

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**MEJORA DE LA OPERACIÓN DE ESTIBA Y DESESTIBA
EN AERONAVES COMERCIALES DE UNA EMPRESA
QUE BRINDA SERVICIOS AEROPORTUARIOS**

Tesis para optar el Título de **Ingeniera Industrial**, que presenta la bachiller:

Cinthia Gabriela Cam Chiang

ASESOR: Eduardo Carbajal López

Lima, mayo de 2014

Resumen

El presente trabajo nace de la necesidad de mejorar la operación de estiba y desestiba de aviones comerciales de una empresa de servicios aeroportuarios. Esto se debe a que, actualmente, los clientes (las aerolíneas) han tomado mayor importancia a la gestión de la carga, debido a su influencia en los costos y la percepción de los clientes hacia la aerolínea.

El objetivo del estudio fue determinar la cantidad de recursos para cumplir eficientemente con los tiempos de operación requeridos por los clientes. El proceso que se llevó a cabo para cumplir este objetivo consistió, en primer lugar, en la identificación de metodologías; luego, se propusieron las mejoras y; finalmente, estas se sometieron a una evaluación técnica y económica.

En primera instancia, se decidió aplicar la simulación de eventos discretos, empleando el software Arena. Esta metodología consiste en imitar un sistema utilizando un conjunto de métodos y aplicaciones. Asimismo, se obtiene como beneficio el analizar los resultados de la operación en distintos escenarios, sin tener que aplicarlos en la vida real. Para este caso, se optimizaron dos modelos de simulación, en el primero se pretende determinar la cantidad de recursos utilizando el método actual y en el segundo, se hace una variación del modo de operación real.

Al analizar los resultados del proceso de optimización, se logra cumplir con los objetivos de los tiempos de operación, reduciéndolos en un 26%; asimismo, la cantidad de mano de obra disminuye un 33%, lo cual permite a la empresa atender un 50% más de aviones. Cabe resaltar que para lograr estos resultados, implica una inversión de 29,790 dólares; sin embargo, se obtiene un margen beneficio costo de 2.73, concluyendo que es factible la propuesta.

Por último, se recomienda emplear esta propuesta, ya que permitirá atender la futura demanda, considerando los proyectos de expansión del Aeropuerto Internacional Jorge Chávez. Además, la versatilidad de este modelo de simulación permite ampliar el alcance del estudio y añadir las operaciones para los aviones comerciales de fuselaje ancho y los de carga.

Tema de Tesis

PARA OPTAR : Título de Ingeniero Industrial

ALUMNO : CINTHIA GABRIELA CAM CHIANG

CÓDIGO : 20084354

PROPUESTO POR : Ing. Eduardo Carbajal

ASESOR : Ing. Eduardo Carbajal

TEMA : Mejora de la operación de estiba y desestiba en aeronaves comerciales de una empresa que brinda servicios aeroportuarios.

Nº TEMA :

FECHA : 15 de abril de 2013

JUSTIFICACIÓN:

Actualmente, las aerolíneas del mundo están tomando importancia de las operaciones orientadas a la gestión de equipajes, debido a la percepción de los clientes hacia la empresa y su relevancia en costos. Como se puede revisar en el informe anual sobre la gestión de equipajes emitido por la empresa *Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques* (SITA), la cantidad de maletas retrasadas y perdidas, en el año 2010, fue de 29.4 millones, 17.6% más que el año anterior, esta ineficiencia en las operaciones ocasionó un aumento de 17.6% en los costos de las aerolíneas. Asimismo, dicho informe indica que esto se debe al aumento vuelos de conexiones y por lo tanto, al incremento de carga aeroportuaria.¹

¹ SITA. Bagage Report 2011.

En el Perú, las estadísticas del Ministerio de Transporte y Comunicaciones del año 2012 indican que el número de vuelos nacionales e internacionales han aumentado en 6.18% y 9.24% respectivamente, causando un incremento de carga aeroportuaria de 2.68% y 10.28% a nivel nacional e internacional². Las empresas aeroportuarias sustentan que dicho crecimiento no les ha permitido planear una buena gestión de equipajes que abarque un método eficiente para realizar las operaciones ni contar con los recursos suficientes; por lo tanto, su principal problema es el incumplimiento de estándares determinados por el cliente, los cuales indican que la primera maleta debe de llegar a los 8 minutos y la última, antes de los 26. En el mes de noviembre del año 2012, el 19% de servicios de desestiba prestados no cumplieron con el tiempo pactado y en el 28% de ellos, las aerolíneas presentaron una papeleta hacia la empresa aeroportuaria por las quejas de los pasajeros al no encontrar su maleta luego de 26 minutos de haber aterrizado el avión.

Como consecuencia de los problemas mencionados, en países como Estados Unidos³ y Canadá⁴ se están analizando los procesos de rampa mediante el uso de simulación de eventos discretos empleando el software Arena, lo que permitió a las empresas evaluar los procedimientos, cambiar los estándares de servicio y determinar la cantidad de recursos que se deben de asignar para la atención de un vuelo.

En conclusión, el uso de un modelo de simulación discreta sobre la operación de carga y descarga en aeronaves comerciales del aeropuerto internacional local, permitirá contribuir con la mejora de operaciones de la empresa aeroportuaria, ya que se determinará la cantidad de recursos necesarios para cumplir eficientemente los estándares propuestos por los clientes.

OBJETIVO GENERAL:

Determinar la cantidad de recursos para el cumplir los estándares operacionales predefinidos con el cliente, por medio de un modelo de simulación a la operación de

² DGAC. Estadísticas Vuelos y carga a nivel Nacional e Internacional.

³ Bonilla, J. ; Mohammed, H. ; Norris, J. ; Thang Phung ; Zegada-Frias, I. "Ramp operations monitoring system"

⁴ Aaron L. Nsakanda; Moustapha Diaby; Michel Turcotte. "Air Cargo operations evaluation and analysis through simulation"

embarque y desembarque en aeronaves comerciales del aeropuerto internacional Jorge Chávez.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Establecer los conceptos y herramientas que se utilizarán en el análisis y mejora del sistema a estudiar.
- Describir el proceso actual de la empresa que sea relevante para elaborar un diagnóstico y determinar las posibles causas del problema.
- Determinar los datos necesarios y ajustarlos estadísticamente para que el modelo sea confiable.
- Diseñar el modelo de simulación que sea afín al sistema actual.
- Validar los resultados obtenidos a partir de la simulación.
- Elaborar una propuesta de mejora basada en cambios sobre el modelo de simulación de eventos discretos diseñado.
- Realizar una evaluación económica a partir de las propuestas sugeridas.

PUNTOS A TRATAR:

a. Marco teórico

Se definirá el término simulación y se indicarán los tipos que presenta. Además, se presentarán las metodologías a emplear para los análisis de datos y la generación de números aleatorios. Por último, se describirá el software a utilizar en el diseño de modelo.

b. Descripción y diagnóstico de la situación actual

Se describirá el sector y rubro de la empresa así como los servicios que esta brinda. Además, se analizarán los procesos de la organización a nivel estratégico, operativo y de soporte hasta profundizar en el proceso crítico de mejora. En este proceso, se analizará la problemática del servicio de estiba y desestiba mediante indicadores.

c. Recopilación y análisis de datos

A partir del flujo de las operaciones, se determinarán los datos necesarios como tiempos de operaciones y proporciones. Esta información será ajustada a distribuciones estadísticas que permitirán reflejar la operación real en el modelo.

d. Desarrollo del modelo

Se desarrollará el modelo de simulación de eventos discretos que permitirá obtener una solución óptima de la operación.

e. Análisis y validación de resultados

Se contrastarán los datos reales de la operación con los resultados obtenidos de la simulación para determinar si el modelo es válido.

f. Propuesta de mejora

Se utilizarán herramientas internas del software para buscar una solución factible de acuerdo al objetivo y restricciones del sistema.

g. Evaluación económica

Se calcularán los costos y se determinará la rentabilidad de la implementación de la propuesta de mejora.

h. Conclusiones y recomendaciones

ASESOR

Índice

Índice de tablas	xi
Índice de figuras	xiii
Capítulo 1. Marco teórico.....	1
1.1. Simulación de sistemas.....	1
1.1.1. Tipos de simulación.....	1
1.1.2. Etapas	2
1.1.3. Ventajas y limitaciones	3
1.2. Adquisición y análisis de datos de entrada	5
1.2.1. Clasificación de datos.....	5
1.2.2. Muestreo aleatorio simple.....	14
1.2.3. Pruebas de bondad de ajuste	15
1.3. Validación y análisis de resultados	18
1.3.1. Validación.....	18
1.3.2. Sistema terminal y no terminal.....	20
1.4. Software Arena.....	23
1.4.1. Input Analyzer	23
1.4.2. Output Analyzer.....	24
1.4.3. Process Analyzer.....	25
1.4.4. OptQuest Optimization	26
Capítulo 2. Descripción y diagnóstico de la situación actual	28
2.1. Descripción de la empresa	28
2.1.1. Sector y actividad económica	28
2.1.2. Perfil organizacional	29
2.2. Procesos	29
2.2.1. Mapa de macroproceso	29
2.2.2. Procesos de nivel 0 a nivel 3	31
2.2.3. Definición de estándares operacionales e indicadores	37
2.2.4. Identificación del problema principal	38

2.2.5.	Análisis de causas.....	39
2.2.6.	Determinación de la causa principal y solución	41
Capítulo 3.	Recopilación de datos	44
3.1.	Procedimiento para la recolección de datos	44
3.2.	Clasificación de datos.....	45
3.3.	Muestreo	46
3.3.1.	Tamaños de muestra.....	47
3.4.	Análisis de datos	49
3.4.1.	Análisis: Tiempo entre maletas.....	49
3.4.2.	Análisis: Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta.....	51
3.4.3.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja.....	51
3.4.4.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega.....	51
3.4.5.	Análisis: Tiempo entre aviones listos para empezar descarga.....	51
3.4.6.	Análisis: Cantidad de maletas por avión	51
3.4.7.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la bodega a la faja.....	51
3.4.8.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la carreta.....	51
3.4.9.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas	51
3.4.10.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia.....	51
3.4.11.	Resumen de análisis de datos	52
Capítulo 4.	Desarrollo del modelo.....	53
4.1.	Definición de los componentes del modelo.....	53
4.1.1.	Entidades	53
4.1.2.	Recursos	53
4.1.3.	Variables	54
4.1.4.	Atributos	55
4.2.	Presunciones para establecer el modelo	55
4.3.	Descripción del modelo	57
4.3.1.	Simulación del proceso en siberia	58

4.3.2.	Simulación del proceso en el avión.....	61
4.3.3.	Simulación del proceso en la aduana	66
4.3.4.	Animación del modelo	67
Capítulo 5.	Validación y análisis de resultados	69
5.1.	Validación de resultados.....	69
5.2.	Análisis de resultados.....	70
Capítulo 6.	Propuesta de mejora	72
6.1.	Descripción de los modelos	72
6.2.	Elementos comunes de los modelos	72
6.1.1.	Controles.....	72
6.1.2.	Variables de respuesta.....	73
6.1.3.	Restricciones.....	75
6.1.4.	Objetivo	75
Capítulo 7.	Evaluación técnica y económica.....	77
7.1.	Evaluación técnica.....	77
7.1.1.	Resultado del modelo 1	77
7.1.2.	Resultado del modelo 2.....	80
7.2.	Evaluación económica y financiera.....	83
7.2.1.	Inversión.....	83
7.2.2.	Flujos de caja	83
7.3.	Análisis general de las propuestas de mejora.....	93
Capítulo 8.	Conclusiones y recomendaciones	94
8.1.	Conclusiones	94
8.2.	Recomendaciones	96
	Bibliografía.....	98
	Anexos	I
Anexo 1.	Base de datos para el muestreo	I
Anexo 2.	Análisis: Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta.....	XVII
Anexo 3.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja.....	XVIII

Anexo 4.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega.....	XIX
Anexo 5.	Análisis: Tiempo entre aviones listos para empezar descarga.....	XX
Anexo 6.	Análisis: Cantidad de maletas por avión	XXI
Anexo 7.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la bodega a la faja.....	XXII
Anexo 8.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la carreta.....	XXIII
Anexo 9.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas	XXIV
Anexo 10.	Análisis: Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia	XXV
Anexo 11.	Resultados del reporte Siman	XXVI
Anexo 12.	Validación de resultados	XXXII
Anexo 13.	Validación del número de réplicas.....	XL
Anexo 14.	Resultado de la optimización del modelo 1	XLIX
Anexo 15.	Cálculo del número de réplicas	LVII
Anexo 16.	Resultados de la optimización del modelo 2	LXX

Índice de tablas

Tabla 1.1. Etapas del estudio de simulación (parte 1).....	2
Tabla 1.2. Etapas del estudio de simulación (parte 2).....	3
Tabla 1.3. Clasificación de distribuciones de probabilidad	7
Tabla 2.1. Matriz de priorización de procesos.....	32
Tabla 2.2 Estándares de tiempo de operaciones	37
Tabla 2.3 Indicadores	37
Tabla 2.4 Valores de indicadores de los meses de mayor demanda.....	38
Tabla 2.5 Valores de indicadores en horas de mayor demanda.....	38
Tabla 2.6. Priorización de causas	41
Tabla 2.7. Priorización de soluciones.....	43
Tabla 3.1. Clasificación de datos	46
Tabla 3.2. Tamaños de muestra para cada dato.....	48
Tabla 3.3 Resumen de valores para cada dato.....	52
Tabla 4.1 Clasificación de entidades.....	53
Tabla 4.2 Recursos disponibles para la operación.....	54
Tabla 4.3 Variables de estado	54
Tabla 4.4 Variables globales.....	55
Tabla 5.1 Análisis de resultados rechazados por la prueba de hipótesis	70
Tabla 5.2 Análisis de resultados – determinar número de réplicas	71
Tabla 6.1 Controles – OptQuest	73
Tabla 6.2 Variables de respuesta – OptQuest	73
Tabla 6.3 Restricciones – OptQuest	75
Tabla 6.4 Lista de costos de la operación.....	75
Tabla 6.5 Función de costos.....	76
Tabla 7.1 Resumen de resultados de la optimización del modelo 1	78
Tabla 7.2 Comparación de tiempos entre el modelo original y el modelo 1 optimizado	80
Tabla 7.3 Resumen de resultados de la optimización del modelo 2.....	81

Tabla 7.4 Comparación de tiempos entre el modelo original y el modelo 2 optimizado	82
Tabla 7.5 Costos de inversión.....	83
Tabla 7.6 Cálculo del costo de oportunidad (COK)	85
Tabla 7.7 Costo del indicador WACC.....	85
Tabla 7.8 Resumen de datos	86
Tabla 7.9 Flujo de caja proyectado 1 – Desde enero 2014 hasta agosto 2014	87
Tabla 7.10 Flujo de caja proyectado 1 – Desde septiembre 2014 hasta abril 2015.....	88
Tabla 7.11 Flujo de caja proyectado 1 – Desde mayo 2015 hasta diciembre 2015.....	89
Tabla 7.12 Flujo de caja proyectado 2 – Desde enero 2014 hasta agosto 2014	90
Tabla 7.13 Flujo de caja proyectado 2 – Desde septiembre 2014 hasta abril 2015.....	91
Tabla 7.14 Flujo de caja proyectado 2 – Desde mayo 2015 hasta diciembre 2015.....	92
Tabla 7.15 Cuadro comparativo de la evaluación económica y técnica	93
Tabla A1.1 Datos de la operación.....	I
Tabla A11.1 Resumen del reporte Siman de 10 réplicas	XXVI
Tabla A12.1 Validación de resultados.....	XXXII
Tabla A13.1 Reporte Siman – 61 réplicas.....	XL
Tabla A13.2 Análisis de resultados - 61 réplicas.....	XLVIII
Tabla A14.1 Resultado luego de optimizar el modelo 1 – Simulación 1 al 12.....	XLIX
Tabla A14.2 Resultado luego de optimizar el modelo 1 – Simulación 13 al 24.....	LI
Tabla A14.3 Resultado luego de optimizar el modelo 1 – Simulación 25 al 33.....	LIV
Tabla A15.1 Reporte SIMAN del modelo 2 – 10 réplicas	LVII
Tabla A15.2 Análisis de resultados del modelo.....	LXIII
Tabla A15.3 Reporte siman del modelo 2 – 77 réplicas	LXIV
Tabla A15.4 Validación de número de réplicas del modelo 2.....	LXIX
Tabla A16.1 Resultado luego de optimizar el modelo 2 – Simulación 1 al 12.....	LXX
Tabla A16.2 Resultado luego de optimizar el modelo 2 – Simulación 13 al 24.....	LXXII
Tabla A16.3 Resultado luego de optimizar el modelo 2 – Simulación 25 al 33.....	LXXIV

Índice de figuras

Figura 1.1. Representación de la variable aleatoria.	6
Figura 1.2. Gráfica de la función densidad de la distribución uniforme.....	8
Figura 1.3. Gráfica de la distribución Exponencial	9
Figura 1.4. Gráfica de la función de densidad normal	9
Figura 1.5. Gráfica de la distribución log-normal.....	10
Figura 1.6. Gráfica de la distribución beta.....	11
Figura 1.7. Gráfica de la distribución gamma.....	12
Figura 1.8. Gráfica de la distribución triangular.....	14
Figura 1.9. Rango de aceptación y rechazo para una prueba t-student bilateral.....	19
Figura 1.10. Región de aceptación y rechazo para una prueba t-student unilateral	20
Figura 2.1. Mapa macroprocesos de la empresa	30
Figura 2.2 Nivel 0 de los procesos de la empresa.....	33
Figura 2.3. Nivel 1 de los procesos de la empresa.....	34
Figura 2.4. Nivel 2 del sub-proceso de atender aeronaves en tierra	35
Figura 2.5. Nivel 3 de la actividad de desestibar y estibar.....	36
Figura 2.6. Diagrama Ishikawa del problema principal	40
Figura 2.7. Análisis de la causa principal con el método del por qué	42
Figura 4.1 Secuencia de bloques: Maletas llegan a la siberia.....	58
Figura 4.2 Secuencia de bloques: Selección de maletas	59
Figura 4.3 Secuencia de bloques: Ficticio para liberar maletas de carga.....	59
Figura 4.4 Secuencia de bloques: Formación de grupos de 40 maletas	60
Figura 4.5 Secuencia de bloques: Asignación de carretas y traslado al PEA.....	60
Figura 4.6 Secuencia de bloques: Liberar recursos de las maletas de conexión	61
Figura 4.7 Secuencia de bloques: Descargar maletas de conexión en siberia.....	61
Figura 4.8 Secuencia de bloques: Entidades de la estación avión.....	62
Figura 4.9 Secuencia de bloques: Entidades de la estación PEA	62
Figura 4.10 Secuencia de bloques: Descarga de bodega	63

Figura 4.11 Secuencia de bloques: Liberar recurso faja	63
Figura 4.12 Secuencia de bloques: Proceso previo para formar grupos de 40 maletas.....	64
Figura 4.13 Secuencia de bloques: Formar grupos de 40 maletas	64
Figura 4.14 Secuencia de bloques: Llenar carretas con la descarga	64
Figura 4.15 Secuencia de bloques: Trasladar carretas con la descarga	65
Figura 4.16 Secuencia de bloques: Liberar recursos para proceder a la carga.....	65
Figura 4.17 Secuencia de bloques: Colocar maletas en la faja del avión.....	66
Figura 4.18 Secuencia de bloques: Colocar maletas en bodega del avión	66
Figura 4.19 Secuencia de bloques: Colocar maletas en faja de aduana.....	67
Figura 4.20 Secuencia de bloques: Información de proceso de descarga	67
Figura 4.21 Animación del modelo.....	68
Figura A2.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta	XVII
Figura A3.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja.....	XVIII
Figura A4.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega.....	XIX
Figura A5.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo entre aviones listos para empezar descarga	XX
Figura A6.1 Análisis de tipo de distribución: Cantidad de maletas por avión.....	XXI
Figura A7.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de la bodega a la faja	XXII
Figura A8.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la carreta.....	XXIII
Figura A9.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas	XXIV
Figura A10.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia	XXV

Capítulo 1. Marco teórico

El presente capítulo muestra conceptos que se emplean en el desarrollo de esta tesis. En primer lugar, se define el término simulación, se muestra su clasificación y se listan las ventajas y limitaciones de emplear esta herramienta. Asimismo, se enumeran los pasos para realizarla. Luego, se detallan los temas estadísticos a utilizar en la adquisición y análisis de datos y, en la validación de resultados. Por último, se explica el software Arena, con el cual es posible realizar la simulación.

1.1. Simulación de sistemas

Actualmente, existen procesos reales que son muy complejos y no permiten ser enfocarlos bajo un método matemático. Dado esto, se suele utilizar un método llamado simulación, el cual se define a continuación.

Según Kelton, Sadowski y Sturrock (2007), la simulación es un conjunto de métodos y aplicaciones que tiene como fin imitar la operación de un proceso real o un sistema en el tiempo.

Según Banks, Carson, Nelson y Nicol (2010) es posible simular un sistema de forma manual o por computadora. Para esto, se debe generar una historia ficticia del sistema teniendo en cuenta las características principales del sistema real; es decir, para modelar un sistema se crean supuestos de la operación real.

1.1.1. Tipos de simulación

Según Winston y Wayne (2005), la simulación se clasifica según el tiempo, la aleatoriedad de los datos y las variables de estado. A continuación, se detalla cada uno de estos tipos.

Por un lado, un modelo de simulación, en función del tiempo, puede ser estático o dinámico. El primero de ellos representa un sistema en un determinado tiempo; mientras que, el segundo, al sistema a lo largo del tiempo.

Por otro lado, considerando la aleatoriedad de los datos, la simulación es determinística cuando el modelo no tiene variables aleatorias, o estocástica, cuando sí las tiene.

Por último, la simulación de eventos discretos y continuos está relacionada con las variables de estado. Estos dos tipos, se comportan de forma similar a los sistemas discretos, donde las variables de estado cambian solo en los puntos discretos o contables en el tiempo, y a los continuos donde, cambian a lo largo del tiempo. Cabe resaltar, que en la práctica, no todos los sistemas se comportan completamente como discretos o continuos, lo cual, según Law (2007), siempre uno predomina y sí es posible clasificarlo de esta manera.

En este documento se estudia un modelo de simulación dinámica, estocástica y discreta, también llamado modelo de simulación de eventos discretos, donde la variable de estado cambia solo en puntos discretos.

1.1.2. Etapas

Según Banks (2001), los pasos para construir y estudiar un modelo de simulación se muestran en la tabla 1.1 y 1.2.

Tabla 1.1. Etapas del estudio de simulación (parte 1)

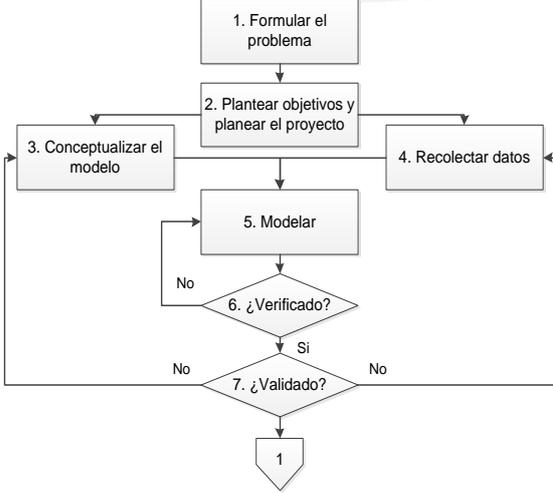
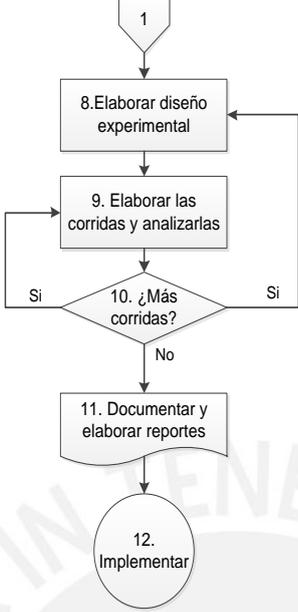
Flujo para construir un modelo de simulación	Descripción
 <pre> graph TD A[1. Formular el problema] --> B[2. Plantear objetivos y planear el proyecto] B --> C[3. Conceptualizar el modelo] B --> D[4. Recolectar datos] C --> E[5. Modelar] D --> E E --> F{6. ¿Verificado?} F -- No --> C F -- Si --> G{7. ¿Validado?} G -- No --> C G -- Si --> H[1] </pre>	<p>Paso 6.- Se determina si hay errores en el programa.</p> <p>Paso 7. Se comprueba si el modelo representa al sistema real.</p>

Tabla 1.2. Etapas del estudio de simulación (parte 2)

Flujo para construir un modelo de simulación	Descripción
 <pre> graph TD 1{{1}} --> 8[8. Elaborar diseño experimental] 8 --> 9[9. Elaborar las corridas y analizarlas] 9 --> 10{10. ¿Más corridas?} 10 -- Si --> 8 10 -- No --> 11[11. Documentar y elaborar reportes] 11 --> 12((12. Implementar)) </pre>	<p>Paso 8. Determinar el número de corridas y réplicas.</p>

1.1.3. Ventajas y limitaciones

Según Winston y Wayne (2005) y Pedgen (1995), las ventajas y limitaciones son las siguientes:

- Ventajas
 - Los métodos de simulación son más fáciles de aplicar que los analíticos. Los métodos analíticos implican crear supuestos simplificados con los que se obtienen soluciones inadecuadas o inferiores.
 - Se pueden explorar nuevas políticas, procedimientos, reglas de decisión, flujos de información, procedimientos organizacionales, entre otros, sin interrumpir la operación real.
 - Se pueden probar nuevas distribuciones de planta, sistemas de transporte, entre otros sin adquirir recursos.

- Se comprueba si las hipótesis sobre la razón del problema es verdadera.
- Se puede aumentar y reducir la velocidad del modelo.
- Se pueden observar la interacción de variables en el sistema y la importancia de ellas.
- Se puede aplicar el análisis de cuello de botella para determinar dónde se está retrasando el proceso.
- Permite estudiar cómo el sistema opera realmente.
- Se pueden responder las pregunta qué pasaría si. Lo cual es beneficioso para el diseño de un nuevo sistema.
- Desventajas
 - El diseño del modelo requiere una persona capacitada. Este se aprende con el tiempo y experiencia. Si dos personas diseñan un mismo modelo, nunca serán idénticos.
 - Los resultados de la simulación pueden ser difíciles de interpretar. La mayoría de resultados de la simulación son estimados (usualmente se basan en variables aleatorias de entrada); por lo tanto, es difícil distinguir si una observación es un resultado de las interrelaciones del sistema o de la aleatoriedad.
 - Diseñar un modelo es costoso y requiere de tiempo.
 - Hay casos en el que se usa simulación, pero es preferible y recomendable realizar un análisis analítico.

- No se obtiene directamente la optimización. Los modelos de simulación se corren varias veces para encontrar una buena solución, en donde se varían los datos de entrada o características del modelo.

1.2. Adquisición y análisis de datos de entrada

Los conceptos que se muestran en el siguiente acápite son parte del paso 4 de la tabla 1.1. En esta etapa se clasifican los datos de entrada y se les asigna la distribución que mejor se les ajusta; por último, se determina el número de observaciones que debe tener una muestra para obtener resultados con cierto nivel de confiabilidad.

1.2.1. Clasificación de datos

Según Hamdy Taha (2004) se pueden tener tres tipos de datos de entrada que se describen a continuación.

a) Datos determinísticos

Son datos que están bien definidos y se conocen con certeza, con ellos es posible tomar decisiones bajo certidumbre.

b) Proporciones o probabilidades

Según Ross (2001), la probabilidad se entiende de dos maneras, como una interpretación subjetiva y como una de frecuencia. La primera de ellas depende de la creencia que cada persona tiene sobre la posibilidad de que ocurra un evento. Mientras que la segunda es una propiedad que se obtiene luego de la repetición continua de un experimento, la proporción de veces en la que ocurra un resultado será considerado como la proporción. Esta última interpretación es la más utilizada por científicos.

c) Variables aleatorias

Las variables aleatorias son resultados numéricos de determinado experimento a una población aleatoria, dichas variables están definidas en un espacio muestral Ω .

Como se muestra en la figura 1.1, según Córdova (2003), una variable aleatoria X es una función definida en Ω y cada elemento w de dicho espacio muestral se le asocia el número real $x = X(w)$. El dominio de la variable aleatoria es el espacio muestral Ω y su rango es $Rx = \{x \in Rx = X(w), w \in \Omega\}$.

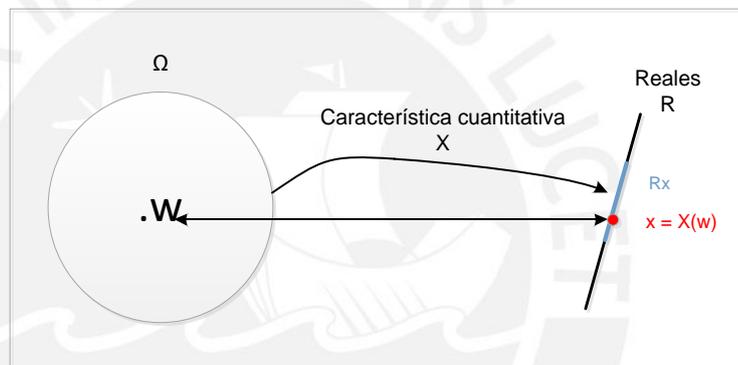


Figura 1.1. Representación de la variable aleatoria.
Fuente: Córdova (2003)

Dado que son variables cuantitativas, se clasifican en discretas y continuas. A continuación, se explica cada una de ellas.

- Variable aleatoria discreta

Según Banks (2010), será una variable discreta si los valores que toma son finitos o, contable e infinito.

- Variable aleatoria continua

Es una variable aleatoria continua, según Banks (2010), cuando el rango de la variable aleatoria X es un intervalo.

A continuación, se muestran las siguientes características de la variable continua:

- La probabilidad que X pertenezca al intervalo [a,b] se halla de la siguiente manera:

$$P(a \leq X \leq b) = \int_b^a f(x)dx$$

A partir de esta se deduce que para una variable específica x_0 , la probabilidad será 0, ya que $\int_{x_0}^{x_0} f(x)dx = 0$.

- $f(x) \geq 0$ para todo x en R_x
- $\int_{R_x} f(x)dx = 1$
- $f(x) = 0$ si x no pertenece a R_x

Para estudiar los resultados de un experimento, ya sean variables aleatorias discretas como continuas, es necesario determinar una distribución de probabilidad que satisfaga un conjunto de supuestos. En la tabla 1.3 se clasifican las distribuciones de probabilidad según sus tipos de variables.

Tabla 1.3. Clasificación de distribuciones de probabilidad

Variables discretas	Variables continuas
Bernoullí	Uniforme
Binomial	Normal
Geométrica	Gamma
Pascal	Exponencial
Hipergeométrica	Chi-cuadrado
Poisson	Distribución t
	Distribución F
	Triangular
	Weibull
	Erlang
	Beta
	Log-normal

A continuación, se explican las distribuciones que se utilizan en el presente documento.

- Distribución Uniforme

Según Córdova (2008), se cumple $X \sim U[a, b]$, si su función densidad de probabilidad es la siguiente función continua que se diagrama en la figura 1.2.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ 0, & \text{en otros casos} \end{cases}$$

Donde su media es $\mu_x = \frac{a+b}{2}$ y varianza es $\sigma_x^2 = \frac{(b-a)^2}{12}$

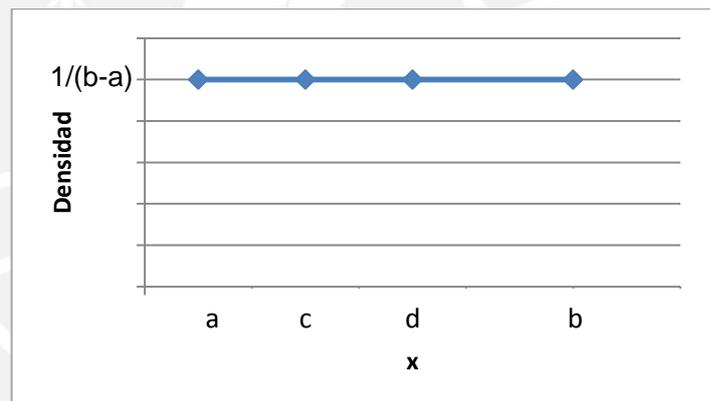


Figura 1.2. Gráfica de la función densidad de la distribución uniforme

- Distribución Exponencial

Según Córdova (2008), se cumple que $X \sim Exp(\beta)$ si su función densidad es la siguiente función continua, representada en la figura 1.3.:

$$f(x) = \begin{cases} \beta e^{-\beta x} & \text{si } x \geq 0 \\ 0 & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Donde el parámetro β es mayor a 0. Y se cumplen las siguientes propiedades:

- La media es $\mu_x = \frac{1}{\beta}$
- La varianza es $\sigma_x^2 = \frac{1}{\beta^2}$

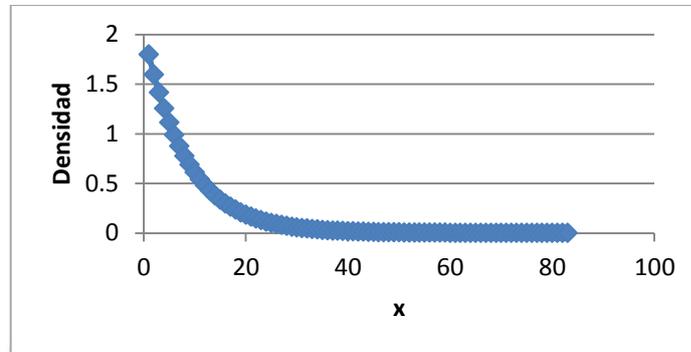


Figura 1.3. Gráfica de la distribución Exponencial

- Distribución Normal

Según Córdova (2008), la variable aleatoria continua X se distribuye normalmente si su función densidad, graficada en la figura 1.4, es la siguiente:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right], \text{ donde } -\infty < x < +\infty$$

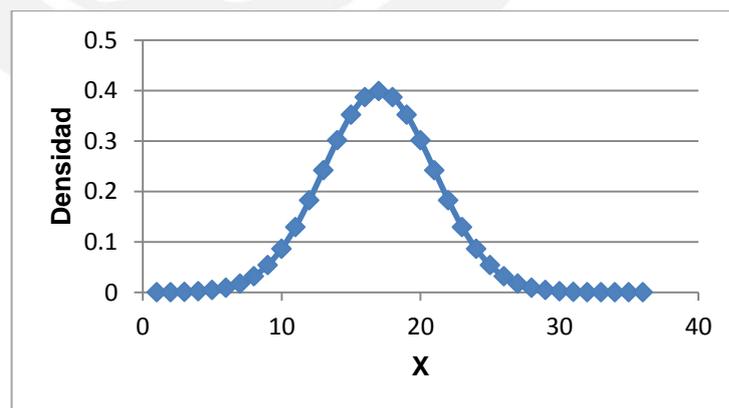


Figura 1.4. Gráfica de la función de densidad normal

Las propiedades de esta distribución son las siguientes:

- Si $X \sim N(\mu, \sigma^2)$, entonces, la variable aleatoria estándar $Z = \frac{X-\mu}{\sigma} \sim N(0,1)$

- La función de distribución de $X \sim N(\mu, \sigma^2)$ está dada por:

$$F_x(x) = P[X \leq x] = P\left[Z \leq \frac{x-\mu}{\sigma}\right] = F_z\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right), -\infty < x < +\infty$$

- Distribución Log-normal

Según Córdova (2008), una variable aleatoria continua X presenta esta distribución si su logaritmo natural se comporta como la distribución normal. Por lo tanto, $X \sim \text{Ln}(\mu, \sigma^2)$ si y solo si $\text{Ln}X \sim N(\mu, \sigma^2)$.

La función densidad, graficada en la figura 1.5, está definida por:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2}, x > 0$$

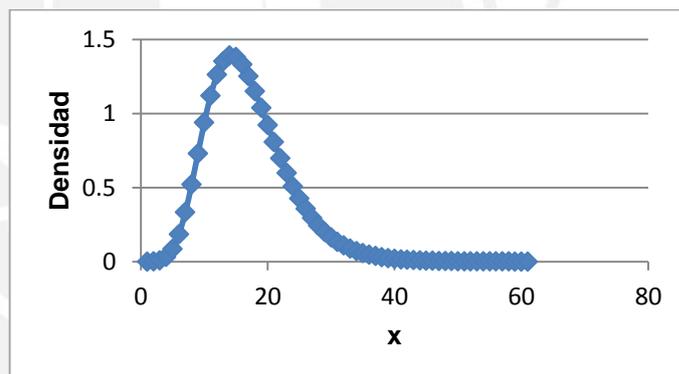


Figura 1.5. Gráfica de la distribución log-normal

Las propiedades de esta distribución son las siguientes:

- La media es $\mu_x = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$
 - La varianza es $\sigma_x^2 = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$
 - La función acumulada está dada por $F(x) = F\left(\frac{\text{Ln}x - \mu}{\sigma}\right)$.
- Distribución Beta

Según Córdova (2008), se cumple esta distribución, cuando la variable aleatoria X presenta la siguiente función de densidad, graficada en la figura 1.6.

$$f(x) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} x^{\alpha-1}(1-x)^{\beta-1} \quad 0 \leq x \leq 1 \quad \alpha > 0 \quad \beta > 0$$

Donde, α es el parámetro de forma y β , de escala.

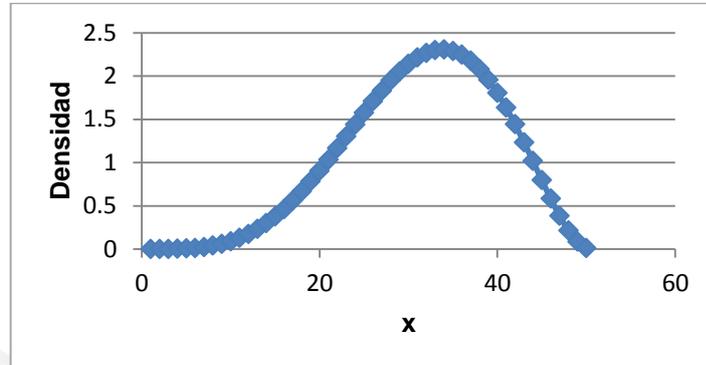


Figura 1.6. Gráfica de la distribución beta

Las propiedades de $X \sim \text{Beta}(\alpha, \beta)$ son las siguientes:

- La media es $\mu_x = \frac{\alpha}{\alpha + \beta}$
- La varianza es $\sigma_x^2 = \frac{\alpha\beta}{(\alpha + \beta)^2(\alpha + \beta + 1)}$

- Distribución Gamma

Según Córdova (2008), la variable aleatoria continua X tiene distribución gamma, $X \sim \Gamma(\alpha, \beta)$, si su función de densidad, graficada en la figura 1.7, es la siguiente función continua:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\beta^\alpha}{\Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} e^{-\beta x}, & \text{si } x \geq 0 \\ 0, & \text{si } x < 0 \end{cases}$$

Donde α y β son constantes positivas.

La función gamma es $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty t^{\alpha-1} e^{-t} dt$ y presenta las siguientes propiedades:

- $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)\Gamma(\alpha - 1)$ si $\alpha > 1$

- $\Gamma(\alpha) = (\alpha - 1)!$ si α es un número entero
- $\Gamma(1) = 1$, y $\Gamma(1/2) = \sqrt{\pi}$
- La media es $\mu_X = \frac{\alpha}{\beta}$
- La varianza es $\mu_X = \frac{\alpha}{\beta}$

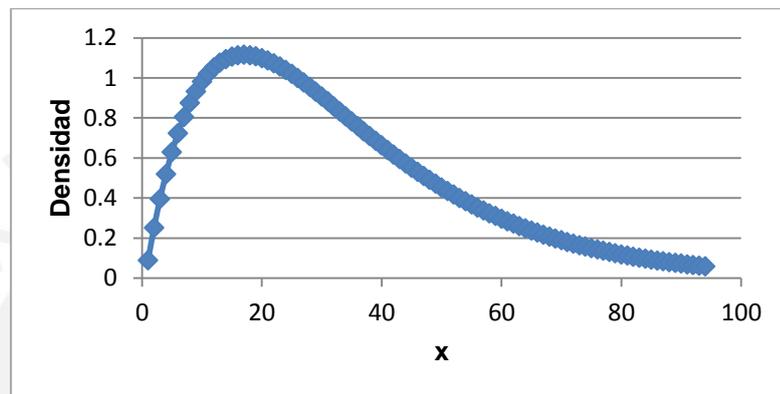


Figura 1.7. Gráfica de la distribución gamma

- Distribución Erlang

Según Cao Abad (2002), esta distribución es la misma que la Gamma, solo que β (parámetro de forma) pertenece a los números naturales.

- Distribución Weibull

Según Córdova (2008), se cumple que $X \sim W(\alpha, \beta)$, si su función densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \begin{cases} \alpha\beta x^{\alpha-1} e^{-\beta x^\alpha}, & x > 0 \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Donde α y β son mayores a 0.

A partir de la función densidad, se halla la acumulada, la cual es la siguiente:

$$F(x) = 1 - e^{-\beta x^\alpha} \quad x \geq 0$$

La media y varianza respectivamente son: $\mu_x = \frac{\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})}{\beta^{\frac{1}{\alpha}}}$ y $\sigma_x^2 =$

$$\frac{\Gamma(1+\frac{2}{\alpha}) - [\Gamma(1+\frac{1}{\alpha})]^2}{\beta^{2/\alpha}}$$

- Distribución Triangular

Según Banks (2010), se cumple que la variable continua X sigue una distribución triangular si su función densidad de probabilidad es la siguiente:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{2(x-a)}{(b-a)(c-a)}, & a \leq x \leq b \\ \frac{2(c-x)}{(c-b)(c-a)}, & b \leq x \leq c \\ 0, & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Donde a representa el valor mínimo; b , el máximo; y c , la moda. Además, se cumple que $a \leq b \leq c$. Dado esto, la media $E(x)$ y moda es la que se muestra a continuación:

$$E(x) = \frac{a + b + c}{3}$$

$$\text{moda} = b = 3E(x) - (a + c)$$

En la siguiente figura 1.8, se representa la función densidad de la distribución triangular.

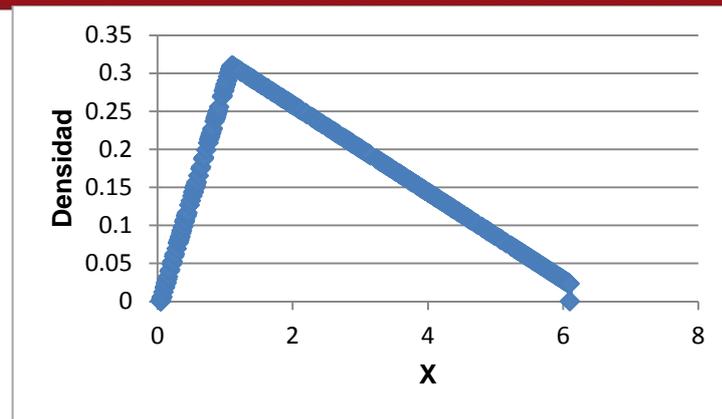


Figura 1.8. Gráfica de la distribución triangular

1.2.2. Muestreo aleatorio simple

Según Córdova (2003), muestreo es un proceso que consiste en seleccionar un número de elementos de una población, es decir, tomar una muestra. Esta última se puede clasificar en no probabilística, la cual depende de la experiencia y criterio de los expertos; y en probabilística o también conocida como muestras aleatorias, las cuales son valores obtenidos bajo un proceso en la que todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser elegidas.

Una muestra aleatoria simple es un conjunto de n variables aleatorias que son independientes y que tiene la misma distribución que la población. Para determinar el tamaño de la muestra se emplean los procedimientos de estimación de la media y proporción que se describen a continuación.

a) Media

Para determinar el tamaño de muestra n , se parte de la premisa que el error de estimación no debe de ser mayor al valor dado e . Es decir, $Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\sigma_{\bar{x}} \leq e$ donde el error estándar de la media es $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$. Por lo tanto, se tiene lo siguiente:

$$n = \frac{Z_{(1-\frac{\alpha}{2})}^2 \sigma^2}{e^2}$$

En caso la población es finita de tamaño N y el muestreo es sin sustitución, el error estándar es $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \sqrt{\frac{N-n}{N-1}}$ y el tamaño de muestra será el siguiente:

$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2 N}{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2 + e^2 (N-1)}$$

Para ambos casos, e toma el valor de $\bar{x} \cdot \alpha$

b) Proporciones

Partiendo de la misma premisa que se utilizó para la media, el error estándar de una proporción es $\sigma_{\bar{p}} = \sqrt{\frac{p(1-p)}{n}}$ y se obtiene lo siguiente:

$$n = \frac{\left(Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\right)^2 \bar{p}(1-\bar{p})}{e^2}$$

Donde e es error porcentual y \bar{p} es la proporción de éxitos en la población.

1.2.3. Pruebas de bondad de ajuste

“A las pruebas estadísticas que determinan si un mecanismo probabilístico dado es apropiado se les llama pruebas de bondad de ajuste” (Ross, 2002, p.454)

Según Ross (2002), el método clásico utilizado es el de prueba de hipótesis nula, la cual consiste en aceptar un argumento provisionalmente, hasta ser comprobado de forma experimental.

A continuación, se explican las dos pruebas que se utilizan en esta tesis, Kolmogorov Smirnov y Chi cuadrado. Y por último, se detalla el criterio de p-value.

a) Kolmogorov Smirnov (KS)

“El test uni-muestral KS se basa en la diferencia absoluta máxima D entre los valores de la distribución acumulativa de una muestra aleatoria de tamaño n y una distribución teórica especificada.” (Miller y Freund, 1988)

Para este caso el estadístico de contraste es el siguiente:

$$D = \sup |\hat{F}_i(x_i) - F_0(x_i)|$$

Donde se cumple lo siguiente:

- x_i es el i ésimo valor observado en la muestra, cabe resaltar que los valores se han ordenado previamente de menor a mayor.
- $\hat{F}_i(x_i)$ es un estimador de la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i .
- $F_0(x_i)$ es la probabilidad de observar valores menores o iguales que x_i cuando la hipótesis nula es cierta.

Este test se puede utilizar para cualquier cantidad de tamaño de muestra, sin embargo, es más eficaz para muestras pequeñas y solo puede usarse para distribuciones continuas.

b) Chi cuadrado (χ^2)

Según Córdova (2008), la hipótesis nula de la prueba Chi-cuadrado tiene como objetivo comprobar si las frecuencias observadas de las variables aleatorias se ajustan a un modelo de probabilidad teórico, discreto o continuo. Según Miller y Freund (1988), esta prueba se utiliza para tamaños de muestra grandes.

El procedimiento, según Córdova (2008), para realizar esta prueba es el siguiente:

- Disponer los datos en una tabla de frecuencias y para cada intervalo indicar la frecuencia absoluta observada (O_i).
- Suponiendo que la hipótesis nula es cierta, que p es igual a su valor hipotético propuesto p_0 , calcular para cada valor o intervalo de valores la frecuencia esperada ($E_i = n \cdot p_i$, donde n es el tamaño de la muestra y p_i la probabilidad del i -ésimo valor o intervalo de valores según la hipótesis nula).
- Determinar el estadístico de prueba, el cual es el siguiente:

$$\sum_{i=1}^k \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} \sim \chi^2(k - 1)$$

- Se rechaza la hipótesis nula si: $\chi_{cal}^2 = \sum_{i=1}^k \frac{(O_i - e_i)^2}{e_i} > \chi_{1-\alpha}^2(k - 1)$

c) P-value

Según Evans y Rosenthal (2004), mediante el uso del valor p , se puede determinar el resultado de la prueba de hipótesis. Este procedimiento consiste en suponer que la hipótesis nula es verdadera y ver si los datos pertenecen a una región de baja probabilidad de cada una de las distribuciones. Si se concluye que esto último sucede, no existen suficientes evidencias para aprobar la hipótesis nula.

Sea α el nivel de significancia, la hipótesis nula se rechaza si es que el valor- p es menor a α , caso contrario se aprueba la hipótesis nula. Es decir, lo siguiente:

$$\begin{cases} p - value > \alpha, se rechaza H_0 \\ p - value \leq \alpha, se acepta H_0 \end{cases}$$

El valor p se determina, para el primer caso de la prueba KS, de la siguiente manera:

$$p - value = P(D > D_{obs}/H_0 \text{ es verdadera})$$

Mientras que, para la prueba de χ^2 , el valor p se determina en la tabla de distribución chi-cuadrado con el valor de estadístico y los grados de libertad.

1.3. Validación y análisis de resultados

Con el propósito de garantizar resultados fieles a la operación real, es necesario validar el modelo planteado e identificar su comportamiento como un sistema terminal o no terminal.

1.3.1. Validación

El proceso de validación tiene como objetivo asegurar que el modelo es una buena representación del sistema real. Se pueden emplear métodos cuantitativos y cualitativos; por un lado, para el primero, se utiliza una herramienta estadística en la que se comparan los datos de salida del modelo con los resultados reales; por otro lado, el método cualitativo implica que un experto revise los resultados de salida y mediante sus conocimientos discierna las capacidades del modelo.

a) Prueba t-student

“Es una prueba estadística para evaluar si dos grupos difieren entre sí de manera significativa respecto a sus medias t .”(Gómez, 2006)

Según Ross (2002), es usual que para estudiar una población no se conozca la media μ y varianza σ^2 . Al suponer este caso, se debe considerar emplear la distribución t-student para la prueba de hipótesis en donde la media sea igual a algún valor dado μ_0 , es decir, plantear lo siguiente:

$$H_0: \mu = \mu_0$$

$$H_1: \mu \neq \mu_0$$

Luego definir el estadístico T, $T = \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{S}$

Este presenta una distribución t con $n - 1$ grados de libertad, cuyo intervalo de confianza con nivel de significancia α , es el siguiente:

$$\left| \frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{S} \right| \leq t_{\alpha/2, n-1}$$

En la figura 1.9 se representa el rango de aceptación y rechazo de la prueba.

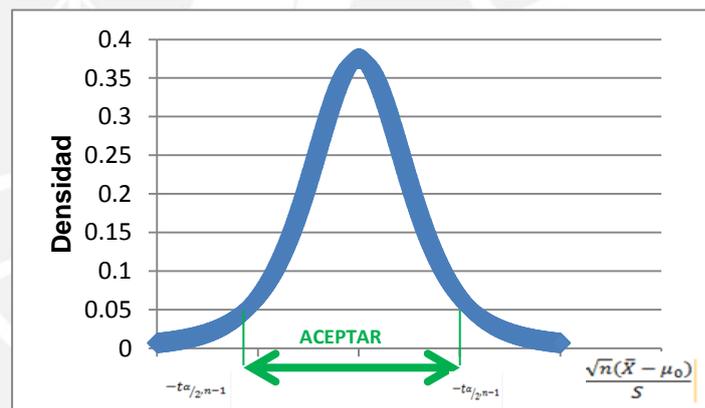


Figura 1.9. Rango de aceptación y rechazo para una prueba t-student bilateral

Por otro lado, también se puede aplicar para pruebas unilaterales, donde la hipótesis nula y la alternativa toman la siguiente forma:

$$H_0: \mu \leq \mu_0$$

$$H_1: \mu > \mu_0$$

De la misma forma que en la prueba bilateral, el estadístico sigue una distribución t-student con nivel de significancia α y un grado de libertad

de $n - 1$. Por lo tanto, se aceptará la hipótesis nula H_0 cuando se cumpla la siguiente condición:

$$\frac{\sqrt{n}(\bar{X} - \mu_0)}{S} \leq t_{\alpha, n-1}$$

A continuación, en la figura 1.10 se representa el rango de aceptación.

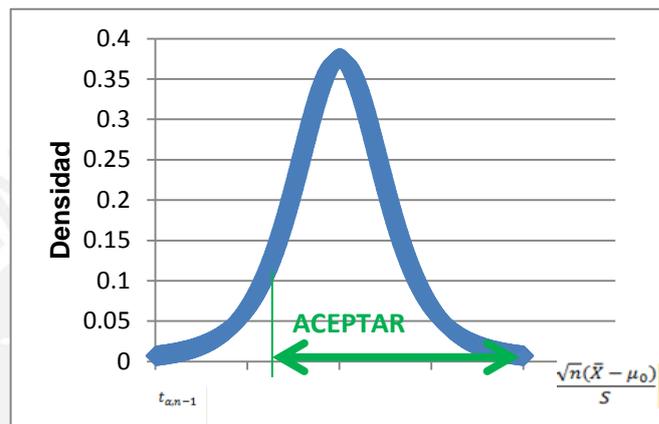


Figura 1.10. Región de aceptación y rechazo para una prueba t-student unilateral

1.3.2. Sistema terminal y no terminal

Según Guasch (2002), para analizar un sistema e interpretar correctamente sus resultados, se debe determinar ciertas características intrínsecas a su comportamiento dinámico, es decir, establecer si un modelo se comporta como un sistema terminal (finito) o no terminal, el cual se caracteriza por su estado estacionario.

Por un lado, la definición de sistema terminal se cita a continuación.

Simulación de un sistema terminal es aquella que se inicia en un determinado estado previsto por el diseñador y que va a ser ejecutada hasta que ocurra determinado evento, previamente identificado, mediante

el cual se detendrá la simulación y, por consiguiente, la observación del sistema o experimentación. (Guasch, 2002, p.226)

El mismo autor lista los siguientes aspectos para el análisis de este tipo de sistema:

- Como la finalización de este sistema está determinada por un evento, no es necesario preocuparse de este aspecto.
- Es posible tratar de forma independiente a cada una de las repeticiones y aplicarles métodos estadísticos.
- Se debe determinar el número de repeticiones para obtener resultados de calidad y confiables, según Guasch (2002), existen dos formas de hallarlo; para la primera, se especifica una precisión deseada y se deberá realizar las réplicas necesarias hasta alcanzarlas, el problema percibido es que no se sabe cuántas serán; en la segunda forma, se especifica un número de repeticiones mediante la aplicación del concepto de intervalos de confianza. Aplicando la distribución t-student se obtiene el siguiente intervalo de confianza:

$$h = t_{1-\alpha/2} \frac{S_x}{\sqrt{n}}$$

A partir de este se determina el número de réplicas (n^*) para cierto ancho de intervalo específico (h^*), de la siguiente manera:

$$n^* = \left\lceil n \left(\frac{h}{h^*} \right)^2 \right\rceil$$

Por otro lado, la simulación de un sistema no terminal no tiene establecido el momento en que comienza y en el que termina. Dado esto, se requiere determinar la longitud de réplicas. Cabe resaltar que no es posible utilizar el método de repeticiones independientes empleadas anteriormente, ya que los

valores iniciales ocasionan un sesgo en los resultados; por lo tanto, se requiere eliminar el periodo de carga y comenzar el análisis cuando el sistema se estabilice. Para esto, el autor propone utilizar el método de batch means, el cual consiste en ejecutar una simulación lo suficientemente larga y dividir en lotes o bloques de observaciones.

Es evidente que las observaciones mantienen un cierto grado de dependencia entre sí. Se debe construir intervalos o lotes de tamaño suficiente. Un método para determinar este último es el de series temporales estandarizadas, en el que se aplica una versión del proceso del teorema del límite central para estandarizar las series resultado y aplicar métodos de análisis estadístico para su correspondiente procesado. (Guasch, 2002)

Según Banks (2010), se recomienda seguir los siguientes pasos:

- Correr el modelo una cantidad muy grande de veces y seleccionar lo apropiado, es decir, eliminar el periodo de calentamiento.
- Dividir en k_1 lotes, al menos en 100.
- Obtener la correlación y verificar si este valor es mayor a 0.2. En caso no lo sea, se deberá variar el número de lotes a una cantidad mayor y nuevamente repetir este punto.
- Una vez se haya obtenido el valor de correlación deseado, se volverá a dividir en k_2 lotes para definir un intervalo de confianza con k_2-1 grados de libertad y con distribución t. Este valor la longitud de las réplicas.

1.4. Software Arena

Según Banks (2010), un software de simulación permite, por medio de evaluación numérica, imitar y estudiar las operaciones de un sistema real. Asimismo, tiene las siguientes características:

- Presenta interfaz gráfica.
- Permite animar el modelo.
- Emite resultados automáticos para medir el rendimiento del sistema.

Rockwell Automation ofrece el software Arena cuyo lenguaje de programación es SIMAN y es una aplicación para el sistema operativo Microsoft Windows. Además de las ya mencionadas, Arena presenta las siguientes características:

- Puede simular sistemas discretos y continuos.
- Los resultados de la simulación son mostrados en reportes estándar con tablas y gráficos.
- Incluye análisis estadístico como intervalos de confianza que permiten medir y comparar el comportamiento del modelo.
- Presenta herramientas como Input Analyzer, Output Analyzer, Process Analyzer y Optquest Optimization, donde las tres últimas tienen como función buscar la optimización del modelo.

1.4.1. Input Analyzer

Según Kelton (2010), es una herramienta estándar que es parte del software Arena y ha sido diseñada para ajustar los datos existentes a una distribución y ofrecer una medida de cuán bien lo hacen; además, el Input Analyzer ofrece el estimado de los parámetros.

Dentro de las distribuciones utilizadas por Arena, se encuentran las continuas y discretas, que son beta, erlang, gamma, lognormal, uniforme, normal, weibull, triangular y exponencial. Asimismo, el software emplea distribuciones empíricas discretas y continuas, donde en la primera devuelve probabilidades para elegir valores individuales; mientras que en la segunda, se usa las probabilidades y los valores para devolver una cantidad real. En muchos casos se utiliza esta última cuando no existe distribución que se ajuste bien a los datos de entrada.

Existen cuatro pasos para utilizar Input Analyzer que se muestran a continuación.

- Crear un archivo con extensión txt. que contenga los valores de los datos.
- Ingresar a Input Analyzer y abrir el archivo txt. Creado anteriormente para que realice el ajuste automático de una o varias distribuciones.
- Seleccionar la distribución a utilizar, considerando el tipo de dato continuo o discreto y el valor del p-value.
- Copiar la distribución seleccionada con sus parámetros al bloque apropiado para realizar el modelo.

1.4.2. Output Analyzer

Según Altiok y Melamed (2007), Output analyzer ofrece opciones para manipular, analizar y mostrar los datos con sus respectivas características. Las funciones que desempeña esta herramienta son las siguientes:

- Es posible recepcionar los datos de salida luego de las repeticiones de la simulación en Arena. Esto es posible ya que al modelar se determina alguna información específica que se requiere como datos de salida, los cuales son guardados en un archivo compatible con Output Analyzer.

- Permite realizar un análisis estadístico, ya que esta herramienta puede dividir y truncar lotes para una observación independiente, además, permite realizar un análisis de correlación ofreciendo los puntos estimados para esta; asimismo, ofrece los intervalos de confianza para la media y desviación estándar y por último, realiza pruebas estadísticas que comparan los parámetros de diferentes muestras.
- Provee gráficos de las estadísticas.

1.4.3. Process Analyzer

Según Altiok y Melamed (2007), esta opción se puede utilizar de la misma pantalla de Arena y permite realizar un análisis paramétrico, es decir, se puede correr el modelo varias veces con diferentes parámetros en cada corrida y luego comparar los resultados del desempeño del modelo. Mediante este análisis de sensibilidad, es posible hallar la solución óptima.

Para realizar este análisis, la herramienta Process Analyzer presenta términos como controles, respuestas, escenarios y proyecto, los cuales se detallan a continuación.

- Controles.- Son los parámetros de entrada, que usualmente son variables y capacidad de recursos.
- Respuestas.- Son los resultados del desempeño según los controles ingresados; además muestra las estadísticas de estos.
- Escenario.- Es el conjunto de controles y respuestas.
- Proyecto.- Es el conjunto de varios escenarios.

1.4.4. OptQuest Optimization

Según Kelton (2010), esta aplicación decide la forma de disponer los datos de entrada, que el modelador selecciona, para realizar las corridas y encontrar la combinación perfecta que optimice el modelo en base a un objetivo fijado previamente.

Según Banks (2010), esto es posible mediante una combinación de métodos, como Scatter search, tabu search, linear integer programming y data mining.

Dentro de los elementos de OptQuest Optimization, se encuentran los siguientes:

- Controles.- De la misma forma que en Process Analyzer, los controles son variables y capacidades de recursos que son cambiados por OptQuest Optimization, dentro de los límites establecidos, hasta encontrar una solución óptima. Al ingresar los controles, se debe de seleccionar sus características, como si es una variable discreta o continua; además, indicar el valor mínimo, máximo y sugerido.
- Restricciones.- Son relaciones entre controles y respuestas. Se considera que mediante el uso de estas, se incrementa la eficiencia para buscar la combinación óptima. En esta etapa se admiten restricciones lineales y no lineales.
- Respuestas.- En esta pestaña se seleccionan las variables que uno quiere como respuesta de la simulación, ésta última depende de las restricciones y objetivos.
- Objetivo.- Es una meta que usualmente se considera como la maximización o minimización de alguna función que depende de las variables del modelo.

- Soluciones sugeridas.- Son soluciones que el usuario introduce y cree que son las óptimas. Esta opción agiliza el proceso de encontrar la mejor combinación de variables para cumplir con el objetivo

- Opciones de corrida.- Son las condiciones que se establecen antes de iniciar la corrida, entre ellas están las siguientes:
 - Opciones de parada.- Esta permite controlar cuándo finalizará la simulación. Dentro de las condiciones de parada están número de simulación, en la que indicas el número de veces que se simulará el modelo; parada manual; donde usuario decide el momento; parada automática, esta opción hace que la simulación se detenga si es que luego de simular 100 veces no encuentra una mejor solución; y correr solo soluciones sugeridas.

 - Tolerancia.- Se utiliza para saber cuándo dos soluciones son iguales.

 - Número de réplicas.- Indica el número de veces que correrá el modelo en una simulación. Existen dos opciones, en la que uno ingresa un número fijo y la segunda, en la que el OptQuest evalúa la significancia entre la media de la función objetivo y el mejor valor hallado, para desechar rápidamente soluciones inferiores.

Capítulo 2. Descripción y diagnóstico de la situación actual

En este capítulo se describen las características de la empresa para tener una mayor comprensión del análisis de los procesos que se presentan y así, poder elaborar el diagnóstico de la situación actual.

2.1. Descripción de la empresa

Actualmente, las aerolíneas emplean servicios de terceros para las operaciones en tierra de las aeronaves, como por ejemplo la gestión de carga. Para el caso del aeropuerto internacional Jorge Chávez de la ciudad de Lima, el principal del Perú, solo tres empresas se dedican a brindar este servicio. A continuación se detalla el sector, actividad económica y perfil de la organización que ofrece este servicio.

2.1.1. Sector y actividad económica

La empresa se dedica a brindar servicios aeroportuarios, estos incluyen las operaciones con la aeronave en sí, con la carga y capacitaciones para el sector aerocomercial. Dentro de los principales servicios realizados a la aeronave en tierra se tiene el parqueo, remolque de aeronaves y limpieza de cabinas; mientras que con la carga del avión, la empresa se encarga de la recepción de maletas y carga en el counter del aeropuerto, la estiba y desestiba y almacenamiento de carga. Esta empresa aeroportuaria pertenece al sector de Transporte, Almacenamiento y Comunicaciones.

De acuerdo con el giro de la empresa, se determina que el código de Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIIU) es 63037. Dentro del sector I, el cual es Transporte, Almacenamiento y Comunicaciones, se encuentra la subdivisión 63, que abarcan las actividades transporte complementarias y auxiliares, y actividades de agencias de viajes. Esta, además, tiene un grupo 630, dentro del cual existen diversas clases, a la empresa le corresponde la clase 63037 cuya actividad principal se relaciona con transporte de pasajeros, animales o carga por vía aérea.

2.1.2. Perfil organizacional

La visión y misión de la empresa aeroportuaria, presentadas a continuación, son consideradas directrices para la toma de decisiones en cualquier nivel jerárquico.

- Visión

“Ser la empresa más importante de servicios aeroportuarios y operaciones de rampa en todo el territorio peruano”

- Misión

“Brindar un adecuado servicio de operaciones aeroportuarios y operaciones de rampa las 24 horas del día y los 7 días a la semana, los 365 días del año”

2.2. Procesos

El análisis de los procesos de la organización permite identificar las actividades que no contribuyen con cumplir la misión de la empresa. Una vez identificada, se evalúan las posibles causas para poder realizar el diagnóstico final.

2.2.1. Mapa de macroproceso

En la figura 2.1 se identifican los procesos de la empresa a nivel estratégico, operativo y funcional, representados en un mapa de procesos.

Los procesos del nivel estratégico tienen relación con la misión y visión de la empresa, la cual se resume en brindar un buen servicio de las operaciones de rampa. Los del nivel operativo se encargan de hacer posible el servicio y por último, los de apoyo garantizan que las operaciones se puedan realizar de manera adecuada.

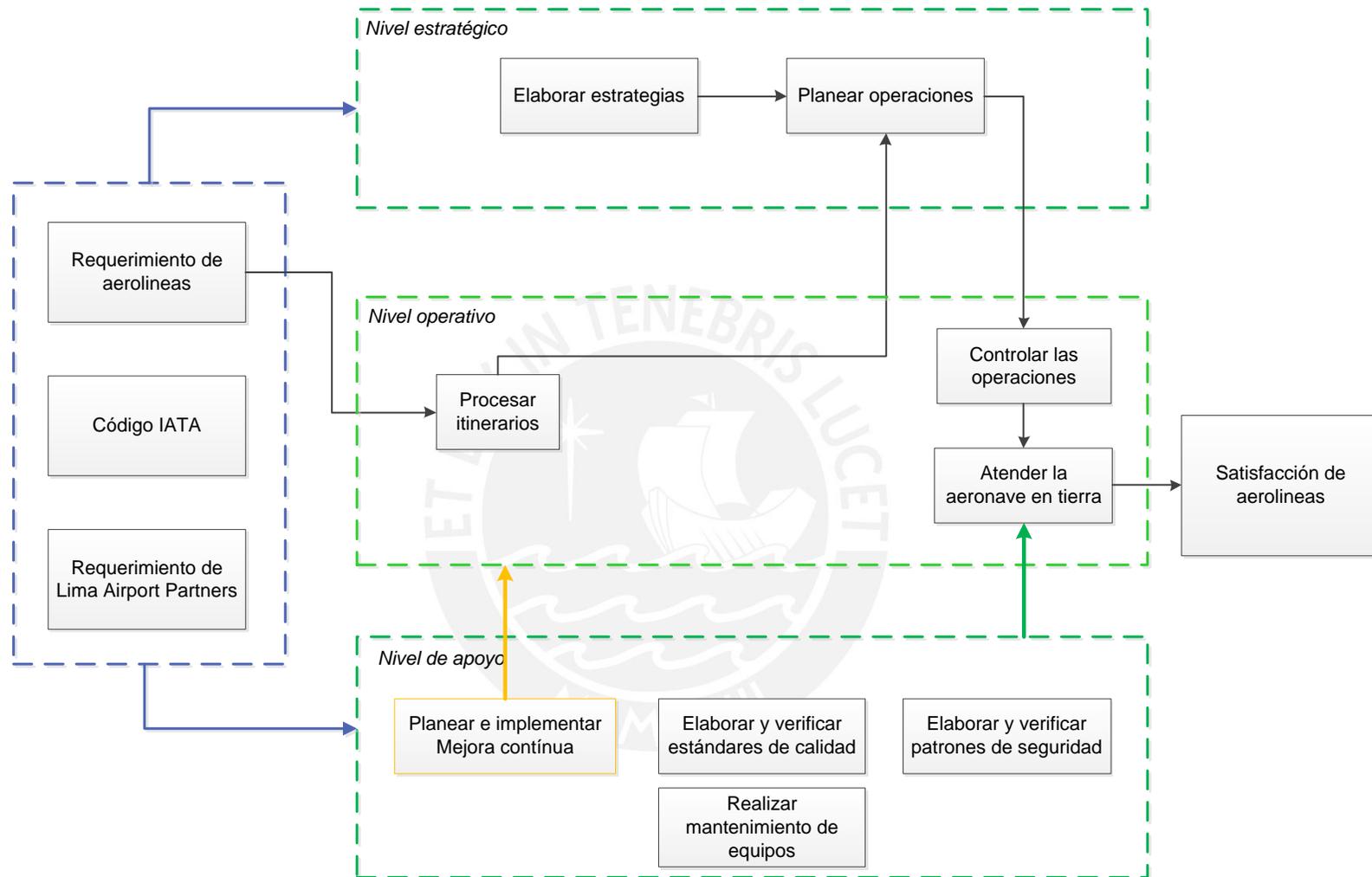


Figura 2.1. Mapa macroprocesos de la empresa

2.2.2. Procesos de nivel 0 a nivel 3

Al analizar el perfil organizacional de la empresa aeroportuaria, se concluye que esta brinda mayor interés a las operaciones de rampa. Debido a esto, se estudia el proceso general de atención de aeronaves en tierra, desagregándolo desde lo más general a lo más específico. Esto último se representa con diagramas de proceso, cuyos niveles representan lo siguiente:

- Nivel cero: Como se observa en la figura 2.2., este representa la relación del proceso principal con las entidades externas de la empresa, las cuales son Lima Airport Partners (LAP), las aerolíneas y la International Air Transport Association (IATA). La primera de ellas brinda los reglamentos dentro del aeropuerto. Por otro lado, la segunda entidad, son los clientes que dan a la empresa sus requerimientos del servicio y los itinerarios de los vuelos. Por último, la tercera entidad brindan estándares y métodos para realizar la operación.
- Nivel uno: En la figura 2.3., mediante el diagrama SIPOC (Supplier, Inputs, Process, Otoput, Customer) se visualizan los procesos e identifican las partes involucradas.
- Nivel dos: En este modelo, representado en la figura 2.4, se grafican las etapas del proceso crítico de atención de aeronaves. Este último se considera importante a partir de la matriz de priorización, mostrada en la tabla 2.1, donde se le otorga mayor porcentaje de decisión a los criterios que afectan con la visión y misión de la empresa. Para la puntuación, se toma como referencia lo siguiente:
 - Valor 1.- La relación entre el proceso y el criterio es débil.
 - Valor 3.- La relación es media.
 - Valor 5.- La relación es fuerte.

Tabla 2.1. Matriz de priorización de procesos

Criterios Procesos	Genera mayor ganancia	Influye en la satisfacción del cliente	Efectos en la calidad del servicio	Utilización económica de recursos	Presenta problemas con frecuencia	Genera un control específico	Ponderación	Nivel de importancia
	19%	19%	19%	15%	15%	13%		
Procesar itinerarios	1	3	5	1	1	1	2.14	13%
Planificar operaciones	3	5	5	1	1	1	2.9	18%
Controlar operaciones	3	5	5	1	1	5	3.42	21%
Atender aeronaves en tierra	5	5	5	5	5	5	5	31%
Elaborar indicadores	1	5	5	1	1	3	2.78	17%
Total	13	23	25	9	9	15	16.24	100%

- Nivel tres: En la figura 2.5 se representa un diagrama de flujo del sub-proceso de estiba y desestiba de aeronaves indicando los responsables de cada actividad. Por cada avión atendido, se requiere un grupo de ocho operadores, dos fajas transportadoras, un tractor y cuatro carretas para trasladar la carga.

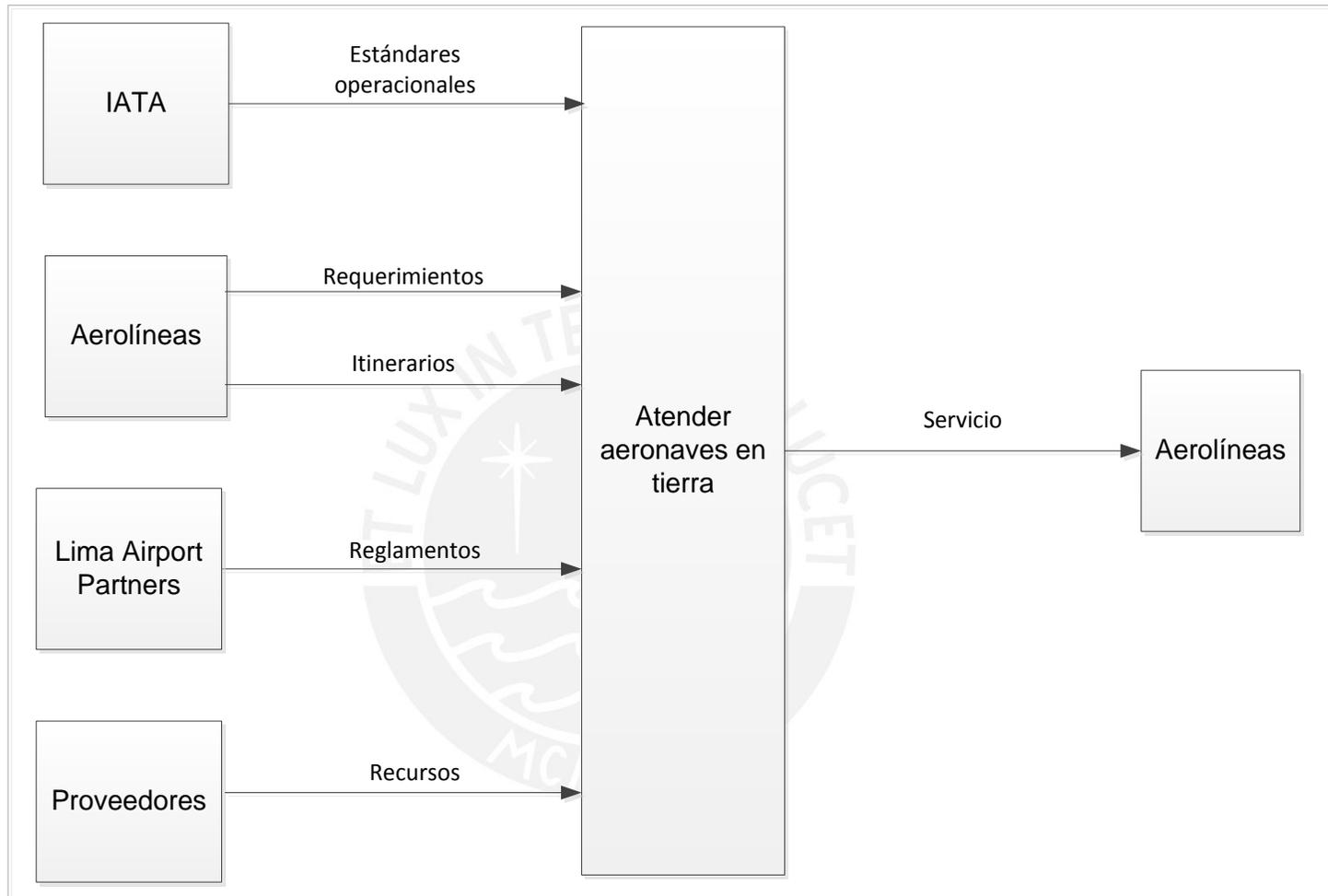


Figura 2.2 Nivel 0 de los procesos de la empresa

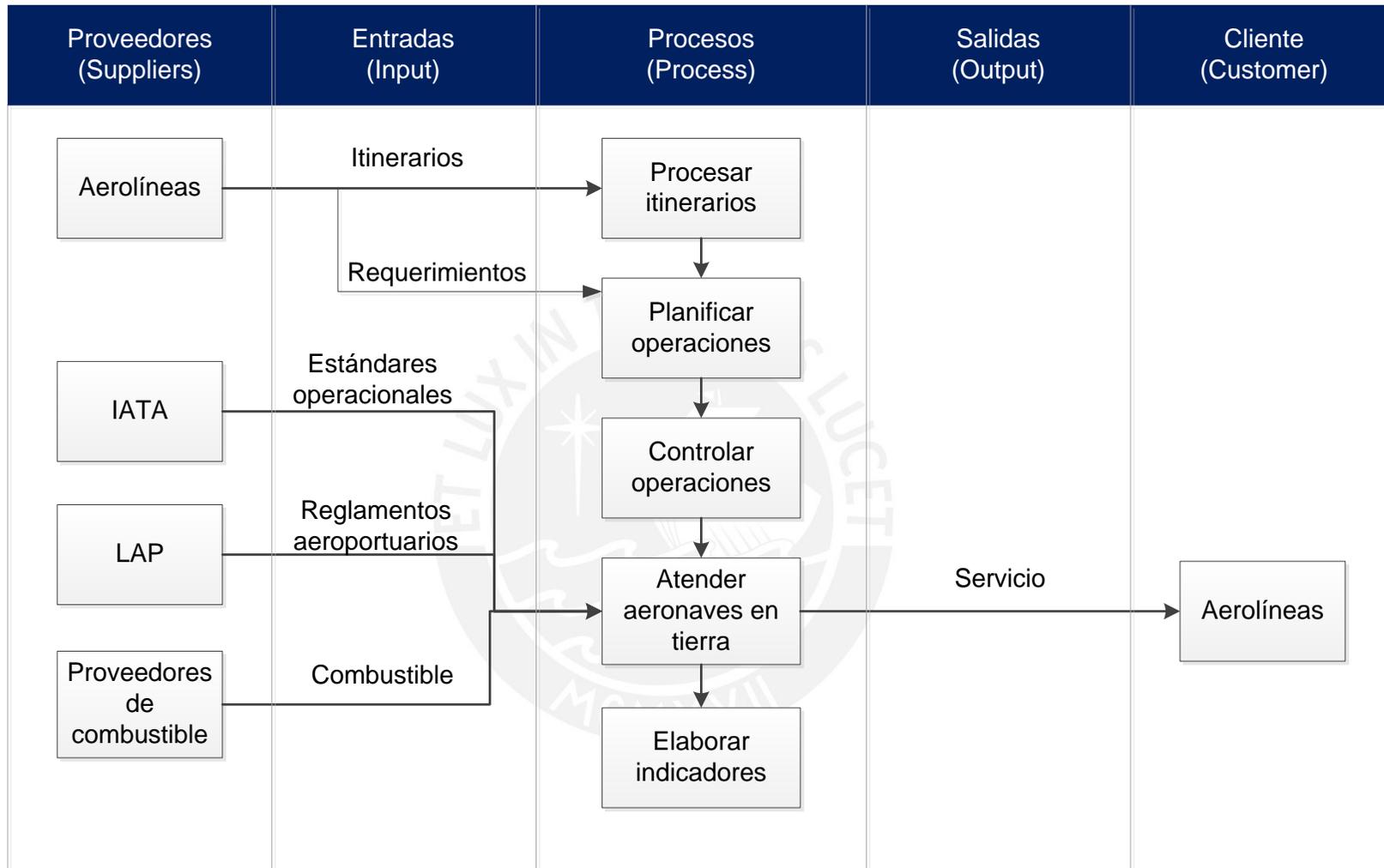


Figura 2.3. Nivel 1 de los procesos de la empresa

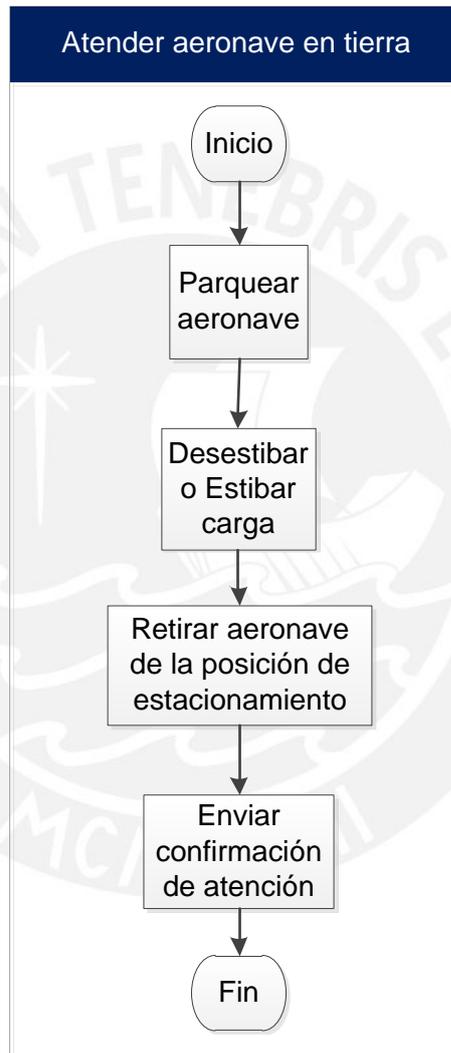


Figura 2.4. Nivel 2 del sub-proceso de atender aeronaves en tierra

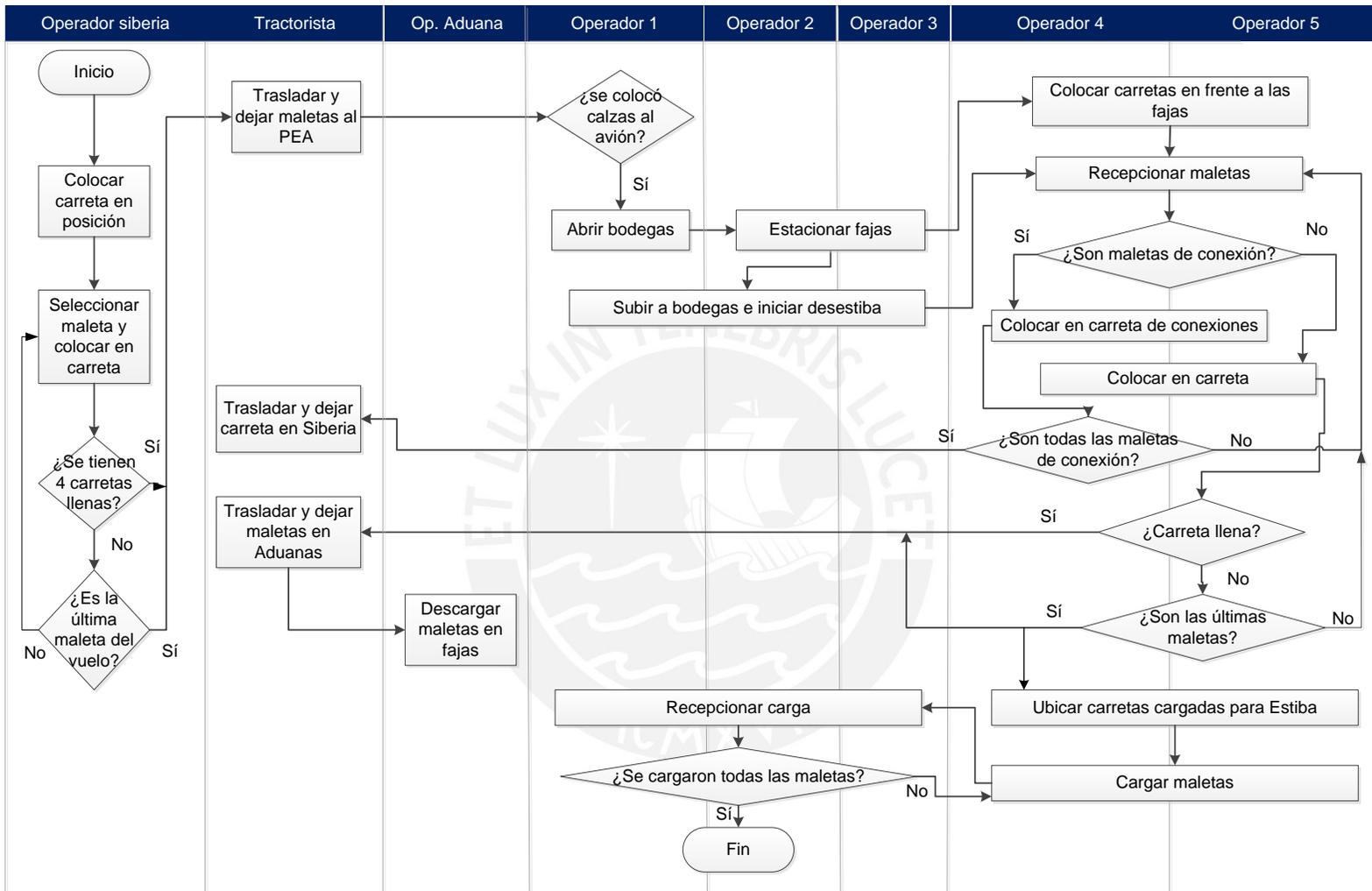


Figura 2.5. Nivel 3 de la actividad de desestibar y estibar

2.2.3. Definición de estándares operacionales e indicadores

La empresa aeroportuaria tiene como principal objetivo el cumplimiento de los estándares de tiempo de estiba y desestiba que fueron estipulados con las aerolíneas. Estos se muestran en la tabla 2.2.

Tabla 2.2 Estándares de tiempo de operaciones

Estándar	Tiempo (minutos)
Primera maleta desestibada	8
Tiempo de desestiba	26
Tiempo de estiba	15

Los indicadores utilizados para evaluar el cumplimiento del objetivo se mencionan en la tabla 2.3, donde el mínimo valor aceptable es 80% para el NCD y 52% para el caso del NCE. La empresa justifica que este último valor es bajo debido a que por itinerario, la aeronave debe permanecer más tiempo en el aeropuerto y el tiempo estándar de 15 minutos se amplía.

Cabe resaltar que no se emplea un indicador que mida el estándar de tiempo de la primera maleta en el sistema, debido a la falta de información que la empresa tiene sobre este suceso. Esto último es consecuencia del método empleado para el registro de información, en la cual el operador manda una marcación por medio de un celular al sistema de la empresa indicando el inicio y fin de cada actividad; sin embargo, solo se le da prioridad a los subprocesos de estiba y desestiba y no al cumplimiento de los ocho minutos de la primera maleta en el sistema.

Tabla 2.3 Indicadores

Indicador	Fórmula
Nivel de cumplimiento del tiempo de estiba (NCE)	$\frac{\# \text{ operaciones que cumplen estándar en un mes}}{\text{total de operaciones en un mes}} \times 100\%$
Nivel de cumplimiento del tiempo de desestiba (NCD)	$\frac{\# \text{ operaciones que cumplen estándar en un mes}}{\text{total de operaciones en un mes}} \times 100\%$

2.2.4. Identificación del problema principal

Para analizar la situación actual de la empresa se utilizan datos históricos de los meses de noviembre y diciembre, que son los más críticos debido al aumento de vuelos en el aeropuerto. Los valores de indicadores en dichos meses se muestran en la tabla 2.4.

Tabla 2.4 Valores de indicadores de los meses de mayor demanda

Indicador	Valor	
	Noviembre	Diciembre
Nivel de cumplimiento del tiempo de estiba (NCE)	52%	45%
Nivel de cumplimiento del tiempo de desestiba (NCD)	81%	80%

Como se puede observar, el nivel del indicador NCE se cumple en el mes de noviembre, pero no en el mes de diciembre. Por otro lado, se perciben cifras altas en el indicador NCD, cumpliendo el nivel mínimo del 80%.

Si bien la empresa desarrolla indicadores de desempeño, esta presta mayor atención a los reportes que envían los clientes, donde en promedio se reciben cinco papeletas diarias por el incumplimiento de tiempos de desestiba, esta se hace efectiva si es que el cliente de la aerolínea presenta una queja por esperar más de 25 minutos su equipaje. Estas papeletas se obtienen en el horario de mayor demanda en el aeropuerto, el cual es de 8 a 11 de la mañana y noche. Debido a esto, en la tabla 2.5 se muestran los valores de los indicadores en dichos horarios.

Tabla 2.5 Valores de indicadores en horas de mayor demanda

Indicador	Valor	
	Noviembre	Diciembre
Nivel de cumplimiento del tiempo de estiba (NCE)	52%	45%
Nivel de cumplimiento del tiempo de desestiba (NCD)	79%	76%

En conclusión, con base en los resultados de la tabla 2.5, el problema principal es el incumplimiento de los tiempos estándares de la operación en el horario pico.

2.2.5. Análisis de causas

La identificación y análisis de las causas se realiza mediante el diagrama de Ishikawa, mostrado en la figura 2.6, que es una representación gráfica de la relación causal de los siguientes factores con el problema principal.

- **Hombre.-** Se tienen operarios en capacitación y no expertos, ya que el nivel de rotación es alto. Asimismo, no existen diversas empresas que manejen carga aeroportuaria, lo cual la mayoría de los operadores contratados no han tenido experiencia.
- **Recursos:** Debido al número insuficiente de equipos, se atienden aeronaves con equipos incompletos o no se atiende la aeronave hasta que estén disponibles. Asimismo, los equipos presentan deficiencias que no garantizan el cumplimiento total de una operación diaria.
- **Método:** Es un método fijo dado que no está en función al nivel de carga del avión, teniendo como resultado, un carga de trabajo desigual en cada operador y un mal análisis de tiempos, ya que se considera la operación global.
- **Aerolínea:** Para fijar los estándares no toman en cuenta las opiniones de la empresa. Además, cuando un vuelo llega retrasado hace que el grupo encargado permanezca sujeto a este, disminuyendo la cantidad de operadores libres que pueden atender otros vuelos.

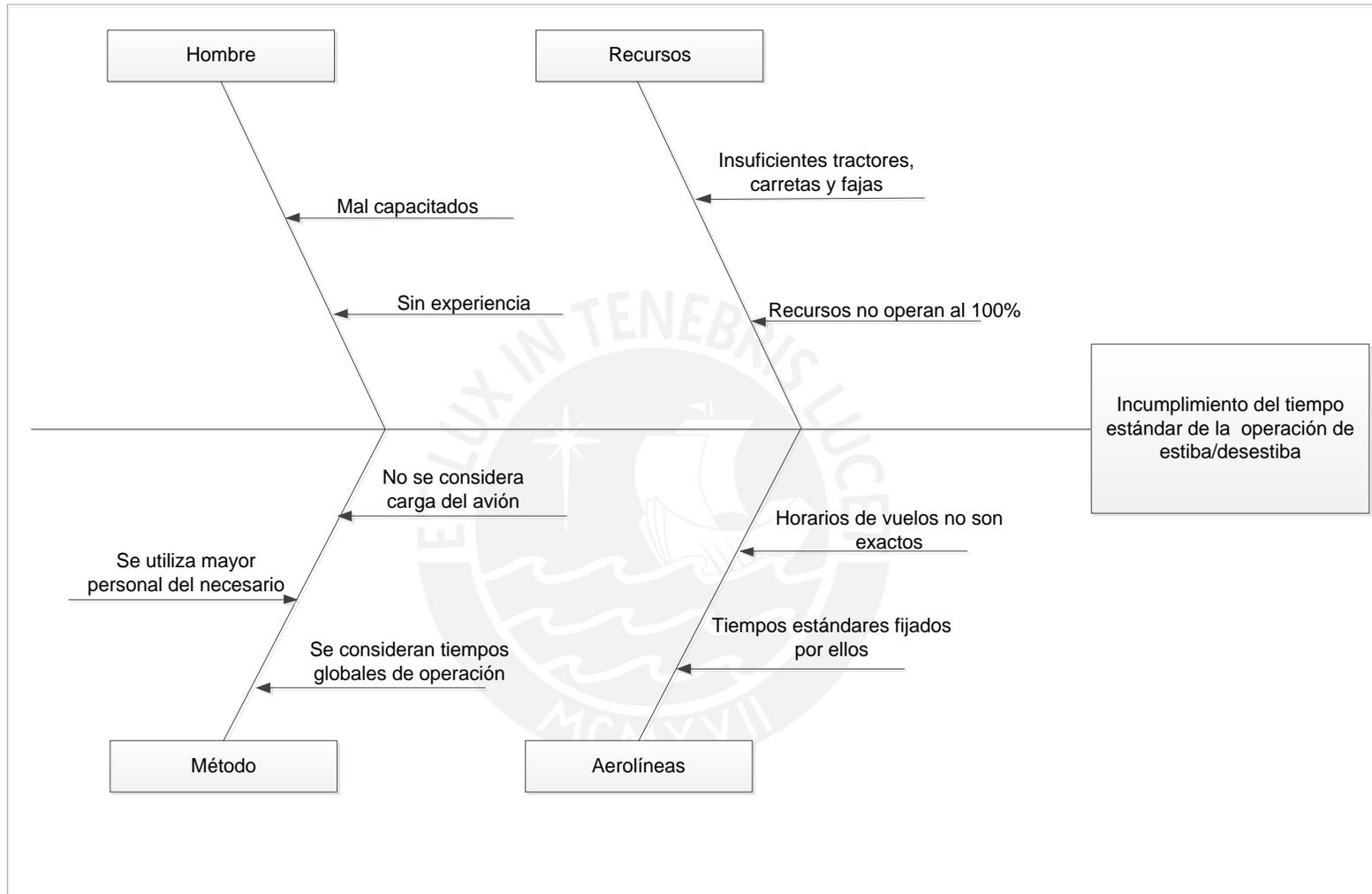


Figura 2.6. Diagrama Ishikawa del problema principal

2.2.6. Determinación de la causa principal y solución

Para determinar la causa principal se emplea un método cuantitativo, mostrado en la tabla 2.6, que enfrentan las causas mencionadas en el diagrama Ishikawa con dos criterios, la posibilidad que el problema ocurra por dicha causa y el impacto que genera. Las puntuaciones otorgadas toman valores del 1 al 5, en la cual a medida que el valor sea mayor, hay más probabilidad o impacto.

Tabla 2.6. Priorización de causas

Causa principal	Descripción de la causa	Posibilidad	Impacto	Total	
Recursos	Insuficientes tractores, carretas y fajas	5	5	25	28%
Recursos	Recursos no operan al 100%	3	5	15	17%
Método	No se considera carga del avión	3	4	12	13%
Hombre	Mal capacitados	3	3	9	10%
Método	Se consideran tiempos globales de operación	2	3	6	7%
Método	Se utiliza mayor personal del necesario	3	2	6	7%
Aerolínea	Horarios de los vuelos no son exactos	3	2	6	7%
Aerolínea	Tiempos estándares fijados por ellos	3	2	6	7%
Hombre	Sin experiencia	2	2	4	4%
				89	100%

A partir de este análisis, se identifica que la causa principal es el número insuficiente de equipos para la operación. Al evaluar este problema con el método del por qué, mostrado en la figura 2.7, se identifican las causas raíz y las propuestas de solución.

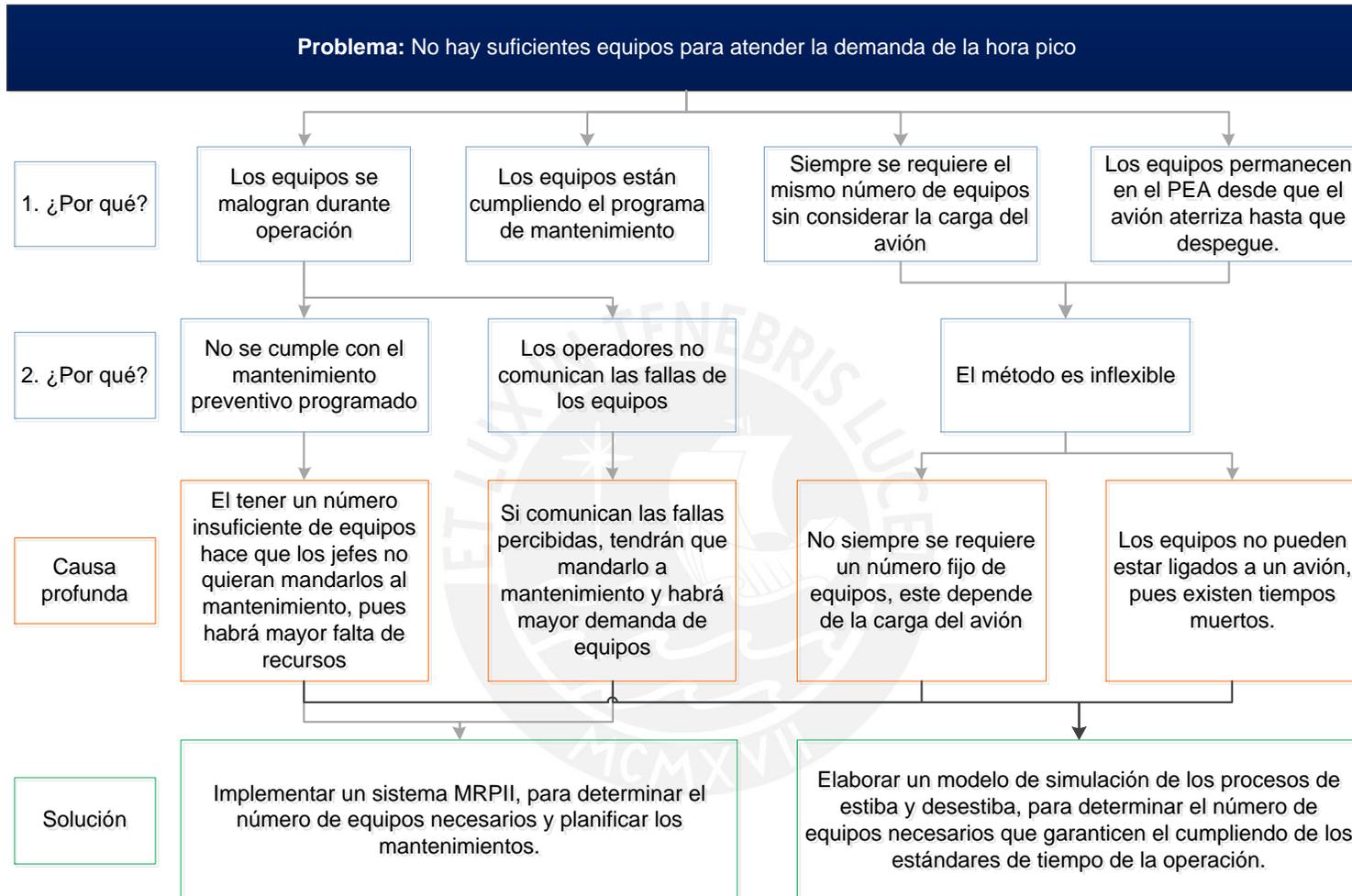


Figura 2.7. Análisis de la causa principal con el método del por qué

Las dos soluciones presentadas se enfrentan en la tabla 2.7 para determinar la mejor opción. El criterio para aplicar este método es identificar el número de problemas solucionados, los cuales se muestran en la figura 2.6, y la posibilidad de desarrollar la mejora.

Tabla 2.7. Priorización de soluciones

Soluciones propuestas	Problemas solucionados	Posibilidad de implementación	Total	%
Sistema MRPII	2	4	8	40%
Simulación de eventos discretos	4	3	12	60%
			20	100%

A partir del resultado que se muestra en la tabla 2.7 se concluye que la solución ideal es la elaboración de un modelo de simulación de la operación de carga y descarga, ya que mediante la generación de números aleatorios en la cantidad de carga de los aviones y los tiempos de servicio, es posible establecer el número de equipos que permita cumplir con los tiempos objetivos del proceso.

Capítulo 3. Recopilación de datos

Este capítulo tiene como objetivo determinar los datos necesarios para representar el sistema en el modelo de simulación. Esto es posible mediante el ajuste de los datos a distribuciones estadísticas.

3.1. Procedimiento para la recolección de datos

Las técnicas utilizadas para el levantamiento de información son dos, la investigación de documentación existente y la observación directa.

Por un lado, la empresa aeroportuaria presenta una base de datos con reportes de la operación, del cual se emplean datos que indiquen la cantidad de maletas por avión y la proporción de maletas que son para vuelos de conexión, dichos reportes son del mes de diciembre del 2012.

Por otro lado, es necesario realizar un estudio de tiempos, ya que se necesitan tiempos unitarios para realizar la simulación y no tiempos globales, como muestran los reportes mencionados anteriormente. Por este motivo, se procede a realizar la toma de tiempos en el mes de enero de 2013 en fechas y horarios de alto tránsito de aeronaves, los cuales son sábado y domingo de 8:00 a.m. a 11:00 a.m. Asimismo, se selecciona las aeronaves Airbus 319, debido a que el 50% vuelos atendidos pertenece a ese modelo de avión⁵. Los datos registrados son los siguientes:

- Tiempo de retirar la carreta llena y traer otra (Siberia)
- Tiempo entre maletas de un vuelo (Siberia)
- Tiempo en llevar la maleta de la faja a la carreta (Siberia)
- Tiempo de colocar la maleta de la carreta a la faja (carga)

⁵ De la base de datos del mes de diciembre, la empresa atendió 6,152 aviones, de los cuales 3,099 son del modelo Airbus 319, es decir el 50%.

- Tiempo de colocar la maleta de la faja a la bodega (carga)
- Tiempo de retirar la carreta vacía y traer otra llena (carga)
- Tiempo entre llegada de aviones (descarga)
- Tiempo de colocar la maleta de la bodega a la faja (descarga)
- Tiempo de colocar la maleta de la faja a la carreta (descarga)
- Tiempo de colocar la maleta de la carreta a la faja de aduanas (descarga)
- Tiempo de colocar la maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia (descarga y Siberia)
- Tiempo de retirar la carreta llena y traer otra (carga y descarga)

3.2. Clasificación de datos

Los datos mencionados se clasifican en tres tipos, los determinísticos, las variables y proporciones. El criterio para su selección es la siguiente:

- Se consideran datos determinísticos a los que no presentan variabilidad significativa.
- Son variables, los datos que no son controlables por el sistema.
- Es una proporción cuando existe la posibilidad de seleccionar alguna alternativa.

Con base en los criterios mencionados, se clasifican los datos en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Clasificación de datos

Datos	Tipo
Tiempo de retirar una carreta llena y traer otra	Datos determinísticos
Tiempo entre maletas	Variable aleatoria continua
Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta	Variable aleatoria continua
Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja	Variable aleatoria continua
Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega	Variable aleatoria continua
Tiempo de retirar una carreta vacía y traer otra llena	Datos determinísticos
Tiempo entre aviones listos para empezar descarga	Variable aleatoria continua
Cantidad de maletas por avión	Variable aleatoria discreta
Tiempo de colocar una maleta de la bodega a la faja	Variable aleatoria continua
Tiempo de colocar una maleta de la faja a la carreta	Variable aleatoria continua
Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas	Variable aleatoria continua
Proporción de maletas de conexión por avión	Proporción
Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia	Variable aleatoria continua
Tiempo de retirar una carreta llena y traer otra	Datos determinísticos

Para los datos determinísticos, los cuales son tres, se establece un tiempo fijo de 40 segundos.

3.3. Muestreo

Para determinar el tamaño de muestra, con el objetivo de obtener data confiable, se emplea la técnica del muestreo aleatorio simple para estimar la media de las variables aleatorias y la media de las proporciones. Para esto, se toman las siguientes consideraciones:

- Los datos que se emplean para el muestreo se muestran en el anexo 1.
- El análisis se inicia con una muestra de 30 datos para cada uno de los tiempos requeridos. La información obtenida es el promedio y la varianza.

- Se emplea un nivel de confianza (α) del 95% y un error admisible (e) del 5%. Cabe resaltar que, para el error admisible de la media no se toma el porcentaje sino, la cifra, es decir, la multiplicación del promedio con el 5%.
- La población (N) es 4480, debido a que los tiempos hacen referencia a cada unidad de maleta y en el horario de estudio existe un máximo de 28 vuelos simultáneos con un promedio de 160 maletas por avión.
- La fórmula que se utiliza para determinar el tamaño de muestra de una media para población finita (n) es la siguiente:

$$n = \frac{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2 N}{Z_{1-\frac{\alpha}{2}}^2 \sigma^2 + e^2 (N - 1)}$$

- La fórmula para determinar el tamaño de muestra de una proporción para población finita (n) es la siguiente:

$$n_0 = \frac{\left(Z_{1-\frac{\alpha}{2}}\right)^2 \bar{p}(1 - \bar{p})}{e^2}$$

$$n = \left\lceil \frac{n_0}{1 + \frac{n_0 - 1}{N}} \right\rceil$$

3.3.1. Tamaños de muestra

En la tabla 3.2 se presenta el tamaño de muestra (n) de las variables presentadas y la proporción estimada.

Tabla 3.2. Tamaños de muestra para cada dato

Dato	Promedio	Varianza	$Z_{\alpha/2}$	e	d (prom x e)	N	n_0	n
Tiempo entre maletas	27.40	95.00	1.96	0.05	1.37	4480	194.42	187.00
Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta	6.29	2.48	1.96	0.05	0.31	4480	96.24	95.00
Tiempo de colocar maleta de la carreta a la faja	2.48	1.24	1.96	0.05	0.12	4480	308.34	289.00
Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega	5.15	6.59	1.96	0.05	0.26	4480	382.29	353.00
Tiempo entre llegada de aviones	4.77	20.94	1.96	0.05	0.24	4480	1416.43	584.00
Cantidad de maletas por avión	157.00	3002.53	1.96	0.05	7.85	4480	187.18	180.00
Tiempo de colocar maleta de la bodega a la faja	2.93	1.33	1.96	0.05	0.15	4480	238.52	227.00
Tiempo de colocar maleta de la faja a la carreta	3.32	0.56	1.96	0.05	0.17	4480	77.87	77.00
Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas	3.67	1.76	1.96	0.05	0.18	4480	200.42	192.00
Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia	3.20	1.16	1.96	0.05	0.16	4480	174.53	168.00
Proporción de maletas de conexión por avión	0.30	-	1.96	0.05	-	4480	138.30	135.00

3.4. Análisis de datos

Esta etapa consiste en determinar la distribución de probabilidad de los datos mediante pruebas de bondad de ajuste, donde se toma como hipótesis nula que la variable aleatoria se ajusta a la distribución candidata con los parámetros estimados.

Como herramienta se utiliza Input Analyzer y del reporte resultante se considera el menor error cuadrático y el valor del p-value de las pruebas Kolmogorov Smirnov (KS) o Chi-cuadrado (χ^2), según corresponda.

En el siguiente acápite, se detalla el procedimiento para realizar el análisis mencionado al dato de tiempo entre maletas; mientras que los restantes se detallan en los anexos indicados en cada punto. Finalmente, en el punto 3.4.11 se detalla una tabla con los resultados finales de todos los datos analizados.

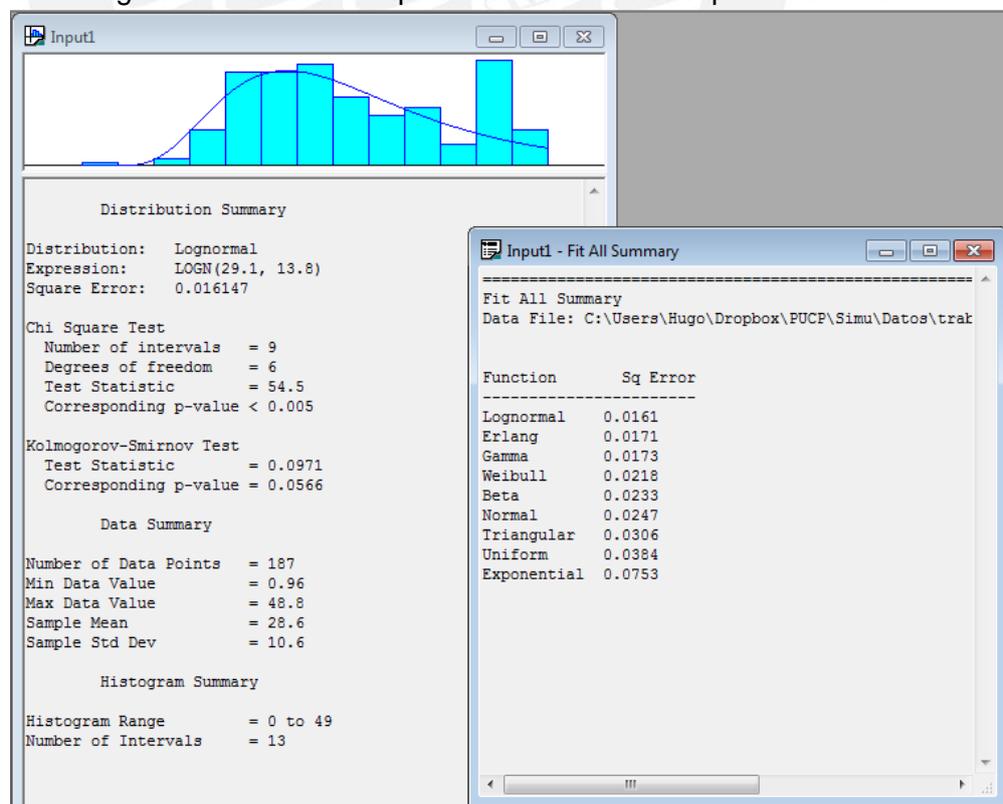
3.4.1. Análisis: Tiempo entre maletas

Con base en los resultados del Input Analyzer, mostrada en la figura 3.1, el procedimiento para determinar la distribución estadística a la que se ajustan los datos es la siguiente:

- Identificar si la variable es discreta o continua para elegir la distribución estadística correcta. Para este caso, el tiempo entre maletas es una variable continua.
- Se observa el reporte del error cuadrático y se selecciona la distribución cuyo valor sea el menor. Cabe resaltar que la distribución seleccionada debe ser idónea para el tipo de variable, discreta o continua. En esta circunstancia, la distribución lognormal presenta menor error cuadrático y además, es una distribución para variables continuas.

- Una vez determinada la distribución, se procede a comprobar el ajuste de los datos mediante las pruebas KS o χ^2 , cabe resaltar que la primera de ellas se emplea para variables continuas, mientras que la segunda, para los dos tipos de variables considerando que la muestra mínima es 90. Para este caso, se tiene una muestra de 187 valores y es una variable continua, lo cual es posible realizar el análisis con las dos pruebas.
- Luego de haber identificado la prueba, se analiza el valor del p-value. En caso este valor sea mayor a 0.05, hay evidencias suficientes para aceptar la hipótesis nula, caso contrario, el dato no se ajusta a la distribución escogida y por ende, se debe de escoger una distribución empírica continua o discreta. Para este caso, el resultado del p-value es menor para la prueba χ^2 , pero mayor en la KS; por lo tanto, se concluye que hay evidencias suficientes para aprobar la hipótesis nula; es decir, que la distribución lognormal se ajusta al dato tiempo entre maletas.

Figura 3.1 Análisis de tipo de distribución: Tiempo entre maletas



3.4.2. Análisis: Tiempo en llevar una maleta de la faja a la carreta

Ver anexo 2.

3.4.3. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja

Ver anexo 3.

3.4.4. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la bodega

Ver anexo 4.

3.4.5. Análisis: Tiempo entre aviones listos para empezar descarga

Ver anexo 5.

3.4.6. Análisis: Cantidad de maletas por avión

Ver anexo 6.

3.4.7. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la bodega a la faja

Ver anexo 7.

3.4.8. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la faja a la carreta

Ver anexo 8.

3.4.9. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de la carreta a la faja de aduanas

Ver anexo 9.

3.4.10. Análisis: Tiempo de colocar una maleta de conexión de la carreta a la faja de Siberia

Ver anexo 10.

3.4.11. Resumen de análisis de datos

En la tabla 3.3 se presentan los valores que tendrá cada dato, para el caso de las variables se muestran el tipo de distribución con sus parámetros; mientras que, para la proporción se observa el valor estimado hallado a partir de la muestra final.

Tabla 3.3 Resumen de valores para cada dato

Variables	Valor
Tiempo entre maletas	LOGN(29.1,13.8)
Tiempo: llevar maleta de la faja a la carreta	NORM(6.25,1.46)
Tiempo: colocar maleta de la carreta a la faja	10*BETA(2.69,7.54)
Tiempo: colocar maleta de la faja a la bodega	ERLA(1.29,4)
Tiempo entre llegada de aviones	CONT(0.119,1.500,0.225,2.500,0.310,3.500,0.402,4.500,0.463,5.500,0.545,6.5,0.604,7.500,0.652,8.500,0.710,9.500,0.748,10.500,0.767,11.500,0.795,12.500,0.813,13.500,0.837,14.500,0.845,15.500,0.851,16.500,0.863,17.500,0.879,18.500,0.887,19.500,0.897,20.500,0.905,21.500,0.907,22.500,0.911,23.500,0.913,24.500,0.928,25.500,0.948,26.500,0.954,27.500,0.956,28.500,0.960,29.500,0.962,31.500,0.966,32.500,0.972,34.500,0.974,35.500,0.980,36.500,0.984,37.500,0.986,38.500,0.988,40.5,0.990,41.500,0.992,42.500,1,54.500)
Cantidad de maletas por avión	DISC(0.017, 58,0.077, 73.00,0.188, 87.00,0.427, 102.00,0.598, 117.00,0.735, 132.00,0.829,147.00,0.889,162.00,0.932,177)
Tiempo: colocar maleta de bodega a faja	GAMM(0.743,4.17)
Tiempo: colocar maleta de faja a carreta	2+GAMM(1.3,1.37)
Tiempo: colocar maleta de carreta a faja de aduanas	9*BETA(2.49,3.79)
Tiempo: colocar maleta de conexión carreta a faja de Siberia	0.48+5.13*BETA(1.6,1.83)
Proporción de maletas de conexión por avión	0.30

Capítulo 4. Desarrollo del modelo

En este capítulo se describe el modelo simulado en el software Arena. En primer lugar, se identifican los componentes del modelo; luego se definen las presunciones y finalmente, se explica la lógica empleada para simular el sistema.

4.1. Definición de los componentes del modelo

El modelo es construido a partir de elementos que se relacionan para lograr la representación del sistema. Dentro de los componentes, están las entidades, recursos, variables y atributos.

4.1.1. Entidades

Las entidades del modelo se clasifican en dos tipos, dinámicas y estáticas. Para el primer caso, la entidad debe de recibir algún servicio, caso contrario, pertenece al segundo tipo de clasificación. En la tabla 4.1 se nombran las entidades y se las clasifica.

Tabla 4.1 Clasificación de entidades

Entidad	Tipo
Maletas	Dinámica
Seleccionador	Estática
Operador	Estática
Carretas	Estática
Tractor	Estática
Fajas transportadoras	Estática

4.1.2. Recursos

Los recursos presentes en el modelo son entidades que prestan servicios, lo cual en la tabla 4.2 se presenta la cantidad actual disponible y el servicio que brinda cada recurso.

Tabla 4.2 Recursos disponibles para la operación

Recurso	Cantidad	Servicio
Seleccionador	28	Seleccionar maletas de un vuelo y cargarlas en carretas.
Operador	168 (6 operadores por vuelo)	Realizar la carga y descarga de maletas de las carretas a las fajas y de las fajas a bodegas.
Carretas	50	Almacenamiento temporal de las maletas para su traslado.
Tractor	28	Trasladar carretas
Faja transportadoras	56 carga y 56 descarga Nota: solo se emplea una faja para la descarga y carga; sin embargo, Arena solo permite asignar una dirección a la faja, por lo cual el valor se duplica.	Traslado de maletas de carreta a bodega y viceversa.

4.1.3. Variables

En el modelo se observan dos tipos de variables, las de estado y las globales. Las primeras, hacen referencia al estado en el que se encuentra la variable en determinado momento; mientras que el segundo tipo de variable refleja una característica del modelo total. Para este caso, en las tablas 4.3 y 4.4 se detallan las variables empleadas.

Tabla 4.3 Variables de estado

Variable	Estado
Seleccionador	Ocupado/desocupado/inactivo
Operador	Ocupado/desocupado/inactivo
Carretas	Ocupado/desocupado/inactivo
Tractor	Ocupado/desocupado/inactivo
Fajas transportadora	Ocupado/desocupado/inactivo
Cola: Cola tractorista carga #	Cantidad carretas que esperan por el tractor para carga
Cola: COLA#	Cantidad de maletas que esperan por carreta en la siberia
Cola: Desc#	Cantidad de maletas que esperan por carreta y operador en la descarga
Cola: ESPERA#	Cantidad de carretas que esperan en el PEA para ser estibadas.
Cola: t#	Cantidad de carretas de descarga que esperan por el tractor para ser llevadas a las aduanas o siberia.

Tabla 4.4 Variables globales

Variable	Estado
TNOW	Indica el tiempo actual
NQ	Indica el número de entidades dinámicas en cola
NC	Indica el valor del contador

4.1.4. Atributos

Los atributos que se establecieron para las maletas fueron:

- Sibericarga.- Este atributo se le asignan a las maletas que llegan del counter y tienen como destino la bodega del avión. Para cada vuelo se genera un atributo llamado *Siberiacarganumerodevuelo*.
- Conexion.- Las maletas de descarga presentan este atributo. Mediante la proporción determinada en el punto 3.3.1. se establece el número de maletas que son de conexión y por lo tanto, tienen como destino la Siberia.
- Bodega.- Este atributo determina la distribución de las maletas para cada bodega del avión. Cabe resaltar que se emplea para la operación de carga como descarga.
- Tingreso.- Este atributo le asigna a cada entidad el tiempo en que comienza la operación de carga y descarga.
- Avión.- Las maletas creadas para la descarga presentan este atributo para distinguir el avión del que provienen.

4.2. Presunciones para establecer el modelo

Con el objetivo de realizar un modelo de simulación que refleje la realidad y cuyo nivel de complejidad sea adecuado, se determinaron los siguientes supuestos:

- Todas las maletas son del mismo tamaño y peso.
- Todos los tractores se desplazan a 5.54 m/s (20 km/h).
- Todas las fajas transportadoras tienen una velocidad de 2.77 m/s (10km/h).
- El desplazamiento de los tractores no será paralizado por el ingreso o salida de un avión.
- Ningún pasajero retirará su maleta por no subir a tiempo al avión.
- En el abordaje, nunca se enviará carga de la cabina a la bodega.
- Los coches y sillas de ruedas descargadas siempre serán entregadas con las maletas, en la faja de aduanas.
- Todos los tractoristas trasladarán una carreta por viaje de la PEA hacia las aduanas.
- El aeropuerto tendrá programado siempre los mismos vuelos a las mismas horas y todos los días.
- Siempre un mismo vuelo se estacionará en la misma PEA.
- Nunca un avión se retrasará de la hora programada de llegada
- Todos los tractoristas van por las rutas señalizadas, no hay posibilidad de cortar ruta.
- Siempre se tendrá un tercio de la carga total en la bodega delantera y lo restante en la bodega trasera.

- Todos los operadores asistirán en sus horarios, no habrán ausencias.
- Los tractoristas nunca ayudan a los operadores en la carga o descarga.
- Siempre habrá maletas de conexiones en los aviones.
- Todas las maletas de conexiones serán transportadas luego de haber trasladado las maletas de aduanas.
- Ningún avión traslada carga que provenga o permanezca en los almacenes de la empresa aeroportuaria.
- Ninguna maleta que llegue a la Siberia contendrá objetos sospechosos, lo cual nunca se tendrá que realizar una inspección minuciosa a la maleta.
- Siempre la faja de aduanas estará disponible para cada vuelo.
- Todos los vuelos atendidos serán de ida y vuelta, es decir, a todos se les dará servicio de estiba y desestiba.
- Todas las carretas trasladan 40 maletas, solo trasladaran un número menor cuando la cantidad que falta cargar o descargar por avión sea menor a la cantidad establecida por carreta.

4.3. Descripción del modelo

La operación de carga y descarga de aeronaves se simula mediante el uso de submodelos. Para este caso se emplean 30 de ellos, los cuales son aduanas, siberia y 28 aviones.

- Siberia.- Este proceso comienza a las 8 a.m. y consiste en recepcionar la carga que proviene del counter del aeropuerto y de los vuelos de

conexión, para luego seleccionarla por vuelos y la colocarla en carretas. A las 10 a.m. las carretas son trasladadas al vuelo que corresponde.

- Avión.- Existen 28 submodelos que representa la operación en cada PEA con el avión. Dentro de este se distinguen las actividades de descarga y carga del avión. La primera de ellas comienza cuando el avión aterriza y tiene como objetivo retirar la carga de las bodegas y trasladarla a las aduanas o siberia, este último ocurre cuando la carga es de conexión. Mientras que, la carga empieza cuando se finaliza la descarga y las carretas con carga estén ubicadas en la PEA.
- Aduanas.- La carga, que procede del avión recién aterrizado, es destinada a este lugar para que los pasajeros la recepcionen.

4.3.1. Simulación del proceso en siberia

La siberia es una zona del aeropuerto que recibe todas las maletas, pero para este modelo se crean 28, donde cada una recibe las maletas de un vuelo. Esto se realiza para poder aplicar transporte con camino dirigido y lograr que los tractores no bloqueen una intersección.

En esta estación se distinguen dos tipos de maletas, las que vienen del counter, con atributo *siberiacarga#*, y las de conexión, con atributos diferentes. Esto se observa en la figura 4.1.

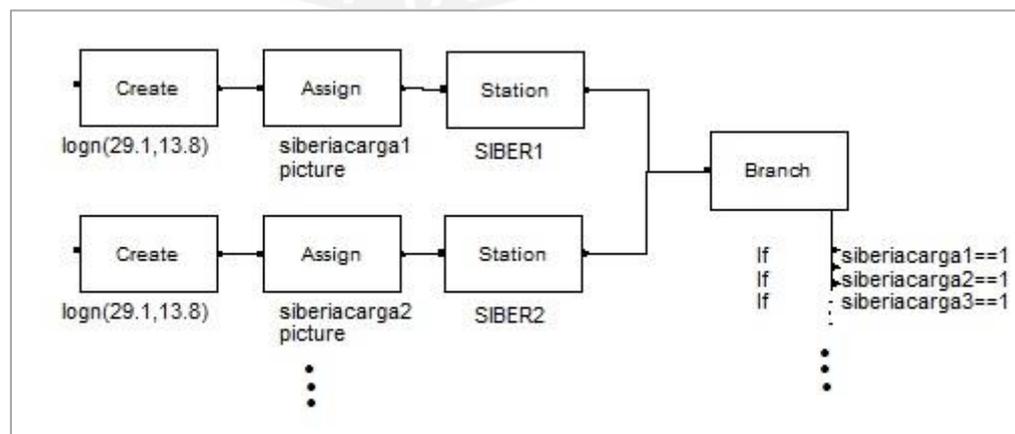


Figura 4.1 Secuencia de bloques: Maletas llegan a la siberia

En la figura 4.2, las maletas con atributo *siberiacarga#*, son seleccionadas por el operador. Luego de dos horas, empieza la siguiente actividad, cuya simulación requiere que se forme un grupo de todas las maletas que pertenecen al vuelo. En la figura 4.3 se muestra el proceso ficticio que lanza una señal a las dos horas de haber comenzado la simulación, para que se liberen las maletas.

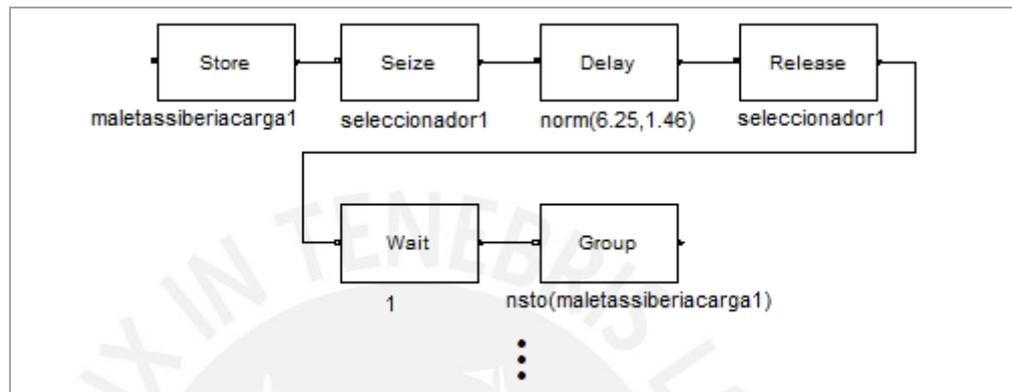


Figura 4.2 Secuencia de bloques: Selección de maletas

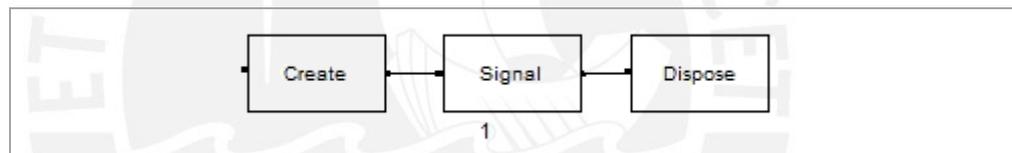


Figura 4.3 Secuencia de bloques: Ficticio para liberar maletas de carga

En la siguiente actividad, representada en la figura 4.4, se dividen las maletas en grupos de 40, debido a que esta es la capacidad máxima de las carretas. Para esto, se analiza la cantidad total de maletas y se comparan con tres condiciones.

- Si hay menos de 40 maletas, se sigue directamente a la siguiente etapa.
- En caso se tengan entre 41 y 80 maletas, se forman dos grupos, uno de 40 maletas y el otro, con la cantidad restante. Como se observa, se emplea un bloque Delay como artificio, para que todas las maletas se acumulen en ese sector y forme un grupo con las maletas sobrantes.

- Si es que se tienen entre 81 y 120 maletas, se forman tres grupos y se utiliza la misma lógica empleada anteriormente.

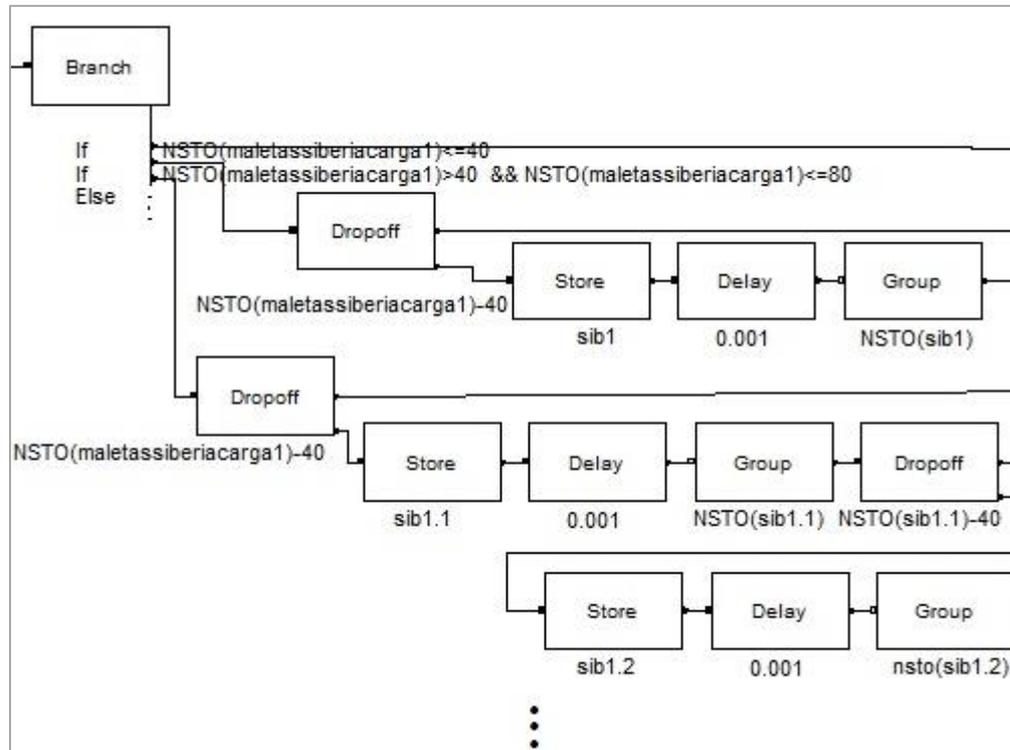


Figura 4.4 Secuencia de bloques: Formación de grupos de 40 maletas

Una vez se formen los grupos de 40 maletas, se asigna una carreta a cada uno. Luego, a todas las carretas se les asigna un tractorista y un tractor para que lo trasladen al PEA que le corresponde. Esta actividad se representa en la figura 4.5.

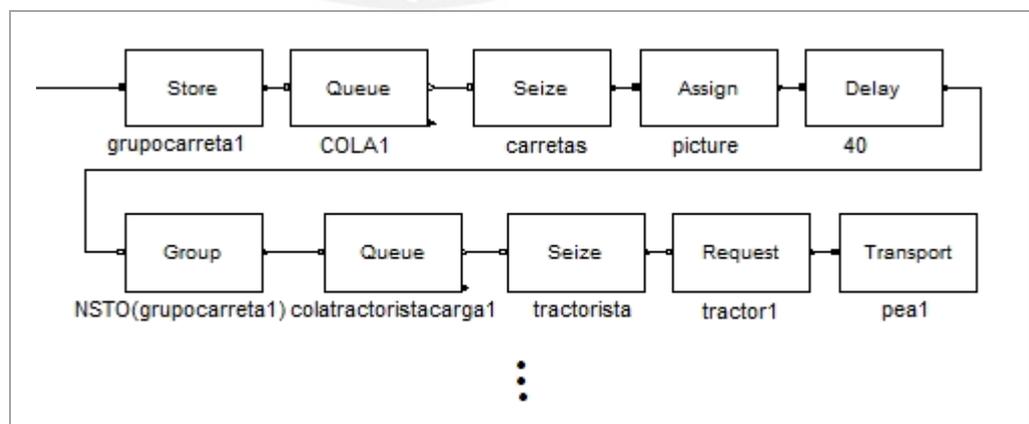


Figura 4.5 Secuencia de bloques: Asignación de carretas y traslado al PEA

Las maletas que son de conexión, cuyo atributo no coincide con alguna condición del bloque Branch de la figura 4.1, liberan el tractor, tractorista y carreta al llegar a la siberia. Esto se observa en la figura 4.6.

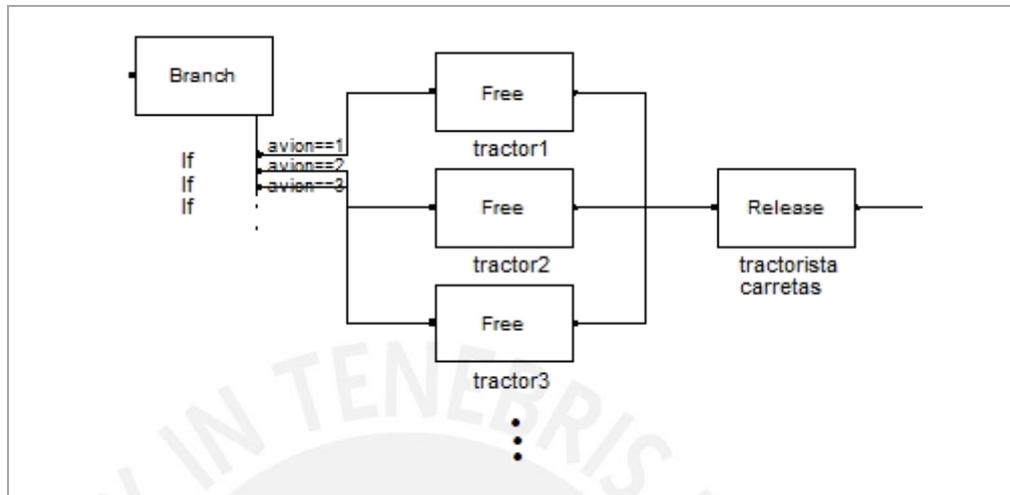


Figura 4.6 Secuencia de bloques: Liberar recursos de las maletas de conexión

Por último, en la figura 4.7 se representa la actividad en la que cualquier seleccionador libre coloca las maletas de conexión en la faja de siberia. Para llevar estadísticas de la operación se contabilizan las maletas de conexión y el tiempo que tarda desde que se coloca en la faja del avión hasta llegar a la siberia.

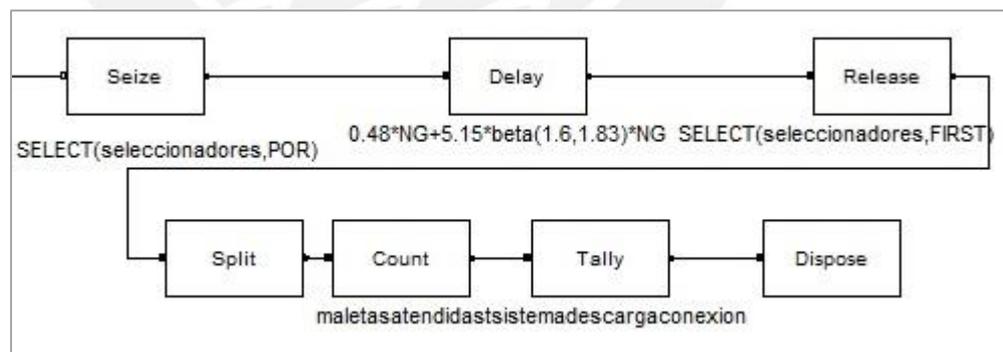


Figura 4.7 Secuencia de bloques: Descargar maletas de conexión en siberia

4.3.2. Simulación del proceso en el avión

En el submodelo avión se distinguen dos procesos, de descarga y carga. Antes de explicar cada uno, se destaca que la estación *avion#* recibe dos tipos de entidades, la de carga, con atributo *siberiacarga#*, y las de

descarga, con atributo *avión*. De la misma forma, la estación *pea#* recibe estos dos tipos de entidades con los mismos atributos. Es por ello que luego de llegar a estas estaciones se realiza una división, ya que las maletas de carga y descarga le corresponden procesos diferentes. En la figura 4.8 se percibe los bloques para la estación avión; mientras que, en la figura 4.9, para la estación PEA.

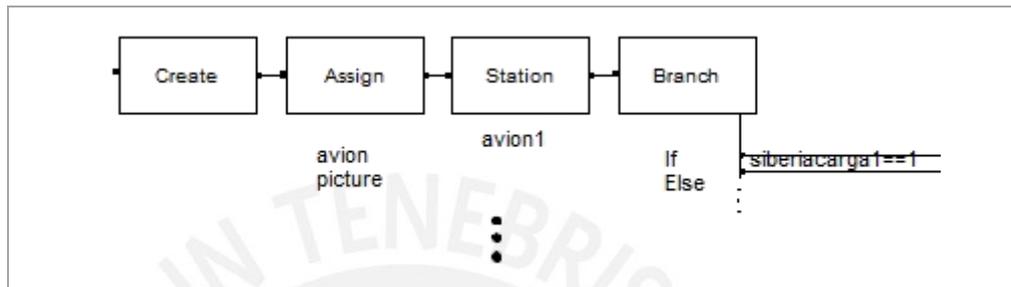


Figura 4.8 Secuencia de bloques: Entidades de la estación avión

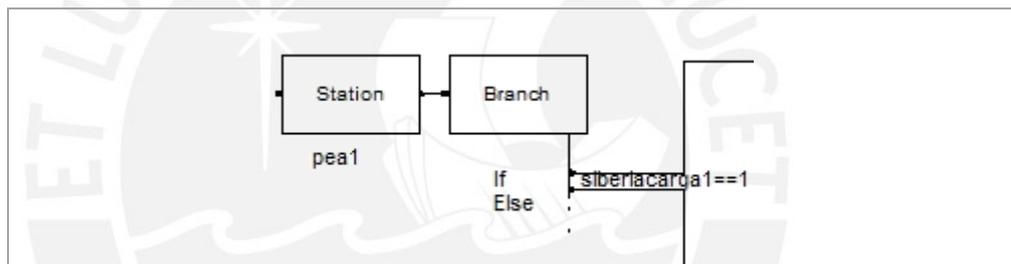


Figura 4.9 Secuencia de bloques: Entidades de la estación PEA

a) Simulación de la operación de descarga

Un avión presenta dos bodegas, donde la delantera tiene una capacidad de un tercio de la trasera. Además, presenta maletas de conexión, cuya proporción es 0.3 por avión. Las maletas creadas en la figura 4.8 presentan estos dos atributos, de bodega y conexión.

En la figura 4.10 se observa un bloque Branch que tiene como objetivo dividir las maletas por bodegas, cabe resaltar que el proceso de una bodega es similar a la otra. Este consiste en que un operador coloque las maletas de la bodega a la faja transportadora, esta última traslada la carga hasta el piso, es decir, la estación PEA.

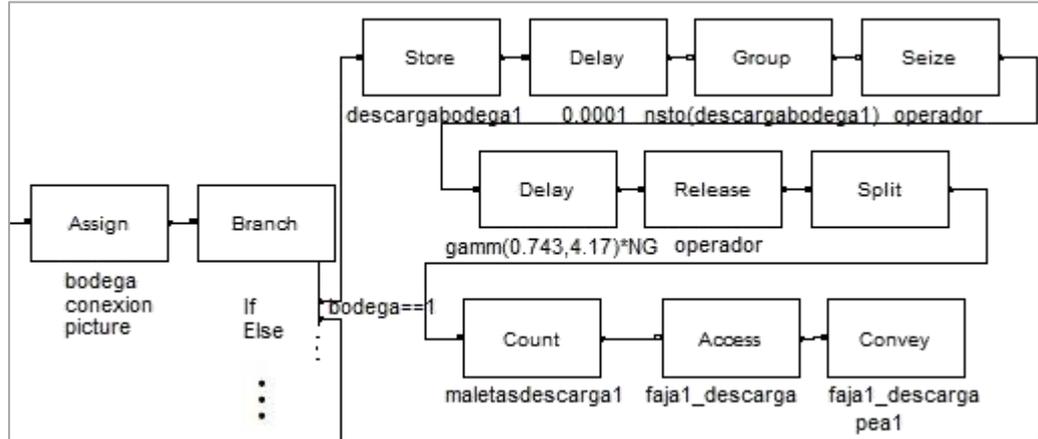


Figura 4.10 Secuencia de bloques: Descarga de bodega

Cuando las maletas son retiradas de la faja transportadora, se procede a seleccionar si son de conexión o van directo a las aduanas. Este proceso se observa en la figura 4.11.

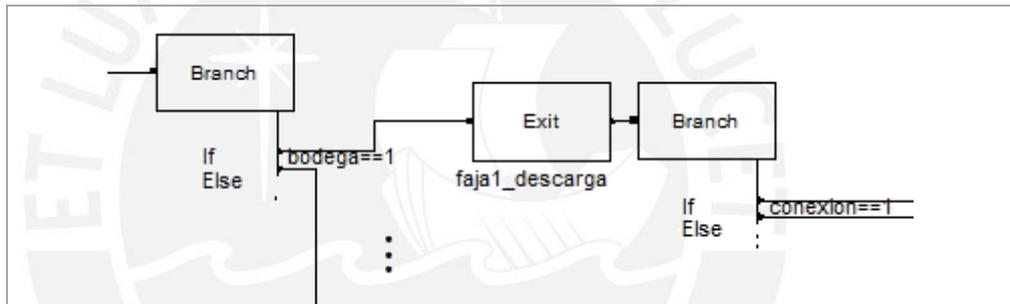


Figura 4.11 Secuencia de bloques: Liberar recurso faja

Para formar grupos de 40 maletas se requiere un proceso previo. En este se forman un total de cuatro grupos; el primero, con toda la carga de conexión de la primera bodega; el segundo, con la carga de aduanas de la misma bodega; el tercero, con la carga de conexión de la segunda bodega; y la última, con la carga de aduanas de la misma bodega. En la figura 4.12 se presenta la secuencia de bloques para el primer caso, para los demás, la lógica es idéntica. Se emplea un bloque Delay con un tiempo de 15 segundos para lograr que se forme el grupo con todas las maletas entrantes.

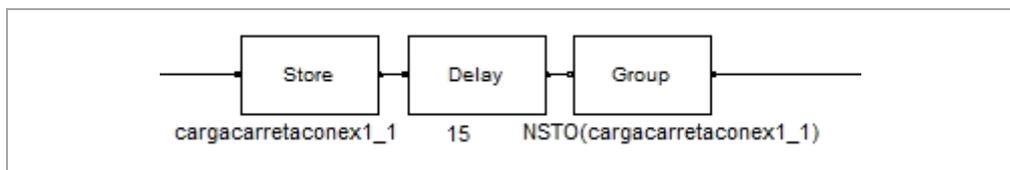


Figura 4.12 Secuencia de bloques: Proceso previo para formar grupos de 40 maletas

De la misma forma que en la siberia, en la figura 4.13 se muestra el proceso de formar grupo de 40 maletas.

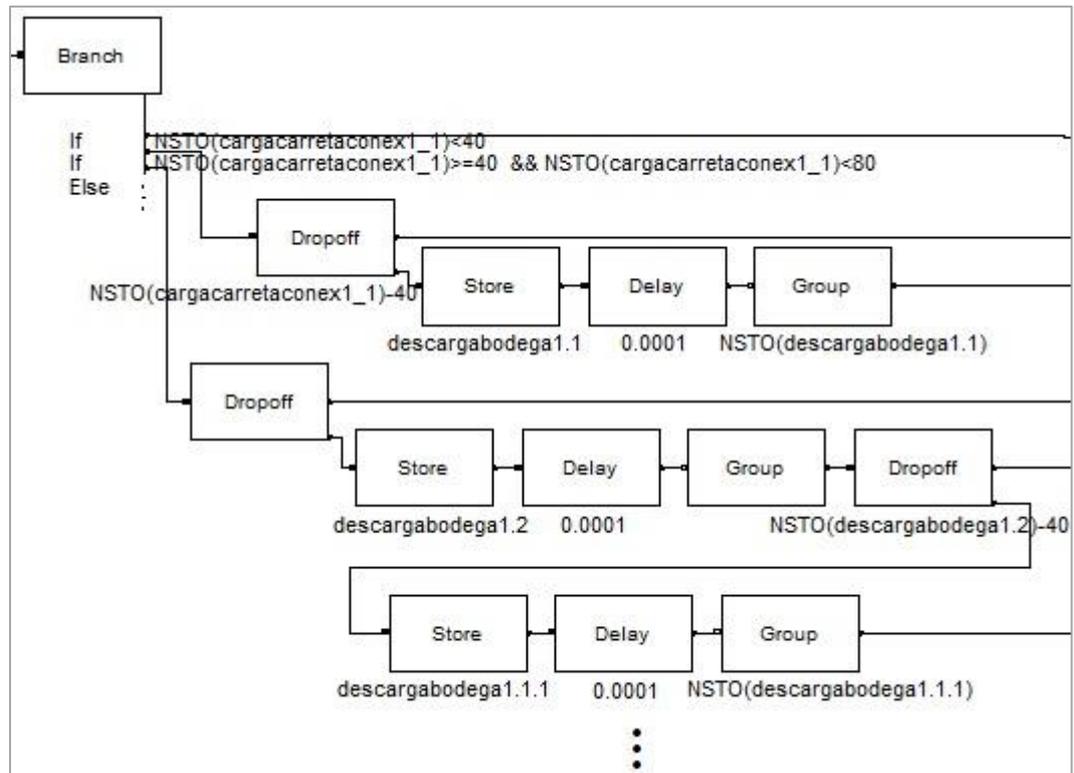


Figura 4.13 Secuencia de bloques: Formar grupos de 40 maletas

A cada grupo de maletas se le asigna un operador para que coloque las maletas en cada carreta. Este proceso se observa en la figura 4.14.

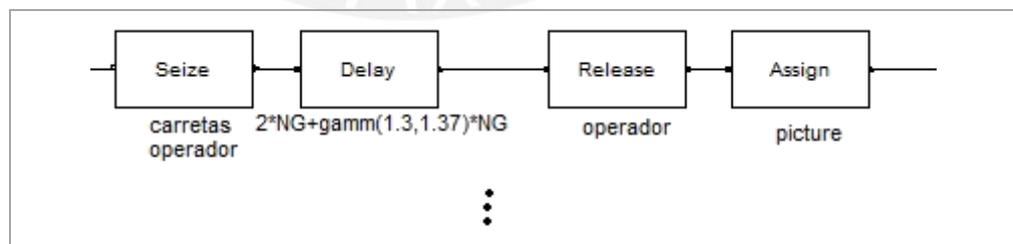


Figura 4.14 Secuencia de bloques: Llenar carretas con la descarga

Finalmente, las carretas esperan a que se le asigne un tractor y tractorista para que sean trasladadas a la aduana o siberia, esta última, en caso sean maletas de conexión. Cabe resaltar que el transporte tiene como prioridad recoger la carga con destino a la aduana.

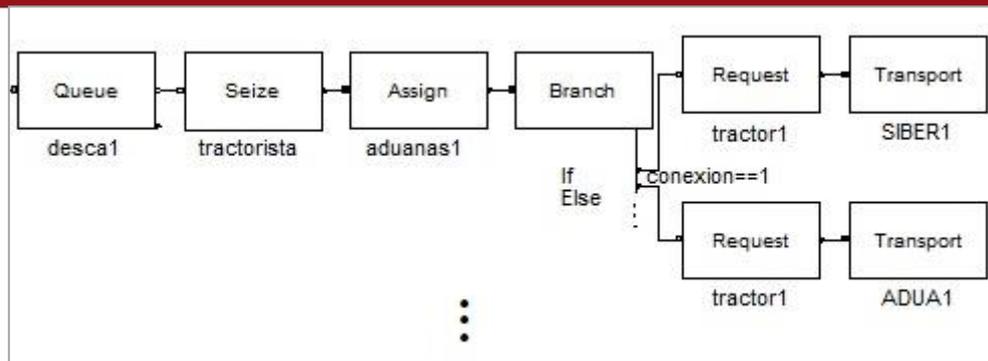


Figura 4.15 Secuencia de bloques: Trasladar carretas con la descarga

b) Simulación de la operación de carga

Cuando el tractor llega con la carga al *PEA*, este se debe de mover a la estación *P#*, la cual pertenece a la estación *PEA*. El motivo de este traslado es para desarrollar el transporte con camino dirigido. Una vez se llegue a este destino, se libera el tractor y tractorista. Las carretas son liberadas cuando se confirme que las bodegas estén vacías, esto se obtiene mediante en bloque *Scan*, el cual libera la entidad cuando toda la carga que sale del avión llega a la aduana. De igual manera que en la descarga, un tercio de carga va a la bodega delantera; mientras que, el resto va a la otra bodega. Esta secuencia de bloques de presenta en la figura 4.16.

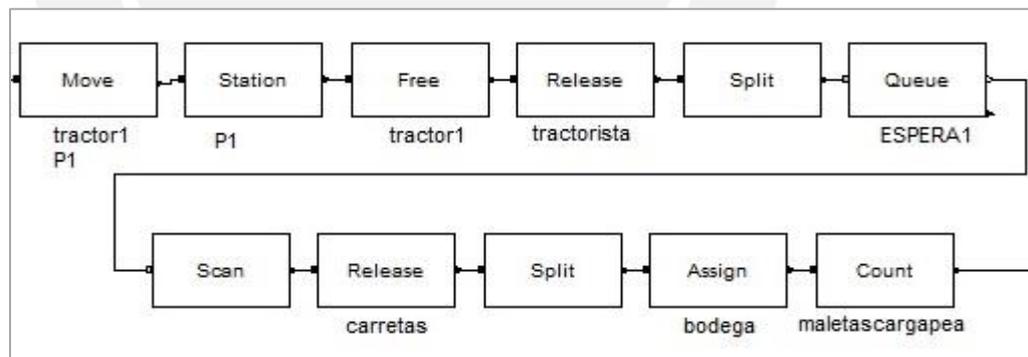


Figura 4.16 Secuencia de bloques: Liberar recursos para proceder a la carga

El bloque *Branch*, que se muestra en la figura 4.17, divide la carga entre las dos bodegas, el proceso en cada una de ellas es igual. Este consiste en que el operador coloque las maletas de la carreta a la faja y esta última traslada la carga hacia la bodega, es decir, la estación avión.

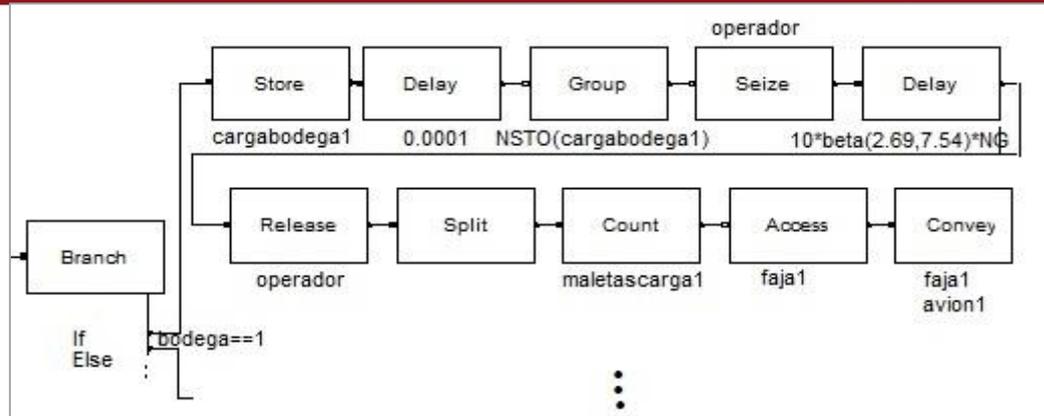


Figura 4.17 Secuencia de bloques: Colocar maletas en la faja del avión

El operador que se encuentra en cada bodega procede a acomodar las maletas. En la figura 4.18 se muestra este proceso. Para desarrollar estadísticas, se halla el tiempo que tarda la carga de maletas.

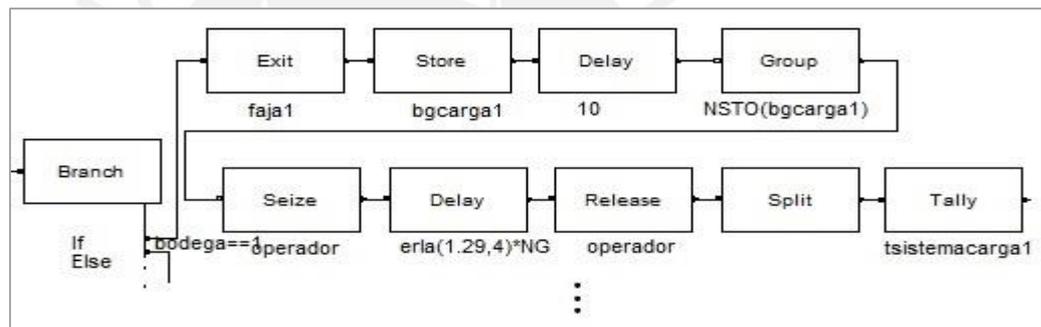


Figura 4.18 Secuencia de bloques: Colocar maletas en bodega del avión

4.3.3. Simulación del proceso en la aduana

La aduana es una zona del aeropuerto, pero para el modelo se crea una aduana para cada vuelo, ya que se está desarrollando transporte con camino dirigido. Cuando las carretas llegan a cada estación, un operador retira las maletas de la carreta y las coloca en la faja de la aduana. Esto se observa en la figura 4.19.

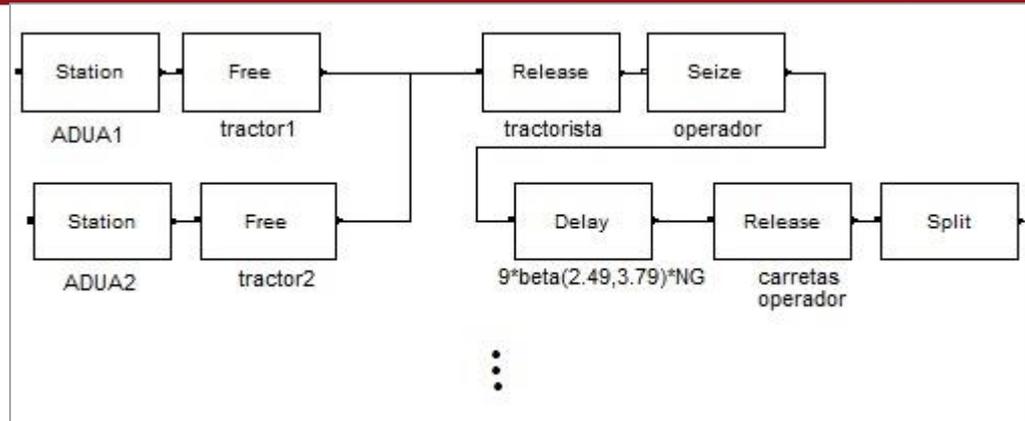


Figura 4.19 Secuencia de bloques: Colocar maletas en faja de aduana

En la figura 4.20 se muestran los bloques que permiten obtener información del proceso como la cantidad de maletas atendidas y el tiempo que tarda la maleta desde que se coloca en la faja del avión hasta que llega a la aduana. Es importante mencionar que, la cantidad de maletas atendidas que almacena el bloque Store se utiliza para saber que todas las maletas del avión han sido descargadas y por lo tanto, se puede seguir con la carga.

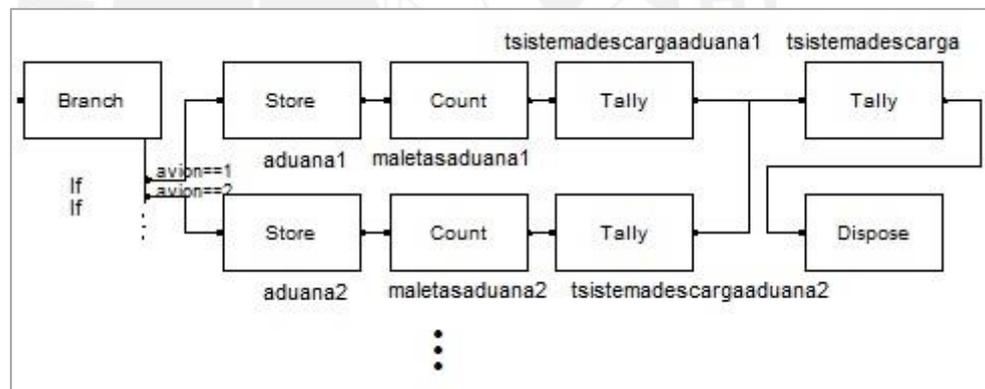


Figura 4.20 Secuencia de bloques: Información de proceso de descarga

4.3.4. Animación del modelo

La animación del modelo permite observar gráficamente el estado en el que se encuentra la simulación, el diseño de este se muestra en la figura 4.21.

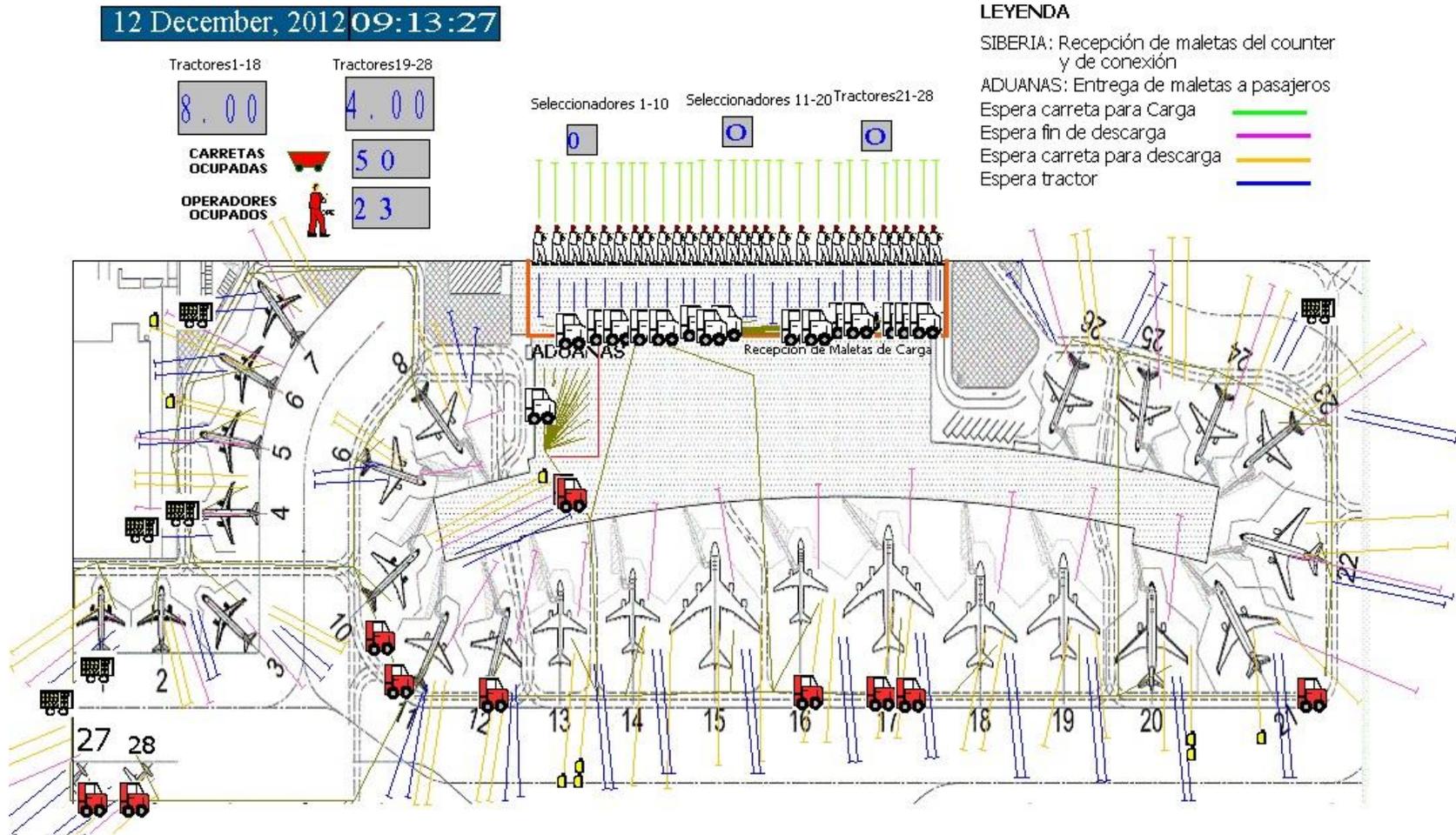


Figura 4.21 Animación del modelo

Capítulo 5. Validación y análisis de resultados

En el presente capítulo se comprueba que el modelo es una buena representación del sistema real mediante pruebas de hipótesis, las que determinan si los datos de salida del modelo son semejantes a los reales. Asimismo, para realizar un análisis confiable de los resultados, se estipula el tipo de sistema, terminal o no terminal, y se establece el número de réplicas necesarias.

5.1. Validación de resultados

La validación de resultados se realiza aplicando el método de prueba de hipótesis de dos colas con un nivel de confianza $(1-\alpha)$ del 95%, cuya hipótesis nula es que el valor promedio del reporte Siman es igual a la cifra promedio real (c).

Los tiempos a validar son seis; el primero, la espera por carretas en la descarga, con un tiempo promedio real de 3 minutos; el segundo, la espera por tractor en la siberia, cuyo tiempo de espera es 0; el tercero, la espera por el tractor en la descarga, con un tiempo de 3 minutos; el cuarto, el tiempo de carga, la cual toma 7 minutos; y finalmente, el tiempo máximo y mínimo de descarga, el cual es 12 y 26 minutos.

En esta etapa se utiliza el resumen de 10 réplicas del reporte Siman, mostrado en el anexo 11, donde se emplean los valores promedio y half width. Estos datos se convierten a minutos, luego se halla el valor T con un α de 5% y n igual a 10, y finalmente, se calcula el estadístico t_0 , cuya fórmula es $\frac{\text{Promedio}-c}{h/t_{0,975,9}}$. La hipótesis nula se rechaza si el valor absoluto del estadístico es mayor a $t_{\alpha/2}$.

En el anexo 12 se muestran los resultados de la validación de los tiempos luego de haber aplicado el procedimiento mencionado. Como se observa, existen 9 datos en las que se rechaza la hipótesis nula, lo cual en la tabla 5.1 se presenta el análisis.

Tabla 5.1 Análisis de resultados rechazados por la prueba de hipótesis

Descripción	Indicador	Comentario
Espera a la carreta	TAVG(desc18.WaitingTime)	Estas colas pertenecen a los aviones que aterrizan al último, por lo tanto, se espera más por el recurso carreta, ya que estas están atendiendo a otros vuelos.
	TAVG(desc20.WaitingTime)	
	TAVG(desc22.WaitingTime)	
	TAVG(desc26.WaitingTime)	
	TAVG(desc34.WaitingTime)	
	TAVG(desc4.WaitingTime)	
	TAVG(desc42.WaitingTime)	
	TAVG(desc44.WaitingTime)	
	TAVG(desc8.WaitingTime)	

5.2. Análisis de resultados

El análisis de resultados implica que se establezca el tipo de sistema, para este caso es uno terminal, porque en el diseño del modelo se representa cada avión por separado que recibe un servicio de carga y descarga; por lo tanto, se tiene una condición fija de inicio y fin, las cuales son cuando llega la primera maleta de carga y cuando se coloque la última maleta en la bodega del avión.

Luego de validar los resultados y determinar el tipo de sistema, se procede a determinar el número de réplicas necesarias para obtener una variación del 30% en los valores de los resultados. Este valor porcentual se establece porque los tiempos en minutos son pequeños. En la tabla 5.2 se muestra el análisis, donde el ancho del intervalo específico es h^* y el número de réplicas necesarias es n^* . Con base en esto, se determina que es necesario realizar 61 réplicas del modelo. Sin embargo, esto se debe confirmar, corriendo el modelo con el número de réplicas establecido. En el anexo 13 se muestra el resultado luego de las 61 réplicas y se concluye que este es el número de réplicas final para obtener la precisión deseada.

Tabla 5.2 Análisis de resultados – determinar número de réplicas

Descripción	Promedio (min)	Half width (min)	$t_{0.975,9}$	c (min)	T_0	n	Precisión (h/prom)	h^*	n^*	Comentario
Descarga - Espera carreta	4.47	3.30	2.26	3	1.01	10	74%	1.34	61	Como la variación del promedio es alta y considerando el valor real (c) es 3, se pide una precisión del 30%.
Siberia - Espera tractor	0.11	0.19	2.26	0	1.32	10	171%	-	-	No se halla h^* ya que estos tiempos son muy pequeños y no afectan al resultado.
Descarga - Espera tractor	1.93	0.75	2.26	3	-3.22	10	39%	0.58	17	Como la variación del promedio es alta se pide una precisión del 30%.
Tiempo de carga	7.01	0.32	2.26	7	0.07	10	5%	-	-	El nivel actual de precisión es óptimo, lo cual no se halla h^*
Tiempo máximo de descarga	20.93	4.05	2.26	26	-2.83	10	19%	-	-	
Tiempo mínimo de descarga	11.14	3.09	2.26	12	-0.63	10	28%	-	-	
Cantidad de réplicas por simulación									61	

Capítulo 6. Propuesta de mejora

En el presente capítulo se utiliza el aplicativo OptQuest de Arena para encontrar la mejor solución al problema planteado, el cual es el incumplimiento de los tiempos de la operación de carga y descarga. Esta herramienta evalúa diferentes escenarios de tal manera que cumplan con las restricciones programadas y el objetivo definido.

6.1. Descripción de los modelos

Se propone optimizar dos modelos, donde el primero es el que representa la operación actual de la empresa; mientras que el segundo, es una variación del método original.

El segundo modelo consiste en descargar primero las maletas de los pasajeros de clase business, los cuales tienen mayor prioridad. Por lo tanto, la primera carreta tiene un total del 17%⁶ del total de maletas de la bodega delantera, es decir, no se emplea la capacidad máxima en la primera carreta. De la misma forma que en el primer modelo, se realiza un análisis de los datos para determinar el número de réplicas necesarias. En el anexo 14 se observa que se requieren 77 réplicas para obtener la precisión deseada.

6.2. Elementos comunes de los modelos

La optimización de ambos modelos presentan los mismos controles, variables de respuesta, restricciones y objetivo.

6.1.1. Controles

Las variables de decisión en este problema de optimización es la cantidad del recurso carretas y operadores. En cada simulación el número de recurso carreta varía entre 110 y 120, donde el valor esperado es 112 unidades. Además, para el caso de los operadores, se plantea que los grupos que

⁶ El avión A-319 tiene 96 asientos de clase turista y 20 de clase business, lo que representa el 17% de asientos. Fuente: <http://samolety.org/luchshie-mesta-v-samolete-airbus-a319-aerobus-a319-aeroflot/>

atiendan cada vuelo disminuya de 6 a 4 o 5; por lo tanto, se optimiza el sistema con las opciones de 168, 112 y 140 operadores. En conclusión, se realizan 33 simulaciones para cada opción de operadores. En la tabla 6.1 se presenta una tabla resumiendo los controles.

Tabla 6.1 Controles – OptQuest

Cantidad \ Recurso	Mínimo	Esperado	Máximo	Salto
Carretas	75	80	85	1
Operadores	112	140	168	28

6.1.2. Variables de respuesta

Estas variables son el resultado de cada simulación. En este caso se emplean valores de outputs y tallies, los cuales son tiempo máximo de descarga, tiempo mínimo de descarga, costos y el tally del tiempo de carga. El detalle de estas variables se muestra en la tabla 6.2.

Tabla 6.2 Variables de respuesta – OptQuest

Descripción	Identificación	Tipo
Tiempo máximo de descarga	MaxDes1	Output
	MaxDes2	Output
	MaxDes3	Output
	MaxDes4	Output
	MaxDes5	Output
	MaxDes6	Output
	MaxDes7	Output
	MaxDes8	Output
	MaxDes9	Output
	MaxDes10	Output
	MaxDes11	Output
	MaxDes12	Output
	MaxDes13	Output
	MaxDes14	Output
	MaxDes15	Output
	MaxDes16	Output
	MaxDes17	Output
	MaxDes18	Output
	MaxDes19	Output
	MaxDes20	Output

	MaxDes21	Output
	MaxDes22	Output
	MaxDes23	Output
	MaxDes24	Output
	MaxDes25	Output
	MaxDes26	Output
	MaxDes27	Output
	MaxDes28	Output
Tiempo mínimo de descarga	Descarga1	Output
	Descarga2	Output
	Descarga3	Output
	Descarga4	Output
	Descarga5	Output
	Descarga6	Output
	Descarga7	Output
	Descarga8	Output
	Descarga9	Output
	Descarga10	Output
	Descarga11	Output
	Descarga12	Output
	Descarga13	Output
	Descarga14	Output
	Descarga15	Output
	Descarga16	Output
	Descarga17	Output
	Descarga18	Output
	Descarga19	Output
	Descarga20	Output
	Descarga21	Output
	Descarga22	Output
	Descarga23	Output
	Descarga24	Output
	Descarga25	Output
	Descarga26	Output
	Descarga27	Output
	Descarga28	Output
Costos	Cost	Output
Tiempo de carga	tsistemacarga	Tally

6.1.3. Restricciones

Dentro de las restricciones se consideran los tiempos estipulados por el cliente, los cuales son tres, el tiempo de descarga general menor a 15 minutos, representado con un tally, el output que indica que el tiempo máximo de descarga es menor a 26 minutos y por último, el output que muestra que el tiempo mínimo de descarga es menor a 8 minutos. En la tabla 6.3 se muestra un resumen de lo mencionado.

Tabla 6.3 Restricciones – OptQuest

Descripción	Detalle (tiempo en segundos)
Tiempo de carga	tsistemacarga <= 900
Tiempo máximo de descarga	MaxDes# <= 1560
Tiempo mínimo de descarga	Descarga# <= 480

6.1.4. Objetivo

El objetivo de la optimización es minimizar los costos, para esto se emplea el output que muestra los costos finales. Esta función incluye costos fijos y variables. Por un lado, dentro del primero se considera el combustible de 56 fajas transportadoras. Mientras que para los costos variables se incluye el costo por hora de los operadores y seleccionadores cuando están ocupados y desocupados; además, el costo por las 3 horas de los tractoristas y por último, el costo por combustible de un tractor para la atención de un vuelo. En la tabla 6.1 se muestra el detalle de los costos y en la tabla 6.2, la fórmula de la función.

Tabla 6.4 Lista de costos de la operación

Descripción	Costo
Combustible de 56 fajas transportadoras	S/. 1194.57
Hora de trabajo de operadores y seleccionadores	S/. 4.68
3 horas de trabajo de tractoristas	S/. 21.09
Combustible para atender un vuelo	S/. 21.33

Tabla 6.5 Función de costos

Fórmula					
Costos	+	ResIdleCost(operador)	+	ResBusyCost(operador)	+
ResBusyCost(seleccionador1)	+			ResBusyCost(seleccionador2)	+
ResBusyCost(seleccionador3)	+			ResBusyCost(seleccionador4)	+
ResBusyCost(seleccionador5)	+			ResBusyCost(seleccionador6)	+
ResBusyCost(seleccionador7)	+			ResBusyCost(seleccionador8)	+
ResBusyCost(seleccionador9)	+			ResBusyCost(seleccionador10)	+
ResBusyCost(seleccionador11)	+			ResBusyCost(seleccionador12)	+
ResBusyCost(seleccionador13)	+			ResBusyCost(seleccionador14)	+
ResBusyCost(seleccionador15)	+			ResBusyCost(seleccionador16)	+
ResBusyCost(seleccionador17)	+			ResBusyCost(seleccionador18)	+
ResBusyCost(seleccionador19)	+			ResBusyCost(seleccionador20)	+
ResBusyCost(seleccionador21)	+			ResBusyCost(seleccionador22)	+
ResBusyCost(seleccionador23)	+			ResBusyCost(seleccionador24)	+
ResBusyCost(seleccionador25)	+			ResBusyCost(seleccionador26)	+
ResBusyCost(seleccionador27)	+			ResBusyCost(seleccionador28)	+
ResIdleCost(seleccionador1)	+			ResIdleCost(seleccionador2)	+
ResIdleCost(seleccionador3)	+			ResIdleCost(seleccionador4)	+
ResIdleCost(seleccionador5)	+			ResIdleCost(seleccionador6)	+
ResIdleCost(seleccionador7)	+			ResIdleCost(seleccionador8)	+
ResIdleCost(seleccionador9)	+			ResIdleCost(seleccionador10)	+
ResIdleCost(seleccionador11)	+			ResIdleCost(seleccionador12)	+
ResIdleCost(seleccionador13)	+			ResIdleCost(seleccionador14)	+
ResIdleCost(seleccionador15)	+			ResIdleCost(seleccionador16)	+
ResIdleCost(seleccionador17)	+			ResIdleCost(seleccionador18)	+
ResIdleCost(seleccionador19)	+			ResIdleCost(seleccionador20)	+
ResIdleCost(seleccionador21)	+			ResIdleCost(seleccionador22)	+
ResIdleCost(seleccionador23)	+			ResIdleCost(seleccionador24)	+
ResIdleCost(seleccionador25)	+			ResIdleCost(seleccionador27)	+
ResIdleCost(seleccionador26)	+			ResIdleCost(seleccionador28)	+
DAVG(tractor1.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor2.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor3.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor4.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor5.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor6.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor7.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor8.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor9.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor10.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor11.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor12.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor13.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor14.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor15.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor16.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor17.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor18.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor19.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor20.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor21.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor22.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor23.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor24.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor25.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor26.NumberScheduled)	+
DAVG(tractor27.NumberScheduled)	+			DAVG(tractor28.NumberScheduled)	+
(21.33 + 21.09)				*	

Capítulo 7. Evaluación técnica y económica

En este capítulo se evalúan los resultados de la optimización de los dos modelos planteados, luego se detalla la inversión necesaria para implementar cada propuesta de mejora y se elabora un flujo de caja con indicadores económicos y financieros. Finalmente, a partir de la viabilidad técnica y económica, se selecciona la mejor propuesta.

7.1. Evaluación técnica

En este punto se analizan los resultados de los dos modelos luego de ser optimizados en OptQuest. Principalmente, se identifica si se llega a cumplir con las restricciones planteadas en el punto 6.1.3, las cuales hacen referencia a los tiempos estándares de operación estipulados por el cliente de la empresa aeroportuaria.

7.1.1. Resultado del modelo 1

A partir de los resultados de la optimización, que se encuentran en el anexo 15, se elabora un resumen que se muestra en la tabla 7.1 y se elaboran las siguientes conclusiones.

- No existe simulación factible porque no se cumple con la restricción del tiempo mínimo de descarga.
- La mejor simulación es la número 28, porque se tienen menores costos, se cumplen los estándares de tiempo máximo de descarga y promedio de carga en el 100% de las atenciones y se logra cumplir con el tiempo mínimo de descarga en la mayor cantidad de servicios, en el 50%.
- Se concluye que la operación de descarga es causante que ninguna simulación sea factible, enfatizando las primeras maletas de las bodegas, ya que estas son las que fijan el tiempo mínimo de descarga. Al ser la primera operación, los tractores y las carretas están disponibles en su totalidad, lo cual no hay tiempo de espera.

Tabla 7.1 Resumen de resultados de la optimización del modelo 1

Iteración.	Resultado	Carreta	Operador	Costo	Tiempo mínimo de descarga				Tiempo máximo de descarga		Tiempo promedio de carga	
					Menor a 8 min.		Mayor a 8 min.		Menor a 26 min.		Menor a 15 min.	
					Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio
28	No es viable	84	112	4360.82	50%	6.61	50%	9.17	100%	15.96	100%	6.97
6	No es viable	85	112	4360.82	46%	6.46	54%	9.09	100%	15.95	100%	6.95
9	No es viable	80	112	4360.82	46%	6.58	54%	9.17	100%	16.11	100%	6.91
12	No es viable	82	112	4360.82	46%	6.51	54%	9.15	100%	16.05	100%	6.96
14	No es viable	78	112	4360.82	46%	6.64	54%	9.26	100%	16.20	100%	6.94
18	No es viable	79	112	4360.82	46%	6.60	54%	9.18	100%	16.18	100%	6.89
20	No es viable	81	112	4360.82	46%	6.55	54%	9.19	100%	16.10	100%	6.96
21	No es viable	83	112	4360.82	46%	6.56	54%	9.10	100%	16.06	100%	7.00
2	No es viable	75	112	4360.82	43%	6.70	57%	9.22	100%	16.34	100%	6.98
19	No es viable	77	112	4360.82	43%	6.58	57%	9.17	100%	16.28	100%	6.94
25	No es viable	76	112	4360.82	43%	6.61	57%	9.23	100%	16.41	100%	6.95
26	No es viable	84	140	4747.49	50%	6.61	50%	9.17	100%	15.96	100%	6.97
1	No es viable	80	140	4747.49	46%	6.58	54%	9.17	100%	16.11	100%	6.91
4	No es viable	78	140	4747.49	46%	6.64	54%	9.26	100%	16.20	100%	6.94
8	No es viable	85	140	4747.49	46%	6.46	54%	9.09	100%	15.95	100%	6.95
13	No es viable	83	140	4747.49	46%	6.56	54%	9.10	100%	16.06	100%	7.00
16	No es viable	82	140	4747.49	46%	6.51	54%	9.15	100%	16.05	100%	6.96
23	No es viable	81	140	4747.49	46%	6.55	54%	9.19	100%	16.10	100%	6.96
29	No es viable	79	140	4747.49	46%	6.60	54%	9.18	100%	16.18	100%	6.89
11	No es viable	75	140	4747.49	43%	6.70	57%	9.22	100%	16.34	100%	6.98
30	No es viable	76	140	4747.49	43%	6.61	57%	9.23	100%	16.41	100%	6.95
33	No es viable	77	140	4747.49	43%	6.58	57%	9.17	100%	16.28	100%	6.94

32	No es viable	84	168	5134.17	50%	6.61	50%	9.17	100%	15.96	100%	6.97
3	No es viable	85	168	5134.17	46%	6.46	54%	9.09	100%	15.95	100%	6.95
5	No es viable	83	168	5134.17	46%	6.56	54%	9.10	100%	16.06	100%	7.00
10	No es viable	79	168	5134.17	46%	6.60	54%	9.18	100%	16.18	100%	6.89
15	No es viable	81	168	5134.17	46%	6.55	54%	9.19	100%	16.10	100%	6.96
17	No es viable	78	168	5134.17	46%	6.64	54%	9.26	100%	16.20	100%	6.94
24	No es viable	80	168	5134.17	46%	6.58	54%	9.17	100%	16.11	100%	6.91
31	No es viable	82	168	5134.17	46%	6.51	54%	9.15	100%	16.05	100%	6.96
7	No es viable	75	168	5134.17	43%	6.70	57%	9.22	100%	16.34	100%	6.98
22	No es viable	76	168	5134.17	43%	6.61	57%	9.23	100%	16.41	100%	6.95
27	No es viable	77	168	5134.17	43%	6.58	57%	9.17	100%	16.28	100%	6.94



De la tabla anterior, se promedian los tiempos de la mejor simulación, la número 28, y se comparan con el tiempo promedio del método original. Este resultado se muestra en la tabla 7.2.

Tabla 7.2 Comparación de tiempos entre el modelo original y el modelo 1 optimizado

Tiempos (min)	Método original	Modelo 1 mejorado	Diferencia
Mínimo de descarga	11.14	7.87	3.27
Máximo de descarga	20.93	15.95	4.98
Promedio de carga	7.01	6.95	0.06

7.1.2. Resultado del modelo 2

Los resultados de la optimización se muestran en el anexo 16. A partir de este, en la tabla 7.3 se muestra un resumen de los resultados de optimización de este modelo, del cual se concluye lo siguiente:

- La mejor simulación es la número 11, porque en este escenario se minimizan los costos y se cumplen los tres estándares de tiempos mencionados empleando el mínimo número de carretas.
- Se requieren 79 carretas y 112 operadores

Finalmente, en la tabla 7.4 se muestra un cuadro comparando los tiempos de la optimización del segundo modelo con el método original.

Tabla 7.3 Resumen de resultados de la optimización del modelo 2

Iteración	Resultado	Carretas	Operadores	Costo	Tiempo mínimo de descarga				Tiempo máximo de descarga		Tiempo promedio de carga	
					Menor a 8 min.		Mayor a 8 min.		Menor a 26 min.		Menor a 15 min.	
					Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio	Cantidad	Promedio
1		80	112	4356.48	100%	6.21			100%	18.70	100%	6.71
2	No viable	75	112	4356.48	96%	6.53	4%	8.21	100%	19.16	100%	6.72
3		85	112	4356.48	100%	5.98			100%	18.35	100%	6.83
4	No viable	78	112	4356.48	96%	6.29	4%	8.05	100%	18.87	100%	6.72
5		83	112	4356.48	100%	6.05			100%	18.46	100%	6.75
6	No viable	76	112	4356.48	96%	6.43	4%	8.18	100%	19.06	100%	6.78
7		82	112	4356.48	100%	6.12			100%	18.55	100%	6.80
8		84	112	4356.48	100%	6.00			100%	18.39	100%	6.75
9		81	112	4356.48	100%	6.15			100%	18.58	100%	6.73
10	No viable	77	112	4356.48	96%	6.35	4%	8.11	100%	18.88	100%	6.77
11		79	112	4356.48	100%	6.27			100%	18.75	100%	6.77
12		80	140	4746.16	100%	6.22			100%	18.69	100%	6.72
14	No viable	75	140	4746.16	86%	6.34	14%	8.11	100%	19.17	100%	6.75
16	No viable	78	140	4746.16	96%	6.30	4%	8.13	100%	18.87	100%	6.72
18		85	140	4746.16	100%	5.97			100%	18.36	100%	6.86
21		82	140	4746.16	100%	6.12			100%	18.58	100%	6.82
22		81	140	4746.16	100%	6.16			100%	18.61	100%	6.76
23		84	140	4746.16	100%	6.01			100%	18.40	100%	6.76
24	No viable	76	140	4746.16	96%	6.44	4%	8.24	100%	19.08	100%	6.78
25	No viable	77	140	4746.16	96%	6.36	4%	8.19	100%	18.87	100%	6.78
27		79	140	4746.16	100%	6.28			100%	18.74	100%	6.77

29		83	140	4746.16	100%	6.06			100%	18.48	100%	6.76
13		80	168	5134.17	100%	6.22			100%	18.69	100%	6.72
15		85	168	5134.17	100%	5.97			100%	18.36	100%	6.86
17		83	168	5134.17	100%	6.06			100%	18.48	100%	6.76
19	No viable	75	168	5134.17	86%	6.34	14%	8.11	100%	19.17	100%	6.75
20	No viable	77	168	5134.17	96%	6.36	4%	8.19	100%	18.87	100%	6.78
26		81	168	5134.17	100%	6.16			100%	18.61	100%	6.76
28		82	168	5134.17	100%	6.12			100%	18.58	100%	6.82
30	No viable	76	168	5134.17	96%	6.44	4%	8.24	100%	19.08	100%	6.78
31	No viable	78	168	5134.17	96%	6.30	4%	8.13	100%	18.87	100%	6.72
32		79	168	5134.17	100%	6.28			100%	18.74	100%	6.77
33		84	168	5134.17	100%	6.01			100%	18.40	100%	6.76

Tabla 7.4 Comparación de tiempos entre el modelo original y el modelo 2 optimizado

Tiempos (min)	Método original	Modelo 2 mejorado	Diferencia
Mínimo de descarga	11.14	6.27	4.87
Máximo de descarga	20.93	18.75	2.18
Promedio de carga	7.01	6.77	0.24

7.2. Evaluación económica y financiera

En este punto se establece el monto de inversión para ejecutar cada propuesta y se identifican los ingresos y egresos provenientes de la implementación de cada proyecto de mejora, para evaluarlos mediante el análisis de indicadores económicos y financieros, que se obtienen del flujo de caja de cada modelo.

7.2.1. Inversión

La mejora en ambos modelos implica la adquisición de carretas, 34 para el primer modelo y 29 para el segundo, la licencia del software Arena Professional Edition y una persona que se encargue de elaborar y hacer seguimiento del modelo por un periodo de dos años. Asimismo, el número de operadores que se encargan de atender un vuelo disminuye a cuatro por grupo. En la tabla 7.5 se muestran los costos de inversión.

Tabla 7.5 Costos de inversión

Detalle	Monto
Precio unitario de carreta	338.98 dólares ⁷
Precio del software Arena Professional	19,067.80 dólares ⁸
Sueldo mensual del encargado del modelo	2,500 soles

7.2.2. Flujos de caja

El flujo de caja se elabora para cada propuesta y se presentan los ingresos y egresos provenientes de la implementación de cada proyecto. Para su elaboración, se toman las siguientes consideraciones:

- Al disminuir la cantidad de operadores por vuelo, existen 56 personas disponibles y considerando que cuatro atienden un avión, es posible realizar 14 servicios más por día.
- Al generarse mayor cantidad de vuelos, se necesitan más tractoristas y seleccionadores, 14 para cada uno. Además, al

⁷ Valor sin IGV.

⁸ Valor sin IGV.

requerirse mayor cantidad de fajas transportadoras y tractores, el costo del combustible también se incrementa.

- En el caso de la propuesta 1, se considera que en el 50% de vuelos no se cumple el estándar de tiempo mínimo, este porcentaje se determina en base al resultado de la simulación número 28 de la tabla 7.1. Asimismo, esta falla de calidad genera un costo de 2.98% del precio del servicio. Este cálculo se explica a continuación.

Ante estas fallas de calidad, el cliente envía notificaciones a la empresa, esta toma como medida de acción el seguimiento de la operación por un mes, el cual incluye a dos practicantes del área de ingeniería, el analista de la misma área y un analista del área de calidad. Entonces, se incurre a un costo de 130.62 soles que refleja los sueldos en 3 horas. Asimismo, este monto entre el número de incumplimientos por día da un valor de 9.33 soles, que es el 2.98% del precio del servicio.

- Se toma una deuda del 13.57% del monto de la inversión total, por la relación deuda capital que toma la empresa. Además, este préstamo presenta una tasa anual de 5.29%⁹.
- El COK se calcula mediante el método CAPM, utilizando la siguiente fórmula:

$$COK = r_f + \beta_{proy} \times [r_m - r_f] + riesgo\ país$$

$$\beta_{proy} = \left[1 + \frac{D}{E} (1 - IR) \right] \times \beta$$

Como se observa, es necesario determinar el β_{proy} para el cálculo del costo de oportunidad. Los datos y cálculos se muestran en la tabla 7.6.

⁹ Fuente: El portal de la Superintendencia de Banca, Seguros y AFP.

Tabla 7.6 Cálculo del costo de oportunidad (COK)

Indicador	Valor	Fuente
D/C	0.1357	Dato de la empresa
r_f	0.0406%	Tasa de interés de los bonos de USA. ¹⁰
Riesgo país	1.82%	Estadística del BCR ¹¹
$[r_m - r_f]$	8.45%	Dato del libro Finanzas Corporativas
Impuesto a la Renta	30%	Datos de SUNAT
β	0.82	β despalancado de empresas del rubro aéreo de Estados Unidos. ¹²
β_{proy}	0.8978	
COK	9.45	

- Debido a que la tasa de retorno del inversionista, el indicador COK, es mayor a la tasa de financiamiento, se plantea pedir un préstamo por un mes.
- El valor del indicador WACC se calcula con la siguiente fórmula:

$$WACC = COK \times \frac{Capital}{Inversión} + k_{deuda} \times (1 - T) \times \frac{Deuda}{Inversión}$$

El detalle del cálculo de este indicador se muestra en la tabla 7.7.

Tabla 7.7 Costo del indicador WACC

Indicador	Valor
COK	9.45%
Capital	0.8643
Deuda	0.1357
Inversión	1
k_{deuda}	5.29%
T	0.30
WACC	8.67%

En la tabla 7.8 se muestra un resumen de datos que se emplean para elaborar el flujo de caja.

¹⁰ Fuente: <http://economia.terra.com.pe/mercados/bonos/default.aspx>

¹¹ El indicador consultado del mes de setiembre es > spread - EMBIG Perú (pbs) de las estadísticas del Banco Central de Reserva del Perú. Fuente: <http://estadisticas.bcrp.gob.pe/index.asp?sFrecuencia=D>

¹² Aswath Damodaran, http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html

Tabla 7.8 Resumen de datos

Datos	Cantidad	Fuente
Número de atenciones	14 más por día	Análisis en el punto 7.2.2
Precio carreta	338.98 dólares	Dato del fabricante ¹³
Software Arena Professional Edition	19,067.80 dólares	Costo del mercado ¹⁴
Tipo de cambio	2.7 soles	Dato de BCRP
Costo de litro GLP	1.57	Dato de Osinergmin
Capacidad del balón de gas	38 litros	Datos de la empresa
Balones de GLP por vuelo	1.02	
Sueldo del seleccionador por hora	4.6865 soles	
Sueldo tractorista por hora	7.0313 soles	
Precio del servicio	313.16 soles	
Monto a financiar	13.57% de la inversión	
Tasa de interés anual para préstamos a grandes empresas	5.29%	Dato de la entidad financiera
COK	9.45%	Dato calculado
WACC	8.38%	
Costo de incumplimiento de calidad	2.98% del ingreso por servicio incumplido	

¹³ La cotización fue realizada por la empresa Fundición y Maestranza Industrial S.R.L.

¹⁴ Fuente: Rockwell Automation.
http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/arena-sg001_-en-p.pdf

a) Flujo de caja proyectado del modelo 1

Tabla 7.9 Flujo de caja proyectado 1 – Desde enero 2014 hasta agosto 2014

	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	ago-14
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Costos por falla de calidad	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08
Implementación de mejora								
Arena Professional	51,483.06							
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas	31,118.36							
Total de egresos	127,230.87	44,629.44						
Flujo de caja económico	8,680.57	91,282.00						
Financiamiento								
Préstamo	11,209.01							
Amortización		11,209.01						
Intereses		48.25						
Flujo de caja financiero	19,889.58	80,024.73	91,282.00	91,282.00	91,282.00	91,282.00	91,282.00	91,282.00

Tabla 7.10 Flujo de caja proyectado 1 – Desde septiembre 2014 hasta abril 2015

	sep-14	oct-14	nov-14	dic-14	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Costos por falla de calidad	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08
Implementación de mejora								
Arena Professional								
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas								
Total de egresos	44,629.44							
Flujo de caja económico	91,282.00							
Financiamiento								
Préstamo								
Amortización								
Intereses								
Flujo de caja económico	91,282.00							

Tabla 7.11 Flujo de caja proyectado 1 – Desde mayo 2015 hasta diciembre 2015

	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Costos por falla de calidad	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08	2,025.08
Implementación de mejora								
Arena Professional								
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas								
Total de egresos	44,629.44							
Flujo de caja económico	91,282.00							
Financiamiento								
Préstamo								
Amortización								
Intereses								
Flujo de caja financiero	91,282.00							

b) Flujo de caja proyectado del modelo 2

Tabla 7.12 Flujo de caja proyectado 2 – Desde enero 2014 hasta agosto 2014

	ene-14	feb-14	mar-14	abr-14	may-14	jun-14	jul-14	ago-14
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Implementación de mejora								
Arena Professional	51,483.06							
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas	26,542.13							
Total de egresos	120,629.56	42,604.36						
Flujo de caja económico	15,281.88	93,307.08						
Financiamiento								
Préstamo	10,588.02							
Amortización		10,588.02						
Intereses		45.58						
Flujo de caja financiero	25,869.90	82,673.48	93,307.08	93,307.08	93,307.08	93,307.08	93,307.08	93,307.08

Tabla 7.13 Flujo de caja proyectado 2 – Desde septiembre 2014 hasta abril 2015

	sep-14	oct-14	nov-14	dic-14	ene-15	feb-15	mar-15	abr-15
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Implementación de mejora								
Arena Professional								
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas								
Total de egresos	42,604.36							
Flujo de caja económico	93,307.08							
Financiamiento								
Préstamo								
Amortización								
Intereses								
Flujo de caja financiero	93,307.08							

Tabla 7.14 Flujo de caja proyectado 2 – Desde mayo 2015 hasta diciembre 2015

	may-15	jun-15	jul-15	ago-15	sep-15	oct-15	nov-15	dic-15
Ingreso								
Por servicio prestado	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44	135,911.44
Total de ingresos	135,911.44							
Egresos								
Salarios								
Tractoristas	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75	9,154.75
Seleccionadores	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82	6,101.82
Combustible	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29	26,410.29
Implementación de mejora								
Arena Professional								
Encargado del manejo del modelo	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50	937.50
Carretas								
Total de egresos	42,604.36							
Flujo de caja económico	93,307.08							
Financiamiento								
Préstamo								
Amortización								
Intereses								
Flujo de caja financiero	93,307.08							

7.3. Análisis general de las propuestas de mejora

La elección de la propuesta de mejora se realiza con base en base a los resultados de las evaluaciones técnicas y económicas presentadas en los puntos anteriores. En la tabla 7.13 se muestra un cuadro resumen. Cabe resaltar que la propuesta 1 implica que el método original se mantenga aumentando el número de recursos carretas a 84 y reduciendo el número de operadores a 4 por vuelo; mientras que en la segunda propuesta, se requieren 79 carretas y 4 operadores por vuelo.

Tabla 7.15 Cuadro comparativo de la evaluación económica y técnica

	Propuesta 1	Propuesta 2
Evaluación técnica	En el 50% de vuelos no se cumple el tiempo mínimo de descarga.	Se cumplen todos los estándares de tiempo
Inversión proyectada	S/.82,601.424	S/. 78,025.19
Monto financiado	S/.11,209.01	S/. 10,588.02
Interés del financiamiento	S/.48.25	S/.45.58
VANe	S/. 906,114.61	S/. 932,625.39
VANf	S/. 906,964.32	S/. 933,428.03
B/C	2.60	2.73

Al analizar los resultados, se infiere que ambas opciones son viables económicamente, ya que los valores actuales netos económicos y financieros son positivos y además, evaluando el valor presente de los ingresos con el de los egresos, se obtienen mayores beneficios. Sin embargo, con la propuesta 1 no se cumplen los estándares de tiempo, teniendo que incurrir en costos por fallas de calidad en la operación y un desprestigio de la empresa. Por lo tanto, considerando el aspecto técnico y económico, se concluye que la mejor propuesta es la segunda.

Capítulo 8. Conclusiones y recomendaciones

Este trabajo de investigación estudia las operaciones en tierra de las aerolíneas, enfocándose en el servicio de estiba y desestiba de equipajes. A partir de este se presentan las siguientes conclusiones y recomendaciones.

8.1. Conclusiones

Las conclusiones de este proyecto de investigación se presentan a continuación.

- El proceso de atención de aeronaves es el más importante de la unidad de negocio Rampa de la empresa aeroportuaria, porque a diferencia de los otros procesos, genera mayor ganancia, utiliza mayor cantidad de recursos y frecuentemente presenta problemas.

Al analizar los indicadores de los dos meses de mayor demanda, se muestra un nivel de cumplimiento del tiempo de desestiba del 79% y 76%, siendo 80% el nivel requerido por la empresa. Mediante un estudio cuantitativo de todas las posibles causas, evaluando la probabilidad e impacto de cada una, se determina que la más importante es que no existen suficientes recursos para la operación. Por lo tanto, como plan de acción, se plantea elaborar un modelo de simulación, ya que además de determinar el número necesario de recursos, se puede implementar un programa de mantenimiento de equipos y modificar el método actual de la operación.

- La primera propuesta de mejora consiste en optimizar el número de recursos empleando el método original de la empresa. Los resultados obtenidos, que se muestran a continuación, se analizan de manera técnica y económica.

Los mejores resultados de la operación, para la primera propuesta, se obtienen al emplear 84 carretas y 112 operadores, aumentando el número del primer recurso en 34 y disminuyendo el total de operadores en 56; es decir, utilizando 4 operadores por vuelo. Sin embargo este resultado no

cumple con todas las restricciones planteadas, ya que el servicio prestado al 50% de aviones sobrepasa el estándar de tiempo mínimo de descarga; no obstante, al analizar la situación, este problema no se debe a la espera por algún recurso, ya que al ser la primera operación de cada avión, se disponen totalmente de los recursos carreta y tractor.

Al comparar los resultados del modelo optimizado con el original, se obtienen mejoras en los tiempos de la operación, por ejemplo, el tiempo máximo de descarga promedio disminuye 4.98 minutos, de 20.93 a 15.95 minutos. Además, el tiempo promedio de carga varía de 7.01 a 6.95 minutos. Y por último, a pesar de que no en todos los aviones cumplen con el estándar de tiempo mínimo de descarga, el promedio disminuye 3.27 minutos de 11.14 a 7.87.

Implementar la primera propuesta implica tener una inversión de S/.82,601.424, el cual incluye la adquisición del software Arena Professional Edition y 34 carretas, y además, se requiere una persona que se encargue del mantenimiento del modelo por dos años. Este cambio tiene como resultado un margen beneficio costo de 2.6 y un valor actual neto económico de S/.906,114. Sin embargo, la empresa tiene como política mantener una proporción deuda capital de 13.57%, entonces al adquirir un préstamo por un mes de S/.11,209 a una tasa de 5.29% anual, se obtiene un monto de S/.906,964 como valor actual neto financiero. Por lo tanto, el proyecto es viable.

- La segunda propuesta consiste en variar el método original de descarga, priorizando la atención de las maletas de los pasajeros de clase business. Los resultados técnicos y económicos se muestran a continuación.

El resultado, luego de la optimización de este modelo, es que se cumplen todos los estándares de tiempo al aumentar la disponibilidad de recursos a 79 carretas y al disminuir el número de operadores a 112, es decir, a 4 por grupo.

Comparando los resultados con el de la operación actual, el tiempo mínimo de descarga se cumple en su totalidad, disminuyendo el promedio de 6.27 a 4.87 minutos. Asimismo, el tiempo máximo de descarga promedio se reduce en 2.18 minutos, de 20.93 a 18.75 minutos. Y por último, el tiempo promedio de carga disminuye de 7.01 a 6.77 minutos.

La inversión para esta segunda propuesta disminuye en 4,576 soles debido a que se requiere adquirir menor cantidad de carretas, cuyo total es S/. 78,025. Este proyecto logra un margen beneficio costo de 2.73 y un valor actual neto económico de S/. 932,625, S/.26,510 más que la primera propuesta. Asimismo, al analizar los resultados con un financiamiento por un mes de S/. 10,588 a una tasa de 5.29% anual, se obtiene que el proyecto, también es viable con un valor neto actual financiero de S/. 933,428; S/.26,463 más que el caso anterior.

- Luego de haber analizado los dos escenarios, se concluye que es conveniente la implementación de la segunda propuesta, ya que se obtienen mayores beneficios económicos y se cumplen con los tiempos solicitados por el cliente, mejorando el prestigio de las operaciones de la empresa aeroportuaria.

8.2. Recomendaciones

El modelo de simulación puede ser modificado para atender más necesidades; por lo tanto, a continuación, se presentan ideas complementarias para colaborar con el estudio original.

- Se puede ampliar el alcance del estudio con la operación de estiba y desestiba de aviones internacionales de fuselaje ancho, que requiere un proceso diferente, ya que se utilizan diferentes equipos y mayor cantidad de personas para la atención.
- Evaluar la posibilidad de incluir la carga proveniente de los almacenes de la empresa aeroportuaria, ya que con esta modificación se incrementa el recorrido que realiza un tractor.

- Al correr el modelo 2 con el número óptimo de recursos, se obtiene que la utilización promedio de los tractores es de 16%, esto se debe a que cada tractor pertenece a un vuelo. Por lo tanto, se plantea modificar el modelo para que los tractores atiendan a los vuelos que lo necesiten primero. De esta manera, se tiene como hipótesis que con esta modificación se puede reducir el número de tractores, tractoristas y costos por combustible.



Bibliografía

- Altiok, T., & Melamed, B. (2007). *Simulation Modeling and Analysis with ARENA*. Estados Unidos: Academic Press Inc.
- Arvelo, A. F. (1998). *Capacidad de los procesos industriales: Métodos exigidos por las normas ISO-9000*. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello.
- Cao Abad, R. (2002). *Introducción a la simulación y a la Teoría de colas*. Coruña: Netbiblo.
- Córdova, M. (2003). *Estadística Discriptiva e Inferencial*. Lima: Moshera S.R.L.
- Córdova, M. (2008). *Estadística Aplicada*. Lima: Moshera.
- Damodaran, A. (2013, Enero). *Betas by sector*. Retrieved Noviembre 2013, from http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/Betas.html
- Evans, M. J., & Rosenthal, J. (2004). *Probabilidad y estadística: La ciencia de la incertidumbre*. New York: Reverté S.A.
- Gómez, M. (2006). *Introducción a la metodología de la investigación científica*. Córdova: Brujas.
- Guasch Petit, A. (2002). *Modelado y simulación: Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios*. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya.
- Inc, R. A. (2007). *Optquest for Arena: User's guide*. Estados Unidos: Rockwell Automation Technologies Inc.
- Jerry Banks, J. C. (2010). *Discrete-event system simulation*. Montreal: Prentice Hall.
- Kelton, W. D. (2010). *Simulation with Arena*. Boston: McGraw-Hill Higher Education.
- Law, A. (2007). *Simulation Modeling and Analysis*. New York: McGraw-Hill.
- Miller, I., & Freund, J. (1988). *Probabilidad y estadística para ingenieros*. New Jersey: Prentice-Hall.
- Osinergmin. (2010). Retrieved from <http://www.osinergmin.gob.pe/newweb/pages/Publico/1.htm?2412>
- Perú, B. C. (n.d.). *Consulta a series estadísticas del BCRP*. Retrieved Noviembre 2013, from <http://estadisticas.bcrp.gob.pe/index.asp?sFrecuencia=D>

- Rockwell Automation.* (n.d.). Retrieved Noviembre 2013, from http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/sg/arena-sg001_-en-p.pdf
- Ross, S. M. (2002). *Probabilidad y estadística para ingeniería y ciencias*. México, D.F.: McGraw-Hill.
- Samolety.* (n.d.). Retrieved Agosto 2013, from <http://samolety.org/luchshie-mesta-v-samolete-airbus-a319-aerobus-a319-aeroflot/>
- SUNAT.* (2012). Retrieved Octubre 2013, from <http://www.sunat.gob.pe/>
- Taha, H. (2004). *Investigación de Operaciones*. México: Pearson Education.
- Terra Perú.* (n.d.). Retrieved Noviembre 2013, from <http://economia.terra.com.pe/mercados/bonos/default.aspx>
- Winston, W. L. (2005). *Operations research : applications and algorithms*. México, D.F.: Thomson.