproximadamente, distribución de Student con grados de libertad dados por la siguiente fórmula debida a Welch:

$$v = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{v_1} \left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{v_2} \left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2} \quad (3.7.4)$$

Donde v_i son los grados de libertad para cada muestra (dados por $n_i - 1$).

Despejando la diferencia crítica $\bar{\delta}_c$ de la fórmula 3.7.3 y calculándola para los modelos en estudio, se obtiene un valor de 0,22 para un nivel de significancia α de 0,01. La diferencia calculada para las medias muestrales de los modelos A y D es de 12,7. Por lo tanto se rechaza la hipótesis nula, pudiéndose asegurar con un nivel de confianza del 99% que efectivamente el porcentaje promedio de utilización de la capacidad de carga del camión propio, en cada viaje, se verá aumentada en caso que se implemente la alternativa D.

3.7.7 Resultado final

Luego de haber evaluado los distintos resultados a nivel cualitativo, cuantitativo y estadístico, se puede concluir que todas las alternativas planteadas son aptas y están en condiciones de ser aplicadas. La conclusión sobre cuál de todas sería la más conveniente a nivel costo se desarrollará en el análisis económico. En el mismo, los resultados serán comparados en función de una cuota mensual, por lo que es necesario adaptar los valores bienales obtenidos directamente de la simulación (ver tabla 3.7.6) a un período mensual. Los valores de dicha cuota y sus desvíos estándar se presentan en la tabla 3.7.8.

<i>Costo mensual de tercerización</i>				
	Modelo			
	A	B	C	D
<i>Cuota [AR\$]*</i>	1242	2387	10527	2884
<i>Desvío est.</i>	605	686	1174	800

**No incluye IVA*

Tabla 3.7.8. Cuotas mensuales de tercerización para cada modelo.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS ECONÓMICO

La conclusión final del estudio sobre qué alternativa resulta más conveniente para Tibex, se desprenderá del análisis realizado sobre los resultados obtenidos a partir de la simulación y de los costos de operación, reales y estimados, de los camiones propios a emplear en cada modelo.

El objetivo de este análisis no es el de desarrollar la evaluación de un proyecto de inversión, debido a que no es el enfoque de interés propuesto para este estudio por la empresa y porque cada organización tiene sus propios criterios para evaluar los riesgos y las diversas formas de financiación posibles. Por estas razones, la información y tratamiento de las variables económicas se presentará desde el punto de vista operativo, a nivel E.B.I.T. (beneficios antes de intereses e impuestos). Con este método se incluirán las amortizaciones, con el fin de cuantificar el peso económico de las distintas alternativas de costo de los camiones propios.

Como se mencionara anteriormente, la comparación de las alternativas se realizará en base al valor de la cuota mensual calculada, correspondiente a los costos totales de la logística de distribución. Las mismas se desarrollan a continuación.

4.1 COSTO TOTAL MODELO A

Esta alternativa, actualmente en uso, contempla la utilización del único camión, propio de 3600 kg de capacidad. Por sus dimensiones y tiempos de carga y descarga, se requieren de dos empleados para su operación. El detalle de los costos de operación y el valor total del costo mensual de la logística se detallan en la tabla 4.1.1.

<i>Costos asociados a la operación del camión propio</i>	
Combustibles y lubricantes	821
Mantenimiento	415
Seguro	150
Patente	52
Amortización (5 años)	1561
Costo Salarial (2 personas)	3674
Verificación técnica (anual)	5
Renov. lic. conductor cargas peligrosas (anual)	20
<i>Subtotal</i>	6698
<i>Costo de tercerización</i>	1242
TOTAL [AR\$]	7941

Tabla 4.1.1. Estructura de costos del modelo A.

4.2 COSTO TOTAL MODELO B

Esta opción contempla el uso de dos camiones de 1700 kg de capacidad cada uno. A diferencia del de 3600 kg, cada uno requiere de una sola persona para su operación. La apertura de costos se aprecia en la tabla 4.2.1.

<i>Costos asociados a la operación de 2 camiones propios</i>	
Combustibles y lubricantes	1130
Mantenimiento	300
Seguro	178
Patente	325
Amortización (5 años)	1848
Costo Salarial (2 personas)	3674
Verificación técnica (anual)	5
Renov. lic. conductor cargas peligrosas (anual)	40
<i>Subtotal</i>	7500
<i>Ahorro en servicio de encomiendas</i>	-2000
<i>Costo de tercerización</i>	2387
TOTAL [AR\$]	7886

Tabla 4.2.1. Estructura de costos del modelo B.

Naturalmente, los costos individuales de cada camión son inferiores a los del que actualmente se utiliza: menor consumo de combustible, menores costos de mantenimiento (por ser vehículos que se comprarían nuevos) y de amortización (ya que son rodados más económicos por su menor envergadura).

Por otra parte, con la capacidad ociosa que se generaría, se podría dejar de utilizar el servicio de encomiendas por ciclomotor que se emplea en la actualidad para envíos y trámites administrativos varios, generándose un ahorro de \$2000.

4.3 COSTO TOTAL MODELO C

En este caso no corresponde ningún tipo de consideración sobre la utilización de camión propio, ya que se trata de la opción de tercerización total. El valor de la cuota equivale al costo de tercerización ya presentado, el cual es de \$10527. A simple vista esta alternativa quedaría descartada por su alto valor, pero se debe tener en cuenta la posibilidad de establecer una alianza estratégica con el proveedor del servicio, a través de un contrato. Bajo una estructura de ese tipo podrían lograrse importantes consideraciones y descuentos a nivel económico

que harían mucho más atractiva esta alternativa. La misma será desarrollada con mayor profundidad más adelante.

4.4 COSTO TOTAL MODELO D

La utilización de este modelo implica el reemplazo del camión propio actual por uno solo de 1700 kg de capacidad. Se detallan los costos de operación logísticos en la tabla 4.4.1. Esta alternativa contempla la menor de todas las cuotas mensuales vistas, lo que la convierte en la más atractiva.

<i>Costos asociados a la operación del camión propio</i>	
Combustibles y lubricantes	650
Mantenimiento	150
Seguro	89
Patente	163
Amortización (5 años)	924
Costo Salarial (1 persona)	1837
Verificación técnica (anual)	3
Renov. lic. conductor cargas peligrosas (anual)	20
<i>Subtotal</i>	3835
<i>Costo de tercerización</i>	2884
TOTAL [AR\$]	6719

Tabla 4.4.1. Estructura de costos del modelo D.

4.5 CONCLUSIÓN DEL ANÁLISIS ECONÓMICO

Después de haber estudiado en detalle la composición de los costos asociados a la logística, para cada alternativa, queda en evidencia que lo más adecuado sería implementar la que compete al modelo D: utilización de un único camión propio de 1700 kg de capacidad.

Otra alternativa que arrojó un valor de cuota inferior a la del modelo en uso, es la que emplea dos camiones de 1700 kg (modelo B). Sin embargo, la pequeña diferencia entre ambas probablemente no justifique la puesta en marcha de una reestructuración. Por último queda mencionar que la opción C (tercerización total) posee la cuota más elevada de todas. Esta podría reducirse considerablemente en caso de llevar adelante una exitosa negociación, con el proveedor, por la formalización de un contrato de servicio. A esto podrían sumarse otros beneficios y ventajas propios de una alianza estratégica.

En la figura 4.5.1 se comparan las cuotas de todas las alternativas y su composición.

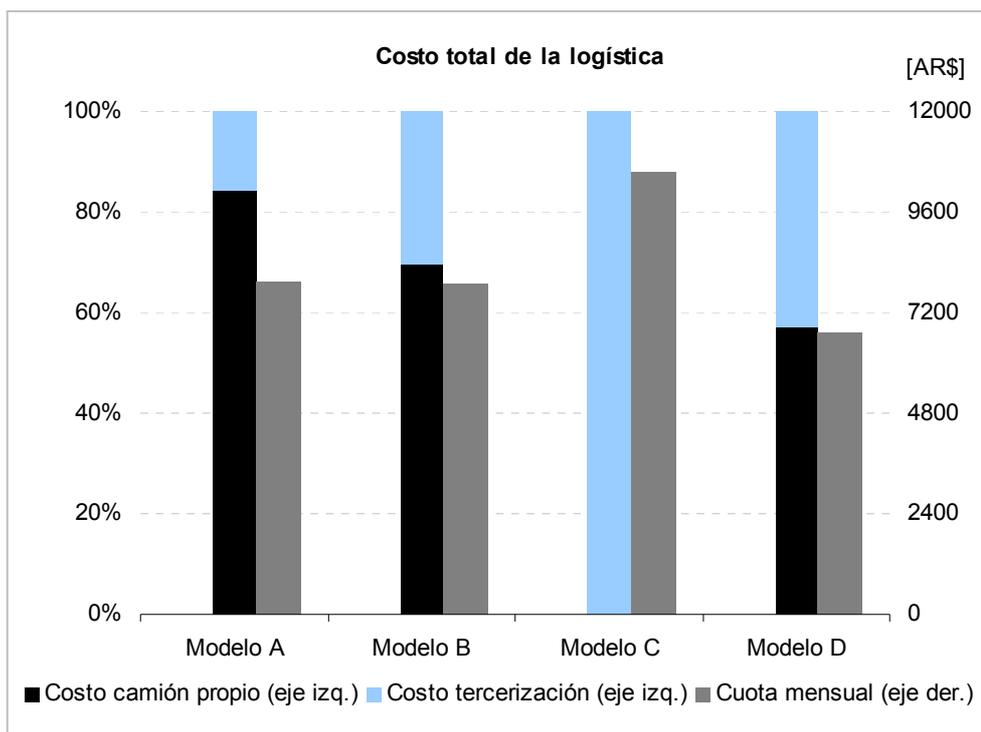


Figura 4.5.1. Composición y valor de la cuota mensual para cada modelo.

CAPÍTULO V ALIANZA ESTRATÉGICA: CONTRATO DE SERVICIO

Del análisis económico resulta evidente, en una primera aproximación, que la alternativa de tercerización total (modelo C) es inviable a nivel económico, dado que el valor de la cuota mensual resulta mucho más elevado que el de las demás variantes. Esta conclusión no debiera ser tomada tan a la ligera, sin previamente realizar un análisis más profundo.

En la práctica, cuando se generan fuertes dependencias o lazos comerciales en una relación cliente-proveedor, es probable que se busque la manera de fortalecer y asegurar dicho vínculo, de manera que sea posible explotar todos los beneficios presentes y potenciales de la relación, durante un período de tiempo que puede variar desde el corto hasta el largo plazo. Al comprometerse ambas partes a operar de manera conjunta, haciéndose partícipes mutuamente de los procesos de decisión y guardando el debido respeto y fidelidad al pacto realizado, podrían obtenerse beneficios o mejoras tanto a nivel operativo como a nivel económico. Esto se desprende del aprovechamiento de las sinergias y economías de escala factibles solo a través de la unión.

Una de las formas más comunes de formalización de una relación de negocios como la que se describe, es mediante la elaboración y firma de un contrato de servicio. A través del mismo las partes se comprometen a cumplir un determinado rol, compartir riesgos, emplear recursos y dividir beneficios, durante un período de tiempo prefijado. Este tipo de acuerdos es denominado comúnmente como alianza estratégica.

Las alianzas pueden clasificarse en tres tipos:

- Tipo I: las empresas se reconocen mutuamente como socios y, con cierto límite, coordinan las actividades y su planeamiento. Son acuerdos de corto plazo y en ellos participa una división o área funcional de cada organización.
- Tipo II: existe un cierto grado de integración de las actividades y el planeamiento. Las relaciones son de largo plazo, pero no se espera que duren para siempre. Participan varias divisiones o áreas funcionales dentro de las empresas.
- Tipo III: las compañías comparten un importante grado de integración operativa. Cada parte ve a la otra como una extensión de su propia empresa. No hay un límite prefijado en cuanto a la duración de la relación comercial.

Para una eventual alianza en el caso en estudio, lo más adecuado sería una relación de tipo I o de tipo II.

Al comprometerse Tibex a contratar una determinada cantidad de camiones por mes (mucho más elevada que la que utiliza actualmente), estaría asumiendo el riesgo de verse eventualmente obligada a afrontar un costo por camiones que pudiera no necesitar. Por otra parte, disminuiría o desaparecería el riesgo para el proveedor de que al menos una parte de sus recursos queden ociosos, sin generar beneficio alguno. Como contrapartida, el proveedor podría estar en condiciones de otorgar un beneficio a nivel económico en relación al costo que implica contratar un camión cada vez que se lo necesita. Este punto es el que Tibex debiera intentar explotar, ya que haría viable la alternativa C por la reducción que podría obtenerse en su respectiva cuota mensual. Un acuerdo de este tipo también podría resultar atractivo por el hecho de que la atención gerencial podría enfocarse en las actividades fundamentales del negocio

5.1 NEGOCIACIÓN Y FORMALIZACIÓN DE LA ALIANZA

Durante todo el ejercicio de subcontratación, los proveedores deberían estar dispuestos a reunirse con el equipo de la empresa encargado de gestionar el contrato. Es común pensar que, si se posee poder de negociación, el proceso debiera hacerse lo más difícil posible para el proveedor y que, si este persevera, se le premiará con el contrato. Esto puede ser apropiado si se desea establecer una relación antagónica, tanto antes como después de definir el vínculo. No se debe cometer este error, dado que la manera en que se manejen las relaciones previamente al ejercicio determinará cómo los proveedores piensen que su potencial cliente se manejará una vez efectuada la subcontratación. Si esta va a ser usada como una herramienta estratégica, entonces un criterio antagónico probablemente no proporcionaría lo buscado. La relación debe ser constructiva, el objetivo es que el conjunto forme una sinergia, es decir, agregue más a la suma de las partes.

La contratación debe concentrarse en la definición del requerimiento y de las medidas de acuerdo con las cuales se estimará el éxito de la relación y, por ende, del proveedor. Esta puede ser una tarea casi imposible para muchas organizaciones. El grupo más obvio para definir qué resultados se necesitan puede ser el equipo y los gerentes comprometidos actualmente en la prestación del servicio o función, pero esto plantea una serie de problemas. En primer lugar, puede ser que se le pida al propio equipo, cuyos puestos y perspectivas están bajo amenaza, que asistan al proceso. En segundo lugar también puede parecerles difícil pensar en los resultados de su servicio de una manera objetiva. Un proveedor podría ofrecer hacer las cosas de diferente manera para lograr el mismo resultado, algo que el equipo actual a menudo considera como una crítica implícita. Por eso, las principales motivaciones para embarcarse en la iniciativa se pueden frustrar si los requerimientos y medidas

no se definen en términos de resultados. Y a las personas les resulta verdaderamente difícil convertir el pensamiento basado en la actividad en definiciones basadas en resultados.

Por consiguiente, subcontratar un servicio implica identificar la necesidad de cambio para obtener algo más de lo que se puede lograr internamente, definir los requerimientos en términos de resultados o productos y dar libertad a los proveedores para responder cómo obtendrían esos resultados. También significa comprender muy claramente cómo operará el resto de la organización con el servicio contratado y con un proveedor externo que maneje lo que antes había sido una función, en su mayor parte, interna.

Como se mencionara anteriormente, esta nueva relación debe ser estipulada y definida por medio de un contrato. Cada parte designa un gerente de contrato para asegurar la adhesión al mismo y que la relación se desarrolle adecuadamente. El contrato formal debe contener tanto los requerimientos como las estimaciones del servicio. Es conveniente separar estas partes de modo que quede absolutamente claro lo que se debe lograr y cómo se determinará el cumplimiento de los objetivos.

Una dificultad inherente a cualquier relación definida por esta vía, es que los cambios inevitables pueden constituir problemas importantes. El cambio también podría ser un área donde ambas partes se sientan vulnerables y expuestas. Esto es especialmente válido para la organización cliente, que al haber ingresado en un contrato podría pensar que su poder de negociación habrá disminuido cuando se requieran cambios.

5.2 OTRAS CONSIDERACIONES A TENER EN CUENTA

Lo primordial y lo que nunca se debe perder de vista es que el receptor o destinatario final debe encontrar satisfactoria la nueva gestión logística. No siendo el destinatario parte del contrato de transporte, este nunca estará obligado a aceptar las mercancías, siendo totalmente libre de rechazarlas (incluso sin motivo alguno).

Existen muchas actividades que deberán ejecutarse durante el desarrollo y control de la relación con el proveedor logístico:

- El costo debería incluir vínculos de comunicación en tiempo real con los proveedores del servicio logístico; acceso del cliente a información sobre pedidos-despachos y recursos internos para asegurar la reacción del proveedor a los requerimientos de clientes y personal de ventas.
- La medición de la calidad va más allá del conocido control de partes. Adicionalmente, el control de un servicio contempla medidas no cuantificables, como la satisfacción del cliente o la capacidad de respuesta del personal. El procedimiento ideal sería el de calcular costos de varios

tipos de fallas de servicio, estimar la probabilidad de ocurrencia tanto con una organización logística interna como externa, y después determinar el costo de recuperación del servicio según ambos regímenes. En cualquier caso es importante alcanzar consenso acerca de los factores de más difícil cuantificación y sobre el peso que se dé a cada factor.

- También debe ser considerada la dificultad de comunicación (surgida debido a horarios especiales de recepción por parte de los clientes, modificaciones en puntos de entrega o cantidades), así como la flexibilidad y velocidad de respuesta que pueda ofrecer el proveedor logístico. El costo de pedidos, que por su atipicidad no pudiera ser servido por el proveedor, también debe ser motivo de análisis. Del mismo modo, el costo de seguimiento de las actividades logísticas del operador debe incluirse en el costo total.
- Al transferirse en muchos casos la relación con el cliente al proveedor logístico, existe un conjunto de actividades que de algún modo dejarán de estar en la órbita de la empresa principal: registros de entrega, informe inmediato de discrepancias y, en general, cualquier otra información necesaria para supervisar la relación entre el tercerizador y el cliente. Es importante definir cuál es la retroalimentación de información en cuanto a la relación con los clientes que se espera de las terceras partes.

5.3 PUNTO DE NEGOCIACIÓN

Después de analizar las posibilidades que ofrece y representa una alianza estratégica, se llegó a la conclusión de que una de las ventajas factibles de obtener es el logro de un beneficio económico respecto del costo tradicional del servicio.

De los resultados obtenidos a través de la simulación, se concluyó que la cuota mensual para la tercerización total (modelo C) sería mucho más elevada que las correspondientes al modelo A (situación actual) y al modelo D (único camión propio de 1700 kg), el cual resultó ser el más viable a nivel costos. Ingresando la variable alianza dentro de la ecuación, resta por determinar qué grado de mejora del precio del proveedor sería necesario para convertir la opción de tercerizar toda la logística en la más conveniente. Los puntos de equilibrio se observan en la figura 5.3.1.

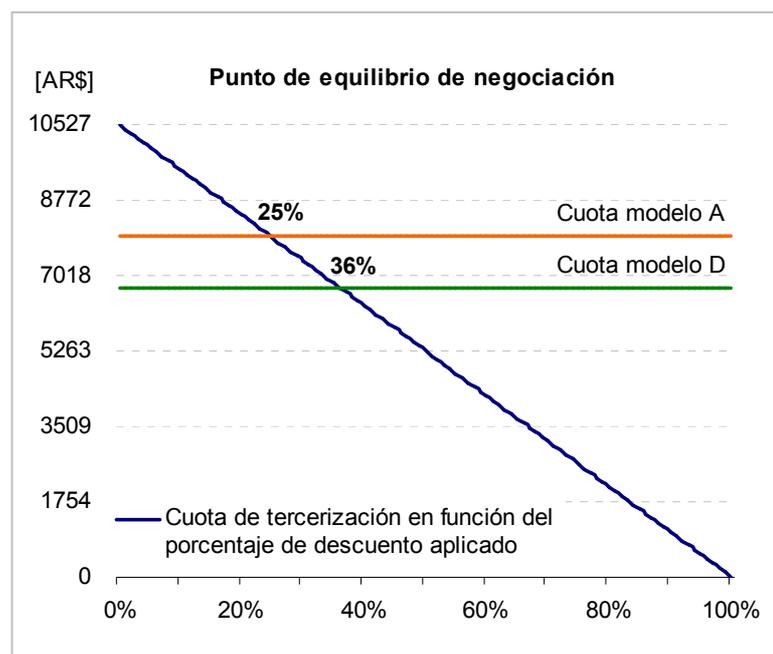


Figura 5.3.1. Descuentos a negociar a la hora de buscar aliarse estratégicamente con el proveedor.

Para poder igualar el bajo nivel de cuota obtenido con el modelo D, sería necesario que el descuento a aplicar a partir del contrato fuese del 36%. En el caso del modelo A, referido al sistema actual, este valor es menor y corresponde al 25%. En torno a estos valores el cuerpo negociador de Tibex debiera enfocar la discusión del acuerdo.

5.4 CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIÓN DEL AUTOR

Hasta aquí se ha estudiado en detalle la logística de distribución de Tibex, sus procesos, el contexto de las operaciones y estructura de costos. Teniendo en cuenta el interés y objetivo de la empresa de reducir su nivel de costos sin impactar negativamente en el nivel de servicio, el curso de acción que se recomienda es el de, inicialmente, plantear una negociación a fin de lograr convertir a la empresa transportista en un proveedor preferencial o aliado estratégico. Esto debiera concretarse a través de la firma de un contrato de servicio que especifique el pago de un canon mensual del orden de los \$6700. Este es el valor que se obtuvo a través de la simulación para la cuota del modelo D, el cual resultó ser el más económico. Dicho valor implicaría un descuento del orden del 36% sobre lo que costaría mensualmente tercerizar toda la logística con las tarifas que se abonan en la actualidad (cuota del modelo C, \$10527).

En caso de no prosperar la negociación, se recomienda instrumentar la alternativa planteada en el modelo D, la cual contempla el cambio del camión que se emplea actualmente por uno de menor capacidad de carga (1700 kg).

En cuanto a la metodología empleada, la misma resultó ser muy útil y demostró a través de su buen desempeño, la gran flexibilidad que la simulación otorga al permitir introducir todo tipo de variables, situaciones y reglas en el escenario, en la medida que puedan ser parametrizadas y traducidas al lenguaje de la herramienta a utilizar. Se recomienda encarar problemas de logística (y de muchos otros campos de la ingeniería) de este tipo con los procedimientos hasta aquí empleados, a fin de obtener soluciones válidas y a un costo razonable, los cuales no serían factibles mediante otras aproximaciones (estudios determinísticos que no contemplen la estocasticidad del comportamiento de las variables, por ejemplo).

Una posible línea de estudio para el futuro, sería investigar sobre la aplicación efectiva de las sinergias resultantes de una alianza estratégica, buscando cómo implementar mejoras a nivel servicio y en las operaciones, y desarrollando la integración de las actividades de control y planeamiento de ambas empresas. Por último, otro estudio a desarrollar podría ser el de la implementación efectiva de una de las alternativas planteadas y la evaluación del grado de divergencia entre el comportamiento del nuevo sistema real y el previamente simulado.

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

Ross, S. M. 1997. Introduction to Probability Models. Editorial Academic Press.

Ballou, R. H. 2004. Logística. Administración de la cadena de suministro. Editorial Pearson Educación.

Chung, C. A. 2004. Simulation Modeling Handbook. A Practical Approach. Editorial CRC Press.

Martínez González, P. 2006. El Transporte Terrestre de Mercancías. Responsabilidad por averías, faltas y retrasos. Ediciones Díaz de Santos.

Kelton, D. W., Sadowski, R. P., Sadowski, D. A. 1998. Simulation with Arena. Editorial WCB McGraw-Hill

Banks, J., Carson, J. S., II, Nelson, B. L. 1996. Discrete-Event System Simulation. Editorial Prentice Hall.

