

---

## DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN PARA TERMINALES TERRESTRES. CASO: MEJORAMIENTO O REUBICACIÓN DE LOS TERMINALES TERRESTRES NACIONAL E INTERNACIONAL DE LA CIUDAD DE ARICA

A. G. BOUILLON S., M. A. VIACAVA P.

*Universidad de Tarapacá. Facultad de Ciencias Sociales Administrativas y Económicas. Departamento de Administración. Arica, Chile*

D. VIERA C.

*Asesor de la investigación. Profesor titular del Departamento de Administración de la Universidad de Tarapacá*

### RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene por objetivo principal determinar si las actuales instalaciones de los terminales terrestres nacional e internacional de la ciudad de Arica deben mejorarse, conservando su ubicación actual o deben ser reubicadas. Para el logro de este objetivo se desarrolla un modelo de simulación que representa, bajo algunos supuestos, el funcionamiento de los terminales terrestres de la ciudad de Arica, de modo tal que permita analizar sus comportamientos frente a distintas condiciones de operación.

En primer lugar, se examinan los síntomas y problemas que dan origen al trabajo de investigación. Luego se analiza el marco teórico, el cual proporciona las definiciones y teorías sobre sistemas, simulación, números y variables aleatorias y líneas de espera. Por otro lado, se realiza una descripción física y operacional de los terminales terrestres de la ciudad de Arica, base teórica en la que se fundamenta el modelo de simulación.

El modelo de simulación se desarrolla formulando, en primer lugar, el sistema que se desea simular, e identificando la información necesaria para poder formular el modelo matemático. Luego se evalúan las características de la información procesada identificando su distribución de probabilidad. Posteriormente, se elabora un diagrama de flujo que representa en forma secuencial las actividades del modelo ejecutadas en un programa computacional desarrollado en lenguaje Visual Basic para Aplicaciones. Los datos entregados por este programa que corresponden a la simulación de los terminales terrestres son validados para verificar su semejanza con la realidad.

Se realizan cuatro experimentos de simulación, para observar el funcionamiento de los terminales terrestres en periodos futuros, encontrar problemas operacionales o de congestión e identificar el momento en que estos ocurren.

Finalmente se exponen las conclusiones y recomendaciones para la solución de los problemas operativos identificados en el desarrollo de la investigación.

**PALABRAS CLAVES:** Simulación, modelo de simulación, terminales.

## INTRODUCCIÓN

La ubicación geográfica de la ciudad de Arica determina la existencia de dos terminales terrestres, uno nacional que cubre viajes hacia el sur del país y otro internacional donde se realizan viajes a los países de Perú y Bolivia.

En el año 2003, el número de ingresos de vehículos a los terminales terrestres se incrementó en un 5% con respecto al año 2002.

De acuerdo con esta tendencia en el aumento de los ingresos de los vehículos a los terminales terrestres, se han generado problemas de congestión al interior de los patios de maniobras de ambos terminales, es así que se estima conveniente determinar si las actuales instalaciones de los terminales terrestres nacional e internacional de la ciudad de Arica, deben mejorarse conservando su ubicación actual o deben ser reubicadas, para que puedan atender la demanda por servicios de estacionamientos que se presente en el futuro.

Para el logro de este objetivo se desarrolla un modelo de simulación para terminales terrestres, instrumento que ayudará a las entidades que estén relacionadas con la administración de los terminales terrestres de la ciudad de Arica; al entregar información técnica sobre el funcionamiento operativo de los patios de maniobras de dichos terminales.

Este modelo permite conocer en mayor detalle el comportamiento de las diversas variables que componen el sistema de terminales terrestres bajo diferentes escenarios de funcionamiento.

### 1. MARCO TEÓRICO

Los terminales terrestres deben ser analizados desde un enfoque sistémico, identificando sus elementos, características, funciones y comportamientos que, de acuerdo a los objetivos del estudio, puedan ser aplicados en un modelo matemático.

Se sabe que "un sistema es un conjunto de elementos, relacionados de modo dinámico, que desarrollan una actividad para alcanzar un determinado objetivo o propósito"<sup>1</sup>

Desde este punto de vista, el objetivo principal del sistema de terminales terrestres es brindar un servicio de transporte. De acuerdo a este objetivo, se debe analizar la capacidad operativa del sistema de terminales terrestres frente a una demanda creciente por servicios de transporte. Este análisis consta de la formulación de un modelo que permite aislar todos los aspectos relevantes del sistema en estudio.

"Un modelo es un conjunto de información que se recoge de un determinado sistema con el propósito de estudiarlo. Se deberá considerar y determinar desde el objetivo del estudio la naturaleza de la información que se recopilará, ya que no habrá un único modelo para un sistema"<sup>2</sup>.

Teniendo en cuenta este concepto, los aspectos de mayor relevancia considerados en el modelamiento son: las entradas y salidas de vehículos desde y hacia los terminales, así como también la capacidad de los patios de maniobras.

Para efectos del estudio, se utiliza un **Modelo Matemático Dinámico**, el cual permite que los cambios de los atributos del sistema sean derivados numéricamente como una función de tiempo. El método que se utiliza para dinamizar este tipo de modelo es el análisis por simulación.

<sup>1</sup> CHIAVENATO, Idalberto. Administración de Recursos Humanos, 5ta ed. Santa Fe de Bogotá, Mc-Graw Hill, 2000, p. 15

<sup>2</sup> GORDON, Geoffrey. System Simulation. New Jersey. Prentice Hall, 1969 p. 5

"Simulación es un proceso numérico diseñado para experimentar el comportamiento de cualquier sistema en una computadora digital, a lo largo de la dimensión tiempo".<sup>3</sup>

El proceso de simulación se inicia con la *formulación del problema*, en donde se identifican las variables de entrada y salida relacionadas con el sistema de terminales terrestres, luego se procede a *recolectar y procesar la información* necesaria para estudiar el sistema de terminales terrestres y poder *formular el modelo matemático* que muestre las relaciones de las identidades del sistema.

En esta etapa se incorpora el elemento aleatorio o probabilístico, por lo cual es necesario *evaluar las características de la información procesada* para hallar la distribución de probabilidad que explique el comportamiento de las variables que componen el sistema (tiempos entre llegadas y tiempos de servicios de vehículos para cada uno de los subsistemas de los terminales terrestres). Con esta información se elaboran los diagramas de flujo para *formular el programa de computadora*.

Los resultados obtenidos deben ser analizados a través de pruebas estadísticas para poder *validar el programa de computadora* y utilizarlo posteriormente en el *diseño de experimentos de simulación*.

Mediante la experimentación con el modelo matemático se pueden utilizar y modificar las variables endógenas y exógenas que afectan el sistema de terminales terrestres, creando nuevos escenarios de ocurrencia que permita analizar el funcionamiento operativo del sistema.

En el desarrollo del sistema de terminales terrestres se utiliza un proceso de simulación para la cuantificación de una línea de espera.

Una línea de espera está constituida por un *cliente*, que requiere de un *servicio* (proporcionado por un *servidor*) en un determinado periodo. Los clientes entran *aleatoriamente* al sistema y forman una o varias *colas* (o *líneas de espera*) para ser atendidos. Si el servidor está ocupado, de acuerdo a ciertas *reglas* preestablecidas, conocidas con el nombre de *disciplina del servicio*, se proporciona el servicio a los elementos de la cola. El cliente será atendido en un periodo determinado de tiempo, llamado *tiempo de servicio*. Al finalizar éste, el cliente abandona el sistema. Los clientes que forman en una cola lo hacen en un *área de espera*.<sup>4</sup>

En el sistema de terminales terrestres los servidores o estaciones de servicio son los andenes del terminal, los clientes son los vehículos y el servicio es el estacionamiento de los vehículos dentro de los terminales terrestres.

Existen diversos tipos de sistemas de líneas de espera; en el caso de los terminales terrestres el sistema que se utiliza es un *modelo de colas de servidores múltiples en paralelo*, que tiene como política atender a los vehículos en el orden con que llegan al establecimiento, donde el servicio lo proporciona el primer andén que se encuentra desocupado. El modelo supone que al principio los terminales se encuentran vacíos y que los andenes se van ocupando progresivamente conforme llegan los vehículos.

Para este modelo se utilizará la siguiente notación:

- $\lambda$  : Número promedio de llegadas al sistema por unidad de tiempo
- $\mu$  : Número promedio de servicios por unidad de tiempo.
- $1/\lambda$  : Tiempo promedio que transcurre entre dos llegadas consecutivas.
- $1/\mu$  : Tiempo promedio de servicio de un cliente.
- S : Número de servidores del sistema
- $\rho$  : Factor de utilización del sistema con servidores múltiples en paralelo.  $\rho = \lambda / (S \cdot \mu)$

<sup>3</sup> PRAWDA, Juan. Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones. México DF, Técnica, 1980, p. 316

<sup>4</sup> PRAWDA, Juan. Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones. México DF, Técnica, 1980, p. 247

El factor de utilización del sistema debe ser menor o igual a uno, es decir,  $\rho_s = \lambda / (S \cdot \mu) \leq 1$ ; para que el sistema pueda dar servicio a todas las llegadas por unidad de tiempo. Si  $\rho_s > 1$  el número de clientes en la cola de espera crecerá sin límites.

## 2. DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE TERMINALES TERRESTRES

### 2.1 DEFINICIÓN DE TERMINAL TERRESTRE

Equipamiento arquitectónico donde se realizan las funciones inherentes al arribo y salida de vehículos terrestres de transporte de pasajeros.

Por lo tanto, un terminal terrestre es un punto de iniciación y término de servicios de transporte de pasajeros y/o encomiendas.

### 2.2 TERMINALES TERRESTRES EN LA CIUDAD DE ARICA

La ciudad Arica se encuentra en el extremo norte de Chile. Se sitúa en la entrada del valle de Azapa, a 2.051 Km. al norte de Santiago (capital Chilena) y 19 Km. al sur del límite con Perú.

Su actividad es primordialmente comercial y turística, con un creciente desarrollo gracias a la integración del área centro andina -Chile, Perú y Bolivia. Esto conlleva a que la ciudad represente una situación geopolítica estratégica en Chile, generándose desde el punto de vista del flujo del transporte de pasajeros, la existencia de dos Terminales Terrestres: Uno nacional y otro internacional.

Los terminales terrestres nacional e internacional se rigen por la Ordenanza Municipal de Terminales de Locomoción Colectiva no urbana de la Ciudad de Arica, la que en términos generales reglamenta las características físicas y de organización tales como el funcionamiento relacionado con los medios de transporte, operación, administración y atención adecuada a los usuarios de estos terminales de buses.

La Ilustre Municipalidad de Arica, mediante su Dirección de Tránsito y Transporte Público entrega en concesión la administración de los terminales terrestres.

#### A. Terminal Nacional

El Terminal Nacional de Arica fue construido en el año 1971. Está ubicado en la avenida Diego Portales. La administración de este Terminal estaba a cargo de la Ilustre Municipalidad de Arica; sin embargo, se entrega en el año 1981 la concesión de la administración del Terminal Nacional a la Sociedad de Comerciantes Asociados Limitada, quienes continúan administrando el terminal en la actualidad.

##### • Descripción física

Los sectores que se encuentran en el interior del Terminal Nacional son las Agencias de viajes, Agencias de Aduanas, Servicio Agrícola Ganadero, oficinas administrativas, locales comerciales y patio de maniobras compuesto de 12 andenes.

##### • Descripción operacional

El terminal nacional cuenta con un patio de maniobras, el cual está destinado para el arribo y salida de buses, provenientes o con destino a las ciudades de Iquique, Santiago e intermedios.

El tiempo de permanencia para los buses que ingresan al terminal para dejar pasajeros es de quince minutos como máximo, pudiendo permanecer un tiempo mayor cancelando un derecho de estacionamiento. Por otro lado, para los buses que van a embarcar pasajeros, el tiempo de permanencia es de 30 minutos.

Con relación a los horarios de salida y llegada, se establece que éstos son determinados libremente por cada agencia de viaje, comunicándolos a la administración.

El funcionamiento diario del terminal nacional es aproximadamente de 19 horas continuadas, en donde los eventos de arribos y salidas de buses suceden repetidamente a lo largo del día.

## **B. Terminal Internacional**

El Terminal Internacional de la ciudad de Arica fue construido el año 1988 funcionando inicialmente sólo el sector de buses. Posteriormente, en el año 1998 inició sus actividades como terminal internacional, atendiendo los arribos y salidas de buses y autos con destinos a Perú, Bolivia e interior de Arica. El terminal se encuentra ubicado en la Av. Diego Portales 1002 y es de propiedad de la Ilustre Municipalidad de Arica, quien se encarga de su administración.

Este equipamiento arquitectónico permite la llegada y salida de vehículos de pasajeros con destinos a Perú, Bolivia y al interior de Arica.

### **• Descripción física**

La infraestructura actual del Terminal Internacional está dividida en los siguientes sectores: oficinas de agencias de viajes, restaurante, servicios higiénicos, custodia, patios de maniobras y estacionamientos.

El terminal internacional cuenta con dos patios de maniobras, uno destinado al sector de buses y el otro al sector de autos, compuestos de 16 y 75 andenes respectivamente.

### **• Descripción operacional**

En el sector de autos se encuentran los vehículos que ofrecen los servicios de Taxis Colectivos a la ciudad de Tacna.

En el sector de buses, hacen uso del patio de maniobras los vehículos con los siguientes destinos:

- Buses Arica - Tacna
- Buses a Bolivia
- Buses al interior de Arica

El funcionamiento diario del terminal internacional es aproximadamente de 16 horas continuas, en donde los eventos de arribos y salidas de buses y autos en ambos sectores suceden repetidamente a lo largo del día.

No existe restricción en el tiempo de permanencia en el sector de autos y buses, estos pueden permanecer durante todo el día pero deben pagar un derecho de estacionamiento si es que pernoctan en el terminal.

Con relación a los horarios de salida de los vehículos con destino a Bolivia y al interior de Arica, éstos salen de acuerdo a un programa de horarios establecidos por las mismas agencias e informado previamente a la administración.

En el caso de los buses con destino a Tacna, las agencias se organizan formulando diariamente un rol que contempla la salida de los buses cada treinta minutos.

De los vehículos que ingresan diariamente al sector de buses del terminal, aproximadamente el 2,3% de éstos tienen por procedencia o destino Bolivia y el Interior de Arica. Por lo tanto, se observa que los vehícu-

los de transporte de pasajeros que hacen uso del terminal internacional, son en su mayoría aquellos que ofrecen el servicio de transporte Arica - Tacna.

Es por esta razón que el Terminal Internacional está regulado por una serie de convenios de transporte entre los países de Perú y Chile.

El número de ingresos de vehículos que se presenta en el terminal internacional está relacionado directamente con el flujo vehicular existente en el control fronterizo Chacalluta, correspondiente a los viajes de vehículos de pasajeros (autos y buses) con destino a la ciudad de Arica.

Según los datos analizados, el 89,7% del total de vehículos de transporte de pasajeros que ingresan por el Control Fronterizo Chacalluta con destino a la Ciudad de Arica, corresponde a autos colectivos, y el 10,3% restante corresponde a buses.

Con el objeto de simplificar el funcionamiento de los terminales terrestres, el siguiente flujograma muestra los lugares de procedencia y destinos de los vehículos que hacen uso de cada uno de los sectores de ambos terminales. (figura N° 1).



### 3. DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN PARA TERMINALES TERRESTRES

#### 3.1 RECOLECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN REQUERIDA

Para la elaboración del modelo de simulación se necesitó de la obtención de los siguientes datos:

- Tiempos interarribos de los vehículos de transporte interurbano que llegan al terminal, para el embarque o desembarque de pasajeros.
- Tiempos que permanecen los vehículos dentro de los terminales.
- Número de arribos diarios, mensuales y anuales.
- Número de calzos que presenta cada patio de maniobras.

Los datos antes mencionados fueron recolectados mediante estudios de campo y datos históricos proporcionados por la Administración de cada terminal, Servicio Nacional de Aduanas, Instituto Nacional de Estadística (INE) y el Servicio Nacional de Turismo (SERNATUR).

#### 3.2 FORMULACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO

Debido al comportamiento observado en los terminales terrestres, la formulación del modelo matemático se basó en un modelo de colas con canales y estaciones múltiples en paralelo.

Los subsistemas identificados y que son simulados por el modelo matemático son:

Terminal Nacional

Subsistema 1: Patio de maniobras Terminal Nacional.

Terminal Internacional

Subsistema 2: Patio de maniobras Terminal Internacional Autos Colectivos.

Subsistema 3: Patio de maniobras Terminal Internacional Buses.

Para cada uno de dichos subsistemas, se identifican los siguientes componentes, variables y relaciones funcionales:

### 3.2.1 COMPONENTES

Los componentes que forman el modelo de simulación de los terminales terrestres son los vehículos y las estaciones de servicio.

#### • Vehículos

Los vehículos son los autos o buses que requieren de un calzo o estacionamiento al ingresar a cualquiera de los terminales terrestres. La llegada de dichos vehículos se generan aleatoriamente de acuerdo a la distribución de probabilidad que presenten.

#### • Estaciones de Servicios

Las estaciones de servicio son los andenes de cada subsistema de los terminales terrestres, en donde llegan los vehículos para el embarque o desembarque de pasajeros. Los tiempos de servicios presentan una distribución de probabilidad y son generados aleatoriamente.

<i>CUADRO 1 Clasificación de los Subsistemas</i>	
<i>SUBSISTEMAS</i>	<i>Nº ANDENES</i>
<i>Subsistema 1: Patio de maniobras Terminal Nacional</i>	12
<i>Subsistema 2: Patio de maniobras Terminal Internacional Autos.</i>	75
<i>Subsistema 3: Patio de maniobras Terminal Internacional Buses.</i>	16

### 3.2.2 VARIABLES

Las variables consideradas en el desarrollo del modelo de simulación son las variables endógenas, de estado y exógenas.

#### A. VARIABLES ENDÓGENAS:

$WT_j$  = Tiempo medio de espera en el andén  $j$

$IDT_j$  = Tiempo medio de ocio en el andén  $j$

$TAT_i$  = Tiempo total de arribo cuando la  $i$ -ésima unidad llega al sistema

#### B. VARIABLES DE ESTADO:

$WT_{ij}$  = Cantidad de tiempo que debe esperar la  $i$ -ésima unidad de arribo para entrar al  $j$ -ésimo andén

$IDT_{ij}$  = Cantidad de tiempo que el  $j$ -ésimo andén permanece ocioso (desocupado o vacío) esperando la llegada de la  $i$ -ésima unidad de arribo

- $TT_{ij}$  = Tiempo total que ha transcurrido en la  $j$ -ésima estación de servicio cuando la  $i$ -ésima unidad de arribo sale de la  $j$ -ésima estación de servicio (Tiempo de ocupación del andén)
- $SMIN$  = El mínimo de los  $TT_{i-1,j}$  de todas las  $j$
- $m$  = Número de llegadas que se deben simular
- $n$  = Número de los andenes en paralelo

### C. VARIABLES EXÓGENAS

- $AT_i$  = Intervalo de tiempo entre el arribo de la  $i$ ésima y la  $(i+1)$ ésima unidad
- $ST_i$  = Tiempo de servicio para la  $i$  - ésima unidad de arribo.

### 3.2.3 RELACIONES FUNCIONALES

Las relaciones funcionales describen el comportamiento de las actividades exógenas y endógenas y sus interrelaciones.

#### A. RELACIONES DE COMPORTAMIENTO

$f(AT)$  = Función de la densidad de probabilidad para el intervalo de tiempo entre los arribos.

$f(ST)$  = Función de la densidad de probabilidad del tiempo de servicio.

#### B. IDENTIDADES

$$TT_{ij} = ST_{ij} + IDT_{ij}$$

$$\overline{WT} = \frac{\sum_{i=1}^m WT_i}{m} = \frac{TWT}{m}$$

$$\overline{IDT} = \frac{\sum_{i=1}^m IDT_i}{m} = \frac{TIDT}{m}$$

### 3.3 EVALUACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE LA INFORMACIÓN PROCESADA

La información utilizada para simular el modelo matemático tiene características de aleatoriedad. Por lo tanto, se debe verificar el tipo de distribución de probabilidad que caracteriza a los tiempos interarribos ( $AT$ ) y a los tiempos de servicio ( $ST$ ).

De acuerdo a los histogramas analizados de la información procesada, se determinó que las distribuciones de los tiempos interarribos y de servicio se asemejan a una distribución exponencial negativa.

Para analizar si existen diferencias significativas entre la distribución empírica observada y la distribución teórica supuesta, se realizan las siguientes pruebas estadísticas:



• Prueba Ji- Cuadrado (prueba referente a variaciones).

Se generaron las siguientes hipótesis:

$H_0$  : Los datos de la muestra se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda_i$  ( $i =$  Subsistema 1,2,3)

$H_1$  : Los datos de la muestra no se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda_i$  ( $i =$  Subsistema 1,2,3)

Nivel de Significancia ( $\alpha$ ) = 0.05

El resumen de los resultados para los tres subsistemas es el siguiente:

Sub-sistema	Tiempos	Parámetro ( $\lambda, \mu$ )	Estadístico Observado	Estadístico Crítico
1	Interarribos	0.0814	3.3553	11.07
	Servicios	0.0294	2.3132	9.48
2	Interarribos	0,5819	7.0391	11.07
	Servicios	0,0154	9.6813	12.59
3	Interarribos	0.1543	6.2059	11.07
	Servicios	0.0175	7.7968	7.81

No existen diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula, es decir, los datos de la muestra se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda$  y  $\mu$  para todos los subsistemas en estudio.

• Prueba Kolmogorov – Smirnov (prueba no paramétrica)

A fin de corroborar los resultados obtenidos a través de la prueba Ji Cuadrada se realizó la prueba no paramétrica de Kolmogorov Smirnov, donde se hace una comparación entre las funciones de distribución empírica de la muestra aleatoria y la distribución teórica propuesta bajo la hipótesis nula  $H_0$ .

$H_0$  : La muestra aleatoria procede de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa.

$H_1$  : La muestra aleatoria no procede de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa.

Nivel de Significancia ( $\alpha$ ) = 0.05.

El resumen de los resultados de esta prueba para los tres subsistemas es el siguiente:

Sub-sistema	Tiempos	Parámetro ( $\lambda, \mu$ )	"D" Observado	"D" Crítico
1	Interarribos	0.0814	0.0199	0.1143
	Servicios	0.0294	0.0313	0.1195
2	Interarribos	0,5819	0.0232	0.0613
	Servicios	0,0154	0.0461	0.0753
3	Interarribos	0.1543	0.0289	0.1224
	Servicios	0.0175	0.0817	0.1389

No existen diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula, es decir, los datos de la muestra proceden de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa para todos los subsistemas.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados obtenidos en ambas pruebas, se determinó que tanto el tiempo interarribos como el tiempo de servicio tienen una distribución exponencial negativa para todos los subsistemas estudiados.

### 3.4 FORMULACIÓN DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA

Para la formulación del programa de computadora se elaboró en primer lugar el diagrama de flujo que describe las condiciones iniciales y la secuencia lógica de los sucesos que se desarrollarán.

Posteriormente, se desarrolló el programa computacional en lenguaje Visual Basic para Aplicaciones, en entorno Microsoft Excel.

El programa computacional comienza con el ingreso de los datos correspondientes al número de calzos que posea el subsistema a simular ( $N$ ), el número de arribos al subsistema ( $M$ ), el parámetro Lambda ( $\lambda$ ) para los tiempos interarribos y el parámetro Mu ( $\mu$ ) para los tiempos de servicio. Las condiciones iniciales del modelo suponen que el subsistema a simular se encuentra vacío lo cual indica el comienzo de un día normal de funcionamiento. Luego el programa genera los tiempos interarribos para la llegada de vehículos hasta que todos los calzos estén ocupados; en seguida se generan los tiempos de servicio para todos los calzos del subsistema. El tiempo de ocio para la  $j$ -ésima estación de servicio es el tiempo total de arribo ( $TAT$ ) que se acumuló antes que se asigne un vehículo a la estación de servicio  $j$ . Se calculan los  $TT_j$  de todas las estaciones de servicio y se determina el valor mínimo de los  $TT_j$  ( $SMIN$ ) para encontrar la estación de servicio que se desocupa primero ( $L$ ).

La variable  $i$  se incrementa en uno, indicando que ha llegado un nuevo vehículo al sistema. Si  $i$  es menor a  $M$ , entonces se genera un nuevo tiempo interarribo y se agrega al tiempo total de arribo ( $TAT$ ).

Se calcula la diferencia ( $DIF$ ) entre el tiempo total de arribo y el tiempo total de ocio más el tiempo de servicio de la primera estación de servicio en desocuparse ( $L$ ); si la diferencia es positiva se produce un tiempo de ocio igual a  $DIF$  y el tiempo de espera ( $WT_L$ ) se hace igual a cero; si la diferencia es negativa, existe un tiempo de espera igual a  $DIF$  y el tiempo de ocio ( $IDT_L$ ) se hace igual a cero. Por otro lado si  $DIF$  es igual a cero, tanto  $IDT_L$  y  $WT_L$  se hacen igual a cero, es decir no existe tiempos de espera ni de ocio.

Por último se genera un nuevo tiempo de servicio para la  $L$ -ésima estación, produciéndose un nuevo valor para  $TT(L)$ .

Todo este proceso se repite hasta que se complete el número total de llegadas al sistema ( $M$ ).

### 3.5 VALIDACIÓN DEL PROGRAMA DE COMPUTADORA

La validación del programa de computadora consiste en que los diferentes resultados de las ejecuciones de dicho programa no presenten diferencias estadísticas significativas. Para comprobar lo anterior, se utilizó como herramienta estadística el análisis de varianza.

Así mismo, los datos simulados deben presentar características similares a la información empírica. Es por esto que, para determinar si los datos generados por el modelo de simulación poseen la misma distribución de frecuencia que el conjunto de datos históricos observados, se realizaron las pruebas de  $Ji - Cuadrado$  y Kolmogorov - Smirnov.

• **Análisis de Varianza**

El objetivo de este análisis es encontrar si existe o no una diferencia estadísticamente significativa entre los valores medios asociados a diferentes ejecuciones simuladas de una sola configuración experimental.

Para comprobar la consistencia del programa de computadora se generaron treinta ejecuciones diarias que representan el funcionamiento de los subsistemas durante un mes.

Las hipótesis planteadas son:

$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_{29} = \mu_{30}$  (No existen diferencias significativas entre las medias de las diferentes corridas del experimento).

$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \dots \neq \mu_{29} \neq \mu_{30}$  (Existen diferencias significativas entre las medias de las diferentes corridas del experimento).

Nivel de Significancia ( $\alpha$ ) = 0.05.

El resumen de los resultados es el siguiente:

<i>Subsistema</i>	<i>Tiempos</i>	<i>F</i>	<i>Valor Crítico para F</i>	<i>Resultado</i>
1	Interarribos	1.4182	1.4724	Aprobado
	Servicios	1.3626	1.4723	Aprobado
2	Interarribos	0.5412	1.4682	Aprobado
	Servicios	1.1047	1.4682	Aprobado
3	Interarribos	0.9142	1.4701	Aprobado
	Servicios	1.1691	1.4700	Aprobado

No existen diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula, es decir, las medias de las diferentes corridas del experimento no son significativamente diferentes entre sí.

• **Prueba Ji- Cuadrado (prueba referente a variaciones).**

Se generaron las siguientes hipótesis:

$H_0$ : Los datos de la muestra se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda_i$  ( $i =$  Subsistema 1,2,3)

$H_1$ : Los datos de la muestra no se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda_i$  ( $i =$  Subsistema 1,2,3)

Nivel de Significancia ( $\alpha$ ) = 0.05

El resumen de los resultados es el siguiente:

<i>Sub-sistema</i>	<i>Tiempos</i>	<i>Parámetro (<math>\lambda</math> y <math>\mu</math>)</i>	<i>Estadístico Observado</i>	<i>Estadístico Crítico</i>
1	Interarribos	0.0805	3.2778	11.07
	Servicios	0.0353	8.3013	11.07
2	Interarribos	0.5625	3.0457	12.59
	Servicios	0.0153	3.3388	11.07
3	Interarribos	0.1716	1.5402	11.07
	Servicios	0.0203	0.5775	7.82

No existen diferencias estadísticamente significativas para rechazar la hipótesis nula, es decir, los datos de la muestra se ajustan a una distribución exponencial con parámetro  $\lambda$  y  $\mu$  para todos los subsistemas en estudio.

• Prueba Kolmogorov – Smirnov (prueba no paramétrica)

A fin de corroborar los resultados obtenidos a través de la prueba Ji Cuadrada se realizó la prueba no paramétrica de Kolmogorov Smirnov, donde se hace una comparación entre las funciones de distribución empírica de la muestra aleatoria y la distribución teórica propuesta bajo la hipótesis nula  $H_0$ .

$H_0$ : La muestra aleatoria procede de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa.

$H_1$ : La muestra aleatoria no procede de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa.

Nivel de Significancia ( $\alpha$ ) = 0.05.

Los resultados de esta prueba para los tres subsistemas son los siguientes:

<i>CUADRO 6: Resultados Prueba Kolmogorov - Smirnov</i>					
<i>Sub-sistema</i>	<i>Tiempos</i>	<i>Lambda o Mu</i>	<i>"D" Obs</i>	<i>"D" Crítico</i>	<i>Resultado</i>
1	Interarribos	0.0805	0.0184	0.1144	Aprobado
	Servicios	0.0286	0.0137	0.1196	Aprobado
2	Interarribos	0.5625	0.0133	0.0613	Aprobado
	Servicios	0.0153	0.0331	0.0753	Aprobado
3	Interarribos	0.1603	0.0082	0.1113	Aprobado
	Servicios	0.0175	0.0286	0.1109	Aprobado

Existe evidencia estadísticamente significativa para aprobar la hipótesis nula, es decir, la muestra de los datos simulados procede de una población con función de distribución acumulativa  $F(x)$  exponencial negativa para todos los subsistemas en estudio.

En conclusión, los resultados de las diferentes ejecuciones del programa computacional para los tres subsistemas no presentan diferencias estadísticamente significativas; así mismo, los datos simulados poseen la misma distribución de probabilidad de los datos históricos. Por lo tanto, se puede concluir que el programa computacional queda validado.

• Predicción en retroceso para datos históricos con el modelo de simulación

Esta predicción se realiza para validar el modelo de simulación y verificar la precisión de los datos en las proyecciones futuras. Se realiza una predicción en retroceso para el año 2002 en los diferentes subsistemas en estudio

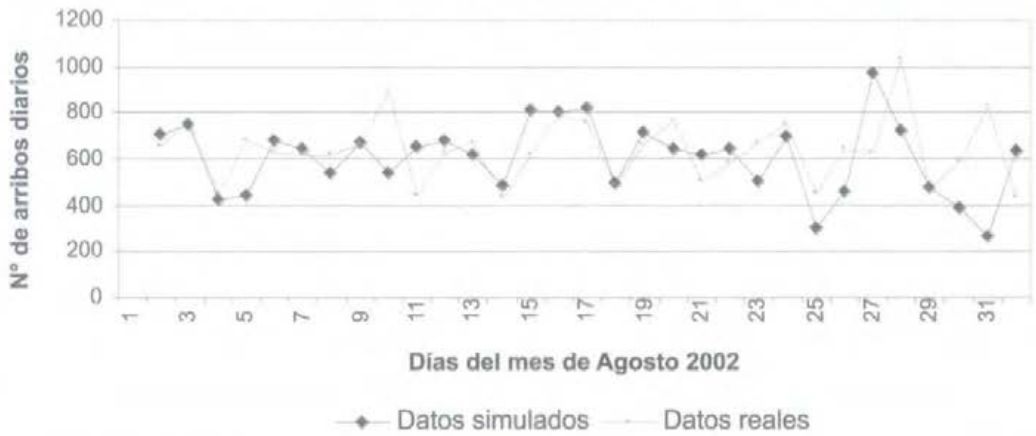
Esta predicción en retroceso consta de tres partes: primero, una predicción del total de arribos para los meses del año 2002, segundo, simulación de todos los días de un mes específico del año 2002, tercero, una simulación de los tiempos de servicios y tiempos interarribos de un día en particular del mes en cuestión.

Estas predicciones en retroceso son contrastadas con los datos reales obtenidos en estudios de campo e información secundaria.

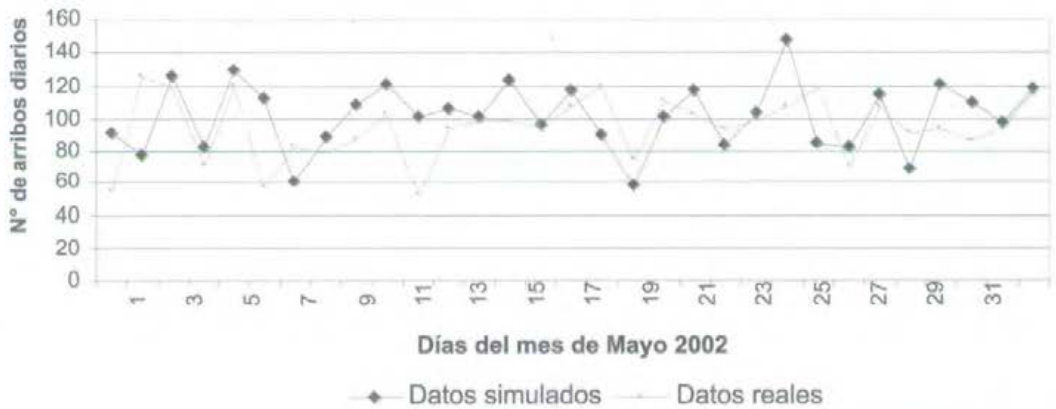
PREDICCIÓN DEL TOTAL DE ARRIBOS PARA LOS MESES DEL AÑO 2002



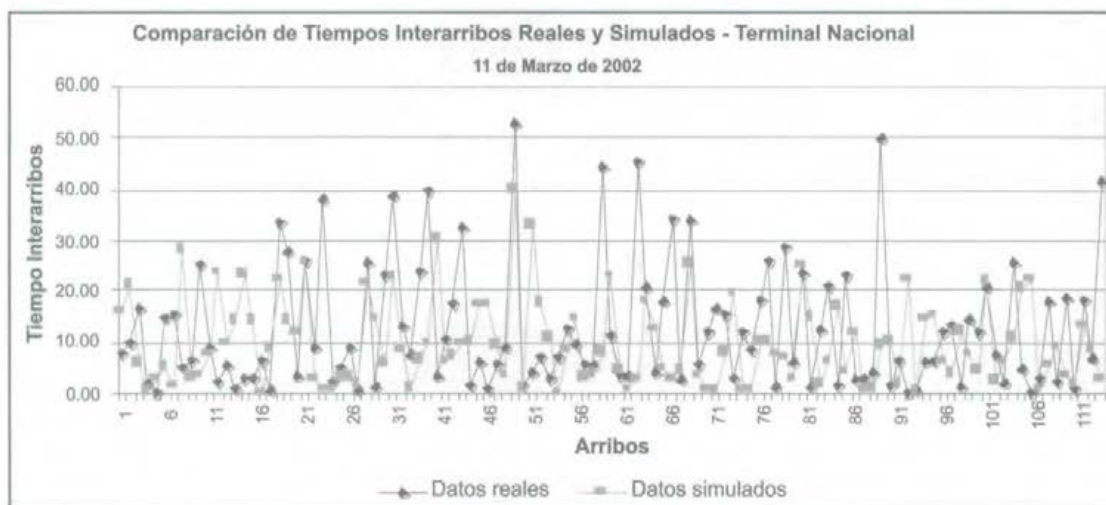
**Número de Arribos Diarios - Terminal Internacional Sector Autos  
(Mes de Agosto 2002)**

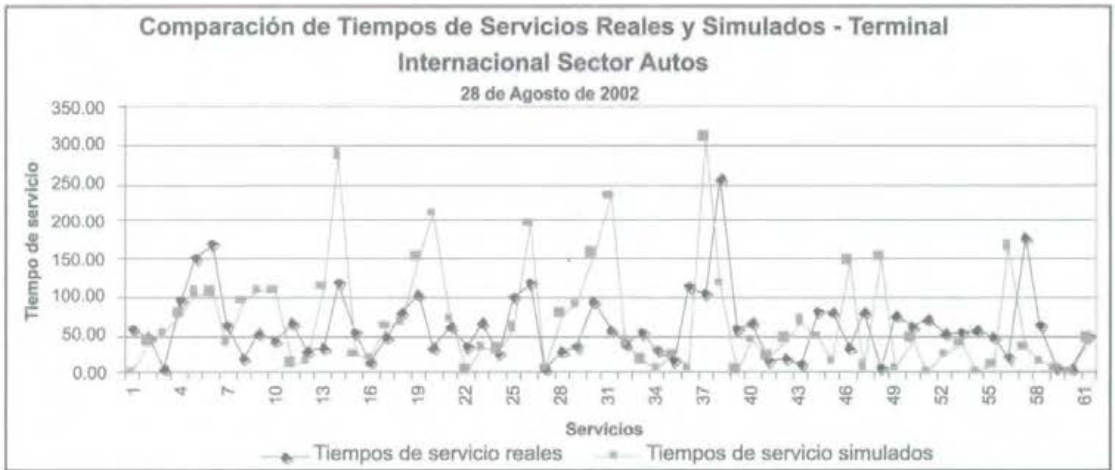


**Número de Arribos Diarios - Terminal Internacional Sector Buses  
(Mes de Mayo 2002)**



# SIMULACIÓN DE LOS TIEMPOS INTERARRIBOS DE UN DÍA EN PARTICULAR DE UN MES ESPECÍFICO







### 3.6 DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE SIMULACIÓN

En esta fase del proceso de simulación se realizaron cuatro experimentos, consistentes en:

#### 3.6.1 Estimación de una curva de regresión que relacione el tiempo interarribos (AT) con el número de llegadas diarias (M) para los tres subsistemas en estudio

Utilizando el modelo de simulación se determinó el tiempo interarribos ( $AT=1/\lambda$ ) en función del número de llegadas diarias (M), estableciendo las siguientes condiciones:

- Funcionamiento diario promedio de 19 horas para el subsistema 1 del Terminal Nacional.
- Funcionamiento diario promedio de 16 horas para el subsistema 2 y 3 del Terminal Internacional.
- Tiempo promedio de servicios ( $1/\mu$ ) constante para cada subsistema a lo largo del tiempo.

Con las curvas de regresión obtenidas se puede estimar el tiempo interarribo, dado cierto número de llegadas; esta estimación permite ejecutar el modelo de simulación en diferentes configuraciones experimentales.

#### 3.6.2 Simulación de periodos futuros de los terminales con las condiciones actuales de funcionamiento

La finalidad de este experimento es determinar el período futuro en que los terminales terrestres presentarán problemas operativos.

Para desarrollar este experimento se realizó previamente la proyección de la demanda mensual por servicios de estacionamiento para cada uno de los subsistemas.

Una vez identificada la demanda mensual futura se determinó el momento en que los terminales terrestres se vuelven inoperantes, es decir, cuando el factor de utilización del sistema es mayor a 1 y por lo tanto se generan colas de espera infinitas.

Utilizando los datos diarios históricos de cada mes, se realizaron pruebas estadísticas para determinar la distribución de probabilidad del número de llegadas diarias en un mes, con la finalidad de simular el número de llegadas diarias para los meses futuros.

Finalmente, para los diferentes subsistemas, se simularon días futuros para estudiar el comportamiento de los terminales e identificar problemas de colapsos reiterados con gran acumulación de vehículos en la cola de espera.

#### 3.6.3 Determinación del número de calzos que permita solucionar los problemas operativos de corto plazo para cada uno de los subsistemas

Analizados los resultados del experimento anterior, se puede observar que los subsistemas 2 y 3, correspondientes al terminal internacional presentan problemas operativos en un plazo aproximado de 6 y 3 años respectivamente. Por otro lado, el subsistema 1 presenta dicho problema dentro de 48 años.

Se ha considerado conveniente incluir en este experimento sólo los subsistemas 2 y 3, con la finalidad de darle una solución al problema de congestión a través de la ampliación del número de calzos.

### 3.6.4 Agrupación de los andenes de los subsistemas 2 y 3 del terminal internacional en un solo patio de maniobras

Al unir los patios de maniobras de los subsistemas 2 y 3, los nuevos parámetros utilizados son los siguientes:

$\lambda$	$\mu$	s	$\rho$	$\lambda$ crítico
0.8591	0.0159	91	0.5930	1.44

Donde:

- $\rho$  = Factor de utilización del sistema
- $\lambda$  = Número promedio de llegadas al sistema por unidad de tiempo (minuto)
- $\mu$  = Número promedio de servicios del sistema por unidad de tiempo (minuto)
- s = Número de servidores del sistema.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los terminales terrestres nacional e internacional han sido divididos en tres subsistemas:

Subsistema 1: Patio de maniobras Terminal Nacional.

Subsistema 2: Patio de maniobras Terminal Internacional Autos Colectivos.

Subsistema 3: Patio de maniobras Terminal Internacional Buses.

Actualmente, el subsistema 1 presenta un 27,6% de ocupación de su capacidad total, con un promedio diario de 115 entradas de vehículos a su patio de maniobras. Este subsistema presentará problemas de congestión el año 2051, cuando ocupe en promedio el 70% de su capacidad total, expresado en 285 entradas diarias o más.

El subsistema 2 ocupa en la actualidad el 54,42% de su capacidad total, con un promedio de 620 entradas de vehículos al patio de maniobras. Los problemas de congestión se presentarán en el año 2009, ocupando el 80% de su capacidad, con un promedio diario de 920 entradas de vehículos.

El subsistema 3 actualmente ocupa el 58,6% de la capacidad de su patio de maniobras al cual entran los vehículos en promedio 135 veces al día. Este subsistema presenta problemas de congestión en el año 2006, cuando el 65% de su capacidad es ocupada, alcanzando un promedio de 180 entradas de vehículos a su patio de maniobras.

Si se incrementan en 17 y en 8 los andenes de los subsistemas 2 y 3 respectivamente los problemas de congestión ocurrirán en periodos posteriores. Para el caso del subsistema 2 estos problemas se presentarían en el año 2017 cuando se ocupe el 80% de la capacidad de su patio de maniobras, entrando los vehículos en promedio 1.165 veces en el día. Por otro lado, el subsistema 3 presentaría problemas el año 2016 al ocuparse el 65% de su capacidad, alcanzando un promedio diario de 262 llegadas.

Se experimentó que, al unir los patios de maniobras de los subsistemas 2 y 3 con un número de andenes igual a los actuales se presentarían los problemas de colapso en el año 2.010, cuando autos y buses ocupen el 85% de la capacidad del nuevo patio de maniobras, es decir se presenten en promedio 1.161 llegadas de vehículos al terminal. Al incrementarse 25 andenes a este nuevo patio de maniobras, los problemas de congestión se presentarán en el año 2017, cuando se ocupe el 85% de la capacidad y las entradas al terminal alcancen un promedio de 1.390 entradas de vehículos diarias.

Con los resultados obtenidos con el trabajo de investigación se recomienda no reubicar los terminales terrestres, ya que efectuando mejoras en sus instalaciones se puede prolongar el momento en que estos colapsan. En el caso del terminal internacional, las acciones necesarias son aumentar el número de calzos en ambos patios de maniobras; esta puede constar, por ejemplo de la unión de dichos patios en uno solo y aprovechar mejor el área total del recinto. En el terminal nacional se recomienda no efectuar mejoras debido a que no presenta problemas de congestión en la actualidad, por lo que se tiene un horizonte de tiempo suficientemente largo hasta que se produzca un colapso en su patio de maniobras.

## REFERENCIAS:

- CHIAVENATO, Idalberto. Administración de Recursos Humanos. 5ta ed, Santafé de Bogotá, McGraw-Hill 2000, 684 p
- EPPEN, G.D., GOULD, F.J., SCHMIDT, C.P., MOORE, J.H y WEATHERFORD, L.R. Investigación de Operaciones en la Ciencia Administrativa, 5ta ed., México DF, Prentice Hall, 2000, 702 p.
- GUJARATI, Damodar N. Econometría. 3ra ed, Santafé de Bogotá, McGraw-Hill, 1997, 824 p.
- GORDON, Geoffrey: System Simulation, New Jersey, Prentice Hall, 1969, 305 p.
- GOTTFRIED, Byron S. Elements of Stochastics Process Simulation, New Jersey, Prentice Hall, 1984
- HERNÁNDEZ, Roberto, FERNÁNDEZ, Carlos, BAPTISTA, Pilar. Metodología de la Investigación. 3ra ed. Mexico DF, McGraw-Hill, 2003, 705 p.
- MITACC MEZA, Máximo. Inferencia Estadística. 2da ed. Lima, Thales, 1999, 522 p.
- NAYLOR, Thomas H. Experimentos de Simulación en Computadoras con Modelos de Sistemas Económicos. México DF, Limusa, 1977, 496 p.
- ORTÚZAR S, Juan de Dios, Modelos de Demanda de Transporte. Santiago, Universidad Católica de Chile, 1994.
- PANICO, Joseph A. Teoría de las Colas. Buenos Aires, Prolam S.R.L., 1973, 221 p.
- PRAWDA, Juan. Métodos y Modelos de Investigación de Operaciones. México DF, Técnica, 1980, 2 volúmenes.
- SERVICIO NACIONAL DE ADUANAS, Síntesis mensual tráfico de fronteras, Avanzada Fronteriza Chacalluta Carretero [en línea], Chile, [Setiembre de 2003], <http://www.aduanas.cl>