

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Revisión de las Leyes de la Física de Fábrica referentes a  
Procesos Productivos por Lote a través de la Aplicación de  
Simulación y Técnicas de Optimización”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERA INDUSTRIAL**

Presentada por:

María Gabriela Parra Chico

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por el camino recorrido durante todos estos años, a mis padres por su amor y motivación constante, a César por el apoyo y confianza que me ha brindado. A todos los profesores de la carrera por impulsar el desarrollo de nuestra formación profesional, y mi más sincero agradecimiento al Ing. Marcos Buestán, Director de Tesis por su invaluable ayuda.

## **DEDICATORIA**

A MIS PADRES:

Gonzalo y Edi María

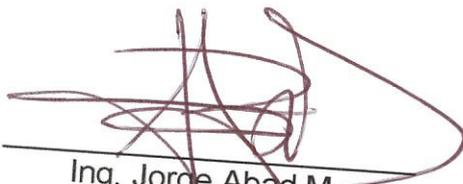
A MI HERMANO:

Gonzalo Alberto

# TRIBUNAL DE GRADUACION

  
Dr. Kleber Barcia V.  
DELEGADO DECANO FIMCP  
VOCAL- PRESIDENTE

  
Ing. Marcos Buestán B.  
DIRECTOR DE TESIS

  
Ing. Jorge Abad M,  
VOCAL



CIB -ESPOL

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

  
\_\_\_\_\_  
Marfa Gabriela Parra Chico



## RESUMEN

El altísimo nivel de competitividad en los mercados globales requiere que las diferentes empresas se ajusten a las necesidades y requerimientos de los clientes y consumidores, controlando y reconfigurando al mismo tiempo los procesos internos de forma tal de entregar a dichos clientes el mayor valor agregado en sus productos, a través de la optimización de sus procesos.

Operaciones como el manejo de materiales son la causa de que se empleen grandes cantidades de tiempo y recursos en actividades que no agregan valor al producto. Así también factores como el movimiento y procesamiento en grandes tamaños de lote o en muy pequeñas cantidades pueden llegar a disparar los tiempos de ciclo y reducir la productividad de una empresa; pudiendo ocasionar grandes tiempos de espera, y altos índices de producto en proceso. Un inadecuado tamaño de lote es causante además de altos niveles de variabilidad y por ende de bajos indicadores de desempeño.

Estudios efectuados en el año 2004, por la Escuela de Negocios de Cardiff, en Reino Unido, han determinado que en la mayoría de las empresas tradicionales un 95% de las actividades no añaden ningún tipo de valor al producto final y que

la actividad donde más existe desperdicio de tiempo es en las operaciones de manejo interno de materiales. Es por esto que ésta investigación está enfocada en recalcar la importancia de establecer tamaños de lote de proceso adecuados que permitan optimizar los tiempos de ciclo y a su vez el nivel de productividad.

La determinación del tamaño de lote óptimo tiene una profunda influencia en las características de un proceso y se pueden generar grandes beneficios si se logra entender la dinámica y comportamiento de éstos. La lógica fundamental de las operaciones con lotes busca reducir los “no productivos” setups y maximizar las operaciones “productivas” de procesamiento. Lo ideal es encontrar el valor óptimo que nos permita obtener un balance entre estos factores, de tal forma que sea posible mejorar el desempeño del sistema de producción.

Para entender un poco más de la dinámica de las operaciones con lote se presentará un capítulo en el que se describen las generalidades del Manejo de Lotes y también se hablará acerca de SimRunner como herramienta de optimización.

En un siguiente capítulo se demostrarán las Leyes de la Física de Fábrica que hacen referencia a Operaciones con Lote de Proceso y que ayudará a comprender la lógica de su funcionamiento.

Adicionalmente, con el fin de avanzar con la investigación se presentará un caso de estudio en el que se determinará el tamaño de lote óptimo en cada una de las operaciones, éstos serán calculados a través de la técnica de optimización desarrollada por Hopp & Spearman y algoritmos evolutivos empleados por SimRunner. Una vez determinados los tamaños de lote óptimos mediante estos dos métodos, se compararán estos resultados empleando para ello un modelo de simulación que permitirá determinar el tamaño de lote que proporciona los mejores resultados con respecto a los indicadores de desempeño del proceso.

Finalmente, se aplicará la técnica seleccionada como la más eficiente en el caso de estudio propuesto y se evaluarán los indicadores de desempeño: Producto en Proceso (WIP), Tiempo de Ciclo (CT) y tasa de producción (TH).

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL .....	V
ABREVIATURAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XI
ÍNDICE DE TABLAS .....	XV
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Objetivo General.....	8
1.3. Objetivos Específicos.....	9
1.4. Planteamiento del Problema.....	10
1.5. Metodología.....	12
CAPÍTULO 2	
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	16
2.1. Generalidades del manejo de lotes.....	17

2.1.1. Tipos de Lote.....	17
2.1.2. Importancia de la determinación de un tamaño óptimo de lote en una Línea de Producción.....	19
2.1.3. Leyes establecidas por la Física de Fábrica para el manejo de lotes.....	21
2.1.4. Fórmulas para determinar tamaños de lote.....	23
2.1.5. Cálculo de tamaño óptimo de lote.....	36
2.2. Aspectos Generales de la Herramienta SimRunner .....	41
2.2.1. Fases del SimRunner.....	41
2.2.2. SimRunner como herramienta de optimización.....	48
2.2.3. Beneficios.....	49

### CAPÍTULO 3

3. DEMOSTRACIÓN DE LA LEY ESTABLECIDA POR LA FÍSICA DE FÁBRICA PARA EL MANEJO DE LOTES DE PROCESO.....	52
3.1. Demostración de la Ley de Lote de Proceso.....	52
3.1.1. Demostración de la Ley para el caso de Lote Serial Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman.....	53
3.1.2. Demostración de la Ley para el caso de Lote Serial con Técnica Split empleando Simulación.....	63

3.1.3. Demostración de la Ley para el caso de Lote Serial Non Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman.....	71
3.1.4. Demostración de la Ley para el caso de Lote Serial con Técnica Non Split empleando Simulación .....	76
3.1.5. Demostración de la Ley para el caso de Lote Paralelo empleando la Técnica de Hopp & Spearman.....	80
3.1.6. Demostración de la Ley para el caso de Lote Paralelo empleando Simulación.....	87

#### CAPÍTULO 4

4. CASO DE ESTUDIO.....	93
4.1. Objetivo del Modelo.....	93
4.2. Fuentes de Información.....	94
4.2.1. Caso de Estudio.....	95
4.3. Lógica del proceso a modelar.....	98
4.4. Asunciones del Modelo.....	99
4.5. Procedimiento para la elaboración del Modelo de Simulación.....	101
4.5.1. Creación de Entidades.....	101
4.5.2. Creación de Locaciones.....	103
4.5.3. Creación de Variables.....	105

4.5.4. Creación de Macros.....	107
4.5.5. Creación de Arribos.....	108
4.5.6. Programación del Modelo.....	109
4.6. Layout del Modelo de Simulación.....	110
4.7. Características Relevantes de la Lógica Aplicada en el modelo de simulación.....	112

## CAPÍTULO 5

5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN.....	120
5.1. Aplicación de las Técnicas de Optimización.....	121
5.1.1. Cálculo del tamaño óptimo de Lote Serial Split empleando la técnica de Hopp & Spearman.....	122
5.1.2. Cálculo del tamaño óptimo de Lote Serial con técnica Split empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner.....	124
5.1.3. Cálculo del tamaño óptimo de Lote Serial Non Split empleando la técnica de Hopp & Spearman.....	133
5.1.4. Cálculo del tamaño óptimo de Lote Serial con Técnica Non Split empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner....	135
5.1.5. Cálculo del tamaño óptimo de Lote Paralelo empleando la Técnica de Hopp & Spearman.....	142

5.1.6. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Paralelo empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner.....	145
5.1.7. Tablas de Resultados .....	153
5.2. Cálculo de Indicadores de Desempeño.....	154
5.2.1. Análisis y comparación de resultados.....	160
5.3. Resultados obtenidos de la comparación del tamaño de lote actual y el propuesto por el método de Optimización.....	172

## CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	191
--	-----

## APÉNDICES

## BIBLIOGRAFÍA

## ABREVIATURAS

$C_a^2$	Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo entre Arribos de Lotes
$C_e^2$	Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo Efectivo de Procesamiento de un Lote
CT	Tiempo de Ciclo
CTq	Tiempo de Espera de los lotes en cola
k	Tamaño de Lote
TH	Tasa de Producción
Warm-Up	Tiempo que toma un Sistema para alcanzar su Estado Estable.
WIBT	Tiempo de Espera de las piezas en un Lote
WIP	Producto en Proceso
WTBT	Tiempo de Formación de un Lote

## ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 1.1	Metodología del estudio.....	13
Figura 2.1	Representación Gráfica de un Lote en Serie.....	24
Figura 2.2	Gráfica de Tiempo de Ciclo vs Tamaño de Lote (setup = 5 hr).....	28
Figura 2.3	Gráfica de Tiempo de Ciclo vs Tamaño de Lote (setup = 2.5 hr)...	29
Figura 2.4	Representación Gráfica de un Lote en Paralelo.....	30
Figura 2.5	Gráfica de Tiempo de Ciclo vs Tamaño de Lote en una Operación de Lote en Paralelo.....	32
Figura 2.6	Representación Gráfica de un Lote de Transferencia.....	33
Figura 2.7	Gráfica de Warm-up.....	43
Figura 2.8	Parámetros Experimentales.....	45
Figura 2.9	Gráfica de Warm-up del ejemplo.....	46
Figura 3.1	Esquema de Lote en Serie con Técnica Split.....	55
Figura 3.2	Gráfica de “Tiempo de Ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenida mediante técnica de Hopp & Spearman (Caso de Estudio # 1 – Técnica Split).....	61
Figura 3.3	Parámetros Experimentales del Caso de Lote Serial Split.....	64
Figura 3.4	Warm-up del Modelo de Simulación del Caso de Lote Serial Split.....	64
Figura 3.5	Gráfica Comparativa de las curvas de “Tiempo de ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenidas por ambas metodologías (Caso de Estudio # 1 – Técnica Split ).....	68
Figura 3.6	Esquema de Lote en Serie con Técnica Non-split.....	72
Figura 3.7	Gráfica de “Tiempo de Ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenida mediante Técnica de Hopp & Spearman (Caso de estudio # 1 – Técnica Nonsplit).....	74
Figura 3.8	Gráfica Comparativa de las Curvas de “Tiempo de Ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenidas por ambas metodologías (Caso de Estudio # 1 – Técnica Nonsplit).....	78
Figura 3.9	Esquema de Lote en Paralelo.....	81
Figura 3.10	Gráfica de “Tiempo de Ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenida mediante Técnica de Hopp & Spearman (Caso de Estudio # 2)...	85
Figura 3.11	Warm-up del Modelo de Simulación del Caso de Lote en Paralelo.....	87
Figura 3.12	Gráfica Comparativa de las Curvas de “Tiempo de Ciclo” vs “Tamaño de Lote” obtenidas por ambas metodologías	

	(Caso de estudio # 2).....	90
Figura 4.1	Producto.....	95
Figura 4.2	Proceso Productivo.....	99
Figura 4.3	Entidades.....	102
Figura 4.4	Layout del Proceso Productivo.....	110
Figura 4.5	Subsistemas del Proceso Productivo.....	111
Figura 4.6	Arribos.....	113
Figura 4.7	Contador Silla.....	115
Figura 4.8	Contador Mesa.....	116
Figura 4.9	Locación Ficticia.....	117
Figura 4.10	Contador Wip Mesas.....	117
Figura 4.11	Contador Wip Sillas.....	118
Figura 4.12	Contador Wip Paralelo.....	119
Figura 5.1	Parámetros Experimentales para determinar Warm up del Subsistema Split.....	125
Figura 5.2	Warm-Up del Subsistema Split.....	126
Figura 5.3	Factores de Entrada del Subsistema Split.....	128
Figura 5.4	Macro del Subsistema Split.....	130
Figura 5.5	Condiciones Iniciales para corrida del Modelo del Subsistema Split.....	131
Figura 5.6	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Split obtenido a través de Simrunner.....	132
Figura 5.7	Parámetros Experimentales para determinar Warm up del Subsistema Nonsplit.....	135
Figura 5.8	Warm up del Subsistema Nonsplit.....	136
Figura 5.9	Factores de Entrada del Subsistema Nonsplit.....	138
Figura 5.10	Macro del Subsistema Nonsplit.....	139
Figura 5.11	Condiciones Iniciales para Corrida del modelo del Subsistema Nonsplit.....	140
Figura 5.12	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Nonsplit obtenido a través de Simrunner.....	141
Figura 5.13	Parámetros Experimentales para determinar Warm up del Subsistema Paralelo.....	146
Figura 5.14	Warm up del Subsistema Paralelo.....	147
Figura 5.15	Factores de Entrada del Subsistema Paralelo.....	149
Figura 5.16	Macro del Subsistema Paralelo.....	150
Figura 5.17	Condiciones Iniciales para Corrida del Modelo del Subsistema Split.....	151
Figura 5.18	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Split obtenido a través de Simrunner.....	152

Figura 5.19	Incremento de Wip de la Entidad Mesas.....	156
Figura 5.20	Decremento de Wip de la Entidad Mesas.....	156
Figura 5.21	Tiempo Promedio de permanencia de la Entidad en una Locación.....	157
Figura 5.22	Total de Entidades que abandonan el Sistema.....	158
Figura 5.23	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “Wip” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Split).....	162
Figura 5.24	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “CT” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Split).....	163
Figura 5.25	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “TH” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Split).....	164
Figura 5.26	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “WIP” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Nonsplit).....	166
Figura 5.27	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “CT” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Nonsplit).....	167
Figura 5.28	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “TH” obtenido por ambas Técnicas (Subsistema Nonsplit).....	168
Figura 5.29	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “WIP” obtenido de la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Split.....	174
Figura 5.30	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “CT” obtenido de la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Split.....	175
Figura 5.31	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “TH” obtenido de la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Split.....	176
Figura 5.32	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “WIP” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Nonsplit.....	178
Figura 5.33	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “CT” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Nonsplit.....	179
Figura 5.34	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “TH” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Nonsplit.....	180
Figura 5.35	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “WIP” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Paralelo.....	183
Figura 5.36	Intervalos de Confianza del Indicador de Desempeño “CT” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el	

	Subsistema Paralelo.....	184
Figura 5.37	Intervalos de Confianza del Indicador de desempeño “TH” obtenido entre la Situación Actual y Propuesta en el Subsistema Paralelo.....	185

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Fórmulas para Lotes en Serie.....	25
Tabla 2	Fórmulas de Tiempo de Ciclo para Lotes en Serie.....	27
Tabla 3	Fórmulas para Lotes en Paralelo.....	31
Tabla 4	Fórmula de Tiempo de Ciclo para Lotes en Paralelo.....	32
Tabla 5	Fórmulas para Lotes de Transferencia (1).....	33
Tabla 6	Fórmulas para Lotes de Transferencia (2).....	34
Tabla 7	Fórmulas para Lotes de Transferencia (3).....	34
Tabla 8	Fórmulas para Optimización de Lotes en Serie (Un solo Producto).....	38
Tabla 9	Fórmulas para Optimización de Lotes en Serie (Múltiples Productos).....	39
Tabla 10	Fórmulas para Optimización de Lotes en Paralelo.....	40
Tabla 11	Utilizaciones calculadas para diferentes Tamaños de Lote mediante Técnica de Hopp & Spearman (Caso de Estudio # 1).....	60
Tabla 12	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote Serial Split obtenido mediante Algoritmos de Hopp & Spearman.....	62
Tabla 13	Condiciones Iniciales de la Simulación del Caso de Estudio # 1 aplicado a Lotes en Serie con Técnica Split .....	65
Tabla 14	Utilizaciones obtenidas para diferentes Tamaños de Lote mediante Simulación (Caso de Estudio # 1 – Técnica Split).....	66
Tabla 15	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote Serial Split obtenidos mediante Simulación.....	69
Tabla 16	Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Lote Serial Split.....	71
Tabla 17	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote Serial Non Split obtenidos mediante Algoritmos de Hopp & Spearman.....	75
Tabla 18	Condiciones Iniciales de la Simulación del Caso de Estudio # 1 aplicado a Lotes en Serie con Técnica Nonsplit.....	76
Tabla 19	Utilizaciones obtenidas para diferentes Tamaños de Lote mediante Simulación (Caso de Estudio # 1 –Técnica Non Split).....	77
Tabla 20	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote Serial Non Split obtenidos mediante Simulación.....	79
Tabla 21	Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Lote Serial Non Split.....	79
Tabla 22	Utilizaciones calculadas para diferentes Tamaños de Lote mediante Técnica de Hopp & Spearman (Caso de Estudio # 2).....	84

Tabla 23	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote en Paralelo obtenidos mediante Algoritmos de Hopp & Spearman.....	86
Tabla 24	Condiciones Iniciales de la Simulación del Caso de Estudio #2 .....	88
Tabla 25	Utilizaciones obtenidas para diferentes Tamaños de Lote mediante Simulación (Caso de Estudio # 2).....	89
Tabla 26	Tiempos de Ciclo para el Caso de Lote en Paralelo obtenidos mediante Simulación.....	91
Tabla 27	Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Lote en Paralelo.....	92
Tabla 28	Tiempo entre Arribos.....	96
Tabla 29	Tiempos de Procesamiento por Unidad.....	96
Tabla 30	Tiempos de Setup.....	97
Tabla 31	Entidades.....	101
Tabla 32	Descripción de Entidades.....	102
Tabla 33	Descripción de Locaciones.....	104
Tabla 34	Locaciones.....	105
Tabla 35	Variables.....	107
Tabla 36	Macros.....	108
Tabla 37	Arribos.....	109
Tabla 38	Locaciones involucradas en cada Subsistema.....	112
Tabla 39	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Split determinado a través de ambas metodologías.....	153
Tabla 40	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Non Split determinado a través de ambas metodologías.....	154
Tabla 41	Tamaño Óptimo de Lote del Subsistema Paralelo determinado a través de ambas metodologías.....	154
Tabla 42	Intervalos de confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos por ambas Técnicas de Optimización (Subsistema Split).....	161
Tabla 43	Intervalos de confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos por ambas Técnicas de Optimización (Subsistema Non Split).....	165
Tabla 44	Intervalos de Confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos por ambas Técnicas de Optimización (Subsistema Paralelo).....	170
Tabla 45	Tamaños de Lote Óptimo.....	172
Tabla 46	Intervalos de Confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos usando el Tamaño de Lote Actual y el Propuesto (Subsistema Split).....	173

Tabla 47	Intervalos de Confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos usando el Tamaño de Lote Actual y el Propuesto (Subsistema Non Split).....	177
Tabla 48	Intervalos de Confianza de los Indicadores de Desempeño obtenidos usando el Tamaño de Lote Actual y el Propuesto (Subsistema Paralelo).....	182
Tabla 49	Comparación del Indicador de Desempeño “CT” .....	186
Tabla 50	Comparación del Indicador de Desempeño “WIP” .....	187
Tabla 51	Comparación del Indicador de Desempeño “TH” .....	188

## **INTRODUCCIÓN**

Gran parte de las empresas manufactureras del Ecuador y del mundo realizan sus procesos mediante la utilización de lotes, sin considerar muchas veces que las características de los mismos pueden afectar considerablemente el desempeño de la producción.

La necesidad de que continuamente se trasladen los productos de un lugar a otro, de una máquina a otra y de un proceso a otro, han ocasionado que estos pasen más tiempo en movimiento que en cualquier otra operación productiva.

La forma en que usualmente se han establecido los tamaños de lote en los procesos productivos no siempre ha sido la óptima, esto se debe muchas veces al desconocimiento existente acerca de técnicas que permitan optimizar el flujo de materiales, entre ellas la optimización de tamaños de lote.

La presente tesis esta basada en los estudios de Hopp & Spearman concernientes a la influencia de los lotes en los sistemas productivos. A lo largo de este trabajo se realizará una descripción de los estudios existentes del tema, se validarán las Leyes de la Física de Fábrica referente a Operaciones con Lotes, se planteará y analizará dos métodos de optimización; y finalmente se

diseñará un Modelo de Simulación que permita comparar indicadores y así determinar la influencia del uso de lotes óptimos en el desempeño de una línea de producción.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. GENERALIDADES**

### **1.1. Antecedentes**

La determinación del tamaño de lote es la base de todo estudio de flujo de materiales, a pesar de ser una operación de gran importancia dentro de todo proceso de producción, ha sido poco estudiada. Desde las pequeñas industrias manufactureras hasta las más grandes plantas industriales han dejado de lado la importancia de fijar un tamaño de lote que permita optimizar las operaciones y lograr movimientos más eficientes.

Son muchas las técnicas que mencionan la importancia del manejo de lotes. Sin embargo son muy pocos los estudios que proponen técnicas

concretas para determinar tamaños de lote óptimos. Entre las técnicas que hacen referencia al tamaño de lote ideal se encuentran:

**Filosofía Just in Time (JIT):** Uno de los elementos de esta filosofía es trabajar con lotes del menor tamaño posible, esto puede ser logrado a través de la obtención de buenos tiempos de preparación o alistamiento que permitan manejar lotes pequeños. El SMED es una técnica del JIT para realizar las operaciones de cambio de modelo en menos de 10 minutos. El sistema SMED nació por la necesidad de lograr la producción Justo a Tiempo. Este sistema fue desarrollado por Shigeo Shingo para acortar los tiempos de la preparación de máquinas, posibilitando hacer lotes más pequeños. El tamaño óptimo de los lotes de acuerdo a la metodología JIT, es de un producto a la vez, para ajustarse al sistema pull y realizar un concepto cliente-proveedor. (Díaz David).

**Optimized Production Technology (OPT):** El objetivo del OPT es incrementar el producto en curso y simultáneamente disminuir las existencias y los gastos operativos. Este sistema fue creado por Eliyahu Goldratt.

OPT distingue dos tipos de lote, el lote de transferencia y el lote de proceso. OPT indica que el funcionamiento eficiente del sistema de producción dependerá de la manera en que sean programados esos lotes.

Los principios básicos del OPT pueden resumirse en nueve reglas, de las cuales 2 de ellas hacen referencia al tema de investigación:

Regla 7: “El lote de transferencia puede no ser, y de hecho muchas veces no debe ser, igual al lote en proceso”.

La aplicación de la regla 7 posibilita el acortamiento del tiempo total de fabricación, pues un determinado centro de trabajo no deberá esperar a la terminación de un lote completo para comenzar su traspaso al siguiente, sino que podrá hacerlo de forma gradual a través de lotes de transferencia de menor tamaño.

Regla 8: “El lote de proceso debe ser variable a través de la ruta y también en el tiempo”.

Los lotes pueden y deben acortarse, solaparse y dividirse para adaptarse al comportamiento dinámico de cualquier proceso de producción, donde los cuellos de botella pueden ser flotantes a lo largo del tiempo, dependiendo del programa de producción a realizar.

**Física de Fábrica:** La ciencia de la Física de Fábrica (Factory Physics) fue creada por Wallace Hopp y Mark Spearman, para comprender los principios de la gerencia de fabricación. En esta se menciona que la interacción entre tamaños de lote de proceso y tiempos de setup es sutil. El incremento del tamaño de lote aumenta la capacidad y así reduce la formación de una cola en espera. Sin embargo, al incrementar el tamaño de lote, se incrementa el tiempo de formación de un lote y el tiempo de espera en lote. Por lo tanto, el mayor énfasis debería estar sobre la reducción de los tiempos de setup, que permitirá el empleo de pequeños y eficientes tamaños de lote. Si no se pueden reducir los tiempos de setup, el tiempo de ciclo bien puede ser reducido al máximo con un tamaño de lote mayor a 1. De la misma manera, dependiendo de la capacidad y demanda, el tamaño de lote más eficiente en un proceso en paralelo puede estar entre uno y el máximo número correspondiente a la capacidad del proceso. Al referirnos a los lotes de

transferencia, Hopp & Spearman afirman que disminuir tamaños de lotes de transferencia es una de las medidas disponibles más simples para reducir tiempos de ciclo en muchos ambientes de producción.

Muy a parte de estas filosofías, existen otros estudios realizados, como es el caso de la investigación de las “Ventajas en el Tiempo de Ciclo del uso de lotes pequeños de manufactura y metrología integrada en hornos verticales de 300 mm” (Renzo Noben, Rien van Driel y Tanja Claasen-Vujcic), en el que se lograron mejoras del tiempo de ciclo, cambiando grandes lotes a pequeños lotes de manufactura. Los resultados obtenidos fueron mejoras en el tiempo de ciclo del 40% para lotes seriales y un 30% para lotes en paralelo. La consecuencia fue un incremento en el número de recursos requeridos, donde se concluye que un factor a analizar es “La mejora del tiempo de ciclo vs costos”.

Según Rodrigo Cáliz Ospino y Germán Riaño Mendoza, autores del estudio de “Modelaje de redes de producción multiclase con inventario constante, considerando loteo y varios servidores por estación de trabajo” afirman que debe tenerse en cuenta que la determinación del tamaño de lote ideal está restringida por el aumento en los costos de

manejo de materiales y por la capacidad que poseen los dispositivos que transportan materiales de una estación de trabajo a otra; es posible que el tiempo que un ítem se ahorra al no tener que esperar a que se complete el lote de proceso sea igualado o sobrepasado por el tiempo que el ítem tiene que esperar para que el dispositivo de transporte esté disponible para realizar la transferencia de material hacia la siguiente estación.

La mayor parte de los tamaños de lotes establecidos para el manejo de materiales tienen una gran influencia en las características de cualquier proceso y logros significativos pueden darse comprendiendo la dinámica existente. Aunque no pensamos a menudo en ella, podemos tratar por lotes en la cantidad de material o la cantidad de tiempo.

## **1.2. Objetivo General**

Evaluar las leyes de la Física de Fábrica referentes a los procesos productivos por lotes a través del empleo de Simulación y técnicas de optimización; y evaluar su desempeño a través de los indicadores:

Producto en proceso (WIP), Tiempo de ciclo (CT) y Tasa de Producción (TH).

### **1.3. Objetivos Específicos**

- Desarrollar un modelo de simulación que permita realizar la evaluación de las leyes de la Física de Fábrica referente a los procesos productivos por lote.
- Calcular el tamaño de lote óptimo para todas las instancias de una línea de producción simulada de acuerdo a algoritmos evolutivos.
- Calcular el tamaño de lote óptimo para todas las instancias de una línea de producción simulada de acuerdo al Algoritmo de Hopp & Spearman.
- Comparar el desempeño de las técnicas aplicadas para el cálculo del tamaño de lote óptimo a través de la evaluación de los indicadores: Producto en Proceso (WIP), Tiempo de ciclo (CT) y tasa de producción (TH).

#### **1.4. Planteamiento del Problema**

La competitividad en los mercados globales requiere que las empresas se ajusten a las necesidades de los clientes y consumidores de forma tal que se entregue a dichos clientes el mayor valor agregado por las unidades monetarias percibidas; para esto es necesario que las empresas trabajen fuertemente en controlar, reconfigurar y mejorar continuamente los procesos internos, de tal manera que puedan eliminar o reducir al mínimo aquellas actividades que no generan valor.

Desde el momento que entra un material o componente al proceso de fabricación, hasta que sale el producto final, se incluyen una serie de operaciones que emplean grandes cantidades de tiempo y recursos; de las cuales, la gran mayoría no generan valor alguno al producto final.

Estudios efectuados en el año 2004, por la Escuela de Negocios de Cardiff, en Reino Unido, han determinado que en la mayoría de las empresas tradicionales sólo un 5% de las actividades agregan valor para el consumidor final, en tanto que un 35% constituyen actividades de apoyo interno sin valor agregado para el cliente, y el restante 60%

no añade ningún tipo de valor, como es el caso del manejo interno de materiales.

La eliminación de este tipo de desperdicios es la fuente potencial más grande de mejora en los servicios, costos y rendimientos de una empresa. La optimización del manejo de materiales es otro factor clave para alcanzar altos niveles de desempeño y rendimiento de una empresa. Si se lograra determinar los tamaños de lote óptimo de un proceso, se obtendrían grandes reducciones en los tiempos de ciclo, y muy probablemente altos niveles de productividad y bajos niveles de inventario.

No existen estudios que muestren cifras de los ahorros monetarios obtenidos por la correcta determinación del tamaño de lote en una línea de producción, pero se conoce que la producción en pequeños lotes permite una reducción del 30 al 40% del tiempo de ciclo en un sistema productivo. (Renzo Noben, Rien van Driel y Tanja Claasen-Vujcic).

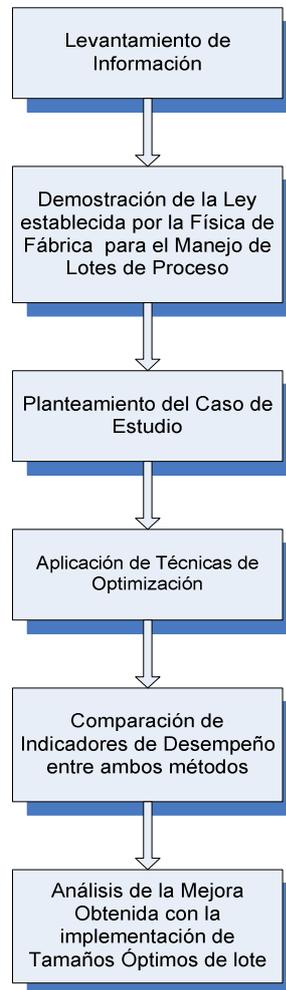
Se conoce además que con el objeto de ocultar las grandes ineficiencias en los procesos productivos y los altibajos de la demanda, suelen utilizarse grandes tamaños de lotes. Un gran tamaño de lote

disminuye la tasa de producción y la calidad del producto. Porteus (1986) afirmó que existe una relación significativa e inversa entre el tamaño del lote y la calidad.

Son todos estos factores y muchos más, los que evidencian la importancia de conocer sobre las técnicas existentes para optimizar tamaños de lote y analizar cómo su aplicación se ve reflejada favorablemente en los indicadores de desempeño de una línea de producción.

### **1.5. Metodología**

La metodología a utilizar consiste en seis etapas, que se indican a continuación en la Figura 1.1



**FIGURA 1.1 METODOLOGÍA DEL ESTUDIO**

*Levantamiento de Información*

Inicialmente se procederá a recopilar todo lo concerniente a las leyes de la Física de Fábrica referente a Operaciones con Lotes. A su vez se presentará una breve descripción de las Técnicas de Hopp &

Spearman, y del funcionamiento de SimRunner como herramientas de Optimización.

*Demostración de la Ley establecida por la Física de Fábrica para el Manejo de Lotes de Proceso*

Se demostrará la Ley de Lote de Proceso por medio de sencillos casos de estudio, a fin de verificar y validar los estudios realizados de Hopp & Spearman en relación a este tema.

*Planteamiento del Caso de Estudio*

Para fines de la investigación se presentará un caso de estudio en el cual se incluyen diferentes tipos de lote para su posterior análisis.

*Aplicación de Técnicas de Optimización*

Se procederá a calcular el tamaño óptimo para cada uno de los tipos de lote presentes en el caso de estudio, a través de la aplicación de dos métodos de Optimización: Técnicas de Hopp & Spearman y Algoritmos Evolutivos empleando SimRunner.

*Comparación de Indicadores de Desempeño entre ambos métodos*

Se compararán los indicadores de desempeño de la línea de producción obtenidos por los métodos ya mencionados y se establecerá la mejor Técnica de Optimización.

*Análisis de la Mejora Obtenida con la implementación de Tamaños Óptimos de Lote*

En la última etapa del estudio se compararán los indicadores de desempeño del Estado Inicial del sistema junto con el Propuesto utilizando Tamaños Óptimos de Lote; con la finalidad de establecer si existe una mejora significativa en el desempeño de la línea de producción.

# CAPÍTULO 2

## 2. FUNDAMENTO TEÓRICO

Este capítulo consta de dos secciones las cuales describen los conceptos y herramientas más importantes a utilizar durante el desarrollo del estudio. La primera de ellas presenta los tipos de lote presentes en un sistema, las leyes y fórmulas que rigen el comportamiento de los lotes en una línea de producción y el método propuesto por Hopp & Spearman para el cálculo del lote óptimo. La segunda sección presentará una breve explicación del funcionamiento de SimRunner como una aplicación informática de los algoritmos evolutivos orientados a la optimización.

## 2.1. Generalidades del Manejo de Lotes

### 2.1.1. Tipos de Lote

En los sistemas de manufactura pueden identificarse dos clases de lotes: lotes de proceso y lotes de transferencia.

- **Lotes de Proceso:** Existen dos tipos de lotes de proceso.  
**Lote Serial:** Un lote en serie es un grupo de ítems que son procesados de forma secuencial (uno a la vez) antes de que se realice el alistamiento de la máquina para procesar otro tipo de producto.  
**Lote Paralelo:** Un lote en paralelo está constituido por un grupo de ítems que son procesados simultáneamente por una máquina.
- **Lotes de Transferencia** Un lote de transferencia hace referencia a aquel grupo de piezas ya procesadas que se trasladan simultáneamente de una estación a otra.

Mientras más pequeño es el lote de transferencia, menor será el tiempo de ciclo porque existe menos tiempo de espera correspondiente a la formación del lote. Sin embargo, al tener pequeños lotes de transferencia se incurre en más movimientos de material.

A pesar de que estos tipos de lotes sean físicamente diferentes, poseen similares impactos operacionales.

El tamaño de un lote de proceso serial se relaciona con la duración de un setup o alistamiento de máquina. Mientras más grande sea el setup, más partes deben ser procesadas entre setups para alcanzar una capacidad dada.

El tamaño de un lote de proceso paralelo depende de la demanda de la estación. Para minimizar la utilización, esas máquinas deben trabajar con grandes tamaños de lote. Sin embargo, si la máquina no es un cuello de botella, la idea de minimizar la utilización no sería la más adecuada; por lo que,

utilizar tamaños de lote más pequeños sería la decisión mas apropiada para reducir tiempos de ciclo.

### **2.1.2. Importancia de la Determinación de un Tamaño Óptimo de Lote en una línea de Producción**

De acuerdo con Hopp & Spearman (2000), la determinación del tamaño de lote es una decisión de control de gran importancia, ya que permite amortiguar la variabilidad inherente al fenómeno de loteo, y por consiguiente, mejorar el desempeño del sistema de producción. Al reducirse la variabilidad, se reducen los tiempos de ciclo y aumentan las tasas de producción del sistema. En el caso de los lotes de proceso, el tamaño de lote afecta directamente la capacidad de la máquina, en razón a que un tamaño de lote inadecuado puede generar la sobreutilización de la máquina debido a un número excesivo de alistamientos o un tiempo excesivo de proceso en paralelo.

Con respecto al tamaño del lote de transferencia, puede decirse que es directamente proporcional al tiempo de ciclo. Esta afirmación sugiere que una forma práctica de reducir los tiempos

de ciclo consiste en reducir los lotes de transferencia de tal manera que un ítem no necesariamente debe esperar a los otros ítems del lote de proceso para ser transferido a la siguiente estación. Esta estrategia frecuentemente hace parte de la práctica conocida como “lot splitting”, la cual consiste en configurar lotes de proceso grandes y lotes de transferencia pequeños si la estación de trabajo posee tiempos de alistamiento muy largos y las otras estaciones de trabajo se encuentran cerca. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que la implementación de esta práctica está restringida por el aumento en los costos de manejo de materiales y por la capacidad que poseen los dispositivos que transportan materiales de una estación de trabajo a otra; es posible que el tiempo que un ítem se ahorra al no tener que esperar a que se complete el lote de proceso sea igualado o sobrepasado por el tiempo que el ítem tiene que esperar para que el dispositivo de transporte esté disponible para realizar la transferencia de material hacia la siguiente estación.

### **2.1.3. Leyes establecidas por la Física de Fábricas para el Manejo de Lotes**

Las siguientes leyes de la Física de Fábrica resumen la dinámica del comportamiento de los lotes de proceso y de transferencia.

#### **Ley del Lote de Proceso:**

*“En estaciones que operan con lotes o con tiempos de setup significativos se cumple:*

*1.- El tamaño mínimo de lote de proceso para que el sistema se vuelva estable puede ser mayor que 1.*

*2.- A medida que el tamaño de lote se incrementa, el tiempo de ciclo crece proporcionalmente con el.*

*3.- El tiempo de ciclo en una estación será minimizado con un tamaño de lote no necesariamente igual a 1”.*

Esta ley implica, que puede ser necesario, incluso deseable, usar grandes lotes de proceso con la finalidad de mantener la utilización; y el Tiempo de Ciclo y Wip bajo control. Sin embargo, hay que tener cuidado al aceptar totalmente esta aseveración; ya que la necesidad de tener grandes tamaños de lotes en serie es

producto de tener altos tiempos de setup. Por lo cual, la principal prioridad debería ser reducir estos tiempos.

Finalmente, concluimos que las reducciones en los tiempos de operación con lotes y tiempos de setups deben ser usados con un enfoque a alcanzar altas tasas de producción y eficientes niveles de WIP y tiempo de ciclo.

**Ley de Lote de Movimiento:**

*“El tiempo de ciclo en un segmento de ruta es aproximadamente proporcional al tamaño de lote de movimiento usado. Se asume que hay total disponibilidad de los medios de transporte”*

Esta ley describe que es posible una reducción en el tiempo de ciclo si se reduce el tamaño del lote de transferencia, para lo cual deben existir suficientes recursos que permitan el manejo de materiales sin dar lugar a retrasos.

### 2.1.4 Fórmulas para determinar Tamaños de Lote

Wallace Hopp y Mark Spearman plantean fórmulas que permiten calcular el tamaño para los distintos tipos de lote. Este método propuesto se rige bajo ciertas asunciones.

#### **Fórmulas de Lotes en Serie**

Para modelar lotes en serie, en el cual lotes de piezas arriban a una máquina y son procesados con un setup entre cada lote; hacemos uso de la siguiente notación:

$k$  = Tamaño de Lote en serie

$r_a$  = Tasa de arribo (piezas/hora)

$t$  = Tiempo de procesamiento de una pieza (hr)

$s$  = Tiempo de Setup (hr)

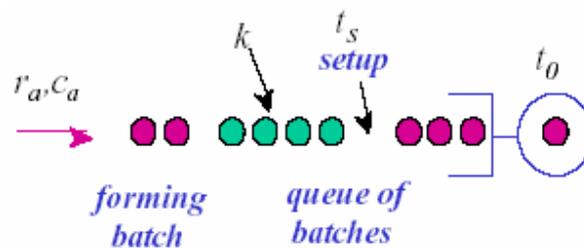
$C_e^2 = \frac{\sigma_e^2}{t_e^2}$  SCV efectivo de tiempo de procesamiento de un lote

(incluye tiempo de procesamiento y de setup)

Se asume que:

- 1) Las piezas arriban en lotes y se considera un tiempo de setup entre ellos.
- 2) El Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo Efectivo de Procesamiento de un Lote ( $C_e^2$ ) incluye tiempo de procesamiento y tiempo de setup.
- 3) El  $C_e^2$  de un lote es igual a 0.5 sin importar el tamaño de lote.
- 4) El Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo entre arribos de lotes ( $C_a^2$ ) es siempre 1.

El funcionamiento de un lote en serie es mostrado gráficamente a continuación:



**FIGURA 2.1 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN LOTE EN SERIE**

**TABLA 1**  
**FÓRMULAS PARA LOTES EN SERIE**

FACTORES	FÓRMULAS
Tiempo Efectivo de Procesamiento de un Lote	$t_e = kt + s$
Tasa de Arribo de lotes	$t_a = \frac{r_a}{k}$
Utilización de la máquina	$U = \frac{r_a t_e}{k}$
Mínimo Tamaño de Lote requerido para estabilizar el sistema	Para que $U < 1$ , requiere $k > \frac{sr_a}{1 - tr_a}$
Tiempo promedio de espera en cola	$CT_q = \left( \frac{C_a^2 + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1 - u} \right) t_e$ Nota: Se asume que el arribo $C_a^2$ es igual a 1, sin importar el tamaño de lote.

El Tiempo de Ciclo promedio total en una estación consiste en la sumatoria de cuatro términos:

- Tiempo de Espera en Cola del lote.
- Tiempo de Setup.
- Tiempo de Espera de las piezas en el lote. (WIBT, Wait-in-batch-time)
- Tiempo de Procesamiento de una pieza.

Los lotes en serie pueden operar usando dos técnicas:

- Cuando decimos que un lote opera bajo la técnica **Splitting**, quiere decir que piezas individuales son enviadas a la siguiente estación tan pronto éstas hayan sido procesadas, o sea que el lote de transferencia es de 1.
- Cuando decimos que un lote opera bajo la técnica **Non-Splitting**, quiere decir que una vez que las piezas hayan sido procesadas, éstas deberán esperar hasta formar un lote de tamaño “k” antes de poder ser enviadas a la siguiente estación.

El factor WIBT depende de si los lotes operan bajo la técnica de splitting o no. Si fuera el caso Non Splitting, entonces, todas las partes esperan a las otras “k-1” partes en el lote.

$$WIBT_{nonsplit} = (k - 1)t$$

Y si fuera el caso de que el lote opera bajo la técnica Splitting, entonces, el factor WIBT depende de la posición de la pieza en el

lote. La primera pieza espera un tiempo de 0 en el lote ya que es enviada inmediatamente a la siguiente estación una vez que haya sido procesada. La segunda pieza espera detrás de la primera; por lo tanto, su tiempo de espera en el lote es de “ $t$ ”. La tercera pieza espera en el lote “ $2t$ ” y así sucesivamente. Por lo tanto el factor WIBT está dado por:

$$WIBT_{split} = \frac{k-1}{2}t$$

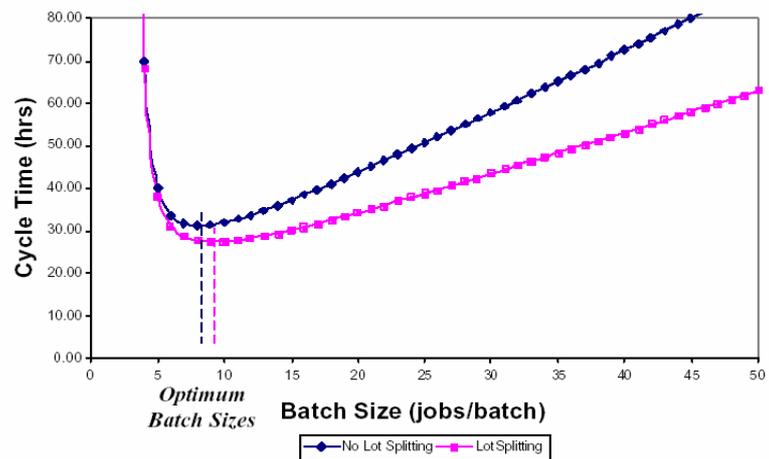
Finalmente, una vez determinados cada uno de los factores que conforman la fórmula del tiempo de ciclo de un lote, procedemos a plantearlas:

**TABLA 2**  
**FÓRMULAS DE TIEMPO DE CICLO PARA LOTES EN SERIE**

<p>“Tiempo de Ciclo de un lote que opera bajo la Técnica Non Split”</p> <p>(Lote de Proceso = Lote de Proceso)</p>	$CT_{non-split} = CT_q + s + WIBT_{non-split} + t$ $CT_{non-split} = CT_q + s + (k-1)t + t$
<p>“Tiempo de Ciclo de un lote que opera bajo la Técnica Split”</p> <p>(Lote de Transferencia = 1)</p>	$CT_{split} = CT_q + s + WIBT_{split} + t$ $CT_{split} = CT_q + s + \frac{k-1}{2}t + t$

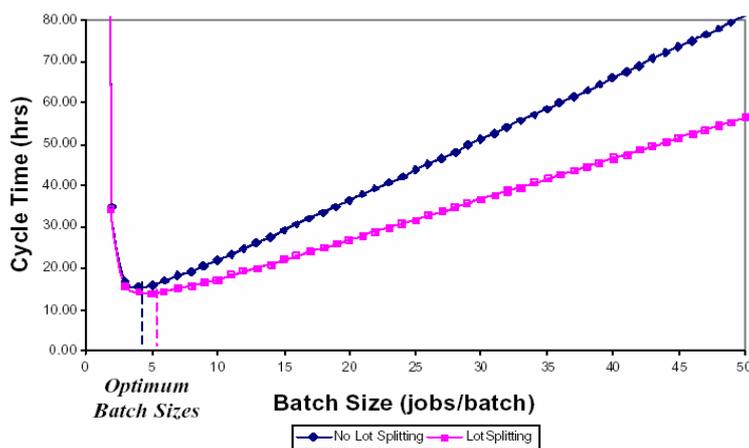
Como se puede apreciar de la tabla anterior, la única diferencia entre ambas técnicas es el factor WIBT, de éste podemos decir que al usar lotes que operan bajo la técnica Split, se reduce el tiempo de ciclo promedio. Esto puede ser observado en las siguiente gráfica de “Tiempo de Ciclo vs Tamaño de Lote”.

### Cycle Time vs. Batch Size – 5 hr setup



**FIGURA 2.2 GRÁFICA DE TIEMPO DE CICLO VS TAMAÑO DE LOTE (SETUP = 5 HR)**

### Cycle Time vs. Batch Size – 2.5 hr setup



**FIGURA 2.3 GRÁFICA DE TIEMPO DE CICLO VS TAMAÑO DE LOTE (SETUP = 2.5 HR)**

En las gráficas se puede apreciar que con la Técnica Split se obtienen menores tiempos de ciclo. Pero además, si comparamos ambas gráficas se puede observar que existe una gran disminución en el Tiempo de Ciclo y en el tamaño de lote utilizado, ambos producto de una reducción en los tiempos de setup de 5 a 2.5 horas.

#### Fórmulas de Lotes en Paralelo

Para el cálculo del tiempo de ciclo de lotes en paralelo se asume que las piezas arriban una a la vez a la operación en paralelo. Las piezas se agrupan hasta conformar un lote, los lotes

formados pueden esperar en una cola hasta ser procesados como lote.

Para el cálculo del tiempo de ciclo, se hace uso de la siguiente notación, similar a la usada para lotes en serie:

$k$  = Tamaño de Lote en Paralelo

$r_a$  = Tasa de arribo (partes/hora)

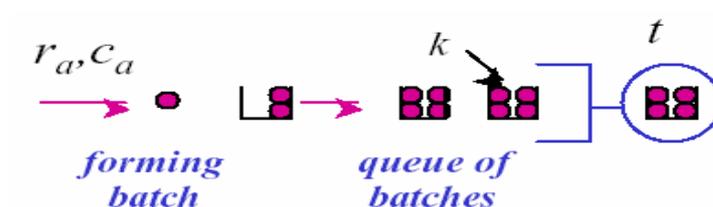
$C_a$  = CV de tiempo entre arribos

$t$  = Tiempo de procesamiento de un lote (hr)

$C_e$  = CV efectivo de tiempo de procesamiento de un lote.

$B$  = Máximo tamaño de lote (número máximo de partes que pueden ser procesadas en la estación simultáneamente)

El funcionamiento de un lote en paralelo es mostrado gráficamente a continuación:



**FIGURA 2.4 REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN LOTE EN PARALELO**

**TABLA 3**  
**FÓRMULAS PARA LOTES EN PARALELO**

FACTORES	FÓRMULAS
Tiempo de Formación de un Lote	$WTBT = \frac{k-1}{2r_a}$
$C_a^2$ (lote)	$\frac{C_a^2}{k}$
Utilización	$U = \frac{r_a}{k/t}$
Mínimo Tamaño de Lote requerido para estabilizar el sistema	Para que $U < 1$ , requiere $k > r_a t$
Tiempo promedio de espera en cola	$CT_q = \left( \frac{C_a^2/k + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1-u} \right) t$

El Tiempo de Ciclo promedio total en una operación de lotes en paralelo está conformado por 3 términos:

- El WTBT( Wait-to-batch-time), conocido como el Tiempo de Formación de un Lote.
- El tiempo de espera de un lote formado en cola.
- El Tiempo de procesamiento de una pieza.

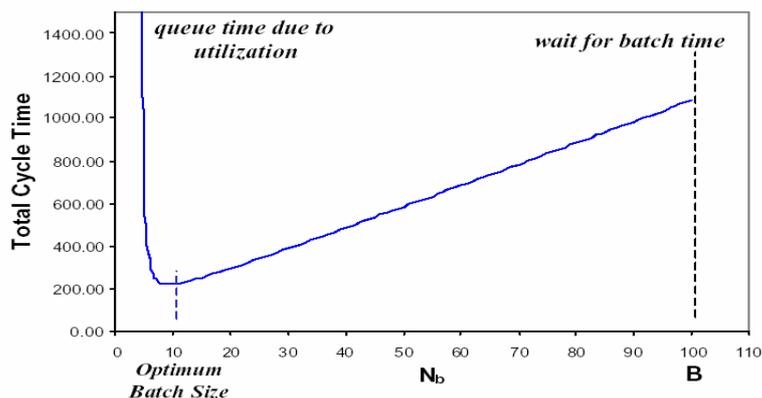
Esto quiere decir, que el tiempo de Ciclo de un lote en paralelo está dado por:

**TABLA 4**  
**FÓRMULA DE TIEMPO DE CICLO PARA LOTES EN PARALELO**

Tiempo de Ciclo	$CT = WTBT + CT_q + t$ $CT = \frac{k-1}{2r_a} + \left( \frac{C_a^2/k + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1-u} \right) t + t$
-----------------	--

En la ecuación se puede observar que el tiempo de ciclo se incrementa a medida que la utilización tiende a 0, al igual que cuando tiende a 1. Esto se debe a que cuando la utilización es baja, la tasa de arribo es menor con respecto al tiempo de procesamiento y por ende el tiempo de formación de un lote se incrementa. Este fenómeno puede ser apreciado en la gráfica mostrada.

### Cycle Time vs. Batch Size in a Parallel Operation



**FIGURA 2.5 GRÁFICA DE TIEMPO DE CICLO VS TAMAÑO DE LOTE EN UNA OPERACIÓN DE LOTE EN PARALELO**



**TABLA 6**  
**FÓRMULAS PARA LOTES DE TRANSFERENCIA (2)**

<b>Salida la Primera Estación</b>	<b>Fórmulas</b>
Tiempo entre salida de piezas individuales hacia el lote de transferencia	$t_a$
Tiempo entre salida de lotes de tamaño k	$kt_a$
Varianza de los Tiempos entre salidas de las piezas	$C_d^2(1)t_a^2$ , donde $C_d^2(1) = (1 - u(1)^2)C_a^2(1) + u(1)^2 C_e^2(1)$
Varianza de Lotes de Tamaño k	$kC_d^2(1)t_a^2$
SCV del arribo de lotes a la Estación 2	$\frac{C_a^2(2)}{k} = \frac{C_d^2(1)}{k}$

**TABLA 7**  
**FÓRMULAS PARA LOTES DE TRANSFERENCIA (3)**

<b>Tiempos en la Segunda Estación</b>	<b>Fórmulas</b>
Tiempo de Procesamiento de un Lote de tamaño k	$kt(2)$
Utilización en estación 2	$u(2) = r_a t(2)$
Varianza del Tiempo de Procesamiento de un Lote de tamaño k	$kC_e^2(2)t^2(2)$
SCV para un lote de Tamaño k	$\frac{kC_e^2(2)t^2(2)}{k^2 t^2(2)} = \frac{C_e^2(2)}{k}$
Tiempo medio gastado en lote parcial de tamaño k	$\frac{k-1}{2}t(2)$ <b>Observación:</b> La primera pieza no espera. La última pieza espera $(k-1)t(2)$ , por lo que el promedio es $\frac{(k-1)t(2)}{2}$

Tiempo en Cola en la Segunda Estación	$CT_q(2) = \left( \frac{C_a^2(2) + C_e^2(2)}{2} \right) \left( \frac{u(2)}{1-u(2)} \right) t(2)$
Tiempo Promedio en la Segunda Estación	$CT(2) = CT_q(2) + \frac{k-1}{2} t(2) + t(2)$

Finalmente, se puede expresar el Tiempo Total de Ciclo para el sistema de dos estaciones con tamaño de lote k:

$$CT_{lote} = CT(1) + CT(2)$$

$$CT_{lote} = CT_q(1) + t(1) + \frac{k-1}{2u(1)} t(1) + CT_q(2) + \frac{k-1}{2} t(2) + t(2)$$

$$CT_{lote} = CT_{single} + \frac{k-1}{2u(1)} t(1) + \frac{k-1}{2} t(2)$$

Donde,  $CT_{single}$  representa el tiempo de ciclo del sistema sin las operaciones de lotes.

Esta Expresión:

$$CT_{lote} = CT_{single} + \frac{k-1}{2u(1)} t(1) + \frac{k-1}{2} t(2)$$

cuantitativamente ilustra la Ley de Lote de Transferencia (el Tiempo de Ciclo incrementa proporcionalmente con el tamaño de

lote). Se observa que el incremento del tiempo de ciclo ocurre cuando el tamaño de lote  $k$  es incrementado y no por aspectos como variabilidad en la tasa de arribo y proceso.

Finalmente, observamos que el impacto de la transferencia de lotes es mayor cuando la utilización en la primera estación es baja. La razón es que cuando la tasa de arribo es baja con respecto a la tasa de procesamiento, toma un largo tiempo completar el lote de transferencia. Por lo tanto, las partes esperan gran tiempo en lotes parciales.

#### **2.1.5. Cálculo de Tamaño Óptimo de Lote**

Las fórmulas propuestas por Hopp y Spearman para la determinación del tamaño de lote óptimo varían de acuerdo al tipo de lote óptimo que se desea calcular. A continuación se detallan las fórmulas para cada caso.

### **Lotes en Serie Óptimos (Un solo producto)**

Para el caso de determinación del tamaño óptimo de lote en serie, se considera:

- El producto a procesar pertenece a una misma familia.
- Los tiempos de arribo son Poisson.

El tamaño de lote será el ideal para la línea de producción si únicamente una estación tiene tiempos de setup significativos y tiende a ser el cuello de botella.

Se realiza un simple procedimiento que primero encuentra (aproximadamente) la utilización óptima de la estación y luego la usa para calcular el tamaño de lote serial.

La fórmula que nos permite obtener una gran aproximación del tamaño de lote serial que minimiza el tiempo de ciclo en una estación se detalla en la tabla presentada, siendo:

$r_a$  = Tasa de arribo (piezas/hora)

$t$  = Tiempo de procesamiento de una pieza (hr)

$s$  = Tiempo de Setup (hr)

**TABLA 8**  
**FÓRMULAS PARA OPTIMIZACIÓN DE LOTES EN SERIE**  
**(UN SOLO PRODUCTO)**

Factores	Fórmulas
Utilización sin considerar setups	$u_o = r_a t$
Tiempo efectivo de proceso e un lote	$t_e = \frac{su}{u - u_o}$
Tiempo de Ciclo	$CT = \left( \frac{1 + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1 - u} \right) t_e + t_e$
Utilización Óptima	$u^* = \sqrt{u_o}$
Tamaño de Lote Óptimo	$K^* = \frac{r_a s}{u^* - u_o} \approx \frac{r_a s}{\sqrt{u_o} - u_o}$

### Lotes en Serie Óptimos (Múltiples Productos)

Para determinar el tamaño de lote óptimo en el caso de una línea con multiproductos, se define los siguientes parámetros:

$r_{ai}$  = Tasa de demanda por producto  $i$  (piezas/hora)

$t_i$  = Tiempo medio de procesamiento de un pieza de producto i  
(hr)

$s_i$  = Tiempo promedio de Setup entre cambios de producto i (hr)

**TABLA 9**  
**FÓRMULAS PARA OPTIMIZACIÓN DE LOTES EN SERIE**  
**(MÚLTIPLES PRODUCTOS)**

<b>Factores</b>	<b>Fórmulas</b>
Utilización sin considerar setups	$u_o = r_{ai} \sum_{i=1}^n t$
Utilización Óptima	$u^* = \sqrt{u_o}$
Tiempo de Corrida Promedio	$L = \frac{\sum_{i=1}^n r_{ai} s_i t_i}{u^* - u_o} + s$
Tamaño de Lote Óptimo	$k_i^* = \frac{L - s_i}{t_i}$

### Lotes en Paralelo Óptimos

Para encontrar el tamaño de lote que minimiza el tiempo de ciclo en operaciones de lote en paralelo, es conveniente encontrar la mejor utilización y luego determinar el tamaño de lote que

corresponde a esta utilización., al igual que en el caso de operaciones de lote en serie.

$r_a$  = Tasa de arribo (partes/hora)

$C_a$  = Coeficiente de variación (CV) de tiempos entre arribos

$t$  = Tiempo de procesamiento de un lote (hr)

$C_e$  = Coeficiente de Variación efectivo del tiempo de procesamiento de un lote

$u_m = r_a t$  = Utilización resultante de un tamaño de lote igual a 1

$u$  = Utilización de la estación

$k$  = Tamaño de lote en paralelo

**TABLA 10**  
**FÓRMULAS PARA OPTIMIZACIÓN DE LOTES EN PARALELO**

<b>Factores</b>	<b>Fórmulas</b>
Mínimo Tamaño de lote para estabilizar el sistema	$k > u_m = r_a t$
Utilización	$U = \frac{r_a}{k/t}$
Tiempo de Formación de un Lote	$WTBT = \frac{k-1}{2r_a}$
Tiempo promedio de espera en cola	$CT_q = \left( \frac{C_a^2/k + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1-u} \right) t$

Tiempo de Ciclo	$CT = WTBT + CT_q + t$
Utilización Óptima	$u^* = \frac{1}{1 + \sqrt{C_a^2 / [u_m (1 + C_e)] + C_e^2}}$
Tamaño de Lote Óptimo	$k^* = \frac{u_m}{u^*}$

## 2.2. Aspectos Generales de la Herramienta SimRunner

En 1995, se desarrolló la herramienta de optimización para simulación conocida como “SimRunner”. Esta herramienta de simulación consiste de dos fases; la primera fase es de optimización y la segunda de determinación del período de calentamiento y número de réplicas.

### 2.2.1. Fases del SimRunner

Las fases de esta herramienta de optimización permiten la obtención de información útil, que deberá ser considerada para las condiciones iniciales de la corrida de un modelo.

#### Fase 1:

##### - **Determinación del tiempo de calentamiento (Warm Up)**

El tiempo que toma un sistema para alcanzar su estado estable se lo conoce como Warm Up. Es ideal que en toda simulación

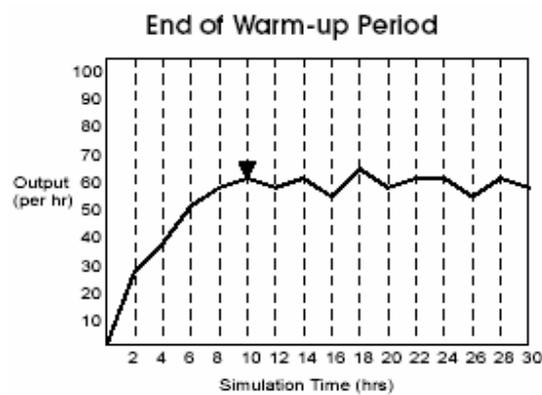
No Terminal, se elimine este período antes de recolectar las estadísticas; ya que eliminamos así cualquier tendencia resultado de observaciones tomadas durante el estado transitorio del modelo. Para algunos modelos, el estado estable puede ser alcanzado en cuestión de horas. Para otros modelos esto puede tomar varios cientos de horas hasta lograr el estado estable.

Para determinar el tiempo de Warm Up se debe realizar una corrida preliminar del modelo de simulación, preferiblemente con varias réplicas (de 3 a 5) y observar en qué tiempo el sistema alcanza estabilidad estadística. La longitud de corrida de cada réplica debería ser relativamente larga y permitir que ocurran eventos poco probables por lo menos 2 o 3 veces, como es el caso de los paros no programados.

Ejemplo:

La siguiente figura ilustra el número promedio de partes procesadas cada hora, para varias réplicas.

Se observa que la estabilidad estadística es alcanzada aproximadamente cuando se cumplen 10 horas del tiempo de corrida. Por lo tanto, se concluye que el Warm Up a utilizar debe ser de 10 horas.



**FIGURA 2.7 GRÁFICA DE WARM-UP**

- ***Determinación del número de réplicas necesarias para obtener estimaciones con un determinado nivel de precisión y confianza.***

Estadísticamente es necesario trabajar con una muestra de tamaño  $n$  para que los resultados sean más confiables, no es representativo trabajar solo con una réplica ya que debe considerarse que eventos inesperados ocurran al menos una vez.

Dependiendo de la variable a analizar, el tamaño de la muestra o el número de réplicas varía, es aquí donde SimRunner dependiendo de esta variabilidad estima el número mínimo de corridas necesarias para obtener una muestra adecuada que proporcione estadísticas confiables para su posterior análisis.

Promodel hace uso de la distribución t-Student para la estimación del número de réplicas. La lógica utilizada por el programa está basada en la siguiente fórmula:

$$N = \left( \frac{Z_{\alpha/2, v} S_{muestra}}{E} \right)^2, \text{ donde}$$

N: Tamaño de Muestra o Número de Réplicas

S: Desviación estándar de la muestra

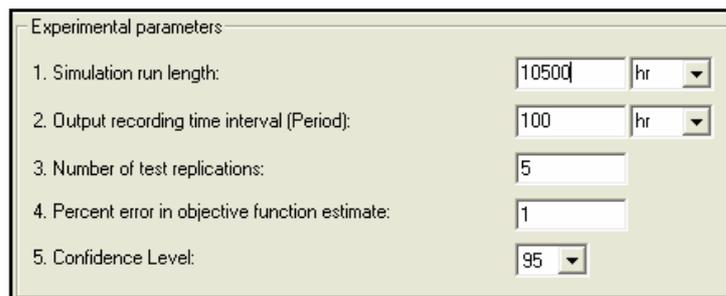
E: % Error

$Z_{\alpha/2}$  = Valor de la distribución Z para un error alfa que sea complementario al nivel de confianza con el que se desea trabajar.

Ejemplo:

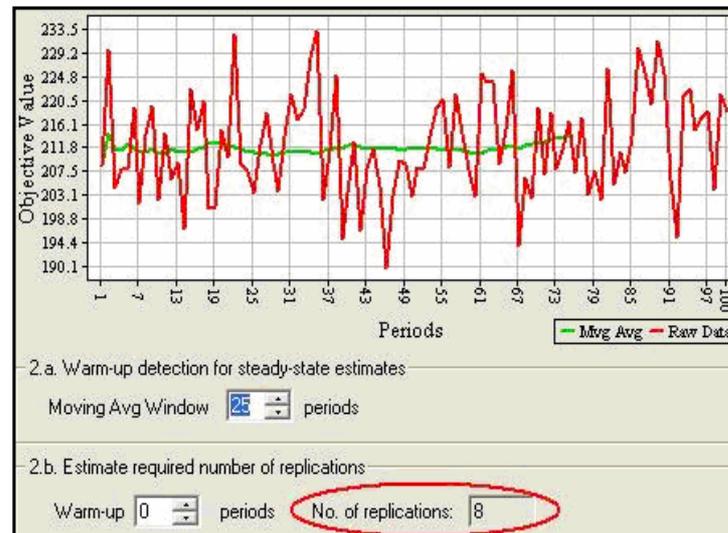
En el gráfico mostrado a continuación proporcionado por SimRunner, se muestra un ejemplo particular con valores establecidos de porcentaje de error, tiempo de período, tiempo de corrida, número de réplicas para la corrida preliminar y nivel de confianza.

Con estos datos ya establecidos, se procede a correr el modelo de simulación, cuando el tiempo de corrida ha finalizado, el programa automáticamente proporciona una segunda ventana que muestra la gráfica que determina el Warm Up y proporciona a su vez el número de réplicas necesario para la obtención de datos confiables.



Experimental parameters	
1. Simulation run length:	10500 hr
2. Output recording time interval (Period):	100 hr
3. Number of test replications:	5
4. Percent error in objective function estimate:	1
5. Confidence Level:	95

**FIGURA 2.8 PARÁMETROS EXPERIMENTALES**



**FIGURA 2.9 GRÁFICA DE WARM-UP DEL EJEMPLO**

## **Fase 2:**

**- Realiza la búsqueda de valores óptimos para las variables de decisión importantes (Optimización)**

El procedimiento para realizar la optimización con SimRunner sigue los siguientes pasos:

### **1) Crear, Verificar y Validar**

Después de crear, verificar, y validar el modelo de simulación que usa ProModel, se define como macros los factores de entrada que se desee monitorear. SimRunner usará los factores

de entrada para probar cómo modificándolos incrementa o decrece el desempeño del modelo.

### 2) Construya un proyecto

Con el modelo *listo* para la evaluación, se crea un nuevo proyecto de SimRunner y se define un objetivo para calibrar el desempeño del sistema. Después de definir el objetivo, se selecciona qué factores de entrada se desea probar. Cuando se optimiza un modelo, SimRunner prueba los factores de entrada para encontrar qué combinación de factores causa la mayor mejora en el desempeño del modelo basado en la función objetivo.

### 3) Correr los Experimentos

Una vez seleccionado los factores de entrada y definida la función objetivo en la simulación, se usa SimRunner para conducir una serie de experimentos sobre el modelo. SimRunner corre el modelo y va probando una variedad de posibles combinaciones de valores. Después de realizadas las pruebas,

SimRunner cataloga los resultados de prueba descendientemente desde la mejor combinación de factores hasta la peor.

#### 4) Evaluar sugerencias

El cuarto paso debe considerar y evaluar las sugerencias de SimRunner. Esto es muy útil porque SimRunner a menudo identificará varias posibles soluciones al problema, sin embargo por motivos varios, la persona encargada de la simulación puede preferir una solución a otra. También podría darse el caso de que se deseen hacer más corridas (réplicas) y observar intervalos de confianza para en un futuro evaluar la lista de posibles soluciones proporcionadas por SimRunner.

#### 5) Implementar solución

### **2.2.2. SimRunner como Herramienta de Optimización**

SimRunner usa algoritmos estratégicos, tanto genético como evolutivos. El diseño específico de estos algoritmos para SimRunner está basado en el trabajo del Doctor Royce Bowden y

otros expertos. Algoritmos evolutivos han sido evaluados extensivamente por académicos y han demostrado ser confiables en la optimización de sistemas simulados.

### Algoritmos evolutivos

Un algoritmo evolutivo es una técnica de optimización numérica basada en la evolución simulada. Las soluciones generadas del algoritmo evolutivo deben adaptarse a su ambiente para sobrevivir. Ya que cada solución potencial devuelve un resultado específico, se debe establecer una función objetivo para medir el desempeño de cada solución. Si el valor devuelto cae dentro de un rango aceptable definido por la función objetivo, SimRunner seguirán examinando el valor mientras continúa en búsqueda de la solución óptima.

### **2.2.3 Beneficios**

Según los miembros de la Corporación PROMODEL (2001), SimRunner es una herramienta de apoyo para la toma de decisiones usada para optimizar procesos simulados que permite

encontrar las condiciones de funcionamiento óptimas para un sistema. SimRunner toma los modelos de simulación existentes, los evalúa, luego realiza pruebas para encontrar mejores modos de alcanzar los resultados deseados.

Las herramientas de simulación son usadas para predecir y mejorar el desempeño del sistema o establecer las relaciones entre varios elementos de la misma. A través del actual modelo, se puede analizar la conducta “Que pasaría si?” para determinar la mejor forma de mejorar el desempeño del sistema.

SimRunner ayuda a optimizar el sistema a través de sofisticados algoritmos de optimización. Este análisis permite evaluar múltiples factores simultáneamente para establecer relaciones causa y efecto entre ellos, y averiguar qué combinaciones de factores producen los mejores resultados. Cada proyecto requiere un modelo validado, un estándar para medir el desempeño del sistema (una función objetivo), y un grupo de factores (factores de entrada) que SimRunner puede cambiar para experimentar. Con estas relaciones establecidas, es posible

desarrollar una solución que beneficiará todos los aspectos de la operación.

Usar SimRunner ayudará a localizar soluciones verdaderas monitoreando como los cambios afectan cada parte del modelo. En otras palabras, SimRunner no permitirá mejorar un área del modelo a expensas de otro, los resultados que se consigan serán beneficiosos al modelo entero.

# CAPÍTULO 3

## 3. DEMOSTRACIÓN DE LA LEY ESTABLECIDA POR LA FÍSICA DE FÁBRICA PARA EL MANEJO DE LOTES DE PROCESO

### 3.1. Demostración de la Ley de Lote de Proceso

La Ley del Lote de Proceso establecida por la Física de Fábrica para el manejo de lotes aduce que:

*“En estaciones que operan con lotes o con tiempos de setup significativos se cumple:*

*Principios:*

*1.- El tamaño mínimo de lote de proceso para que el sistema se vuelva estable puede ser mayor que 1.*

*2.- A medida que el tamaño de lote se incrementa, el tiempo de ciclo crece proporcionalmente con él.*

*3.- El tiempo de ciclo en una estación será minimizado con un tamaño de lote no necesariamente igual a 1.*

Se procederá a desarrollar casos sencillos, los mismos que serán representados a través de modelos de simulación, con el fin de corroborar la veracidad del enunciado anterior. Esto se realizará a través de la comparación de los parámetros de Utilización y Tiempo de Ciclo obtenidos para diferentes tamaños de lote; ya sea por medio de las ecuaciones elaboradas por Hopp & Spearman y los resultados obtenidos a través de un modelo de Simulación.

### **3.1.1. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Serial Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman**

Con la finalidad de simplificar los cálculos, los autores Wallace Hopp y Mark Spearman, plantean ciertas asunciones para la aplicación de esta técnica; las cuales son necesarias que sean mencionadas.

Asunciones:

- 1) Las piezas arriban en lotes y se considera un tiempo de setup entre ellos.
- 2) El Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo Efectivo de Procesamiento de un Lote ( $C_e^2$ ) incluye tiempo de procesamiento y tiempo de setup.
- 3) El  $C_e^2$  de un lote es igual a 0.5 sin importar el tamaño de lote.
- 4) El Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo entre Arribos ( $C_a^2$ ) es siempre 1.

Las asunciones realizadas por Hopp y Spearman, limitan ampliamente el campo de aplicación de éstos algoritmos; ya que únicamente sería adecuado utilizarlos en casos que presenten un nivel de variación específico y similar al asumido.

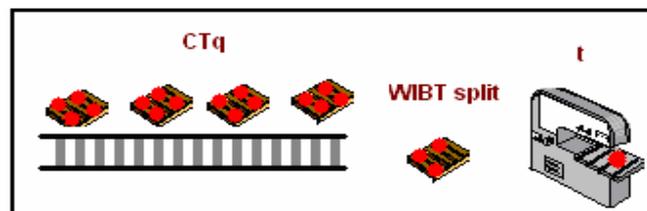
Somos concientes de que en los sistemas productivos reales, es imposible que todos se desempeñen con un mismo nivel de variabilidad. Por lo que, para efectos de la demostración, algunas de estas asunciones serán modificadas más adelante.

Por el momento se planteará el caso de estudio empleado para la demostración y se procederá con la validación de la ley y sus principios.

Caso de Estudio # 1:

El proceso inicia cuando lotes de piezas arriban a la bodega a una tasa de 1.167 piezas/hora. Las piezas son enviadas para ser procesadas individualmente en la estación con un tiempo de 0.5 horas distribuidos exponencialmente. Existe además, un tiempo destinado para la realización de setups de 0.8 horas (distribuidos exponencialmente) y es realizado cada vez que un lote completo de piezas haya sido procesado.

En esta operación, las piezas individuales son enviadas a la siguiente estación tan pronto hayan sido procesadas (splitting).



**FIGURA 3.1 ESQUEMA DE LOTE EN SERIE CON TÉCNICA SPLIT**

CTq= Tiempo en que lotes de piezas esperan en cola para ser procesados.

WIBT= Tiempo de Espera de las piezas en el lote cuando se encuentran frente a la máquina antes de ser procesadas.

T= Tiempo de Procesamiento de una pieza.

*Modificaciones realizadas a las Asunciones:*

Como ya se mencionó, algunas modificaciones se realizarán para llevar a cabo la aplicación de estas leyes.

**- Modificación a Asunción 3:**

La técnica de Hopp & Spearman no considera variación mientras aumenta el tamaño de lote (k). Es por esto, que se procederá a programar el modelo de simulación de tal forma que permita determinar el  $C_e^2$  para cada valor de "k"; así se calcularán valores más precisos de tiempo de ciclo y evitaremos asunciones generales y poco precisas.

**- Modificación a Asunción 4:**

Para el caso de estudio, se considerarán tiempos de arribo determinísticos.

Una vez planteadas las asunciones, se procederá finalmente a plantear los datos del caso de estudio y demostrar a través de éste, la ley y sus principios.

Datos:

A partir de la información presentada, procedemos a resumir los datos que utilizaremos para el cálculo del tiempo de ciclo de un lote, a través de las fórmulas de Hopp y Spearman:

$k$  = Tamaño de Lote en serie

$r_a$  = Tasa de arribo (piezas/hora) = 1.167 p/h

$t$  = Tiempo de procesamiento de una pieza (hr) = 0.5 hr

$s$  = Tiempo de Setup (hr) = 0.8 hr

$C_a^2$  = SCV de tiempos de arribo = 0 (Arribos Determinísticos)

$C_e^2$  = SCV efectivo de tiempo de procesamiento (Dist. Exponencial)

La fórmula para determinar el tiempo de ciclo de un lote en estado estable es la siguiente:

$$CT_{split} = CT_q + s + WIBT_{split} + t \quad ,$$

$$CT_{split} = CT_q + s + \frac{k-1}{2}t + t$$

**Procedimiento para Demostración del Primer Principio:**

El procedimiento utilizado para la demostración del primer principio de esta ley es el siguiente:

1.- Considerando un tamaño de lote igual a 1, se calcula el tiempo efectivo de proceso y nivel de utilización de la estación:

Tiempo Efectivo:

$$t_e = kt + s$$

$$t_e = (1p)x(0.5h / p) + (0.8h)$$

$$t_e = 1.3h$$

Utilización:

$$u = \frac{r_a t_e}{k}$$

$$u = \frac{(1.167 p / h) x (1.3 hr)}{1 p} = 1.52$$

Con este tamaño de lote se obtuvo un nivel de utilización de 1.52, lo cual indica que a largo plazo el sistema será inestable.

2.- Para determinar el mínimo tamaño de lote en el cual el sistema se vuelva estable ( $U < 1$ ), se procede a utilizar la siguiente condición:

$$\text{Para que } U < 1, \text{ se requiere que } k > \frac{sr_a}{1 - tr_a}$$

$$\text{Para que } U < 1, \text{ se requiere que } k > \frac{(0.8h)x(1.167 p / h)}{1 - (0.5h)x(1.167 p / h)}$$

$$\text{Para que } U < 1, \text{ se requiere que } k > 2.24p$$

El resultado obtenido puede ser corroborado en la siguiente tabla, donde se aprecia como disminuye la utilización del sistema

mientras aumenta el tamaño de lote, logrando la estabilidad del sistema a un nivel de  $k$  igual a 3 piezas.

**TABLA 11**  
**UTILIZACIONES CALCULADAS PARA DIFERENTES TAMAÑOS**  
**DE LOTE MEDIANTE TÉCNICA DE HOPP & SPEARMAN**  
**(CASO DE ESTUDIO # 1)**

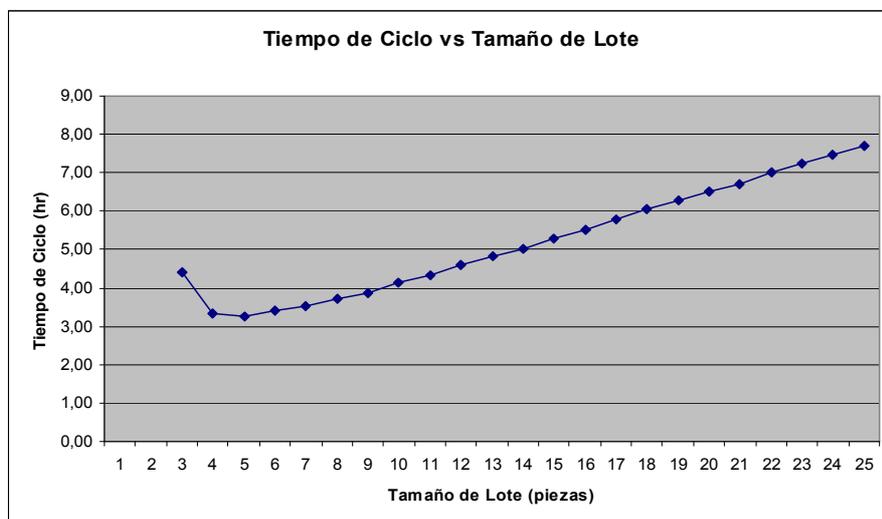
Tamaño de lote (k)	Utilización (U)
1	1,52
2	1,05
<b>3</b>	<b>0,89</b>

Se tiene que con un lote de tamaño 3, la utilización es del 89%, lo que indica que el sistema es estable y queda demostrado el primer principio de esta ley.

**Demostración del Segundo Principio:**

Para demostrar que a medida que aumenta el tamaño de lote se incrementa el tiempo de ciclo del sistema; se realizó la siguiente gráfica considerando diferentes tamaños de lote ( $k$ ), para los cuales se cálculo sus respectivos Tiempos de Ciclo.

Para esto se aplicaron las fórmulas antes mencionadas y se consideraron las asunciones expuestas al inicio de esta sección.



**FIGURA 3.2 GRÁFICA DE “TIEMPO DE CICLO” VS “TAMAÑO DE LOTE” OBTENIDA MEDIANTE TÉCNICA DE HOPP & SPEARMAN (CASO DE ESTUDIO # 1 – TÉCNICA SPLIT)**

Observando la gráfica se observa la tendencia creciente de los tiempos de ciclo a medida que se incrementa el tamaño de lote, con lo cual queda demostrado el segundo principio.

**Demostración del Tercer Principio:**

Para demostrar el 3er principio, basta con observar la gráfica anterior, en la cual se aprecia que el menor tiempo de ciclo no se obtiene con un lote de tamaño igual a 1.

En la Tabla 12 se muestran los resultados del caso de estudio planteado, calculado para diferentes tamaños de lotes con sus respectivos tiempos de ciclo:

**TABLA 12**  
**TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE SERIAL SPLIT**  
**OBTENIDO MEDIANTE ALGORITMOS DE HOPP & SPEARMAN**

Tamaño de Lote (k)	CTq	Setup	WIBT	t	Tiempo de Ciclo (hr)
1					No es calculable (U>1)
2					No es calculable (U>1)
3	2,62	0,80	0,50	0,50	4,45
4	1,28	0,80	0,75	0,50	3,56
<b>5</b>	<b>0,95</b>	<b>0,80</b>	<b>1,00</b>	<b>0,50</b>	<b>3,24</b>
6	0,86	0,80	1,25	0,50	3,31
7	0,72	0,80	1,50	0,50	3,48
8	0,65	0,80	1,75	0,50	3,67
9	0,56	0,80	2,00	0,50	3,90
10	0,57	0,80	2,25	0,50	4,12

Se puede apreciar que el mínimo tiempo de ciclo (3.24 hr), se obtuvo con un tamaño de lote igual a 5 piezas, y no con 1 pieza, con lo cual queda demostrado el 3er principio.

Observaciones:

En la tabla se observa que a medida que aumenta el tamaño de lote, el tiempo de espera en cola (CTq) disminuye; esto se debe a que la utilización va reduciéndose paulatinamente.

Y por el contrario, el Tiempo de Espera de las piezas en el Lote (WIBT) aumenta, debido a que mientras más grande es el tamaño de lote, mas piezas deben ser retiradas del mismo para ser procesadas y esto toma más tiempo.

### **3.1.2. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Serial con Técnica Split empleando Simulación**

Para efectos de comparación con el método anterior, se busca que los resultados que se obtengan sean realizados en un estado estable; ya que eliminamos así cualquier tendencia que pudo haberse producido durante el estado transitorio del modelo, para esto es necesario determinar la longitud de corrida, el nivel de warm-up y el número de réplicas sobre la cual se generarán los resultados del modelo.

Condiciones Iniciales del Modelo de Simulación: Longitud de Corrida, Nivel de Warm-Up y Número de Réplicas:

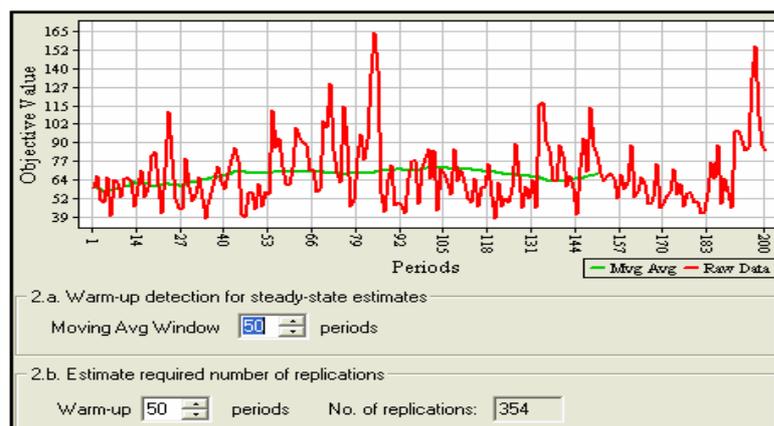
Dados los siguientes parámetros, mostrados en la Figura 3.3, se dispone a correr el modelo de simulación para obtener la gráfica

que mostrará el comportamiento de la variable respuesta (Tiempo de Ciclo) en el tiempo.

Experimental parameters	
1. Simulation run length:	20000 hr
2. Output recording time interval (Period):	100 hr
3. Number of test replications:	5
4. Percent error in objective function estimate:	1
5. Confidence Level:	95

**FIGURA 3.3 PARÁMETROS EXPERIMENTALES DEL CASO DE LOTE SERIAL SPLIT**

La gráfica obtenida a partir de la corrida del modelo de simulación es la siguiente:



**FIGURA 3.4 WARM-UP DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO DE LOTE SERIAL SPLIT**

Se observa que aproximadamente cuando el modelo ha corrido 50 períodos, lo cual es equivalente a 5000 horas de corrida (cada período fue establecido de 100 horas), el sistema logra estabilizarse y los valores proporcionados a partir de este tiempo son los recomendables a ser utilizados para nuestro análisis.

Uno de los tantos beneficios de SimRunner es que proporciona el tamaño de muestra o número de réplicas que debe ser utilizado para obtener una muestra adecuada que proporcione estadísticas confiables, en este caso el valor sugerido es de 354 réplicas.

En resumen, las condiciones bajo las cuales se llevará a cabo el desarrollo del modelo son las siguientes:

**TABLA 13**  
**CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN**  
**DEL CASO DE ESTUDIO # 1 APLICADO A LOTES EN**  
**SERIE CON TÉCNICA SPLIT**

<b>Warm-Up (hr)</b>	5000
<b>Número de Réplicas</b>	354
<b>Tiempo de Corrida (hr)</b>	4000

El tiempo de Corrida establecido es de 4000 horas, lo que equivale a 166 días de 24 horas cada uno.

**Demostración del Primer Principio:**

En base a las condiciones iniciales establecidas, los datos generados por el programa fueron los siguientes:

**TABLA 14  
UTILIZACIONES OBTENIDAS PARA DIFERENTES  
TAMAÑOS DE LOTE MEDIANTE SIMULACIÓN  
(CASO DE ESTUDIO # 1 – TÉCNICA SPLIT)**

<b>Tamaño de lote (k)</b>	<b>Utilización (U)</b>
1	1
2	1
<b>3</b>	<b>0,89</b>

Observación: ProModel no calcula utilidades superiores a 1, en caso de que el sistema tenga una utilización mayor a este dígito, el valor proporcionado será de 1, lo que quiere decir que la máquina está siendo utilizada al 100% o más.

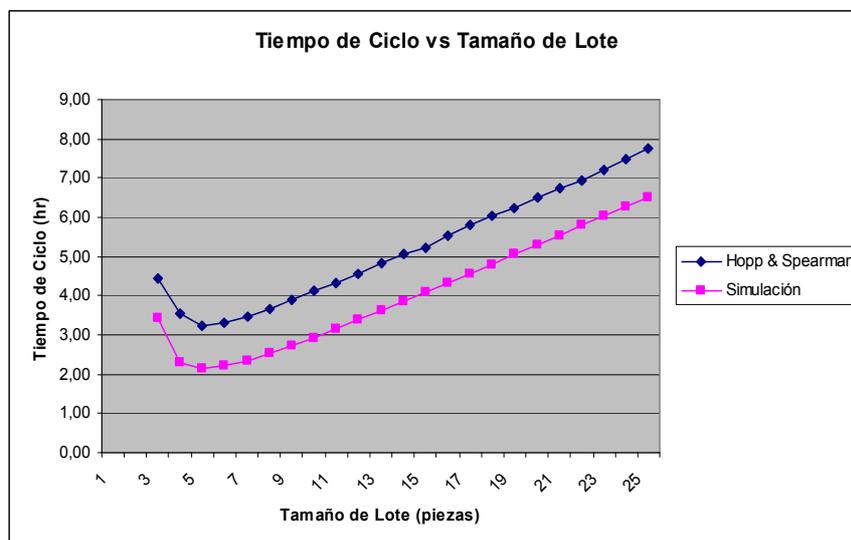
Una vez realizada esta observación, queda comprobado una vez más que el tamaño mínimo de lote de proceso para que el sistema se vuelva estable puede ser mayor que 1.

En este caso, para que el sistema alcance su estabilidad el tamaño de lote ideal para trabajar debe ser de 3 piezas o más, éste valor fue igual al obtenido por el método anterior.

**Demostración del Segundo Principio:**

La gráfica obtenida a partir de los datos generados por la simulación permite demostrar visualmente que a medida que el tamaño de lote se incrementa, el tiempo de ciclo crece proporcionalmente con él.

En la gráfica se muestra la curva de Tiempo de Ciclo obtenida por el método anterior y el actual, que se obtuvo como resultado del modelo de Simulación.



**FIGURA 3.5 GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS CURVAS DE “TIEMPO DE CICLO” VS “TAMAÑO DE LOTE” OBTENIDAS POR AMBAS METODOLOGÍAS (CASO DE ESTUDIO # 1 – TÉCNICA SPLIT)**

**Demostración del Tercer Principio:**

Para demostrar que el tiempo de ciclo en una estación puede ser minimizado con un tamaño de lote no necesariamente igual a 1, presentamos la siguiente tabla donde se muestran los tiempos de ciclo de un lote calculados a diferentes valores, estos datos fueron generados por el programa de simulación.

**TABLA 15**  
**TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE SERIAL SPLIT**  
**OBTENIDOS MEDIANTE SIMULACIÓN**

Tamaño de Lote (k)	Tiempo de Ciclo (hr)
1	No es calculable (U>1)
2	No es calculable (U>1)
3	3,41
4	2,28
<b>5</b>	<b>2,14</b>
6	2,21
7	2,34
8	2,52
9	2,72
10	2,93

Al igual que el método anterior, se observa que el mínimo tiempo de ciclo (2.14 hr) fue obtenido con un tamaño de lote de 5 piezas, y no con lotes unitarios, con lo cual queda demostrado el tercer principio.

Observaciones:

En la Figura 3.5 se observa que existe una diferencia aproximada de 1 hora en el tiempo de ciclo entre ambos métodos, esto puede deberse a que la técnica de Hopp & Spearman establece ciertas asunciones para llevar a cabo el método, pero para fines de nuestro estudio estas fueron modificadas, lo cual pudo llegar a

alterar los resultados, causando la brecha existente entre ambas curvas.

Como otra razón podemos anotar que uno de los términos de la fórmula de Hopp & Spearman: WIBT (Tiempo de Espera de las piezas en el lote), calcula este valor considerando el tiempo promedio de espera de la primera y de la última pieza que conforman el lote obteniendo un resultado poco preciso; mientras que la simulación recolecta resultados de la espera real de cada una de las piezas que conforman el lote, lo que hace que los resultados obtenidos sean más confiables.

### **Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Serial**

#### **Split**

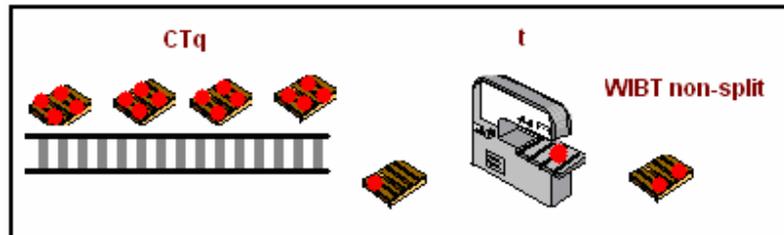
El objetivo de este capítulo es lograr la demostración de la Ley de Lote de proceso usando ambas técnicas; y se lo ha conseguido.

**TABLA 16**  
**RESULTADOS DE LA DEMOSTRACIÓN DE LA LEY**  
**PARA EL CASO LOTE SERIAL SPLIT**

<b>Caso Serial Split</b>		
<b>Principios</b>	<b>Hopp &amp; Spearman</b>	<b>Simulación</b>
1) K min para lograr estabilidad del sistema	K = 3, (U = 0,89)	K = 3, (U = 0,89)
2) K es directamente proporcional a CT	SI	SI
3) Valor de K que minimiza el CT	K = 5, (CT = 3.24hr)	K = 5, (CT = 2.14hr)

### 3.1.3. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Serial Non Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman

En la demostración de la Ley de Lote de Proceso para este caso en particular, se hará uso del mismo problema planteado para la demostración anterior, pero ahora por tratarse de una Técnica Non Split, las piezas procesadas esperan hasta formarse un lote, el mismo que será enviado a la siguiente estación.



**FIGURA 3.6 ESQUEMA DE LOTE EN SERIE  
CON TÉCNICA NON-SPLIT**

$CT_q$ = Tiempo en que las piezas esperan en cola para ser procesados.

$T$ = Tiempo de Procesamiento de la pieza.

$WIBT$ = Tiempo de Espera de las piezas en el lote.

Partiendo de las mismas asunciones ya mencionadas y de la información del caso planteado en el numeral anterior, procedemos a plantear la fórmula que determina el Tiempo de Ciclo de un lote aplicando la Técnica Non Split.

$$CT_{non-split} = CT_q + s + WIBT_{non-split} + t$$

$$CT_{non-split} = CT_q + s + (k-1)t + t$$

La diferencia en la fórmula para calcular el tiempo de ciclo de un lote bajo estas dos formas (Split y Non Split) radica básicamente en el Tiempo de Espera de las piezas en el lote (WIBT). Para el caso de Lotes Seriales Non Split, el WIBT es mayor que para lotes seriales Split; ya que lotes de piezas tienen que formarse antes de ser enviados a la siguiente estación.

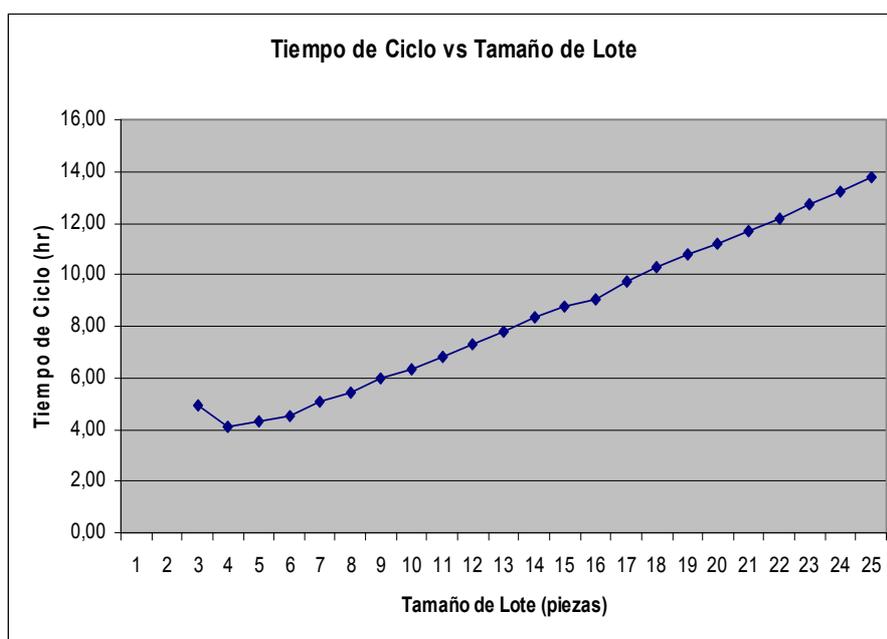
En la demostración del tercer principio observaremos la Tabla 17, que presenta los tiempos de ciclo calculados para diferentes tamaños de lote; ahí se observa que para el mismo caso de estudio pero aplicando la técnica Non Split, se obtiene tiempos de ciclo superiores a los obtenidos por la Técnica Split.

**Demostración del Primer Principio:**

Considerando que la única diferencia entre estos dos escenarios se debe a la forma en que las piezas abandonan la estación, una vez que han sido procesadas; la demostración del primer principio es la misma que se realizó para el caso de Lote Serial usando la Técnica Split.

**Demostración del Segundo Principio:**

Para demostrar este segundo principio, presentamos la siguiente gráfica obtenida a través de la aplicación de las fórmulas expuestas anteriormente y que muestra la tendencia creciente de los tiempos de ciclo a medida que se incrementa el tamaño de lote.



**FIGURA 3.7 GRÁFICA DE “TIEMPO DE CICLO” VS “TAMAÑO DE LOTE” OBTENIDA MEDIANTE TÉCNICA DE HOPP & SPEARMAN (CASO DE ESTUDIO # 1 – TÉCNICA NONSPLIT)**

**Demostración del Tercer Principio:**

La forma de demostración es la misma que para la técnica Split, ésta puede ser de dos formas:

- La primera observando la Figura 3.7, en la cual se aprecia que el menor tiempo de ciclo no se obtiene con un lote de tamaño igual a 1.
- La segunda a través de la siguiente tabla que muestra los tiempos de ciclo de un lote, calculados a partir de la fórmula descrita anteriormente.

**TABLA 17  
TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE SERIAL NONSPLIT  
OBTENIDOS MEDIANTE ALGORITMOS DE HOPP & SPEARMAN**

Tamaño de Lote (k)	CTq	Setup	WIBT	t	Tiempo de Ciclo (hr)
1					No es calculable (U>1)
2					No es calculable (U>1)
3	2,62	0,8	1	0,5	4,92
<b>4</b>	<b>1,33</b>	<b>0,8</b>	<b>1,5</b>	<b>0,5</b>	<b>4,13</b>
5	0,98	0,8	2	0,5	4,28
6	0,73	0,8	2,5	0,5	4,53
7	0,77	0,8	3	0,5	5,07
8	0,64	0,8	3,5	0,5	5,44
9	0,66	0,8	4	0,5	5,96
10	0,52	0,8	4,5	0,5	6,32

Se puede apreciar que el mínimo tiempo de ciclo (4.13 hr), se obtuvo con un tamaño de lote igual a 4 piezas, y no con 1 pieza, con lo cual queda demostrado el 3er principio.

### **3.1.4. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Serial con Técnica Non Split empleando Simulación**

El procedimiento para esta demostración es el mismo que para el caso de Lotes en Serie Split, por lo cual únicamente presentaremos los resultados obtenidos.

Cálculo de Longitud de Corrida, Nivel de Warm-Up y Número de Réplicas:

Las condiciones bajo las cuales se llevará a cabo el desarrollo del modelo son las siguientes:

**TABLA 18  
CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN  
DEL CASO DE ESTUDIO # 1 APLICADO A LOTES EN  
SERIE CON TÉCNICA NONSPLIT**

<b>Warm-Up (hr)</b>	4000
<b>Número de Réplicas</b>	252
<b>Tiempo de Corrida (hr)</b>	2000

El tiempo de Corrida establecido es de 2000 horas, lo que equivale a 83 días de 24 horas cada uno.

**Demostración del Primer Principio:**

El procedimiento utilizado para la demostración del primer principio de esta ley es el mismo realizado para el caso del Lote Serial usando Técnica Split.

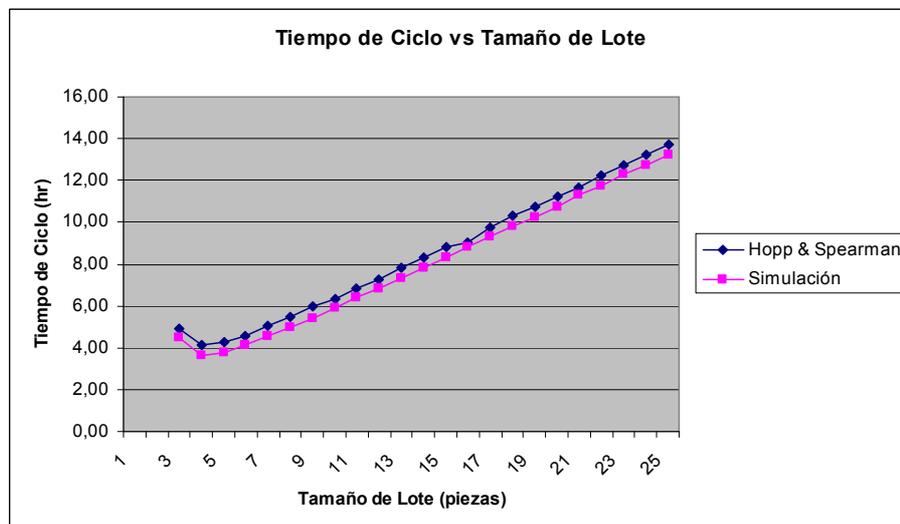
**TABLA 19  
UTILIZACIONES OBTENIDAS PARA DIFERENTES  
TAMAÑOS DE LOTE MEDIANTE SIMULACIÓN  
(CASO DE ESTUDIO # 1 –TÉCNICA NONSPLIT)**

Tamaño de lote (k)	Utilización (U)
1	1
2	1
3	0,89

Una vez más queda demostrado que el tamaño de lote para que el sistema alcance su estado estable, no necesariamente se lo obtiene con un valor de  $k=1$ .

**Demostración del Segundo Principio:**

La gráfica obtenida a partir de los datos generados por la simulación es la siguiente:



**FIGURA 3.8 GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS CURVAS DE “TIEMPO DE CICLO” VS “TAMAÑO DE LOTE” OBTENIDAS POR AMBAS METODOLOGÍAS (CASO DE ESTUDIO # 1 – TÉCNICA NONSPLIT)**

En esta gráfica se muestran las dos curvas, ambas son muy próximas entre sí. Se aprecia también que el Tiempo de Ciclo crece proporcionalmente al Tamaño del Lote, con lo que se demuestra este segundo principio.

**Demostración del Tercer Principio:**

A partir de esta tabla que muestra los datos generados por el programa de simulación, se observa que el tiempo de ciclo es minimizado con un tamaño de lote de 4 piezas, con lo cual queda demostrado por la Técnica de Simulación este tercer principio.

**TABLA 20**  
**TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE SERIAL**  
**NONSPPLIT OBTENIDOS MEDIANTE SIMULACIÓN**

Tamaño de Lote (k)	Tiempo de Ciclo (hr)
1	No es calculable ( $U > 1$ )
2	No es calculable ( $U > 1$ )
3	4,45
<b>4</b>	<b>3,66</b>
5	3,80
6	4,12
7	4,53
8	4,97
9	5,43
10	5,89

**Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Serial**

**Non Split**

Una vez más se ha demostrado la veracidad de la ley y sus principios.

**TABLA 21**  
**RESULTADOS DE LA DEMOSTRACIÓN DE LA LEY**  
**PARA EL CASO LOTE SERIAL NONSPPLIT**

Caso Serial Non Split		
Principios	Hopp & Spearman	Simulación
1) K min para lograr estabilidad del sistema	K = 3, (U = 0,89)	K = 3, (U = 0,89)
2) K es directamente proporcional a CT	SI	SI
3) Valor de K que minimiza el CT	K = 4, (CT = 4.13 hr)	K = 4, (CT = 3.66 hr)

### **3.1.5. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Paralelo empleando la Técnica de Hopp & Spearman**

Con la finalidad de simplificar los cálculos, los autores Wallace Hopp y Mark Spearman, plantean una asunción para la aplicación de esta técnica desarrollada para lotes en paralelo.

#### Asunción:

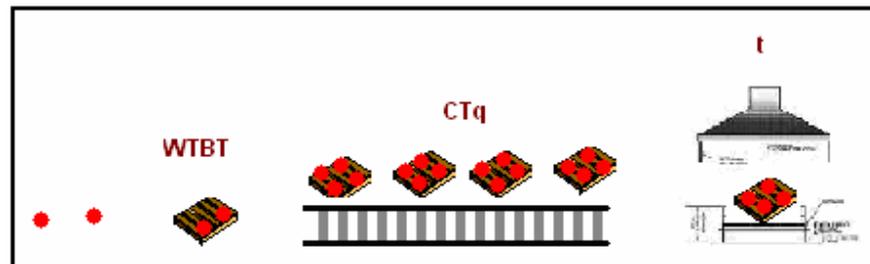
- 1) El Coeficiente Cuadrado de Variación del Tiempo entre Arribos ( $C_a^2$ ) es siempre 1.

Una vez planteada la asunción procedemos al planteamiento del segundo caso de estudio.

#### Caso de Estudio # 2:

El proceso inicia cuando piezas individuales arriban a la bodega a una tasa de 0.4 piezas/hora. Las piezas se agrupan hasta formar lotes, en algunos casos, lotes de piezas formados esperan en cola antes de ser procesados como lote.

El tiempo de procesamiento de la operación es de 10 horas con una desviación estándar de 0.5 horas distribuidos normalmente.



**FIGURA 3.9 ESQUEMA DE LOTE EN PARALELO**

WTBT= Tiempo de Formación del Lote.

CTq= Tiempo en que lotes completos esperan en cola para ser procesados.

T= Tiempo de Procesamiento del Lote

Modificación realizada a las Asunción:

**- Modificación a Asunción 1**

Para el caso de estudio, por tratarse de tiempos de arribo determinísticos, la variabilidad existente es nula, por lo cual se establece un  $C_a^2 = 0$ .

Una vez planteada la modificación realizada a la asunción, se procede a plantear los datos del caso de estudio.

**Datos:**

$k$  = Tamaño de Lote en paralelo

$r_a$  = Tasa de arribo (piezas/hora) = 0.4 p/h

$t$  = Tiempo de procesamiento del lote (hr) = N(10, 0.5) hr

$C_a^2$  = SCV de tiempos entre arribos = 0 (Arribos Determinísticos)

$C_e^2$  = SCV efectivo de tiempo de procesamiento de un lote.

La fórmula para determinar el tiempo de ciclo de un lote en paralelo en el estado estable es la siguiente:

$$CT = WTBT + CT_q + t$$

$$CT = \frac{k-1}{2ku} t + \left( \frac{C_a^2/k + C_e^2}{2} \right) \left( \frac{u}{1-u} \right) t + t$$

**Procedimiento para Demostración del Primer Principio:**

El procedimiento utilizado para la demostración del primer principio de esta ley es el siguiente:

1.- Considerando un tamaño de lote igual a 1, se calcula el nivel de utilización de la estación:

Utilización:

$$u = \frac{r_a t}{k}$$

$$u = \frac{(0.4p / hr) * (10hr)}{1p} = 4$$

Con  $k=1$ , se obtuvo un nivel de utilización de 4, lo que indica que a largo plazo el sistema será inestable.

2.- Para determinar el mínimo tamaño de lote para que el sistema se vuelva estable ( $U < 1$ ), se procede a utilizar la siguiente condición:

Para que  $U < 1$ , se requiere que  $k > r_a t$

Para que  $U < 1$ , se requiere que  $k > (0.4p / hr) * (10hr)$

Para que  $U < 1$ , se requiere que  $k > 4p$

Para corroborar el resultado obtenido, se muestra la siguiente tabla en el que se aprecia los diferentes niveles de utilización del sistema calculado con distintos tamaños de lote:

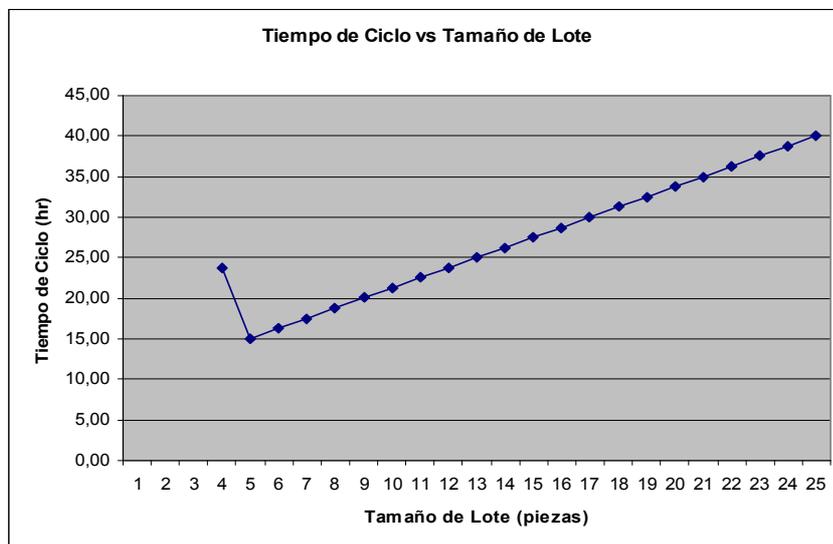
**TABLA 22**  
**UTILIZACIONES CALCULADAS PARA DIFERENTES TAMAÑOS**  
**DE LOTE MEDIANTE TÉCNICA DE HOPP & SPEARMAN**  
**(CASO DE ESTUDIO # 2)**

Tamaño de Lote (k)	Utilización
1	4,00
2	2,00
3	1,33
4	1,00
<b>5</b>	<b>0,80</b>

Se tiene que con un lote de tamaño 5, la utilización es del 80%, lo que indica que el sistema es estable y queda demostrado el primer principio de esta ley.

**Demostración del Segundo Principio:**

Para demostrar que a medida que aumenta el tamaño de lote se incrementa el tiempo de ciclo del sistema; se realizó la siguiente gráfica considerando diferentes valores de k, para los cuales se cálculo sus respectivos Tiempos de Ciclo.



**FIGURA 3.10 GRÁFICA DE “TIEMPO DE CICLO” VS “TAMAÑO DE LOTE” OBTENIDA MEDIANTE TÉCNICA DE HOPP & SPEARMAN (CASO DE ESTUDIO # 2)**

Observando la gráfica desarrollada a partir de las fórmulas establecidas por Hopp y Spearman, queda demostrada la tendencia creciente de los tiempos de ciclo a medida que se incrementa el tamaño de lote.

**Demostración del Tercer Principio:**

Para demostrar el tercer principio, basta con observar la gráfica anterior, en la cual se aprecia que el menor tiempo de ciclo no se obtiene necesariamente con un lote de tamaño igual a 1.

En la siguiente tabla se muestran los valores de Tiempo de Ciclo obtenidos, considerando diferentes tamaños de lotes:

**TABLA 23**  
**TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE EN PARALELO**  
**OBTENIDOS MEDIANTE ALGORITMOS DE HOPP & SPEARMAN**

Tamaño de Lote (k)	CTq	WIBT	t	Tiempo de Ciclo (hr)
1				No es calculable (U>1)
2				No es calculable (U>1)
3				No es calculable (U>1)
4	10,03	3,75	10,00	23,78
<b>5</b>	<b>0,05</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>	<b>15,05</b>
6	0,02	6,25	10,00	16,27
7	0,01	7,50	10,00	17,51
8	0,01	8,75	10,00	18,76
9	0,01	10,00	10,00	20,01
10	0,01	11,25	10,00	21,26

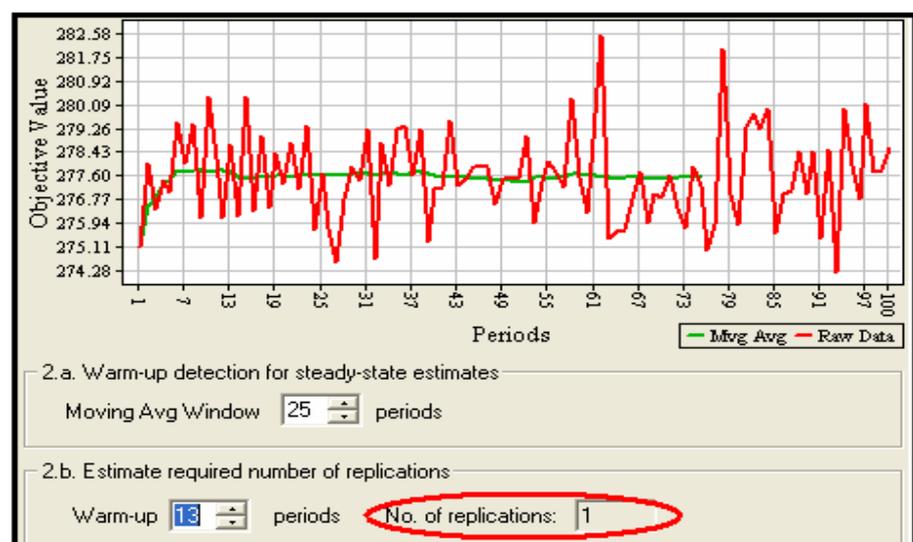
Se observa que el mínimo tiempo de ciclo (15.05 hr), se obtuvo con un tamaño de lote igual a 5 piezas, y no con 1 pieza, con lo cual queda demostrado el 3er principio.

### 3.1.6. Demostración de la Ley para el Caso de Lote Paralelo empleando Simulación

Primero determinaremos las condiciones sobre las cuales se correrá el modelo de simulación:

Cálculo de Longitud de Corrida, Nivel de Warm-Up y Número de Réplicas:

La gráfica que muestra el comportamiento del Tiempo de Ciclo a lo largo del tiempo es bastante estable.



**FIGURA 3.11 WARM-UP DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL CASO DE LOTE EN PARALELO**

Se observa que aproximadamente cuando el modelo ha corrido 13 períodos, lo cual es equivalente a 1300 horas de corrida (cada período fue establecido de 100 horas), el sistema logra estabilizarse y los valores proporcionados a partir de este tiempo son los recomendables a ser utilizados para nuestro análisis.

El tamaño de muestras sugerido es de 1; ya que se trata de un sistema bastante estable, pero el mínimo valor de datos para que una muestra tienda a ser normal es de 30. Por lo tanto, el número de réplicas que utilizaremos es de 30.

**TABLA 24**  
**CONDICIONES INICIALES DE LA SIMULACIÓN**  
**DEL CASO DE ESTUDIO #2**

<b>Warm-Up (hr)</b>	1300
<b>Número de Réplicas</b>	30
<b>Tiempo de Corrida (hr)</b>	5000

El tiempo de Corrida establecido es de 5000 horas, lo que equivale a 208 días de 24 horas cada uno.

**Demostración del Primer Principio:**

A partir de las condiciones establecidas, los datos generados por el programa fueron los siguientes:

**TABLA 25  
UTILIZACIONES OBTENIDAS PARA DIFERENTES  
TAMAÑOS DE LOTE MEDIANTE SIMULACIÓN  
(CASO DE ESTUDIO # 2)**

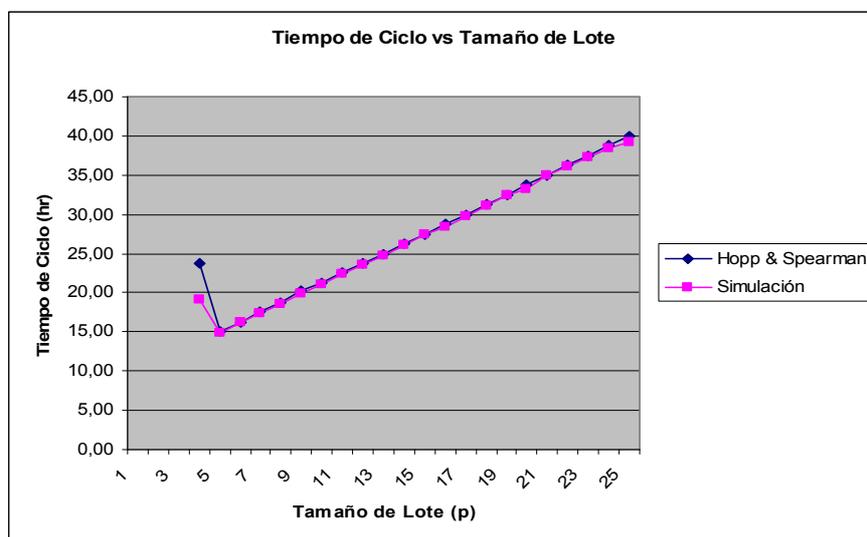
<b>Tamaño de Lote (k)</b>	<b>Utilización</b>
1	1,00
2	1,00
6	1,00
<b>4</b>	<b>0,9986</b>
5	0,80

Como ya se mencionó, ProModel no calcula utilizaciones superiores a 1, es por esto que para los valores de  $k=1$ ,  $k=2$  y  $k=3$ , el programa establece una utilización igual a 1.

Una vez realizada esta observación, queda comprobado que para que el sistema alcance su estabilidad, el tamaño mínimo de lote de proceso puede ser mayor que 1.

**Demostración del Segundo Principio:**

La gráfica obtenida a partir de los datos generados por la simulación permite demostrar visualmente que a medida que el tamaño de lote se incrementa, el tiempo de ciclo crece proporcionalmente con el.



**FIGURA 3.12 GRÁFICA COMPARATIVA DE LAS CURVAS DE "TIEMPO DE CICLO" VS "TAMAÑO DE LOTE" OBTENIDAS POR AMBAS METODOLOGÍAS (CASO DE ESTUDIO # 2)**

Se observa además que existe una gran similitud entre ambas curvas obtenidas, lo que demuestra gran precisión entre los

resultados obtenidos por ambas técnicas, para este tipo de lote en paralelo.

**Demostración del Tercer Principio:**

La tabla mostrada a continuación nos permite demostrar este principio; ya que se observa que el tiempo de ciclo en una estación puede ser minimizado con un tamaño de lote no necesariamente igual a 1.

**TABLA 26  
TIEMPOS DE CICLO PARA EL CASO DE LOTE EN PARALELO  
OBTENIDOS MEDIANTE SIMULACIÓN**

<b>Tamaño de Lote (k)</b>	<b>Tiempo de Ciclo (hr)</b>
1	No es calculable ( $U > 1$ )
2	No es calculable ( $U > 1$ )
3	No es calculable ( $U > 1$ )
4	19,11
<b>5</b>	<b>14,94</b>
6	16,20
7	17,47
8	18,62
9	19,92
10	21,07

Al igual que el método anterior, se observa que el mínimo tiempo de ciclo (14.94 hr), fue obtenido con un tamaño de lote de 5 piezas, y no con lotes unitarios, con lo cual queda demostrado el tercer principio.

**Resultados de la Demostración de la Ley para el Caso Lote en Paralelo**

Una vez más queda demostrado la veracidad de la ley y sus principios para cada uno de los casos estudiados, esto puede ser corroborado en la tabla mostrada.

**TABLA 27  
RESULTADOS DE LA DEMOSTRACIÓN DE LA LEY  
PARA EL CASO LOTE EN PARALELO**

<b>Caso Lote en Paralelo</b>		
<b>Principios</b>	<b>Hopp &amp; Spearman</b>	<b>Simulación</b>
1) K min para lograr estabilidad del sistema	K = 5, (U = 0,80)	K = 4, (U = 0,9986)
2) K es directamente proporcional a CT	SI	SI
3) Valor de K que minimiza el CT	K = 5, (CT = 15.05 hr)	K = 4, (CT = 14.94 hr)

# **CAPÍTULO 4**

## **4. CASO DE ESTUDIO**

En este capítulo se presentará el caso de estudio que será utilizado con el fin de evaluar la aplicación del método de Algoritmos de Optimización de Tamaño de Lote de Hopp & Spearman y comparar este resultado con el obtenido a través de la aplicación del Software de Optimización Simrunner.

### **4.1. Objetivo del Modelo**

Representar una línea de producción que permita optimizar el flujo de materiales.

## 4.2. Fuentes de Información

Para efecto del estudio y análisis se desarrollará un modelo de simulación basado en problemas propuestos en el libro de Factory Physics, Foundations of Manufacturing Management, desarrollado por los autores Wallace J. Hopp y Mark L. Spearman, en el cual plantean sencillos casos de manufactura utilizando distintos tipos de lote.

Se han realizado ciertas modificaciones al caso planteado por los autores siguiendo la lógica de producción real. Las modificaciones fueron las siguientes:

- 1.- Todos los casos de manufactura presentes en el texto de Factory Physics fueron integrados en un solo caso de estudio.
- 2.- Se definió al producto resultante como Juego de Mesa y Sillas para Jardín.
- 3.- Se modificaron algunos tiempos de procesamiento.

#### 4.2.1. Caso de Estudio

##### **Línea de Producción de Juegos de Mesa y Sillas para Jardín**

Producto a Producir: Juego de Jardín.

El producto está conformado por una mesa circular y 4 sillas con respaldar. El juego se muestra en la figura.



**FIGURA 4.1 PRODUCTO**

Proceso Productivo:

A la planta llegan dos tipos de lotes, unos conformados por 12 sillas y otros por 20 mesas, ambas tipos de lote arriban en bruto para ser trabajados, estos son almacenados separadamente en bodegas. La primera bodega fue construida para almacenar las sillas que van a ser procesadas y la segunda para las mesas.

Los lotes de sillas y mesas arriban a las bodegas a una tasa de arribo que se puede observar a continuación:

**TABLA 28**  
**TIEMPO ENTRE ARRIBOS**

<b>Tiempo entre Arribos</b>	
<b>Estación</b>	<b>Tiempo (hr)</b>
BMP_Sillas	2
BMP_Mesas	2

Las sillas y mesas en bruto son enviadas por separado en lotes a las estaciones de acabado de sillas y mesas respectivamente. Ambas estaciones operan paralelamente.

En estas estaciones de acabado, se pulen las piezas, y se dan los últimos detalles previos a su salida. Finalmente se les coloca una capa gruesa de barniz.

Los tiempos de procesamiento se encuentran distribuidos exponencialmente, y son:

**TABLA 29**  
**TIEMPOS DE PROCESAMIENTO POR UNIDAD**

<b>Tiempos de Procesamiento por Unidad</b>	
<b>Estación</b>	<b>Tiempo (hr)</b>
Acabado de Sillas	E (1)
Acabado de Mesas	E (1.5)

Como política de la empresa se ha establecido que cada vez que un lote haya sido procesado, se realice mantenimiento preventivo y se limpien los equipos de cada estación. Estos tiempos se distribuyen exponencialmente y varían dependiendo de la máquina:

**TABLA 30  
TIEMPOS DE SETUP**

<b>Tiempos de Setup</b>	
<b>Estación</b>	<b>Tiempo (hr)</b>
Acabado de Sillas	E (1.5)
Acabado de Mesas	E (2)

Los operarios tienen como reglamento que una vez que una mesa haya sido procesada ésta tiene que ser enviada inmediatamente a la Bodega de Mesas Acabadas, mientras que para el caso de las sillas éstas tienen que esperar hasta formar un lote de 12 sillas para poder ser transportadas a la Bodega de Sillas Acabadas; donde permanecerán de 2 a 3 días para que la capa de barniz colocada a las sillas y mesas se seque y se pueda proceder a la última fase del proceso productivo.

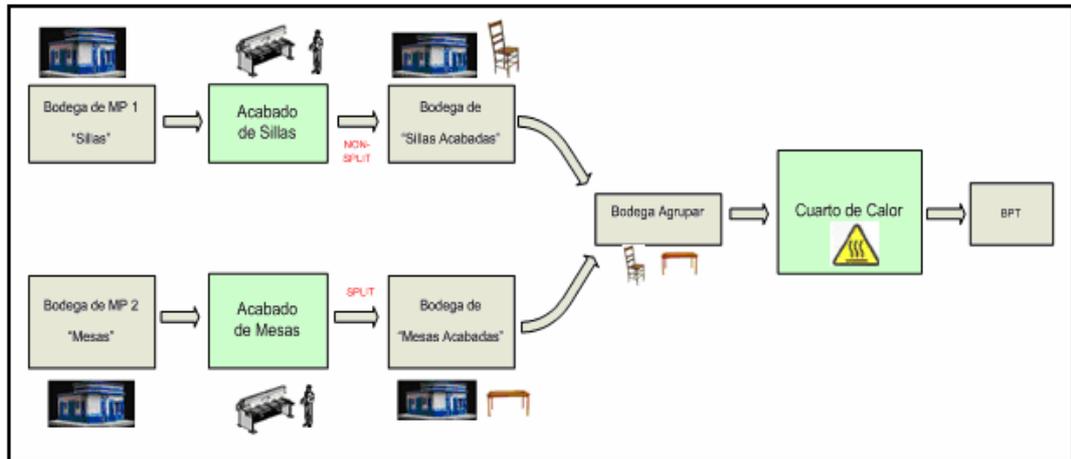
Una vez que las “partes” (nombre que se le asigna a las sillas o mesas indistintamente) se encuentren completamente secas son

enviadas a la Bodega Agrupar, donde éstas esperan hasta formar lotes de 24 partes que serán enviados al Cuarto de Calor. El objetivo de esta operación es asegurarse que la capa de barniz esté seca, además se gasifica el área con productos químicos que proporcionan mayor durabilidad a la madera, ésta operación tiene una duración de 24 horas (dist. Exponencial). El cuarto de calor tiene capacidad para 55 partes, ya sean éstas sillas o mesas. El arribo de las partes (sillas o mesas) a la Bodega Agrupar es de 1 parte/hora distribuido exponencialmente.

Finalmente, los lotes de partes son enviados a una bodega de producto terminado.

#### **4.3. Lógica del Proceso a Modelar**

El flujo del proceso productivo se muestra detallado en el siguiente diagrama de bloques:



**FIGURA 4.2 PROCESO PRODUCTIVO**

#### 4.4. Asunciones del Modelo

Para el desarrollo del modelo de simulación se hicieron los siguientes supuestos:

- 1.- El Modelo no toma en cuenta paros inesperados por daño de máquinas ni por almuerzo. Se considera únicamente los mantenimientos preventivos realizados cada vez que un lote es procesado.
  
- 2.- En el modelo, las locaciones que representan a las bodegas de materia prima poseen capacidades infinitas, es decir que siempre se

cuenta con las sillas y mesas necesarias para cumplir con la jornada de trabajo.

- 3.- Se creó en el modelo una locación ficticia colocada después de la Estación de Acabado de Sillas, debido a que esta operación utiliza la técnica de Lotes Seriales Non Split, lo que conlleva a tener que agrupar lotes de sillas para ser transportados hacia la siguiente estación, la Bodega de Sillas Acabadas.
- 4.- Para la operación de la Bodega Agrupar, se forman lotes conformados por ambos tipos de partes (sillas y mesas) conjuntamente ya que la producción es en masa y lo ideal es tener la mayor cantidad de juegos completos y listos para cuando el cliente los requiera.
- 5.- Se considera disponibilidad infinita de recursos; es decir, existe la suficiente cantidad de equipos y personal, para llevar a cabo los movimientos de material.
- 6.- La simulación desarrollada será de tipo No Terminal.

## 4.5. Procedimiento para la Elaboración del Modelo de Simulación

### 4.5.1. Creación de Entidades

Una entidad es la parte o artículo que el modelo procesa, éstas pueden ser piezas, productos, pallets, materia prima o información.

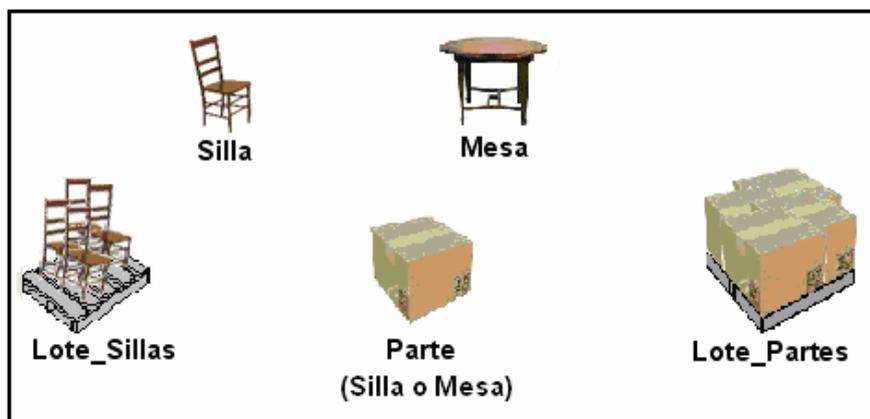
En el modelo se crearon entidades que representan la materia prima y sus diferentes transformaciones a lo largo del proceso de producción hasta lograr el producto terminado. Las entidades empleadas en el modelo son las siguientes:

**TABLA 31  
ENTIDADES**

* Entities *			
Name	Speed (fpm)	Stats	Cost
Silla	150	Time Series	
Mesa	150	Time Series	
Lote_Sillas	150	Time Series	
Parte	150	Time Series	
Lote_Part es	150	Time Series	

**TABLA 32**  
**DESCRIPCIÓN DE ENTIDADES**

Descripción de las Entidades	
Entidad	Representa a:
Silla	Silla a ser procesada.
Mesa	Mesa a ser procesada.
Lote_Sillas	Grupo de "k" sillas que se forma tras la Estación de Acabado de Sillas; ya que en esta estación los lotes operan bajo la técnica Non-Split.
Parte	Puede ser una silla o mesa, indistintamente. Se lo usa para modelar la operación en paralelo.
Lote_Part es	Grupo de k partes (sillas o mesas indistintamente) que son enviadas conjuntamente al Cuarto de Calor



**FIGURA 4.3 ENTIDADES**

#### **4.5.2. Creación de las Locaciones**

Las locaciones representan lugares fijos en el sistema donde las entidades son dirigidas para procesamiento, almacenamiento, toma de decisiones de la ruta a seguir o para formación de colas de espera.

El modelo consta de locaciones que son utilizadas como estaciones de procesamiento y almacenaje, junto con aquella locación ficticia que fue empleada para facilitar la elaboración del modelo de simulación. A continuación en la Tabla 33, se presenta las locaciones utilizadas:

**TABLA 33  
DESCRIPCIÓN DE LOCACIONES**

Descripción de las Locaciones	
Locaciones Reales	
Locación	Descripción
BMP_Sillas	Bodega donde se almacenan las sillas que van a ser procesadas.
BMP_Mesas	Bodega donde se almacenan las mesas que van a ser procesadas.
Acabado_Sillas	Estación donde se procesa y se logra el acabado de las sillas.
Acabado_Mesas	Estación donde se procesa y se logra el acabado de las mesas.
Bodega_Sillas_Acabadas	Bodega donde se almacenan temporalmente las sillas barnizadas para ser llevadas al cuarto de calor.
Bodega_Mesas_Acabadas	Bodega donde se almacenan temporalmente las mesas barnizadas para ser llevadas al cuarto de calor.
Bodega_Agrupar	Bodega donde arriban las partes (sillas o mesas) que van a ser enviadas al Cuarto de Calor. En esta locación se agrupan las partes en lotes antes de ser enviados a la estación siguiente.
Cuarto_de_Calor	Estación donde entran sillas y mesas conjuntamente en un lote para secar correctamente la capaz de barniz. Aquí también se rocían agentes químicos a las partes.
BPT	Bodega donde se almacenan las partes terminadas.
Cola_Split	Cola donde las piezas esperan antes de ser procesadas en la operación Split. (Estación Acabado Mesas)
Cola_Nonsplit	Cola donde las piezas esperan antes de ser procesadas en la operación NonSplit. (Estación Acabado Sillas)
Cola_Paralelo	Cola donde los lotes de partes esperan antes de ser procesadas en la operación Paralelo. (Cuarto de Calor)
Locaciones Ficticias	
Nonsplit_Locación	Sección donde se agrupan las sillas que serán transportadas a la Bodega de Sillas Acabadas. Se agrupan en lotes por tratarse de una operación Non Split.

Las capacidades de las locaciones se encuentran definidas a continuación:

**TABLA 34  
LOCACIONES**

Locations					
Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
BMP_Sillas	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
BMP_Mesas	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Acabado_Sillas	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Acabado_Mesas	1	1	Time Series	Oldest, ,	
Bodega_Sillas_Acabadas	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Bodega_Mesas_Acabadas	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Bodega_Agrupar	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Cuarto_de_Calor	1	1	Time Series	Oldest, ,	
BPT	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Nonsplitlocacion	inf	1	Time Series	Oldest, ,	
Cola_Paralelo	inf	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
Cola_NonSplit	inf	1	Time Series	Oldest, FIFO,	
Cola_Split	inf	1	Time Series	Oldest, FIFO,	

#### 4.5.3. Creación de Variables

Las variables son contadores o estadísticos del sistema que pueden ir cambiando durante la simulación según sea lo que se vaya a calcular. Estas pueden ser del tipo real o entero. Las variables son comúnmente empleadas para toma de decisiones o recolección de información.

En el modelo se han empleado variables como contadores de entidades en las partes que se considera debe existir un control.

**Contador\_silla:** Cuenta la cantidad de sillas entre las cuales debe realizarse el setup. La cantidad de sillas está dada por  $k$ , donde  $k$  representa el tamaño de lote a procesar.

**Contador\_mesa:** Cuenta la cantidad de mesas que deben pasar antes de realizarse el setup. Aquí también, la cantidad de mesas está dada por  $k$ , donde  $k$  representa el tamaño del lote a procesar.

**WIP\_Sillas:** Contabiliza la cantidad sillas que permanecen en el Subsistema Non Split, sin ser totalmente procesadas.

**WIP\_Mesas:** Contabiliza la cantidad mesas que permanecen en el Subsistema Split, sin ser totalmente procesadas.

**WIP\_Paralelo:** Contabiliza la cantidad partes (sillas o mesas) en el sistema Paralelo que no han sido procesadas en su totalidad.

A continuación se muestra la tabla de las variables utilizadas con sus valores iniciales:

**TABLA 35  
VARIABLES**

* Variables (global)			
ID	Type	Initial value	Stats
contador_silla	Integer	k_nonsplit - 1	Time Series
contador_mesa	Integer	k_split - 1	Time Series
WIP_Sillas	Integer	0	Time Series
WIP_Mesas	Integer	0	Time Series
WIP_Paralelo	Integer	0	Time Series

#### 4.5.4. Creación de Macros

El macro es una variable utilizada para una expresión que se usa sucesivamente en el programa, ya sea una función o texto usado en una expresión. El macro puede ser definido una vez y su valor puede ser sustituido para el valor que representa en cualquier parte del modelo, las veces que sea necesario.

Las macros empleadas en el modelo fueron las siguientes:

**K\_split:** Permite sustituir los distintos valores de tamaño de lote (k) que se desean probar hasta encontrar el tamaño óptimo de lote en el Sistema Split.

**K\_nonsplit:** Permite sustituir los distintos valores de tamaño de lote (k) que se desean probar hasta encontrar el tamaño óptimo de lote en el Sistema Non Split.

**K\_paralelo:** Permite sustituir los distintos valores de tamaño de lote (k) que se desean probar hasta encontrar el tamaño óptimo de lote en el Sistema Paralelo.

**TABLA 36  
MACROS**

***** Macros *****	
ID	Text
k_split	7.0000000
k_nonsplit	10
k_paralelo	1.0000000
MACRO	

#### 4.5.5. Creación de Arribos

El arribo de piezas al sistema está dado por:

**TABLA 37  
ARRIBOS**

Arrivals *						
Entity	Location	Qty Each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
Silla	BMP_Sillas	k_nonsplit		inf	k_nonsplit/0.5 hr	
Mesa	BMP_Mesas	k_split		inf	k_split/0.5 hr	
Parte	Bodega_Agrupar	1		inf	e(1) hr	

En la tabla se especifica las entidades que ingresan al sistema y las locaciones a la cuales arriban.

Se coloca además la cantidad de piezas por cada arribo y la ocurrencia y frecuencia de éstos.

#### 4.5.6. Programación del Modelo

En la programación se describe la ruta que siguen las entidades a través del sistema, las operaciones que se llevan a cabo en cada locación, la cantidad de tiempo que la entidad permanece en dicha locación, los recursos empleados para su transportación y las reglas lógicas que pueden ser empleadas en el modelo.

La programación del modelo de simulación del caso de estudio puede ser consultada en el Apéndice 4.

#### 4.6. Layout del Modelo de Simulación

El diseño de la línea de producción de sillas y mesas del caso de estudio se muestra a continuación:



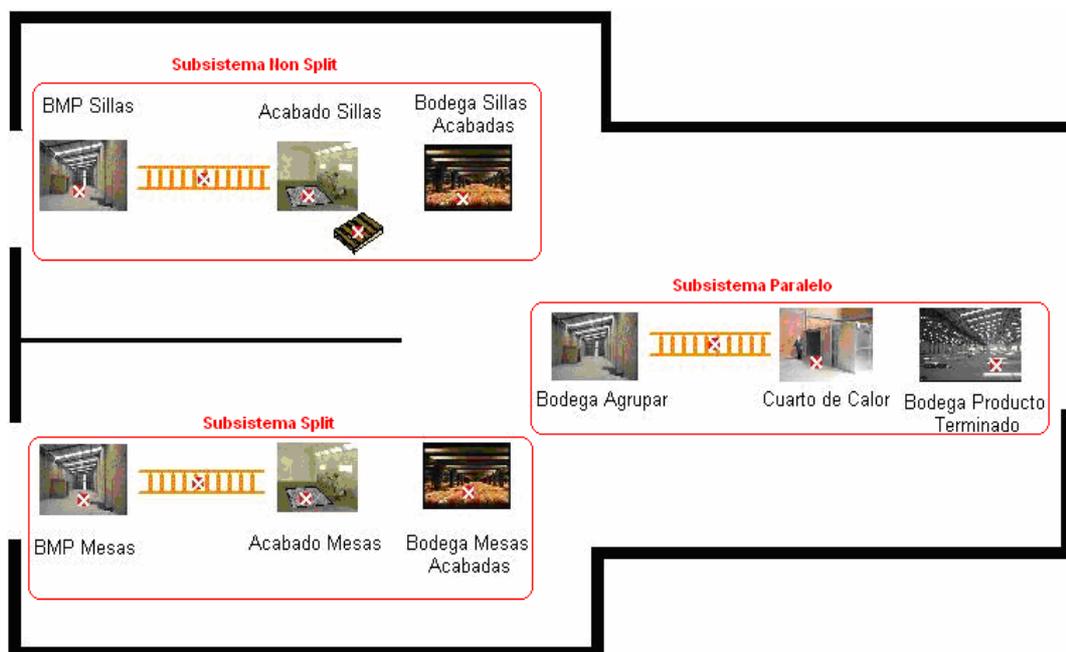
**FIGURA 4.4 LAYOUT DEL PROCESO PRODUCTIVO**

Para facilitar los cálculos de este, se ha procedido a dividir al sistema en 3 subsistemas:

- Subsistema Split
- Subsistema Non Split
- Subsistema Paralelo

Se ha realizado esta división para facilitar el análisis del comportamiento de cada tipo de lote independientemente.

La figura 4.5 muestra el layout del modelo de simulación y cada uno de los subsistemas en los que se lo ha dividido.



**FIGURA 4.5 SUBSISTEMAS DEL PROCESO PRODUCTIVO**

**TABLA 38**  
**LOCACIONES INVOLUCRADAS EN CADA SUBSISTEMA**

Subsistema Split		Subsistema Non Split		Subsistema Paralelo	
Entidad: Mesa		Entidad: Silla		Entidad: Partes (Sillas o Mesas)	
1	BMP Mesas	1	BMP Sillas	1	Bodega Agrupar
2	Cola Split	2	Cola Non Split	2	Cola Paralelo
3	Acabado Mesas	3	Acabado Sillas	3	Cuarto de Calor
4	Bodega Mesas Acabadas	4	NonSplit Locación	4	Bodega Producto Terminado
		5	Bodega Sillas Acabadas		

#### 4.7. Características Relevantes de la Lógica Aplicada en el Modelo de Simulación

A continuación se presenta la manera en que fueron programadas ciertas características del modelo del caso de estudio:

**Característica 1:** En el caso del Subsistema NonSplit, las sillas arriban en lotes con una tasa de arribo constante, sin considerar el tamaño de lote utilizado.

**Forma de Programación 1:** ProModel permite ingresar únicamente la frecuencia de arribo de las entidades al sistema y no la tasa de arribo de éstas. Por lo tanto, al tener una tasa de arribo constante, ocasiona que la frecuencia de estos arribos varíe dependiendo del tamaño de lote

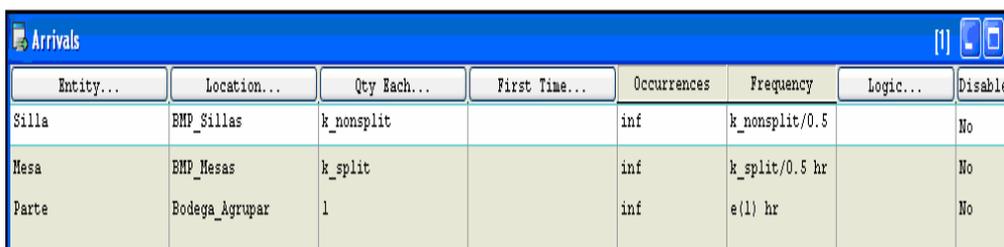
utilizado; lo que conllevaría a realizar un procedimiento más largo y engorroso para obtener los datos.

Es por esto que se planteó usar un macro (`k_nonsplit`), el cual evitaría tener que calcular este valor de frecuencia para cada uno de los tamaños de lote utilizados.

Conociendo que la Frecuencia de arribo de un lote ( $t_a$ ) está dada por el tamaño del lote ( $k$ ) dividido para la tasa de arribos ( $r_a$ ),

$$t_a = \frac{k}{r_a}$$

se planteó con ayuda del macro la frecuencia de entrada de los lotes; que permitirá ir cambiando el valor de “ $k$ ”. La forma de programación es la siguiente:



Entity...	Location...	Qty Each...	First Time...	Occurrences	Frequency	Logic...	Disable
Silla	BMP_Sillas	k_nonsplit		inf	k_nonsplit/0.5		No
Mesa	BMP_Mesas	k_split		inf	k_split/0.5 hr		No
Parte	Bodega_Agrupar	1		inf	e(1) hr		No

**FIGURA 4.6 ARRIBOS**

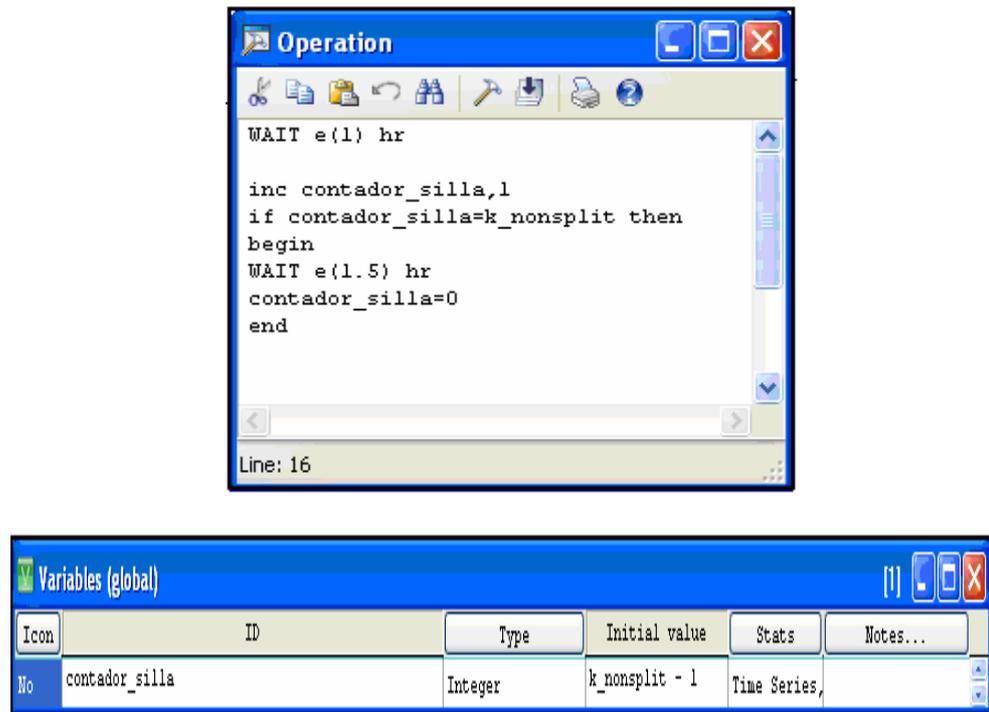
Se procede de la misma manera para el sistema Split.

**Característica 2:** Para el caso de las operaciones NonSplit, se realiza un setup cada vez que hayan sido procesadas k piezas, donde k es el tamaño de lote.

**Forma de Programación 2:** Se crea un contador (contador\_silla), el cual inicia en el valor “k\_nonsplit – 1” y se incrementa en uno cada vez que una silla llegue a la estación de acabado.

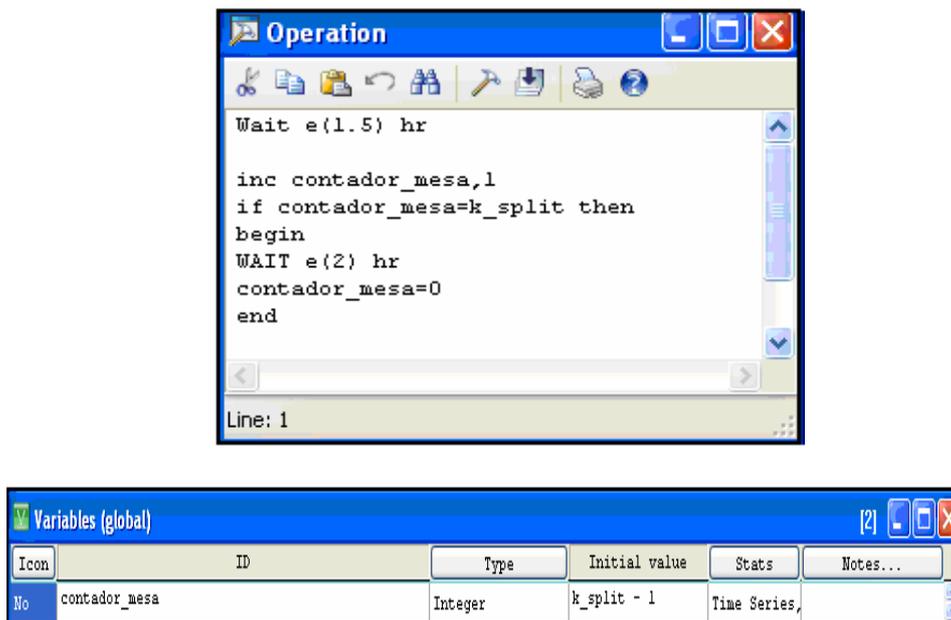
El valor inicial del contador es “k\_nonsplit – 1”, debido a que al ingresar la primera pieza al sistema, el contador se incrementa en 1 y automáticamente la pieza se demora en la estación lo correspondiente al tiempo de procesamiento más el tiempo designado para setup, finalmente el contador automáticamente se iguala a 0 y se debe esperar a que ingresen k\_nonsplit piezas para realizarse nuevamente otro setup.

De esta forma nos aseguramos que el programa calcule el tiempo de ciclo del lote, incluyendo el tiempo de setup.



**FIGURA 4.7 CONTADOR SILLA**

La misma situación se presenta en el Subsistema Split, donde se procesan mesas.



**FIGURA 4.8 CONTADOR MESA**

**Característica 3:** Para el Subsistema NonSplit, una vez que las sillas han sido procesadas, se forman lotes de sillas para ser enviadas a la Bodega de Sillas Acabadas.

**Forma de Programación 3:** Es aquí que existe la necesidad de crear una locación ficticia llamada “Nonsplitlocacion”, donde las sillas son agrupadas hasta formar lotes.

Los lotes de piezas formados son de tamaño “k\_nonsplit”, que es el macro creado para sustituir los valores de k.

Entity...	Location...	Operation...
Silla	Nonsplitlocacion	Group k_nonsplit AS lote_sillas
Lote_Sillas	Nonsplitlocacion	

FIGURA 4.9 LOCACIÓN FICTICIA

**Característica 4:** Se crearon contadores para calcular el WIP, de tal forma que se incrementen de uno en uno al ingresar a cada subsistema y decrezcan de acuerdo al tamaño de la entidad de salida.

**Forma de Programación 4:** La forma de programación varía de acuerdo a cada tipo de Subsistema.

Para Subsistema Split:

Al subsistema Split entran y salen mesas, individualmente.

Mesa	BMP_Mesas	inc WIP_Mesas,1	1	Mesa	Cola_Split	FIRST 1
Mesa	Cola_Split		1	Mesa	Acabado_Mesas	FIRST 1
Mesa	Acabado_Mesas	Wait e(1.5) hr				
		inc contador_mesa,1				
		if contador_mesa=k_split then				
		begin				
		WAIT e(2) hr				
		contador_mesa=0				
		end				
Mesa	Bodega_Mesas_Acabadas		1	Mesa	Bodega_Mesas_Acabadas	FIRST 1
Mesa	BPT		1	Mesa	BPT	FIRST 1
Mesa	BPT		1	Mesa	EXIT	FIRST 1

FIGURA 4.10 CONTADOR WIP MESAS

Para Subsistema NonSplit:

En el subsistema Non Split, el contador se incrementa de uno en uno. Al momento de salir las sillas del subsistema, estas salen formando lotes de tamaño “k\_nonsplit”, es por esto que el contador decrece como se muestra en la tabla adjunta.

Entity	Location	Process		Routing			
		Operation	Blk	Output	Destination	Rule	Move Logic
Silla	BWP_Sillas	<u>INC WIP_Sillas,1</u>	1	Silla	Cola_NonSplit	FIRST 1	
Silla	Cola_NonSplit	WAIT e(1) hr	1	Silla	Acabado_Sillas	FIRST 1	
Silla	Acabado_Sillas	<pre> inc contador_silla,1 if contador_silla=k_nonsplit then begin WAIT e(1.5) hr contador_silla=0 end </pre>					
			1	Silla	Nonsplitlocacion	FIRST 1	
Silla	Nonsplitlocacion	Group k_nonsplit AS lote_sillas					
Lote_Sillas	Nonsplitlocacion		1	Lote_Sillas	Bodega_Sillas_Acabadas	FIRST 1	<u>DEC WIP_Sillas,k_nonsplit</u>
Lote_Sillas	Bodega_Sillas_Acabadas		1	Lote_Sillas	EXIT	FIRST 1	

**FIGURA 4.11 CONTADOR WIP SILLAS**

Para Subsistema Paralelo:

En el subsistema Paralelo entran partes individualmente y salen lotes de partes de tamaño “k:paralelo”.

Parte	Bodega_Agrupar	inc WIP_Paralelo,1		
		group k_paralelo as Lote_Part		
Lote_Part	Bodega_Agrupar			
			1	Lote_Part Cola_Paralelo FIRST 1
Lote_Part	Cola_Paralelo		1	Lote_Part Cuarto_de_Calor FIRST 1
Lote_Part	Cuarto_de_Calor	wait e(24) hr	1	Lote_Part BPT FIRST 1
Lote_Part	BPT	dec WIP_Paralelo,k_paralelo	1	Lote_Part EXIT FIRST 1

**FIGURA 4.12 CONTADOR WIP PARALELO**

# **CAPÍTULO 5**

## **5. COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LA OPTIMIZACIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos a través de las Técnicas de Optimización de Hopp & Spearman y Algoritmos evolutivos de la herramienta SimRunner, empleados para calcular los tamaños óptimos de lote de la línea de producción. A su vez, se realiza una comparación de los indicadores de desempeño del proceso considerando el estado inicial y los resultados de las técnicas de optimización.

### 5.1. Aplicación de las Técnicas de Optimización

De acuerdo a los parámetros considerados en cada uno de los procesos, se obtuvieron diferentes tamaños óptimos de lote, los cuales a su vez se vieron influenciados por el método usado para su cálculo. Con el fin de evaluar las técnicas de optimización se determinaron los siguientes indicadores de desempeño:

- WIP: Producto en proceso
- CT : Tiempo de Ciclo
- TH: Tasa de Producción,

los mismos que se compararon para establecer la igualdad o no de los resultados de cada uno de los métodos.

La función objetivo que deseamos optimizar está dada por:

$$F(k) = \text{Min CT}(k),$$

Donde  $k$ , es el tamaño de lote.

### 5.1.1. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Serial Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman

Los algoritmos planteados por la Física de Fábrica presentan un sencillo procedimiento que primero permite encontrar la utilización óptima aproximada de la estación y luego la utiliza para calcular el tamaño de lote adecuado

Los algoritmos utilizados para nuestro caso de estudio hacen referencia a productos de una sola familia. En el caso de que se procesen multiproductos, los algoritmos a utilizar son otros.

A continuación mostramos paso a paso el proceso realizado para el cálculo del tamaño óptimo de un lote serial que opera de forma Split.

#### **Datos del Caso de Estudio:**

$r_a$  = Tasa de arribo de lotes de mesas = 0.5 p/h

$t$  = Tiempo de procesamiento de una mesa =1.5 hr (Dist. Exponencial)

$s$  = Tiempo de Setup =2 hr (Dist. Exponencial)

**Paso 1:**

Se procede a calcular la utilización de la estación sin que existan setups. La fórmula está dada por:

$$u_o = r_a t$$

$$u_o = (0.5 p / h) x (1.5 h / p)$$

$$u_o = 0.75$$

**Paso 2:**

Según los algoritmos obtenidos del estudio de la Física de Fábrica, el cálculo del tiempo de ciclo está en función únicamente de la utilización, en vez del tamaño de lote (k) y de la utilización (u). Es por esto que encontrar el mínimo tiempo de ciclo se reduce prácticamente a encontrar la utilización óptima de la estación. La fórmula final que nos permite calcular la utilización óptima es:

$$u^* = \sqrt{u_o}$$

$$u^* = \sqrt{0.75}$$

$$u^* = 0.86660$$

**Paso 3:**

Finalmente, una buena aproximación del tamaño de lote en serie que minimiza el tiempo de ciclo en una estación está dado por:

$$K^* = \frac{r_a S}{u^* - u_o}$$

$$K^* = \frac{(0.5 p / h)x(2h)}{(0.86660) - (0.75)}$$

$$K^* = 8.58 p \approx 9 p$$

Por lo tanto, el tamaño de lote óptimo para el Subsistema en Serie operado bajo la Técnica Split de nuestro caso de estudio es de 9 mesas.

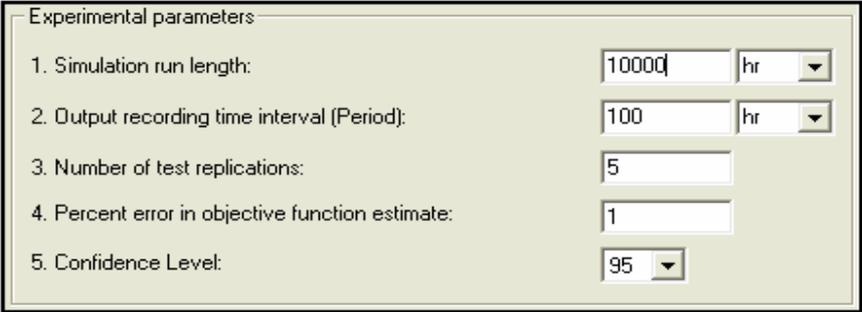
### **5.1.2. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Serial con Técnica Split empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner**

Para determinar el tamaño óptimo de lote empleando SimRunner como herramienta de Optimización seguimos los pasos presentados en el Capítulo 2. Los cuales son:

### **Paso 0: Determinar Warm Up**

Antes de proceder al primer paso de la metodología 2, es necesario que en toda simulación No Terminal se proceda primero a determinar el tiempo que toma un sistema para alcanzar su estado estable, ya que eliminamos cualquier tendencia producida durante el estado transitorio del modelo.

Dado los siguientes parámetros experimentales:

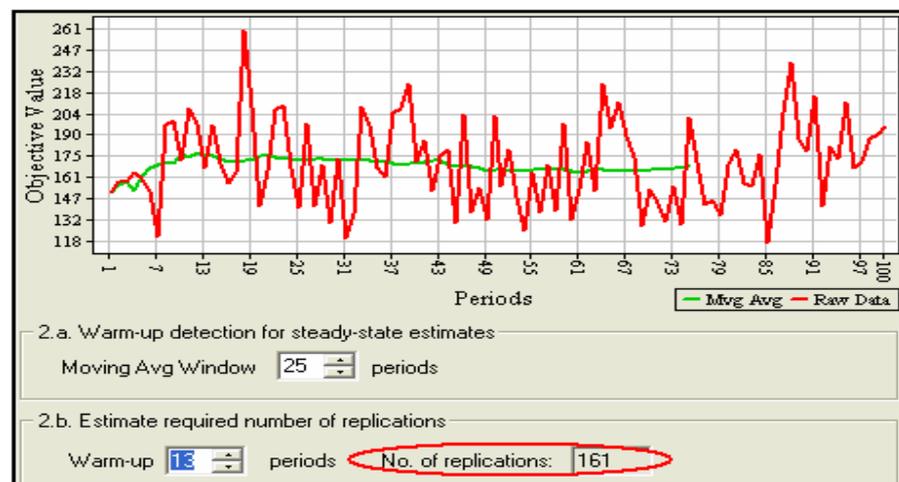


Experimental parameters	
1. Simulation run length:	10000 hr
2. Output recording time interval (Period):	100 hr
3. Number of test replications:	5
4. Percent error in objective function estimate:	1
5. Confidence Level:	95

**FIGURA 5.1 PARÁMETROS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR WARM UP DEL SUBSISTEMA SPLIT**

Una vez que se ha corrido el modelo. Se creó la siguiente gráfica en la que se puede observar que aproximadamente cuando el modelo ha corrido 13 períodos, lo que equivale a 1300 horas (cada período fue definido de 100 horas), el proceso se vuelve estable en el tiempo.

Uno de los tantos beneficios de SimRunner es que proporciona el tamaño de muestra o número de réplicas que debe ser utilizado para obtener una muestra adecuada que proporcione estadísticas confiables, en este caso el valor sugerido es de 161 réplicas.



**FIGURA 5.2 WARM UP DEL SUBSISTEMA SPLIT**

### **Paso 1: Crear y Verificar**

Una vez creado y verificado el modelo, se define como macro el factor de entrada que se desea monitorear.

Macro: “k\_split”

## **Paso 2: Construir un proyecto**

Se crea un proyecto de SimRunner. Ingresamos a la opción de “Definir Objetivo”. Una vez que hayamos ingresado a esta opción, seleccionamos la función objetivo que deseamos determinar.

Como nuestro caso de estudio fue dividido en 3 subsistemas (Split, NonSplit y Paralelo). La función objetivo que deseamos minimizar está dada por la suma de los tiempos que permanece la entidad en cada una de las locaciones por donde ésta atraviesa, sin considerar las bodegas de materia prima y de producto terminado.

Las locaciones por donde las mesas atraviesan la línea de producción son:

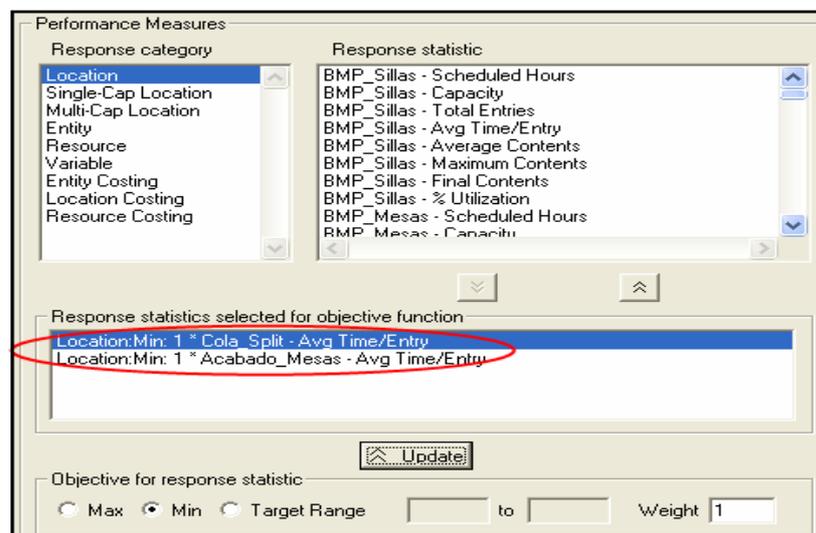
- BMP\_Mesas
- Cola\_Split
- Acabado\_Mesas
- Bodega\_Mesas\_Acabadas

Por lo tanto, los componentes que conforman la función objetivo que deseamos minimizar son:

- Avg. Time/Entry de Cola Split
- Avg. Time/Entry de Acabado\_Mesas

El Avg. Time/Entry calcula el tiempo promedio que una entidad permanece en una locación.

A continuación, mostramos la ventana de SimRunner en donde elegimos los elementos que conforman la función objetivo



**FIGURA 5.3 FACTORES DE ENTRADA DEL SUBSISTEMA SPLIT**

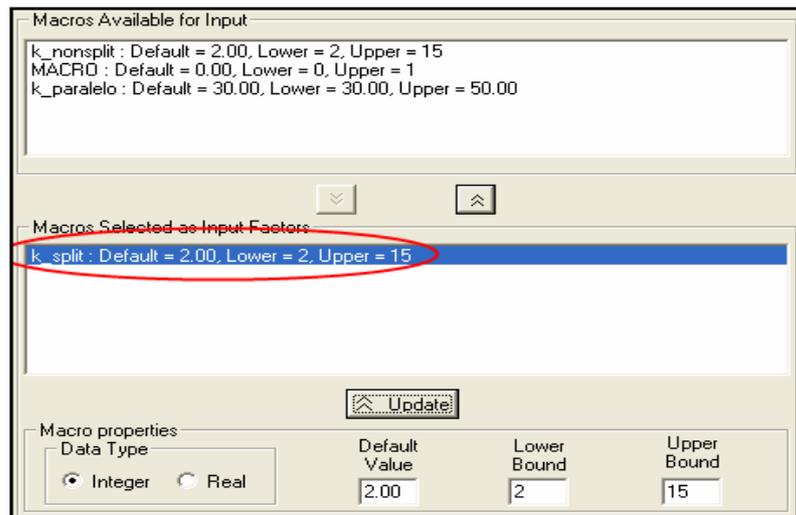
Después de definir el objetivo, se selecciona el o los factores de entrada que se desea probar. En este caso, se desea probar los distintos tamaños de lote hasta encontrar el valor que cause la mejora en el desempeño del modelo basado en la función objetivo

El factor de entrada que se desea probar es: **k\_split**. **K\_split** es un macro que oscila entre los números 2 a 15, todos valores enteros, ya que trabajamos con tamaños de lote.

El rango propuesto para que oscile el macro fue colocado en base al resultado del tamaño óptimo de lote obtenido por el método de algoritmos de Hopp & Spearman, donde se obtuvo un tamaño óptimo de lote de 9.

Al haber obtenido un tamaño de lote óptimo de 9, se reducirá el rango de **k\_split** a valores cercanos al óptimo obtenido para facilitar nuestra búsqueda. Por lo tanto, el rango fijado para la corrida de los experimentos son valores de **k**, de 2 a 15

La figura presentada a continuación, muestra un screenshot de SimRunner al momento de elegir el factor de entrada

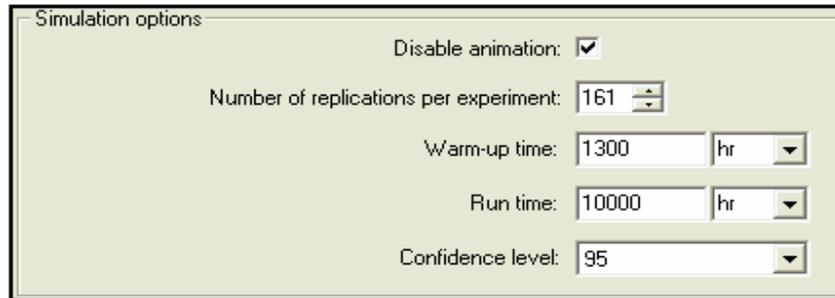


**FIGURA 5.4 MACRO DEL SUBSISTEMA SPLIT**

### **Paso 3: Correr los Experimentos**

Una vez seleccionado los factores de entrada y definida la función objetivo en la simulación, se puede usar SimRunner para conducir una serie de experimentos sobre el modelo.

Las condiciones para la corrida del modelo son las siguientes:



**FIGURA 5.5 CONDICIONES INICIALES PARA CORRIDA DEL MODELO DEL SUBSISTEMA SPLIT**

SimRunner corre el modelo y va probando los valores de  $k$ , desde  $k= 2$  hasta  $k= 15$ . Después de realizadas las pruebas, SimRunner cataloga los resultados de prueba descendientemente desde el mejor valor de  $k$ , hasta el peor valor de  $k$  del rango establecido.

La Figura 5.6 muestra los resultados obtenidos:

Convergence Status:  
Phase 1:   
Generation: 2

Optimization C

Experiment	Objective Function	Cola_Split: Avg Time/Entry	Acabado_Mesas: Avg Time/Entry	k_split	Low CI	Hi CI
1	-740.076	634.995	105.081	8.000	-747.651	-732.501
12	-746.660	643.242	103.418	9.000	-752.689	-740.632
6	-757.950	656.025	101.925	10.000	-762.663	-753.236
9	-766.786	659.632	107.153	7.000	-776.752	-756.819
4	-789.730	688.674	101.056	11.000	-794.586	-784.873
14	-812.367	712.398	99.969	12.000	-816.759	-807.975
11	-843.844	733.786	110.059	6.000	-858.383	-829.305
10	-846.097	746.804	99.293	13.000	-850.546	-841.647
13	-882.796	784.111	98.685	14.000	-887.050	-878.542
3	-915.584	817.601	97.983	15.000	-919.802	-911.365
7	-1158.549	1044.518	114.032	5.000	-1192.196	-1124.903
2	-4216.291	4096.286	120.006	4.000	-4504.625	-3927.957
8	-23842.839	23712.711	130.128	3.000	-24355.34	-23330.331
5	-59972.966	59823.043	149.923	2.000	-60481.93	-59463.997

**FIGURA 5.6 TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA SPLIT OBTENIDO A TRAVÉS DE SIMRUNNER**

En este punto ya hemos determinado el tamaño óptimo de lote. A partir de la Figura 5.6 concluimos que el tamaño óptimo a través del método de optimización empleando SimRunner es de 8 mesas; y el segundo valor óptimo obtenido es de 9 mesas, igual al obtenido por el método de Hopp & Spearman.

#### **Paso 4: Evaluar sugerencias**

El cuarto paso debe considerar y evaluar las sugerencias de SimRunner. En este caso, consideraremos como única respuesta

válida el primer valor de  $k$  proporcionado por la tabla. Para este caso,  $k = 8$ .

### **5.1.3. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Serial Non Split empleando la Técnica de Hopp & Spearman**

Los algoritmos planteados por la física de fábrica para el cálculo del Tamaño Óptimo de Lote en Serie bajo la Técnica Split y NonSplit son los mismos. Es por esto que se repite el procedimiento de Split para nuestro subsistema NonSplit.

#### **Datos del Caso de Estudio:**

$r_a$  = Tasa de arribo de lotes de sillas = 0.5 p/h

$t$  = Tiempo de procesamiento de una silla =1 hr (Dist. Exponencial)

$s$  = Tiempo de Setup =1.5 hr (Dist. Exponencial)

#### **Paso 1:**

Al igual que en el proceso Split, primero se calcula la utilización, obviando el setup existente. La fórmula está dada por:

$$u_o = r_a t$$

$$u_o = (0.5 p / h) x (1h / p)$$

$$u_o = 0.50$$

**Paso 2:**

La utilización óptima está dada por:

$$u^* = \sqrt{u_o}$$

$$u^* = \sqrt{0.5}$$

$$u^* = 0.7071$$

**Paso 3:**

Luego de calcular la utilización óptima, este valor es utilizado para obtener el tamaño óptimo de lote en serie (NonSplit):

$$K^* = \frac{r_a S}{u^* - u_o}$$

$$K^* = \frac{(0.5 p / h) x (1.5 h)}{(0.7071) - (0.5)}$$

$$K^* = 3.62 p \approx 4 p$$

De acuerdo a los resultados obtenidos, el tamaño de lote óptimo para el Subsistema en Serie operado bajo la Técnica Non Split de nuestro caso de estudio es de 4 sillas.

#### 5.1.4. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Serial con Técnica Non Split empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner

Para Serial NonSplit seguiremos el mismo procedimiento utilizado por esta metodología en el Caso Split.

##### **Paso 0: Determinar Warm Up**

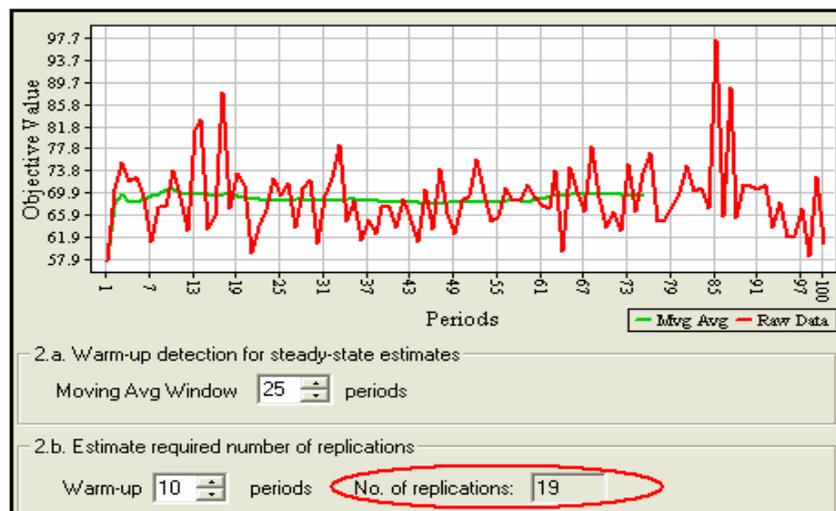
Dado los siguientes parámetros experimentales:

Experimental parameters	
1. Simulation run length:	10000 hr
2. Output recording time interval (Period):	100 hr
3. Number of test replications:	5
4. Percent error in objective function estimate:	1
5. Confidence Level:	95

**FIGURA 5.7 PARÁMETROS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR WARM UP DEL SUBSISTEMA NONSPLIT**

Se procede a correr el modelo. La gráfica obtenida es la presentada en la Figura 5.8 en la que se puede observar que aproximadamente cuando el modelo ha corrido 10 períodos, lo que equivale a 1000 horas (cada período fue definido de 100 horas), el proceso se vuelve estable en el tiempo.

De acuerdo a SimRunner, el tamaño de muestra o número de réplicas sugerido es de 19 réplicas, sin embargo el mínimo valor de datos para que la muestra sea considerada normal es de 30 réplicas, por esta razón, el número de réplicas con el que se trabajará será de 30.



**FIGURA 5.8 WARM UP DEL SUBSISTEMA NONSPLIT**

### **Paso 1: Crear y Verificar**

Luego de crear el modelo, se procedió a verificarlo. Como siguiente paso se define como macro el factor de entrada que se desea monitorear.

Macro: “**k\_nonsplit**”

### **Paso 2: Construir un proyecto**

Aquí, se repite el mismo procedimiento realizado para el caso Split.

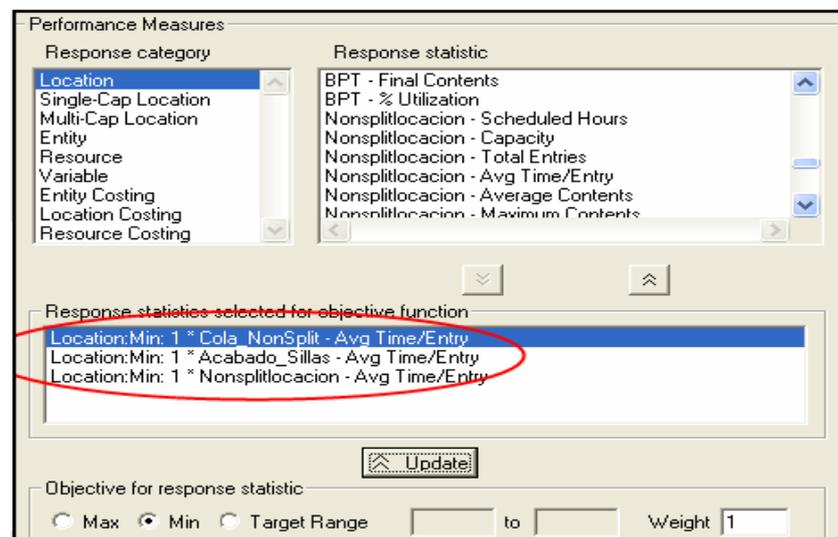
Planteamos la función objetivo, que en este caso está dada por las locaciones por donde las sillas atraviesan en su proceso productivo. Estas son:

- BMP\_Sillas
- Cola\_NonSplit
- Acabado\_Sillas
- Nonsplitlocacion
- Bodega\_Sillas\_Acabadas

Una vez eliminadas las bodegas de materia prima y producto terminado, los componentes que conforman la función objetivo que deseamos minimizar son:

- Avg. Time/Entry de Cola\_NonSplit
- Avg. Time/Entry de Acabado\_Sillas
- Avg. Time/Entry de Nonsplitlocacion

La ventana de SimRunner en donde se muestra el paso que estamos realizando es la siguiente:



**FIGURA 5.9 FACTORES DE ENTRADA DEL SUBSISTEMA NONSPLIT**

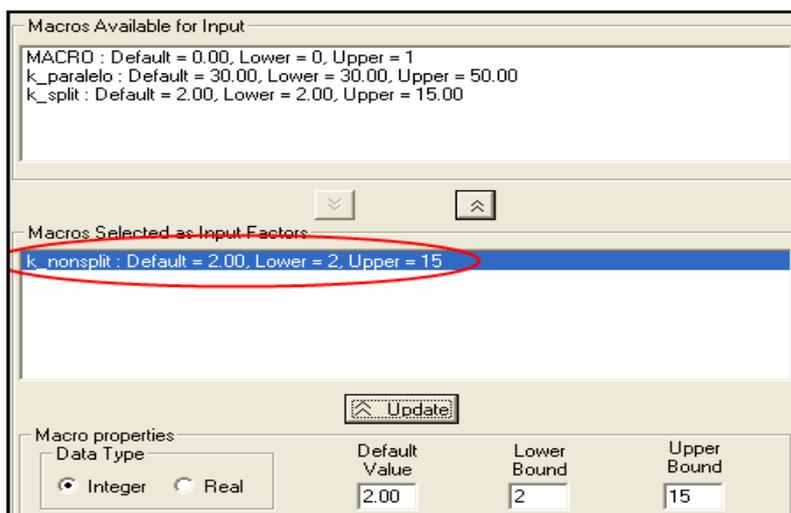
Después de definir el objetivo, se selecciona el o los factores de entrada que se desea probar.

**Factor de Entrada:** k\_nonsplit

**Rango de Experimentos:**  $2 < k < 15$ , donde k es un número entero.

Se seleccionó este rango para incluir el resultado de los algoritmos de Hopp & Spearman, donde se obtuvo un tamaño óptimo de lote de 4.

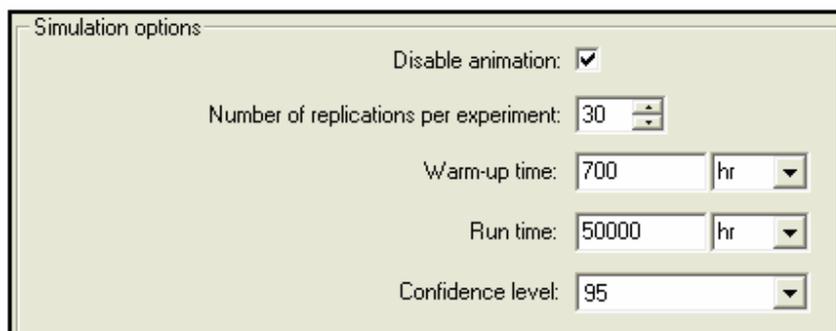
En la siguiente figura se observa el screenshot de SimRunner al momento de elegir el factor de entrada



**FIGURA 5.10 MACRO DEL SUBSISTEMA NONSPLIT**

### **Paso 3: Correr los Experimentos**

A continuación se plantean las condiciones para la corrida del modelo:



Simulation options

Disable animation:

Number of replications per experiment: 30

Warm-up time: 700 hr

Run time: 50000 hr

Confidence level: 95

**FIGURA 5.11 CONDICIONES INICIALES PARA CORRIDA DEL MODELO DEL SUBSISTEMA NONSPLIT**

La herramienta SimRunner se encarga de calcular el tiempo total de proceso con cada uno de los tamaños de lote considerados en el estudio, desde  $k= 2$  hasta  $k= 15$ . En la siguiente figura aparecen los resultados ordenados desde el mejor valor de  $k$ , hasta el peor valor de  $k$  del rango establecido.

La figura muestra los resultados obtenidos:

Convergence Status  
Phase 1: █  
Generation: 2

Optimization Converged

Experiment	Objective Function	Acabado_Sillas: Avg Time/Entry	Nonsplitlocacion: Avg Time/Entry	Cola_NonSplit: Avg Time/Entry	k_nonsplit	Low CI	Hi CI
8	-326.585	91.920	61.382	173.283	3.000	-357.035	-296.135
2	-335.746	80.453	86.877	168.416	4.000	-355.164	-316.328
5	-358.214	109.023	30.638	218.552	2.000	-398.197	-318.231
7	-363.701	75.552	115.065	173.084	5.000	-382.131	-345.270
11	-450.449	74.851	147.711	227.887	6.000	-480.494	-420.403
9	-469.745	69.871	170.330	229.544	7.000	-493.979	-445.510
1	-555.144	71.739	204.049	279.357	8.000	-586.108	-524.180
6	-620.721	68.521	283.327	268.873	10.000	-660.380	-581.063
12	-623.746	70.079	236.189	317.478	9.000	-657.701	-589.791
14	-708.142	64.545	295.983	347.614	12.000	-743.204	-673.080
4	-763.527	70.272	286.160	407.095	11.000	-804.407	-722.647
10	-877.230	67.482	363.168	446.581	13.000	-927.090	-827.371
13	-930.225	67.131	377.294	465.799	14.000	-967.691	-892.759
3	-949.290	68.285	386.247	494.758	15.000	-1005.434	-893.145

**FIGURA 5.12 TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA NONSPLIT OBTENIDO A TRAVÉS DE SIMRUNNER**

Se concluye que el tamaño óptimo de lote a través del método de optimización empleando SimRunner es de 3 sillas.

#### **Paso 4: Evaluar sugerencias**

De acuerdo a los resultados obtenidos, se procede a evaluar los valores establecidos por SimRunner. Finalmente se considerará como valor óptimo el primer valor de k proporcionado por la tabla.

Para este caso,  $k = 3$ .

### 5.1.5. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Paralelo empleando la Técnica de Hopp & Spearman

Al igual que en lotes de proceso seriales, para encontrar el tamaño de lote que minimiza el tiempo de ciclo de una operación en paralelo, es conveniente encontrar la mejor utilización y luego calcular el tamaño de lote que corresponde a esta utilización. La utilización deberá ser menor a 1 para que la estación sea estable.

Debemos recordar además que el tiempo total de un lote en una operación en paralelo incluye el Tiempo de Formación del Lote (“Wait to batch time”, WTBT), tiempo de espera en cola y el tiempo de procesamiento.

$$CT = WTBT + CT_q + t$$

Es importante mencionar que si los coeficientes de variación  $C_e$  o  $C_a$  se incrementan, la utilización óptima del sistema decrece. Esto es una consecuencia de los resultados de variabilidad y

utilización de la Física de Fábrica que muestra que la combinación de estos dos factores pueden llegar a reducir el desempeño de una línea de producción.

De ahí, cuando se busca optimizar el desempeño de un proceso mediante los algoritmos de la Física de Fábrica, se busca compensar el lograr una reducción en los niveles de utilización a costas de un incremento en la variabilidad.

A continuación mostramos paso a paso el proceso realizado para el cálculo del tamaño óptimo de lote.

**Datos del Caso de Estudio:**

$r_a$  = Tasa de arribo = 1 partes/hora (Dist. Exponencial)

$C_a$  = Coeficiente de variación (CV) de tiempos entre arribos = 1  
(Dist. Exponencial)

$t$  = Tiempo de procesamiento del lote= 24 hr (Dist. Exponencial)

$C_e$  = Coeficiente de Variación efectivo del tiempo de procesamiento de un lote = 1 (Dist. Exponencial)

**Paso 1:**

El mínimo tamaño de lote para estabilizar el sistema está dado por:

$$k > u_m = r_a t$$

$$u_m = (1p/h)x(24h)$$

$$k > 24$$

Lo que implica que el mínimo tamaño de lote sea 25.

**Paso 2:**

Ahora para encontrar el tamaño de lote óptimo, primero determinamos la utilización óptima del sistema.

$$u^* = \frac{1}{1 + \sqrt{C_a^2 / [u_m(1 + C_e)] + C_e^2}}$$

$$u^* = \frac{1}{1 + \sqrt{(1) / [(24)x(1 + 1)] + (1)^2}}$$

$$u^* = 0.4974$$

**Paso 3:**

Una vez calculada la utilización óptima del sistema, la fórmula utilizada por la Física de Fábrica para calcular el óptimo tamaño de un lote en paralelo es:

$$k^* = \frac{u_m}{u^*}$$

$$k^* = \frac{24p}{0.4974p}$$

$$k^* = 48.25p \approx 49p$$

Por lo tanto el tamaño de lote óptimo para el Subsistema en Paralelo de nuestro caso de estudio es de 49 piezas.

**5.1.6. Cálculo del Tamaño Óptimo de Lote Paralelo empleando Algoritmos evolutivos de SimRunner**

Al igual que los dos casos anteriores, el procedimiento a seguir es el mismo. Como ya fue detallado para el caso Split y NonSplit, abreviaremos la explicación y expondremos los resultados obtenidos.

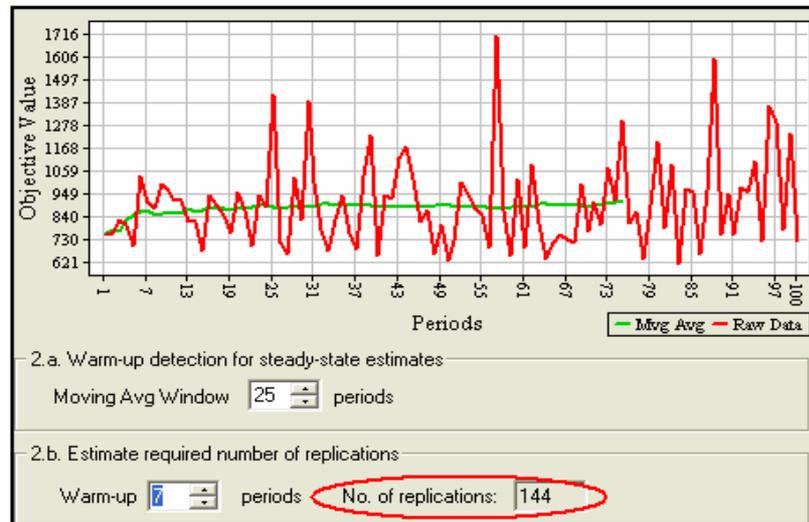
### **Paso 0: Determinar Warm Up**

Dado los siguientes parámetros experimentales:

Experimental parameters	
1. Simulation run length:	10000 hr
2. Output recording time interval (Period):	100 hr
3. Number of test replications:	5
4. Percent error in objective function estimate:	1
5. Confidence Level:	95

**FIGURA 5.13 PARÁMETROS EXPERIMENTALES PARA DETERMINAR WARM UP DEL SUBSISTEMA PARALELO**

Se procede a correr el modelo. La gráfica obtenida es la presentada a continuación en la que se puede observar que aproximadamente cuando el modelo ha corrido 7 períodos, lo que equivale a 700 horas (cada período fue definido de 100 horas), el proceso se vuelve estable en el tiempo. El tamaño de muestra o número de réplicas sugerido es de 144 réplicas.



**FIGURA 5.14 WARM UP DEL SUBSISTEMA PARALELO**

### **Paso 1: Crear y Verificar**

Se define como macro el factor de entrada que se desea monitorear.

Macro: “**k\_paralelo**”

### **Paso 2: Construir un proyecto**

Las locaciones de la línea de producción por donde pasan las partes de interés en este estudio son:

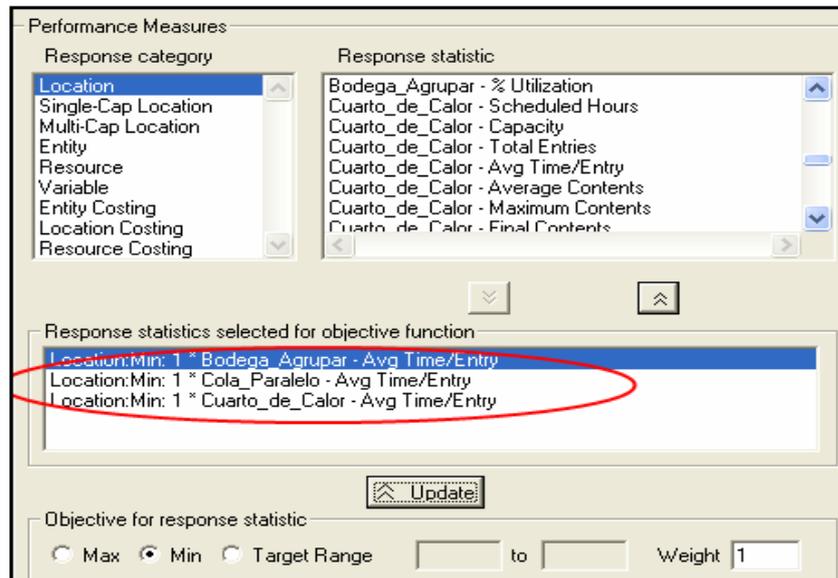
- Bodega Agrupar

- Cola\_Paralelo
- Cuarto\_de\_Calor
- BPT

Por lo tanto, los componentes que conforman la función objetivo que deseamos minimizar son:

- Avg. Time/Entry de Bodega Agrupar (agrupamiento en lotes)
- Avg. Time/Entry de Cola Paralelo
- Avg. Time/Entry de Cuarto de Calor

La ventana de SimRunner que muestra el paso 2, es la siguiente:



**FIGURA 5.15 FACTORES DE ENTRADA DEL SUBSISTEMA PARALELO**

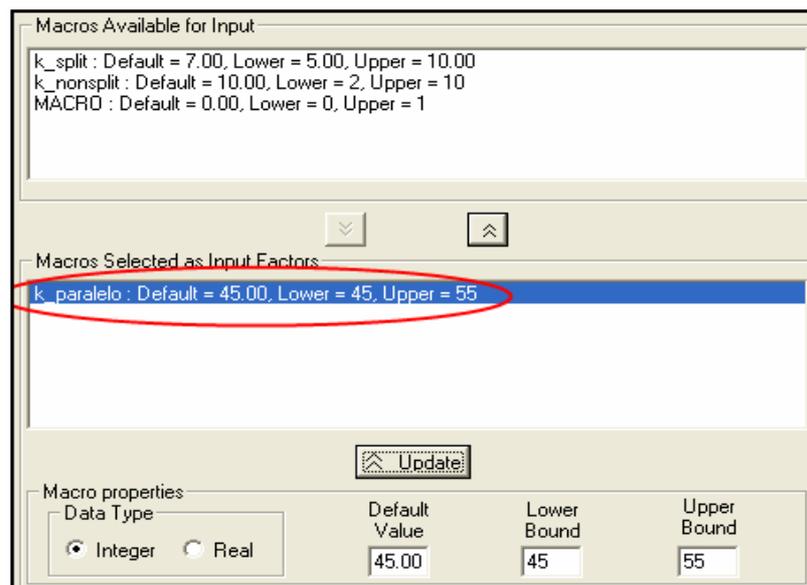
Después de definir el objetivo, se selecciona el o los factores de entrada que se desea probar.

**Factor de Entrada:**  $k_{\text{paralelo}}$

**Rango de Experimentos:**  $45 < k < 55$ , donde  $k$  es un número entero.

Se consideró trabajar con este rango de valores de  $k$  debido a que el tamaño óptimo de lote obtenido por medio del método de algoritmos de Hopp & Spearman ( $K= 49$ ) se encuentra incluido en este intervalo, lo cual facilita la búsqueda del tamaño óptimo de lote en Paralelo utilizando la herramienta SimRunner.

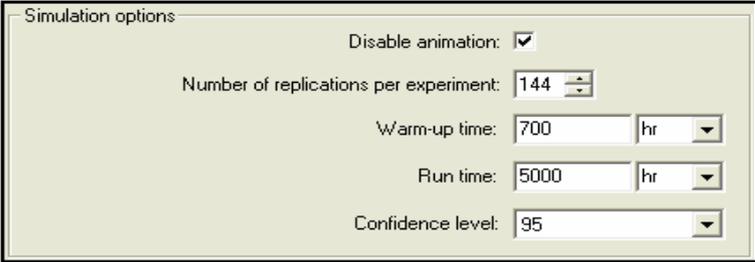
El gráfico mostrado a continuación, presenta un screenshot de SimRunner al momento de elegir el factor de entrada



**FIGURA 5.16 MACRO DEL SUBSISTEMA PARALELO**

### **Paso 3: Correr los Experimentos**

Al haber definido la función objetivo y los factores de entrada considerados, se plantean las condiciones para la corrida del modelo:



Simulation options

Disable animation:

Number of replications per experiment: 144

Warm-up time: 700 hr

Run time: 5000 hr

Confidence level: 95

**FIGURA 5.17 CONDICIONES INICIALES PARA CORRIDA DEL MODELO DEL SUBSISTEMA SPLIT**

Cada uno de los tamaños de lote en paralelo seleccionados para este estudio son probados por la herramienta SimRunner, la misma que calcula los tiempos reales de procesamiento, desde  $k= 45$  hasta  $k= 55$ . Después de realizadas las pruebas, SimRunner cataloga los resultados de la siguiente forma:

Convergence Status

Phase 1:

Generation: 1

Optimization Converged

Experi	Objective Function	Bodega_Agrupar: Avg Time/Entry	Cola_Paralelo: Avg Time/Entry	Cuarto_de_Calor: Avg Time/Entry	k_paralelo	Low CI	Hi CI
8	-3219.416	1434.806	354.600	1430.010	49.000	-3260.910	-3177.923
5	-3219.738	1523.275	273.666	1422.797	52.000	-3258.266	-3181.211
3	-3221.694	1344.125	449.361	1428.407	46.000	-3275.798	-3167.990
1	-3228.511	1464.799	324.487	1439.224	50.000	-3269.807	-3187.214
2	-3230.270	1375.501	416.679	1438.090	47.000	-3282.627	-3177.912
6	-3236.033	1315.415	473.824	1446.794	45.000	-3286.767	-3185.298
11	-3241.405	1549.635	262.803	1428.967	53.000	-3280.967	-3201.844
9	-3248.073	1584.698	241.883	1421.492	54.000	-3284.318	-3211.829
10	-3250.885	1402.276	400.471	1448.119	48.000	-3301.886	-3199.845
7	-3260.124	1491.764	324.107	1444.252	51.000	-3304.906	-3215.341
4	-3334.153	1612.930	274.492	1446.731	55.000	-3377.128	-3291.178

**FIGURA 5.18 TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA SPLIT OBTENIDO A TRAVÉS DE SIMRUNNER**

Observando la Figura 5.18, se concluye que el tamaño óptimo de lote paralelo obtenido es de 49 partes; ya sean éstas sillas o mesas.

#### **Paso 4: Evaluar sugerencias**

Se podrían considerar otros valores de k, pero nos enfocaremos como respuesta del valor óptimo al primer valor proporcionado por la tabla,  $k = 49$ .

### 5.1.7. Tablas de Resultados

De acuerdo a los cálculos realizados mediante la utilización de algoritmos de Hopp & Spearman y los algoritmos evolutivos empleados por Simrunner se obtuvieron tamaños de lote óptimos para cada caso.

#### **Tamaño Óptimo de Lote Split**

Mediante la aplicación de las dos técnicas se obtuvieron resultados similares. Se puede observar que el tamaño óptimo de Lote Split difiere en una mesa entre ambas metodologías:

**TABLA 39**  
**TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA SPLIT**  
**DETERMINADO A TRAVÉS DE AMBAS METODOLOGÍAS**

	<b>k ( mesas )</b>
Hopp & Spearman	9
SimRunner	8

#### **Tamaño Óptimo de lote Non Split**

Al igual que en el caso anterior, ambas metodologías consiguieron resultados similares, teniendo de diferencia una silla en el tamaño óptimo de lote Non Split:

**TABLA 40**  
**TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA NON SPLIT**  
**DETERMINADO A TRAVÉS DE AMBAS METODOLOGÍAS**

	<b>k ( sillas )</b>
Hopp & Spearman	4
SimRunner	3

### Tamaño Óptimo de lote Paralelo

En este estudio, el tamaño óptimo de lote paralelo se mantiene igual para las dos metodologías:

**TABLA 41**  
**TAMAÑO ÓPTIMO DE LOTE DEL SUBSISTEMA PARALELO**  
**DETERMINADO A TRAVÉS DE AMBAS METODOLOGÍAS**

	<b>k ( partes )</b>
Hopp & Spearman	49
SimRunner	49

## 5.2. Cálculo de Indicadores de Desempeño

Aun cuando se pueda observar similitudes en los tamaños de lote obtenidos mediante los dos métodos utilizados, es necesario demostrar si con los diferentes resultados por utilizar algoritmos de optimización de

Hopp & Spearman y algoritmos evolutivos empleados por la herramienta de optimización SimRunner se obtiene el mismo desempeño de la línea o no. A continuación hemos calculado tres indicadores de desempeño de la línea de producción para cada tamaño de lote con el fin de compararlos estadísticamente y comprobar su similitud.

Estos indicadores de desempeño son:

**WIP (Work in Process):** Fue determinado en cada uno de los subsistemas, mediante la creación de una variable que contabiliza tanto las entradas como salidas de las entidades en la línea de producción, obteniéndose de esta manera el número exacto de entidades dentro de la línea de proceso.

En este ejemplo se observa que cada vez que entra la entidad Mesa ingresa a la locación BMP\_Mesas (la cual es considerada como el inicio de la línea de producción), se incrementa la variable WIP en 1 unidad.

Entity...	Location...	Operation...
Mesa	BMP_Mesas	Inc WIP_Mesas,1

**FIGURA 5.19 INCREMENTO DE WIP DE LA ENTIDAD MESAS**

A su vez, cuando la entidad Mesa ingresa a la BPT (en la cual finaliza la línea de producción), se decrementa la variable WIP en 1 unidad.

Output...	Destination...	Rule...	Move Logic...
1 Mesa	BPT	FIRST 1	DEC WIP_MESAS,1

**FIGURA 5.20 DECREMENTO DE WIP DE LA ENTIDAD MESAS**

De esta manera se mantiene un registro del Productoo en Proceso durante toda la simulación.

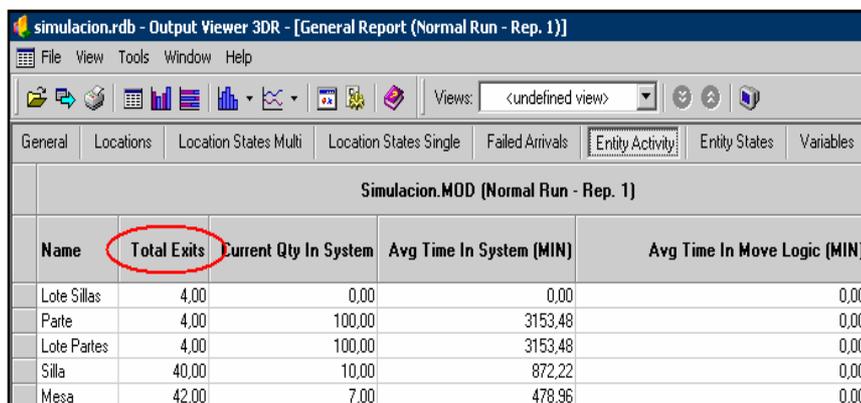
**CT (Cycle Time):** Para calcular el tiempo promedio que cada una de las entidades de interés permanece en el sistema, se hizo uso de una de las estadísticas de Promodel, Avg Time/entry, la cual proporciona el tiempo de permanencia de una entidad en una Locación determinada.

SPLIT K 8.MOD (Normal Run - Avg. Repts)					
Name	Scheduled Time (HR)	Capacity	Total Entries	Avg Time Per Entry (MIN)	Avg Contents
BMP Sillas	10000,00	999999,00	5010,00	0,00	0,00
BMP Mesas	10000,00	999999,00	5000,00	0,00	0,00
Acabado Sillas	10000,00	1,00	4999,94	69,00	0,57
Acabado Mesas	10000,00	1,00	5000,75	105,00	0,88
Bodega Sillas Acabadas	10000,00	999999,00	4999,91	0,00	0,00

**FIGURA 5.21 TIEMPO PROMEDIO DE PERMANENCIA DE LA ENTIDAD EN UNA LOCACIÓN**

Para cada una de las entidades se sumaron los valores de Avg Time/entry de las locaciones por las que pasaban en la línea de producción, obteniéndose de esta forma el Tiempo de Ciclo de cada una.

**TH (Throughput):** Al igual que el tiempo de ciclo, la tasa de producción se obtuvo de uno de los resultados de ProModel, Total Exits, el cual contabiliza el total de entidades que salen de la línea de producción. Dividiendo este valor para el total de tiempo que dura la simulación se obtiene el TH para cada una de las entidades del estudio.



The screenshot shows a software window titled "simulacion.rdb - Output Viewer 3DR - [General Report (Normal Run - Rep. 1)]". The window contains a menu bar (File, View, Tools, Window, Help) and a toolbar with various icons. Below the toolbar are several tabs: General, Locations, Location States Multi, Location States Single, Failed Arrivals, Entity Activity (selected), Entity States, and Variables. The main content area displays a table titled "Simulacion.MOD (Normal Run - Rep. 1)". The table has five columns: Name, Total Exits (circled in red), Current Qty In System, Avg Time In System (MIN), and Avg Time In Move Logic (MIN). The data rows are as follows:

Name	Total Exits	Current Qty In System	Avg Time In System (MIN)	Avg Time In Move Logic (MIN)
Lote Sillas	4,00	0,00	0,00	0,00
Parte	4,00	100,00	3153,48	0,00
Lote Partes	4,00	100,00	3153,48	0,00
Silla	40,00	10,00	872,22	0,00
Mesa	42,00	7,00	478,96	0,00

**FIGURA 5.22 TOTAL DE ENTIDADES QUE ABANDONAN EL SISTEMA**

Posteriormente al cálculo de cada uno de los indicadores de desempeño, se procede a compararlos para determinar si los resultados obtenidos de la metodología de optimización de Hopp & Spearman y de los algoritmos evolutivos empleados por SimRunner fueron iguales o diferentes. Esta comparación no se realizará con valores puntuales, sino que se establecerá Intervalos de Confianza para cada uno de los indicadores.

Como ilustración se calculará a continuación el Intervalo de Confianza del WIP considerando los resultados obtenidos en SimRunner para el caso serial Split:

Nivel de Confianza: 95 %

$\alpha$ : 0.05

$\overline{WIP}$  : 6.1656 mesas

$\sigma_{wip}$  : 0.3684

n: 161 réplicas

Para un NC del 95% se tiene un  $Z_{\alpha/2}$ : 1.96

Se tiene entonces un Limite Superior del Intervalo de Confianza de:

$$LS = \overline{WIP} + Z_{\alpha/2} * \left( \frac{\sigma_{wip}}{\sqrt{n}} \right)$$

$$LS = 6.1656 + 1.96 * \left( \frac{0.3684}{\sqrt{161}} \right)$$

$$LS = 6.2225 \text{ mesas}$$

De la misma manera se procede a calcular el Limite Inferior del Intervalo de confianza:

$$LI = \overline{WIP} - Z_{\alpha/2} * \left( \frac{\sigma_{wip}}{\sqrt{n}} \right)$$

$$LI = 6.1656 - 1.96 * \left( \frac{0.3684}{\sqrt{161}} \right)$$

$$LI = 6.1088 \text{ mesas}$$

Finalmente se obtiene que con un nivel de confianza del 95%, el Intervalo de Confianza del WIP para el lote en Serie Split calculado por la metodología de los algoritmos evolutivos empleando SimRunner va de 6.1088 a 6.2225 mesas.

Este intervalo debe ser comparado con el Intervalo de Confianza del WIP para lote en Serie Split calculado por la metodología de optimización de Hopp & Spearman. Si estos se cruzan, podemos concluir que con ambas metodologías se obtiene el mismo desempeño de la línea. De caso contrario, se debe establecer con cual metodología se logra un mejor desempeño.

### **5.2.1. Análisis y Comparación de Resultados**

A continuación se realiza el análisis de cada uno de los Intervalos de confianza de los indicadores de desempeño y se establece la relación existente entre los mismos.

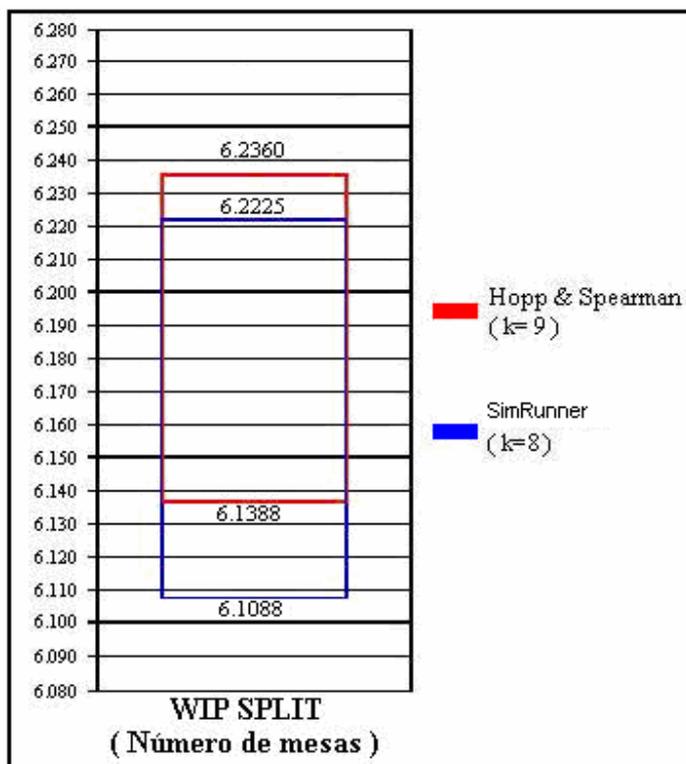
### **Resultados de Lote Serial Split:**

En esta tabla se puede observar el desempeño de la línea Split considerando los tamaños de lote óptimos obtenidos a través de ambas técnicas de optimización.

**TABLA 42  
INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE  
DESEMPEÑO OBTENIDOS POR AMBAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN  
(SUBSISTEMA SPLIT)**

INDICADORES DE DESEMPEÑO SPLIT			
		Hopp & Spearman ( K = 9 )	SimRunner ( K = 8 )
WIP ( mesa )	LI	6,1388	6,1088
	X	6,1874	6,1656
	LS	6,2360	6,2225
CT ( hr )	LI	12,3439	12,2084
	X	12,4443	12,3346
	LS	12,5448	12,4609
TH (mesa/hr)	LI	0,50002	0,49991
	X	0,50008	0,49998
	LS	0,50013	0,50004

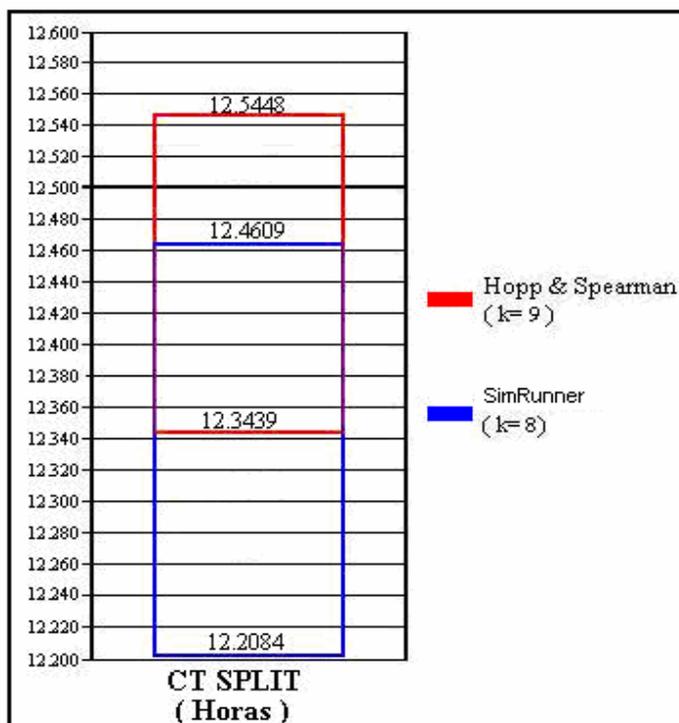
En la siguiente figura se muestra que los Intervalos de Confianza del WIP para la metodología de Hopp & Spearman y la metodología de SimRunner se cruzan, con lo cual se concluye con un 95% de confianza que el nivel de WIP en la línea es el mismo para ambas metodologías.



**FIGURA 5.23 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "WIP" OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA SPLIT)**

Según los resultados, vemos a su vez que el Intervalo de Confianza del Tiempo de Ciclo, tanto para un tamaño óptimo de lote de 9 mesas (Hopp & Spearman) y de 8 mesas (SimRunner) se cruzan, por lo que a su vez se puede establecer con 95% de confianza que el desempeño del CT de la línea es el mismo tanto

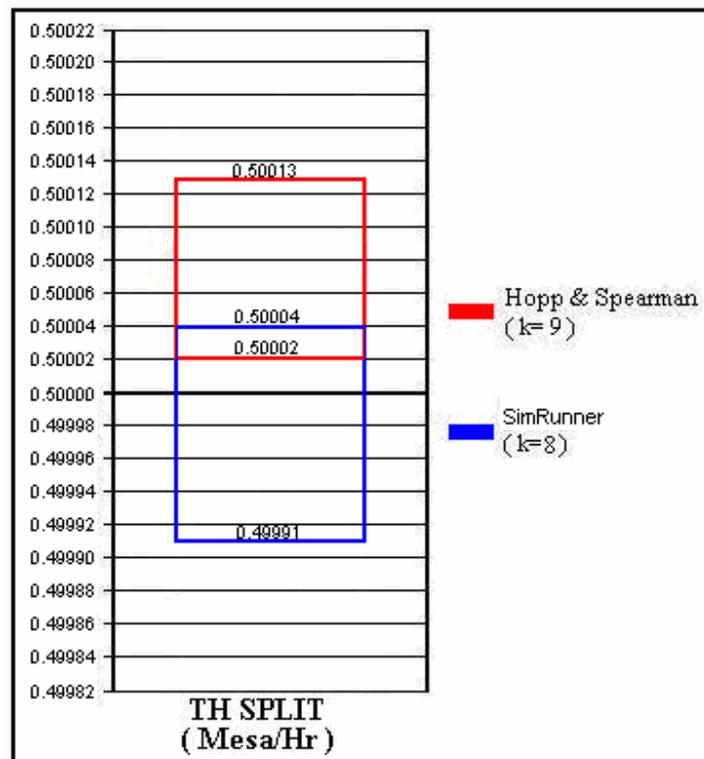
para la metodología de SimRunner como para la de Hopp & Spearman.



**FIGURA 5.24 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “CT” OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA SPLIT)**

Finalmente se tiene que el Intervalo de Confianza de TH para ambas metodologías también se cruza, lo cual indica con 95% que la Tasa de Producción es igual tanto para un tamaño de lote

de 9 mesas (Hopp & Spearman) como para 8 mesas (SimRunner).



**FIGURA 5.25 INTERVALOS DE CONFIANÇA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "TH" OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA SPLIT)**

Estadísticamente se demuestra que los tres indicadores considerados para medir el desempeño de la línea que utiliza

Lotes Seriales Split son iguales, ya sea usando el valor de “k” de la metodología de Hopp & Spearman o el de SimRunner.

### **Resultados de Lote Serial Non Split:**

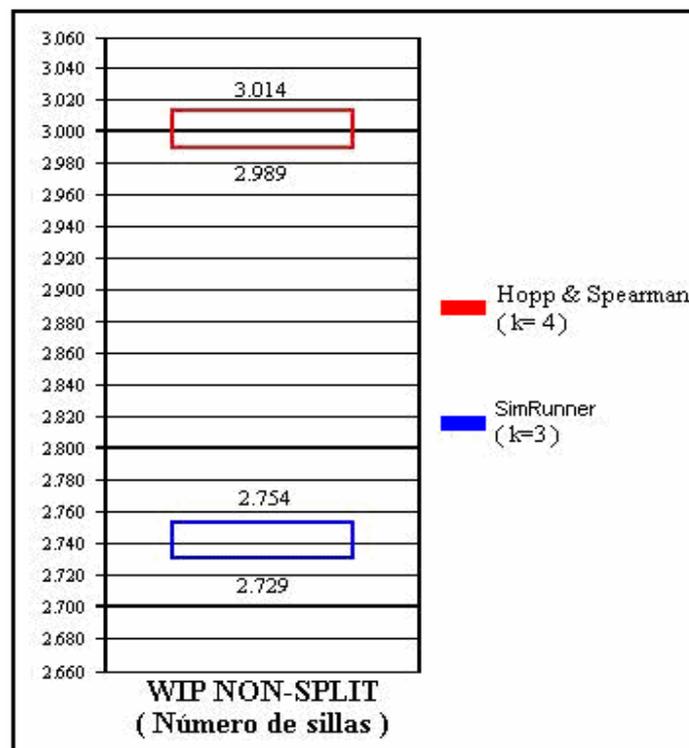
A continuación se muestran los Intervalos de Confianza de los indicadores de desempeño considerados en el caso de estudio, calculados con un tamaño de lote de 4 sillas (Hopp & Spearman) y 3 sillas (SimRunner):

**TABLA 43**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO OBTENIDOS POR AMBAS TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN (SUBSISTEMA NONSPLIT)**

INDICADORES DE DESEMPEÑO NON-SPLIT			
		Hopp & Spearman ( K = 4 )	SimRunner ( K = 3 )
WIP ( silla )	LI	2,989	2,729
	X	3,002	2,742
	LS	3,014	2,754
CT ( hr )	LI	5,272	4,936
	X	5,596	5,443
	LS	5,919	5,951
TH (silla/hr)	LI	0,49997	0,49996
	X	0,50002	0,49998
	LS	0,50008	0,50001

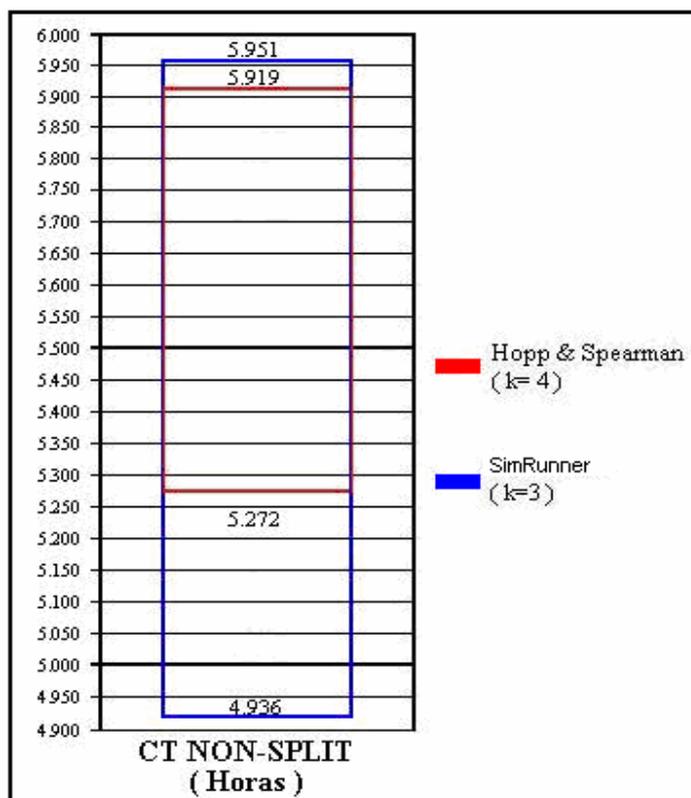
La siguiente figura muestra que los Intervalos de Confianza del WIP calculados para ambas metodologías no se cruzan, por lo

que se concluye con un 95% de confianza que el WIP con un tamaño de lote de 4 sillas es diferente al WIP con un tamaño de lote de 3 sillas, concluyendo que el nivel de WIP resultante del valor de K utilizado por la metodología de Hopp & Spearman es mayor al de la técnica de SimRunner.



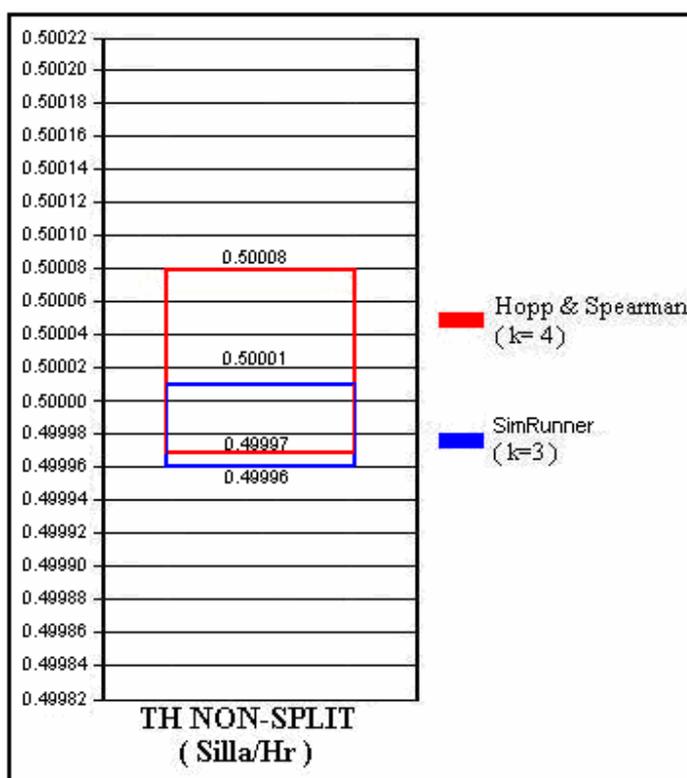
**FIGURA 5.26 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "WIP" OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA NONSPLIT)**

De acuerdo a los cálculos realizados, el Intervalo de Confianza del Tiempo de Ciclo obtenido de la línea de producción que trabaja con lotes de 4 sillas se cruza con el Intervalo de Confianza de la misma línea de producción que trabaja con 3 sillas, por lo que se concluye con un 95% de confianza que el CT es el mismo para ambas metodologías.



**FIGURA 5.27 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "CT" OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA NONSPLIT)**

Al igual que en el indicador anterior, se observa que el Intervalo de confianza del TH calculado por la metodología de Hopp & Spearman y el calculado por la metodología de SimRunner se cruzan, por lo que se concluye con 95% de confianza que la Tasa de Producción es la misma en ambas metodologías.



**FIGURA 5.28 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “TH” OBTENIDO POR AMBAS TÉCNICAS (SUBSISTEMA NONSPLIT)**

Se ha obtenido mediante un análisis estadístico, que tanto el CT como el TH son iguales para ambos tamaños de lote, pero el nivel de WIP de la línea que trabaja con lotes de 4 sillas es mayor al de la línea utilizando lotes de 3 sillas, por lo que se concluye con 95% de confianza que el desempeño de la línea al utilizar un tamaño de lote óptimo con la metodología de SimRunner es mejor al de la metodología de Hopp & Spearman.

**Resultados de Lote Paralelo:**

Tanto con la metodología de optimización de Hopp & Spearman y de los algoritmos evolutivos empleados por la herramienta de optimización SimRunner se obtuvo el mismo tamaño óptimo de lote, por lo que los Intervalos de Confianza de sus indicadores de desempeño son iguales:

**TABLA 44**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE**  
**DESEMPEÑO OBTENIDOS POR AMBAS TÉCNICAS DE**  
**OPTIMIZACIÓN (SUBSISTEMA PARALELO)**

INDICADORES DE DESEMPEÑO PARALELO		
		Simulación y Hopp & Spearman ( K = 49 )
WIP ( parte )	LI	52,27
	X	53,07
	LS	53,87
CT ( hr )	LI	51,93
	X	52,85
	LS	53,78
TH (parte/hr)	LI	0,998
	X	1,000
	LS	1,003

Al haber obtenido en ambas metodologías el mismo tamaño de lote, se concluye con 95% de confianza que el nivel de WIP, CT y TH tanto para la metodología de Hopp & Spearman como para la metodología de SimRunner es igual.

**Resultados del Caso de Estudio:**

Para el caso Serial Split se obtuvieron tamaños de lote de 8 mesas y 9 mesas y se comprobó estadísticamente que el desempeño de la línea era el mismo al utilizar ambos tamaños de

lote. A fin de continuar con el caso de estudio se considerara utilizar el tamaño de lote de 8 mesas para futuras comparaciones.

En el caso Non Split, los indicadores CT y TH fueron iguales tanto para un tamaño de lote de 3 sillas y de 4 sillas, pero el WIP era mayor con un lote de 4 sillas. Siendo que el desempeño de la línea de producción en general fue mejor con un lote de 3 sillas, se considera este tamaño como óptimo para las siguientes comparaciones.

Tanto para la metodología de Hopp & Spearman como para SimRunner el tamaño óptimo de lote fue de 49 partes, es por esta razón que se considera este tamaño como el óptimo para los siguientes análisis.

A continuación se muestra una tabla con el resumen de los tamaños de lote óptimo para cada subsistema:

**TABLA 45  
TAMAÑOS DE LOTE ÓPTIMO**

TAMAÑOS DE LOTE ÓPTIMOS	
	K Óptimo
Caso Split	8
Caso NonSplit	3
Caso Paralelo	49

### **5.3. Resultados obtenidos de la Comparación del Tamaño de Lote Actual y el Propuesto por el método de Optimización**

De acuerdo a los tamaños óptimos de lote obtenidos para los casos Serial Split, Serial Non Split y Serial Paralelo, se procederá a comparar sus indicadores de desempeño con respecto a los calculados en la línea de producción en su Estado Actual.

El procedimiento utilizado para calcular los Intervalos de Confianza es igual al utilizado en la sección 5.2., de la misma manera se utilizó el procedimiento para comparar los dos escenarios planteados para cada tipo de lote.

### Resultados de Lote Serial Split:

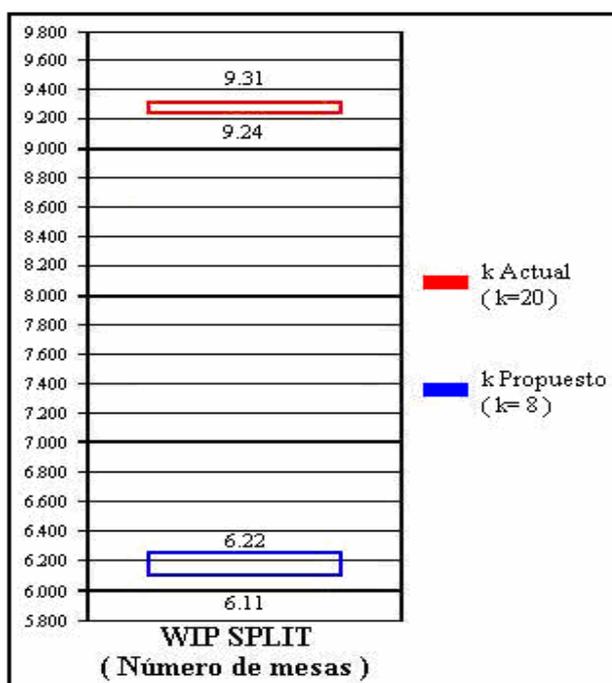
La siguiente tabla muestra los Intervalos de Confianza de los indicadores de desempeño para el caso Serial Split de la línea de producción en su Estado Actual y los calculados con un tamaño óptimo de lote:

**TABLA 46**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE**  
**DESEMPEÑO OBTENIDOS USANDO EL TAMAÑO DE LOTE ACTUAL Y EL**  
**PROPUESTO (SUBSISTEMA SPLIT)**

INDICADORES DE DESEMPEÑO SPLIT			
		K Actual (k=20)	K Propuesto (k=8)
WIP ( mesa )	LI	9,24	6,11
	X	9,27	6,17
	LS	9,31	6,22
CT ( hr )	LI	18,46	12,21
	X	18,52	12,33
	LS	18,59	12,46
TH (mesa/hr)	LI	0,49993	0,49991
	X	0,50000	0,49998
	LS	0,50007	0,50004

A continuación se presentan los Intervalos de Confianza para el WIP, CT y TH tanto para el Estado Actual de la línea de producción como para el calculado considerando un tamaño óptimo de lote.

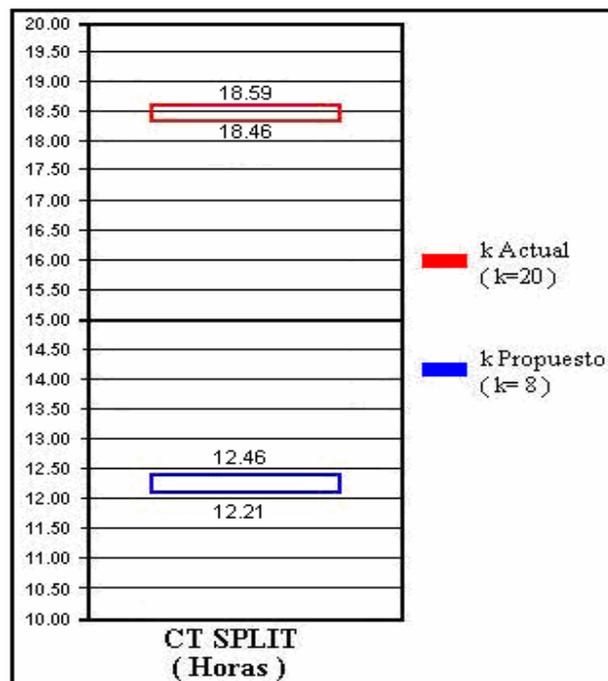
Como se aprecia, los Intervalos de Confianza del WIP no se cruzan, por lo que se concluye con 95% de confianza que el WIP en el Estado actual de la línea no es el mismo al de la misma trabajando con un tamaño óptimo de lote. Se observa que el nivel de WIP obtenido usando el tamaño de lote propuesto es menor al obtenido actualmente.



**FIGURA 5.29 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "WIP" OBTENIDO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA SPLIT**

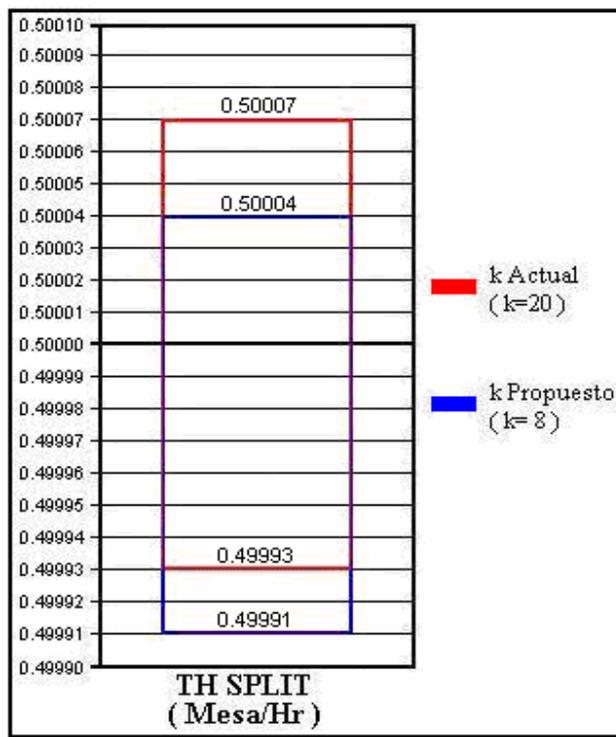
De acuerdo a los resultados, los Intervalos de Confianza del CT de la línea en su Estado Actual y el propuesto no se cruzan, teniendo como

conclusión que con 95% de confianza el Tiempo de Ciclo usando un tamaño de lote óptimo es mucho menor al obtenido con los parámetros actuales.



**FIGURA 5.30 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “CT” OBTENIDO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA SPLIT**

A diferencia de los anteriores indicadores de desempeño, los Intervalos de Confianza del TH para el Estado Actual y el propuesto se cruzan, con lo cual se concluye con 95% de confianza que la Tasa de Producción es la misma en ambos escenarios.



**FIGURA 5.31 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “TH” OBTENIDO DE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA SPLIT**

Como se aprecia en los resultados anteriores, tan solo la Tasa de Producción de ambos escenarios resultó ser igual, mientras que el Tiempo de Ciclo y el WIP de la línea de producción al utilizar un tamaño óptimo de lote fue menor a los calculados en el Estado Actual de la misma, siendo entonces que en general la línea tiene un mejor desempeño al utilizar lotes de tamaño óptimo en sus procesos; ya que

puede generar el mismo nivel de producción con un menor nivel de WIP y CT.

### **Resultados de Lote Serial Non Split:**

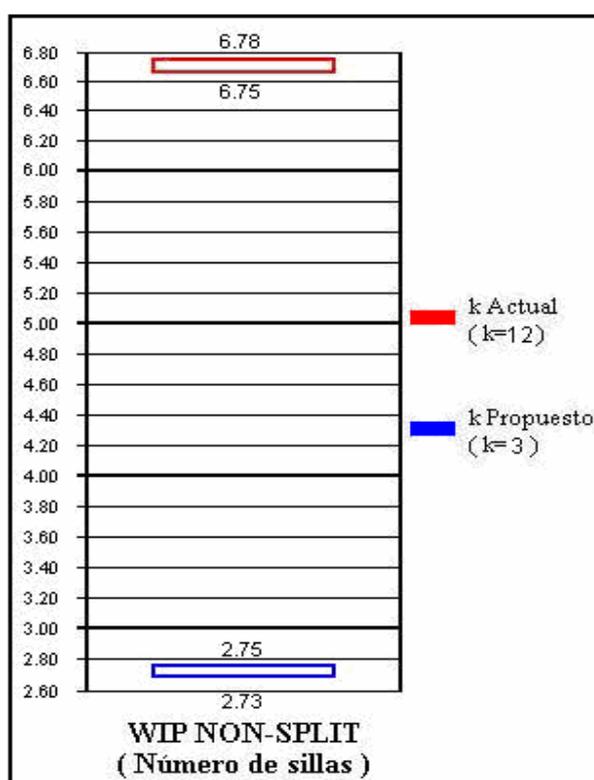
En esta tabla se presentan los resultados de los Intervalos de Confianza de los indicadores de desempeño calculados en la línea serial Non Split para los escenarios de la misma en su Estado Actual (lotes de 12 sillas) y utilizando un tamaño óptimo de lote (lotes de 3 sillas):

**TABLA 47  
INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO OBTENIDOS USANDO EL TAMAÑO DE LOTE ACTUAL Y EL PROPUESTO (SUBSISTEMA NON SPLIT)**

<b>INDICADORES DE DESEMPEÑO NON-SPLIT</b>			
		K Actual (k=12)	K Propuesto (k=3)
WIP ( silla )	LI	6,75	2,73
	X	6,76	2,74
	LS	6,78	2,75
CT ( hr )	LI	13,48	4,94
	X	13,52	5,44
	LS	13,56	5,95
TH (silla/hr)	LI	0,49994	0,49996
	X	0,49998	0,49998
	LS	0,50002	0,50001

En la siguiente gráfica, se aprecia que el Intervalo de Confianza del WIP del Estado Actual no se cruza con el calculado con un tamaño óptimo

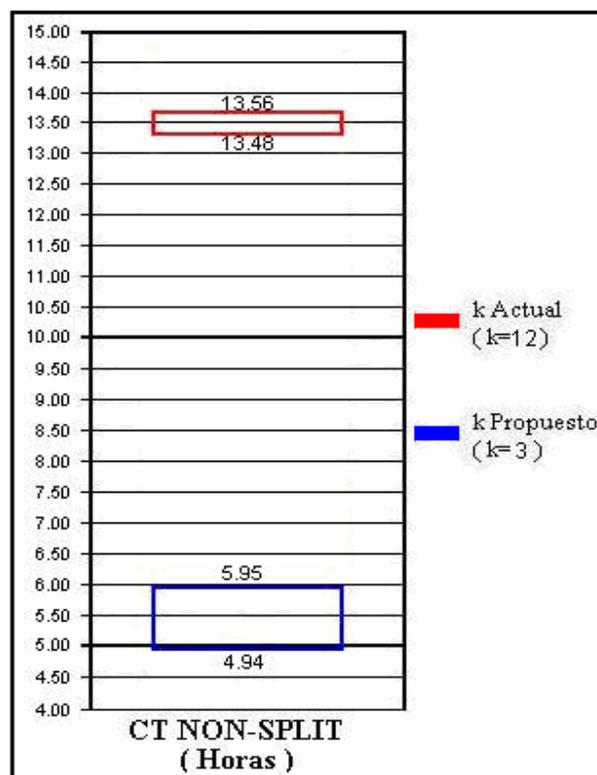
de lote, concluyéndose con 95% de confianza que el Producto en Proceso en ambos escenarios es diferente, resultando que el del Estado Actual es mayor que el de la línea de producción usando un tamaño óptimo de lote.



**FIGURA 5.32 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "WIP" OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA NONSPLIT**

Para el Tiempo de Ciclo se observa que los Intervalos de Confianza del Estado Actual y del escenario con un tamaño óptimo de lote no se

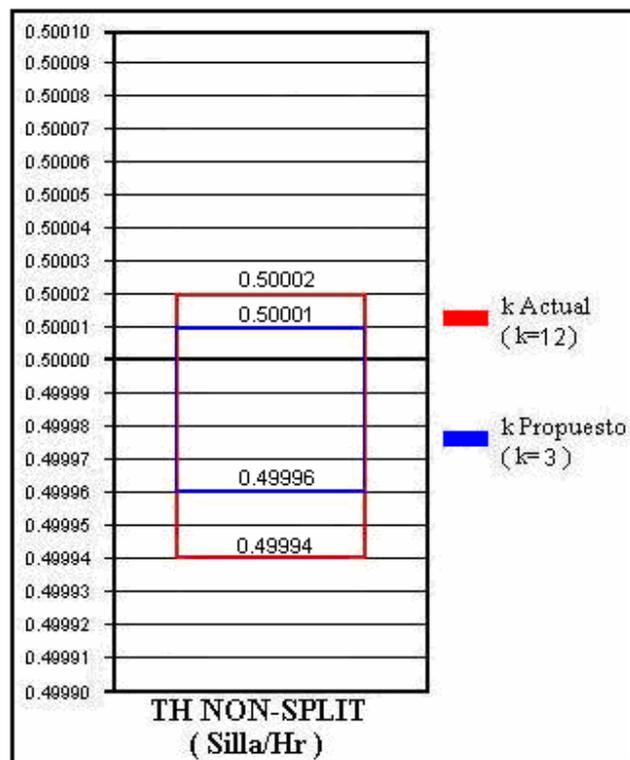
cruzan. Por esta razón se concluye con 95% de confianza que el CT del escenario de la línea en el Estado Actual es diferente que el de la línea con un tamaño óptimo de lote. Además se aprecia que el Tiempo de Ciclo con un tamaño de lote en el Estado Actual es mayor al del otro escenario.



**FIGURA 5.33 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “CT” OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA NONSPLIT**

De la misma forma que en el lote serial Split, en este caso a su vez los Intervalos de Confianza de la Tasa de Producción para ambos

escenarios se cruzan, por lo que se concluye con 95% de confianza que el TH de la línea de producción en su Estado Actual es la misma que al usar un tamaño óptimo de lote.



**FIGURA 5.34 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “TH” OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA NONSPLIT**

Se determinó estadísticamente que el Tiempo de Ciclo y el nivel de Producto en Proceso de la línea de producción al utilizar un tamaño óptimo de lote fueron menores a los calculados en el Estado Actual, y

nuevamente se observó que la Tasa de Producción para ambos escenarios es la misma.

Por esta razón se concluye que el desempeño de la línea serial Non Split es mejor si se utilizara lotes de tamaño óptimo; ya que se reduce los niveles de producto en proceso y los tiempos de ciclo de los lotes.

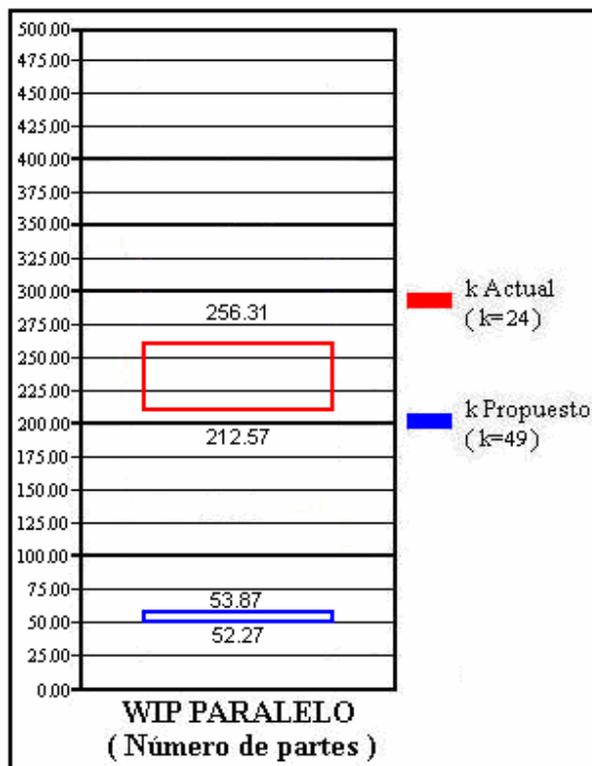
**Resultados de Lote Paralelo:**

Para ambos escenarios se estimaron Intervalos de Confianza de los indicadores de desempeño, con tamaños de lote de 24 partes para el Estado Actual de la línea, y de 49 partes usando un tamaño óptimo de lote:

**TABLA 48**  
**INTERVALOS DE CONFIANZA DE LOS INDICADORES DE DESEMPEÑO**  
**OBTENIDOS USANDO EL TAMAÑO DE LOTE ACTUAL Y EL PROPUESTO**  
**(SUBSISTEMA PARALELO)**

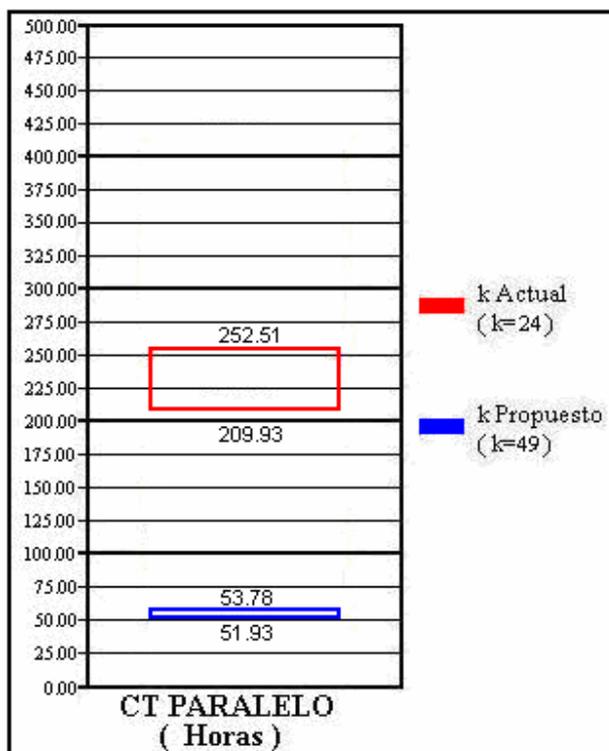
INDICADORES DE DESEMPEÑO PARALELO			
		K Actual (k=24)	K Propuesto (k=49)
WIP ( parte )	LI	212,57	52,27
	X	234,44	53,07
	LS	256,31	53,87
CT ( hr )	LI	209,93	51,93
	X	231,22	52,85
	LS	252,51	53,78
TH (parte/hr)	LI	0,95275	0,998
	X	0,96091	1,000
	LS	0,96907	1,003

Se observa en la siguiente gráfica que los Intervalos de confianza del WIP para el escenario Actual y el Propuesto no se cruzan, por lo que se concluye con 95% de confianza que el Producto en Proceso para ambos escenarios es diferente, resultando que al simular la línea de producción con un tamaño óptimo de lote, el nivel de WIP generado es menor.



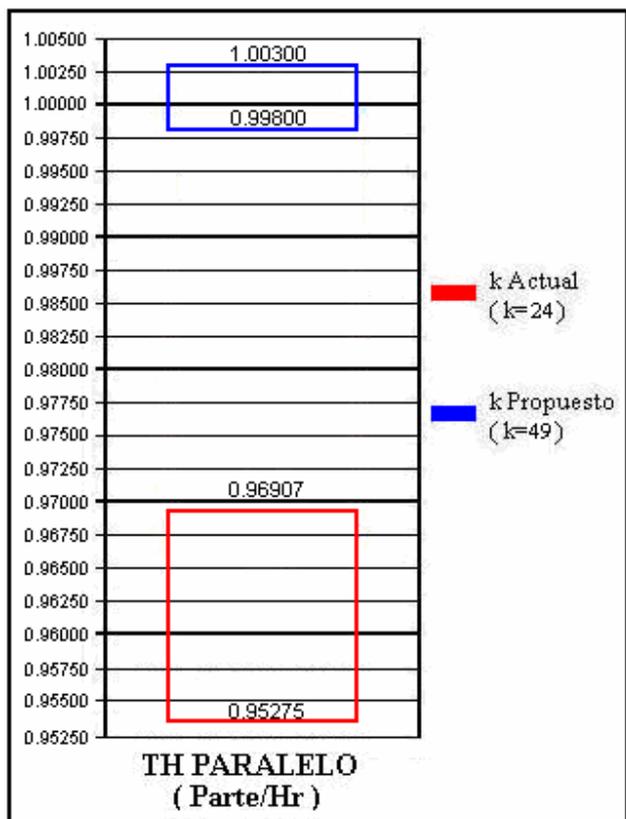
**FIGURA 5.35 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “WIP” OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA PARALELO**

Como se concluyó en el indicador anterior, el Intervalo de Confianza del CT para ambos escenarios no se cruzan, debido a esto se concluye con 95% de confianza que el Tiempo de Ciclo del Estado Actual y al utilizar lotes de tamaño óptimo son diferentes. Se puede apreciar que el CT para el Estado Actual es mayor que para el escenario propuesto.



**FIGURA 5.36 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “CT” OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA PARALELO**

Al igual que en los anteriores indicadores de desempeño de este tipo de lote, se concluye con 95% de confianza que el TH de ambos escenarios es diferente ya que los Intervalos de Confianza para el Estado Actual y al utilizar un tamaño óptimo de lote no se cruzan.



**FIGURA 5.37 INTERVALOS DE CONFIANZA DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "TH" OBTENIDO ENTRE LA SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA EN EL SUBSISTEMA PARALELO**

A diferencia de los casos anteriores, la Tasa de producción (TH) del Escenario Propuesto es mayor a la del Estado Actual. Los otros indicadores, tanto el Tiempo de Ciclo (CT) como el nivel de Producto en Proceso (WIP) generaron resultados mayores en el Estado Actual.

Considerando que todos los indicadores resultaron tener un mejor desempeño en el Escenario Propuesto se concluye que en el caso de Lotes en Paralelo se obtiene un mejor desempeño al utilizar tamaños de lote óptimos en sus procesos.

Se observa además que existe una menor variación de los intervalos de confianza si se utilizara tamaños de lote óptimos.

### **Resultados del Caso de Estudio**

Como ya se analizó estadísticamente que existen mejoras en cuanto a los indicadores WIP, CT y TH utilizando tamaños de lote óptimos, determinaremos en qué porcentaje influyeron estas mejoras.

Para determinar estas mejoras utilizaremos los valores promedios obtenidos.

**TABLA 49  
COMPARACIÓN DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO "CT"**

<b>COMPARACION DEL INDICADOR DE TIEMPO DE CICLO "CT" (hr) (Promedio)</b>			
	<b>K Actual</b>	<b>K Propuesto</b>	<b>% Reducción del CT</b>
<b>Lote Serial Split</b>	18,52	12,33	33,41
<b>Lote Serial Non Split</b>	13,52	5,44	59,75
<b>Lote Paralelo</b>	231,22	52,85	77,14

Se observa que para todos los tipos de lotes de proceso se obtienen reducciones significativas en el tiempo de ciclo, pero en el caso de lote Paralelo el impacto en la reducción del CT es bastante grande, ya que usualmente este tipo de lotes opera en máquinas que poseen altos tiempos de procesamiento y si no se elige un adecuado tamaño de lote, por ejemplo si se utiliza pequeños tamaños de lote ocasiona que la utilización sea casi de 1, lo que dispara el tiempo de espera en cola, elevando así el tiempo de ciclo.

**TABLA 50  
COMPARACIÓN DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “WIP”**

<b>COMPARACION DEL INDICADOR DE PRODUCTO EN PROCESO "WIP" (p) (Promedio)</b>			
	<b>K Actual</b>	<b>K Propuesto</b>	<b>% Reducción del WIP</b>
<b>Lote Serial Split</b>	9,27	6,17	33,52
<b>Lote Serial Non Split</b>	6,76	2,74	59,46
<b>Lote Paralelo</b>	234,44	53,07	77,36

Analizando el parámetro de manufactura, Producto en Proceso, se observa que para todos los tipos de lote analizados se obtienen reducciones del nivel de WIP, lo cual favorece al sistema, haciendo que el nivel de inventario existente a lo largo de la línea sea bajo, lo que refleja un adecuado flujo de materiales.

En el caso de Lote Paralelo se obtuvo una reducción de casi el 78%, la cual fue mayor que los otros dos casos de lotes considerados. Esto se origina debido a que en este proceso, las entidades en el sistema tan solo se mueven agrupadas en sus respectivos lotes, los elevados Tiempos de procesamiento originan por ende que cada lote deba esperar más tiempo en la línea. Debido a que el tiempo de espera para que un lote se procese es mayor que en los otros tipos de lote, cada grupo debe esperar mas tiempo llegando a acumularse en grandes cantidades.

**TABLA 51  
COMPARACIÓN DEL INDICADOR DE DESEMPEÑO “TH”**

<b>COMPARACION DEL INDICADOR DE TASA DE PRODUCCIÓN "TH" (p/hr) (Promedio)</b>			
	<b>K Actual</b>	<b>K Propuesto</b>	<b>% Aumento del TH</b>
<b>Lote Serial Split</b>	0,50000	0,49998	0,00
<b>Lote Serial Non Split</b>	0,49998	0,49998	0,00
<b>Lote Paralelo</b>	0,96091	1,000	4,07

En el caso de este parámetro de manufactura se suscita un aspecto interesante para el caso de los lotes en serie; ya que al obtener reducciones considerables en los otros dos parámetros (WIP y CT), se esperaría lógicamente obtener una mayor cantidad de piezas producidas; sin embargo esto no sucede.

Si analizamos la ley principal establecida por la Física de Fábrica, “la Ley de Little”, que establece la relación entre el Throughput (TH), el Cycle Time (CT) y el Work In Process (WIP), tenemos

$$WIP = CT \times TH$$

Despejando la variable de interés, Throughput, obtenemos lo siguiente:

$$TH = \frac{WIP}{CT}$$

Una vez despejado el parámetro TH, analizamos que:

1. Si se disminuye el nivel de WIP, manteniendo constante el CT, se obtiene una reducción del TH.
2. Pero si reducimos el CT, manteniendo constante el WIP, obtenemos un incremento del TH.
3. Al disminuir simultáneamente el nivel de WIP y CT, ambas disminuciones pueden llegar a equipararse haciendo que no exista ni incremento ni reducción del TH.

Este análisis explica lo sucedido con este parámetro de manufactura para el caso de lotes en serie (Split y Non Split), lo que sin embargo no desvirtúa la mejora obtenida ya que es posible obtener niveles de producción similares con menor nivel de WIP y CT.

# CAPÍTULO 6

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones:

1. La Física de Fábrica es una ciencia de la manufactura que ha permitido comprender las principales interrelaciones que se presentan en los Sistemas de Producción. Una de las formas de comprobar dichas interrelaciones ha sido mediante la Simulación, que se ha convertido en una herramienta muy poderosa que permite mejorar y acelerar la comprensión de los Principios y Leyes de la Física de Fábrica.

2. Se demostró la veracidad de la ley de la Física de Fábrica que rige el comportamiento de los lotes de proceso en una línea de producción considerando los supuestos y escenarios establecidos por los autores.
3. Existe una fuerte interacción entre los tamaños de lote de proceso y los tiempos de setup. Si se incrementa el tamaño de un lote, aumenta la capacidad y así reduce la formación de una cola en espera. Sin embargo, al incrementar el tamaño de lote, se incrementa el tiempo de formación de un lote y el tiempo de espera en lote. Por lo tanto, el mayor énfasis debería estar sobre la reducción de los tiempos de setup, que permitirá el empleo de pequeños y eficientes tamaños de lote. En caso de no poder reducirse los tiempos de setup, el tiempo de ciclo bien puede ser reducido al máximo con un tamaño de lote mayor a 1, que deberá ser determinado.
4. El tamaño de lote puede afectar la capacidad de una máquina, la idea de trabajar con lotes de tamaño uno puede causar que una estación se vuelva sobreutilizada a causa de setups excesivos o tiempos excesivos de operaciones de lote en paralelo.

5. En un sistema donde existen largos tiempos de setup pero las estaciones de proceso se encuentran muy próximas entre sí, se recomienda utilizar la práctica conocida como "lot splitting.
6. Según Hopp & Spearman se puede asumir que independientemente del tamaño de lote que se este procesando, el Coeficiente Cuadrado de Variación se mantiene constante. Pero el estudio realizado muestra que para diferentes tamaños de lote, tanto la media como la desviación de los tiempos de proceso se alteran, causando por ende que el SCV se modifique, lo que hace que por la técnica de Hopp & Spearman se obtengan resultados menos precisos.
7. En el caso de estudio se observó que ambas técnicas de optimización de tamaños de lote son efectivas; ya que se obtuvo resultados muy similares; sin embargo en el Subsistema de Lote en Serie Non Split se obtuvo mejores resultados en uno de los parámetros de manufactura usando la técnica de SimRunner, por lo cual para este caso se recomienda esta herramienta de optimización como la más adecuada.

8. Las asunciones realizadas por Hopp y Spearman, limitan ampliamente el campo de aplicación del método; ya que únicamente sería adecuado utilizarlos en casos que presenten niveles de variación específicos, como los planteados en las asunciones.
9. La herramienta SimRunner ayuda a optimizar el sistema a través de sofisticados algoritmos de optimización que permiten evaluar factores mientras realiza la búsqueda de la solución óptima. Esta herramienta examina al sistema de forma más real, generando datos confiables y más precisos; ya que no requiere que se realicen asunciones para llevar a cabo un proceso de optimización.
10. En ninguno de los subsistemas de lotes en serie analizados (Split y Non Split), en que se implementaron tamaños de lote óptimos, se alcanzaron mejoras del nivel de productividad de la línea de producción. Únicamente para el caso de lotes en paralelo se obtuvo una mejora leve de este indicador.
11. Al comparar los parámetros de manufactura de la línea de producción presentada en el caso de estudio, entre el estado actual y el propuesto

(implementando tamaños de lote óptimos), se obtuvo reducciones significativas del Tiempo de Ciclo (CT) y del Nivel de Producto en Proceso (WIP), pero para el caso de lotes en serie no se logró mejoras en la tasa de producción (TH). Sin embargo, al mejorar dos de los tres parámetros de manufactura, se puede considerar una mejora positiva global del sistema.

12. Se observó que para operaciones con lotes en paralelo se obtuvo grandes reducciones del Tiempo de Ciclo y de Producto en Proceso; ya que usualmente son altos los tiempos de procesamiento de las máquinas en las que se opera con este tipo de lote; y una pequeña variación en el tamaño del mismo puede llegar a generar un gran impacto.

**Recomendaciones:**

1. Se deberían realizar estudios futuros de Optimización de Tamaños de Lote con restricciones de recursos de transporte de material, como equipos y operarios.
2. Antes de implementar estas técnicas de optimización del flujo de materiales es necesario que se evalúen los costos incurridos en su manejo, para analizar si realmente es beneficioso o no, desde el punto de vista financiero.
3. Se recomienda realizar la misma experimentación considerando Sistemas de Producción distintos a los sugeridos por los autores.
4. Resultaría un estudio de gran interés desarrollar esta misma experimentación en procesos productivos que tengan implementado Sistemas de Control de Producción, como Kankan y MRP.
5. Se recomienda desarrollar estudios similares aplicados a sistemas productivos modelados bajo diferentes distribuciones de probabilidad a fin

de determinar el comportamiento de los mismos bajo diferentes escenarios; ya que los principios y leyes de la Física de Fábrica establecidos por los autores Hopp y Spearman, están basados en procesos markovianos.

# APÉNDICES

## 4.- Programación del Modelo de Simulación

```

*****
* Processing *
*****

Entity      Location      Process      Blk Output      Routing      Rule      Move Logic
-----
Silla      BMP_Sillas      inc WIP_Sillas,1      1   Silla      Cola_NonSplit      FIRST 1
Silla      Cola_NonSplit      WAIT e(1) hr
Silla      Acabado_Sillas      inc contador_silla,1
                          if contador_silla=k_nonsplit then
                          begin
                          WAIT e(1.5) hr
                          contador_silla=0
                          end
                          1   Silla      Nonsplitlocacion      FIRST 1

Silla      Nonsplitlocacion      Group k_nonsplit AS lote_sillas

Lote_Sillas Nonsplitlocacion      1   Lote_Sillas Bodega_Sillas_Acabadas FIRST 1 DEC WIP_Sillas,k_nonsplit

Lote_Sillas Bodega_Sillas_Acabadas      1   Lote_Sillas EXIT      FIRST 1
Parte      Bodega_Agrupar      Inc WIP_Paralelo,1
                          group k_paralelo as Lote_Partes

Lote_Partes Bodega_Agrupar      1   Lote_Partes Cola_Paralelo      FIRST 1
Lote_Partes Cola_Paralelo      1   Lote_Partes Cuarto_de_Calor      FIRST 1
Lote_Partes Cuarto_de_Calor      Wait e(24) hr      1   Lote_Partes BPT      FIRST 1
Lote_Partes BPT      Dec WIP_Paralelo,k_paralelo
                          1   Lote_Partes EXIT      FIRST 1

Mesa      BMP_Mesas      Inc WIP_Mesas,1      1   Mesa      Cola_Split      FIRST 1
Mesa      Cola_Split      1   Mesa      Acabado_Mesas      FIRST 1
Mesa      Acabado_Mesas      Wait e(1.5) hr
                          inc contador_mesa,1
                          if contador_mesa=k_split then
                          begin
                          WAIT e(2) hr
                          contador_mesa=0
                          end

Mesa      Bodega_Mesas_Acabadas      1   Mesa      BPT      FIRST 1 DEC WIP_MESAS,1
Mesa      BPT      1   Mesa      EXIT      FIRST 1

```

# 1. Tiempo de Ciclo de Lote Serial Split

## HOPP & SPEARMAN

k	te	U	Ce2
1	1,3	1,5171	
2	1,8	1,0503	
3	2,3	0,8955	0,269009
4	2,8	0,8168	0,204748
5	3,3	0,7696	0,170161
6	3,8	0,7398	0,140562
7	4,3	0,7164	0,124727
8	4,8	0,7005	0,111088
9	5,3	0,6872	0,103084
10	5,8	0,6769	0,094314
11	6,3	0,6684	0,084076
12	6,8	0,6610	0,074973
13	7,3	0,6550	0,074965
14	7,8	0,6500	0,071887
15	8,3	0,6460	0,058129
16	8,8	0,6420	0,060166
17	9,3	0,6381	0,060941
18	9,8	0,6357	0,056439
19	10,3	0,6325	0,051123
20	10,8	0,6300	0,051506
21	11,3	0,6276	0,047449
22	11,8	0,6260	0,03822
23	12,3	0,6238	0,038422
24	12,8	0,6228	0,040269
25	13,3	0,6210	0,040066

CTq	s	WIBT	t
2,65	0,8	0,5	0,5
1,28	0,8	0,75	0,5
0,94	0,8	1	0,5
0,76	0,8	1,25	0,5
0,68	0,8	1,5	0,5
0,62	0,8	1,75	0,5
0,60	0,8	2	0,5
0,57	0,8	2,25	0,5
0,53	0,8	2,5	0,5
0,50	0,8	2,75	0,5
0,52	0,8	3	0,5
0,52	0,8	3,25	0,5
0,44	0,8	3,5	0,5
0,47	0,8	3,75	0,5
0,50	0,8	4	0,5
0,48	0,8	4,25	0,5
0,45	0,8	4,5	0,5
0,47	0,8	4,75	0,5
0,45	0,8	5	0,5
0,38	0,8	5,25	0,5
0,39	0,8	5,5	0,5
0,43	0,8	5,75	0,5
0,44	0,8	6	0,5

Ctsplit
4,45
3,56
3,24
3,31
3,48
3,67
3,90
4,12
4,33
4,55
4,82
5,07
5,24
5,52
5,80
6,03
6,25
6,52
6,75
6,93
7,19
7,48
7,74

## SIMULACION

Ctsplit
3,4157
2,2798
2,1388
2,2082
2,3385
2,5192
2,7165
2,9277
3,1505
3,3733
3,6090
3,8393
4,0783
4,3243
4,5610
4,8085
5,0497
5,2918
5,5325
5,7862
6,0375
6,2790
6,5235

Tamaño de lote (k)	Utilización (U)
1	1,52
2	1,05
3	0,89

Tamaño de lote (k)	Utilización (U)
1	1,00
2	1,00
3	0,89

## 2. Tiempo de Ciclo de Lote Serial Non Split

### HOPP & SPEARMAN

k	te	U	Ce2	CTq	s	WIBT	t	Ct
1	1,3	1,5171						
2	1,8	1,0503						
3	2,3	0,8957	0,265201724	2,62	0,8	1	0,5	4,92
4	2,8	0,8182	0,210611245	1,33	0,8	1,5	0,5	4,13
5	3,3	0,7718	0,176062725	0,98	0,8	2	0,5	4,28
6	3,8	0,7400	0,134327148	0,73	0,8	2,5	0,5	4,53
7	4,3	0,7168	0,141247494	0,77	0,8	3	0,5	5,07
8	4,8	0,7012	0,113837086	0,64	0,8	3,5	0,5	5,44
9	5,3	0,6870	0,113375456	0,66	0,8	4	0,5	5,96
10	5,8	0,6771	0,085783176	0,52	0,8	4,5	0,5	6,32
11	6,3	0,6691	0,083287311	0,53	0,8	5	0,5	6,83
12	6,8	0,6613	0,07337713	0,49	0,8	5,5	0,5	7,29
13	7,3	0,6560	0,071507322	0,50	0,8	6	0,5	7,80
14	7,8	0,6500	0,073694511	0,53	0,8	6,5	0,5	8,33
15	8,3	0,6456	0,063870349	0,48	0,8	7	0,5	8,78
16	8,8	0,6422	0,059550072	0,47	0,8	7,5	0,5	9,05
17	9,3	0,6385	0,051860404	0,43	0,8	8	0,5	9,73
18	9,8	0,6336	0,057972594	0,49	0,8	8,5	0,5	10,29
19	10,3	0,6315	0,053429555	0,47	0,8	9	0,5	10,77
20	10,8	0,6287	0,046074009	0,42	0,8	9,5	0,5	11,22
21	11,3	0,6289	0,041066598	0,39	0,8	10	0,5	11,69
22	11,8	0,6259	0,04048327	0,40	0,8	10,5	0,5	12,20
23	12,3	0,6256	0,038521036	0,40	0,8	11	0,5	12,70
24	12,8	0,6218	0,038796206	0,41	0,8	11,5	0,5	13,21
25	13,3	0,6195	0,041100392	0,44	0,8	12	0,5	13,74

### SIMULACION

Ct
4,4507
3,6568
3,8040
4,1230
4,5285
4,9718
5,4272
5,8942
6,3757
6,8470
7,3465
7,8188
8,3185
8,8197
9,3177
9,7870
10,2717
10,7443
11,2793
11,7572
12,2902
12,7613
13,2353

### 3. Tiempo de Ciclo de Lote Paralelo

#### HOPP & SPEARMAN

k	U	Ce2
1	4,0000	
2	2,0000	
3	1,3333	
4	0,9986	0,00281
5	0,8000	0,00240
6	0,6665	0,00213
7	0,5722	0,00207
8	0,4999	0,00260
9	0,4434	0,05059
10	0,3997	0,00261
11	0,3636	0,00257
12	0,3332	0,00249
13	0,3073	0,00266
14	0,2864	0,00274
15	0,2664	0,00268
16	0,2500	0,00263
17	0,2350	0,00198
18	0,2200	0,00258
19	0,2124	0,00265
20	0,1999	0,00268
21	0,1923	0,00236
22	0,1802	0,00268
23	0,1733	0,00195
24	0,1669	0,00261
25	0,1601	0,00222

CTq	WTBT	t
10,03	3,75	10
0,05	5,00	10
0,02	6,25	10
0,01	7,50	10
0,01	8,75	10
0,20	10,00	10
0,01	11,25	10
0,01	12,50	10
0,01	13,75	10
0,01	15,00	10
0,01	16,25	10
0,00	17,50	10
0,00	18,75	10
0,00	20,00	10
0,00	21,25	10
0,00	22,50	10
0,00	23,75	10
0,00	25,00	10
0,00	26,25	10
0,00	27,50	10
0,00	28,75	10
0,00	30,00	10

Ct (hr)
23,78
15,05
16,27
17,51
18,76
20,20
21,26
22,51
23,76
25,01
26,26
27,50
28,75
30,00
31,25
32,50
33,75
35,00
36,25
37,50
38,75
40,00

#### SIMULACION

Ct (hr)
19,1128
14,9377
16,2033
17,4675
18,6248
19,9217
21,0680
22,4207
23,6457
24,8073
26,1402
27,3458
28,3725
29,8243
31,1550
32,3923
33,1903
34,8783
36,0748
37,2897
38,3860
39,1907

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. Cáliz Ospino Rodrigo, Riaño Mendoza Germán, Modelaje de Redes de Producción Multiclase con inventario constante considerando lote y varios servidores por estación de trabajo, Tesis de Maestría, Universidad de los Andes-Colombia, 2004.
2. Díaz David, Breve Historia del JIT, Foro Temático [www.puntolog.com](http://www.puntolog.com), Diciembre 3, 1999.
3. Goldratt Eliyahu, La Meta, Editorial Díaz de Santos, Tercera Edición, Madrid 2005.
4. Hay, Edward, La Técnica Japonesa que genera mayor ventaja competitiva, Editorial Norma S.A, Colombia, 1992.
5. Hopp Wallace, Spearman Mark, Factory Physics: Foundations of Manufacturing Management, Editorial McGraw-Hill, Segunda Edición, New York 2001.

6. Lefcovich Mauricio, La Empresa Magra, Artículo de Análisis de la Administración de Operaciones y Estrategia de Negocios, [www.monografias.com](http://www.monografias.com), 2004.
7. Porteus Evan, Fine Charles, Dynamic Process Improvement, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, 1986.
8. Promodel Corporation, User Guide Versión 7, 2006.
9. Renzo Noben, Rien van Driel y Tanja Claasen-Vujcic, Cycle time advantages of mini batch manufacturing and integrated metrology in a 300 mm vertical furnace, Editorial IEEE, 2001.
10. Rodríguez Medina Guillermo, Balestrini Atencio Solange, Balestrini Atencio Sara, Meleán Romero Rosana, Rodríguez Castro Belkis, Análisis Estratégico del Proceso Productivo en el Sector Industrial, Revista de Ciencias Sociales, Universidad del Zulia, Maracaibo-Venezuela, 2002, pag 135-156.