

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Mejora del Proceso de Fabricación de Electrodo mediante el desarrollo de un Modelo de Simulación y la aplicación de Técnicas de Diseño de Experimentos y Optimización”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO INDUSTRIAL

Presentada por:

Esteban Xavier Espinoza Espinosa

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2008

AGRADECIMIENTO

Principalmente a Dios, por las incontables bendiciones que me ha brindado y por permitirme culminar con éxito esta etapa de mi vida. Con mucho cariño a mis padres, Arturo y Ruth, a mi hermana Mónica y a Claribel, por su incansable apoyo y sacrificio diario para facilitar mi recorrido de preparación. A mis sinceros y grandes amigos, en especial a Mónica M., con quienes compartí sacrificios y éxitos; fueron apoyo y mentores para mí. Al Ing. Marcos Mendoza y al Ing. Marcos Buestán por su confiable guía y apoyo.

DEDICATORIA

A MIS PADRES:

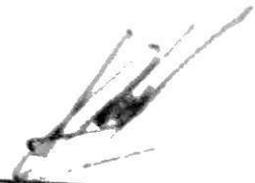
Arturo y Ruth

A MI HERMANA:

Mónica

A Claribel y Estefanía

TRIBUNAL DE GRADUACION



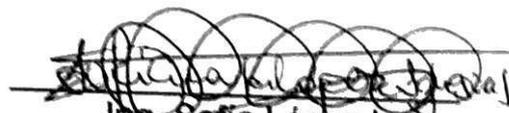
Dr. Kleber Barcia V.
DELEGADO DECANO FIMCP
PRESIDENTE



Ing. Marcos Buestán B.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Marcos Mendoza V.
VOCAL



Ing. Sofía López I.
VOCAL

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).



Esteban Xavier Espinoza Espinosa

RESUMEN

El ambiente laboral que afecta hoy en día a las empresas es tremendamente exigente y dinámico, por lo que la capacidad de tomar decisiones de forma inmediata se ha vuelto un requerimiento imprescindible para la supervivencia de las empresas.

Para mantenerse a la par de la demanda y las exigencias de los clientes, cuando se trata de la toma de decisiones emergentes, muchas compañías han dejado a un lado los estudios técnicos previos para darle todo el trabajo a la intuición, corriendo el riesgo que tales decisiones afecten el desempeño de la línea de producción en lugar de mejorarlo.

Esto ocurre debido a que técnicas como la experimentación en muchos casos toman demasiado tiempo en realizarse y tienen un costo considerablemente alto; interrumpiendo además, las actividades normales del proceso productivo de la empresa. Esto a pesar de ser excelentes para encontrar el ajuste necesario que permita mejorar el desempeño de un proceso.

Los modelos matemáticos de optimización por otro lado, son demasiado complejos para las actividades diarias de la empresa, o toman demasiado

tiempo en emplearse y requieren una persona con una preparación académica de alto nivel para resolverlos e interpretarlos.

Sin embargo, la simulación es el complemento sobre el cual es posible aplicar estas técnicas de forma rápida, sencilla y con bajos costos de preparación, permitiendo de esta forma la integración de una herramienta técnicamente sofisticada con el proceso de toma de decisiones de una compañía.

Actualmente en la mayoría de los paquetes de simulación, se incluye una herramienta de optimización que permite al usuario interactuar entre diferentes parámetros con el fin de encontrar la mejor solución. El único problema es que a mayor cantidad de parámetros en estudio, mayor tiempo demora el computador en procesar los datos. La simulación también ofrece la capacidad de experimentar sin tener que interrumpir las actividades de la empresa, ni influir en sus costos, obteniendo resultados en muy poco tiempo. Además, mediante un estudio previo de Diseño de Experimentos se pueden obtener los factores que tienen mayor impacto en el desempeño de la línea de producción ahorrando tiempo valioso durante el proceso de optimización.

Al aplicar en conjunto las fortalezas de estas técnicas: simulación, diseño de experimentos y optimización, se eliminan las debilidades individuales de cada

una de ellas, obteniendo así una opción eficiente y efectiva que se ajusta a las exigencias actuales para la toma de decisiones. Esta combinación será precisamente aplicada a una fábrica de electrodos para soldadura, la cual tiene un serio problema debido a su elevado tiempo de ciclo de un lote de electrodos producidos. Esto ha provocado que el producto en proceso se eleve entre algunas estaciones de trabajo, pasando días sin ser procesados; y ha generado como consecuencia la disminución de la tasa de producción y por ende el incremento de las horas extras, exigiendo por tanto a sus trabajadores laborar fines de semana y mantener doble turno de trabajo durante los días hábiles.

Bajo estas circunstancias el objetivo principal de esta investigación es determinar los principales factores que influyen en el desempeño del proceso productivo de fabricación de electrodos para soldadura, y establecer los niveles óptimos de operación de los mismos con el fin de minimizar el tiempo de ciclo productivo actual. Utilizando para ello técnicas de Diseño de Experimentos y de Optimización.

En el primer capítulo de esta Tesis se encuentra con mayor detalle los antecedentes de la fábrica objeto de estudio y los objetivos perseguidos. El segundo capítulo describe en que consisten las técnicas que serán aplicadas para encontrar el mejor escenario, parámetros y sus niveles, para mejorar el

desempeño de la línea productiva. En el capítulo número tres se describe en detalle el proceso productivo de esta fábrica, así como el modelo de simulación de este sistema y su validación. Dentro del capítulo cuatro se encuentra la ejecución del Diseño de Experimentos aplicando los datos obtenidos del modelo de simulación y su respectiva evaluación de resultados. El quinto capítulo contiene la ejecución de la Optimización de parámetros más influyentes determinados en el capítulo anterior. Esto será realizado con la ayuda del software de optimización SimRunner. Finalmente, las conclusiones y recomendaciones de esta investigación se presentan en el sexto capítulo.

Al obtener los resultados se espera determinar con Diseño de Experimentos los principales factores o parámetros que tienen mayor influencia en el desempeño de la línea de fabricación de electrodos para soldadura, y encontrar mejores niveles para estos parámetros; permitiendo así, plasmar un escenario eficiente y productivo para esta empresa.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	VI
ABREVIATURAS.....	IX
SIMBOLOGÍA.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XI
ÍNDICE DE TABLAS.....	XII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1	
1. GENERALIDADES.....	3
1.1. Antecedentes.....	3
1.2. Objetivo General.....	5
1.3. Objetivos Específicos.....	6
1.4. Metodología.....	7
CAPÍTULO 2	
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	9
2.1. Simulación con ProModel.....	9

2.2. Diseño de Experimentos y Simulación.....	13
2.3. Simulación y Optimización.....	25
2.4. SimRunner como Herramienta de Optimización.....	30
2.4.1. Algoritmos Evolutivos.....	30

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN.....	39
3.1. Descripción del Proceso.....	39
3.2. Descripción del Modelo.....	47
3.3. Verificación y Validación del Modelo.....	62
3.3.1. Selección de Indicadores.....	62
3.3.2. Cálculo de Longitud de Corrida, Nivel de Warm-Up y Número de Réplicas... ..	64
3.3.3. Comparación con respecto a los Valores de Referencia.....	67

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS.....	72
4.1. Descripción del Problema.....	75
4.2. Selección de Variable de Respuesta.....	75
4.3. Selección de Factores y Niveles.....	76
4.4. Selección del Diseño Experimental.....	81
4.5. Desarrollo del Experimento.....	85

4.6. Análisis Estadístico.....	89
4.7. Evaluación de Resultados del Diseño de Experimentos.....	107

CAPÍTULO 5

5. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO.....	111
5.1. Selección de Factores Críticos.....	111
5.2. Optimización a través de SimRunner.....	113
5.3. Evaluación de Resultados de la Optimización.....	117

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	119
--	-----

APÉNDICES

BIBLIOGRAFÍA

ABREVIATURAS

CT	<i>Cycle Time</i> , Tiempo de Ciclo
TH	<i>Throughput</i> , Tasa de Producción
WIP	<i>Work In Process</i> , Producto en Proceso
MIN	Mínimo
MAX	Máximo
mm	Milímetros
IC	Intervalo de Confianza
TPM	Mantenimiento Preventivo Total

SIMBOLOGÍA

\emptyset	Diámetro
η	Resultado verdadero del experimento
μ	Media Global
e	Componente aleatoria del Error
α	Valor alfa, Nivel de Confianza

ÍNDICE DE FIGURAS

		Pág.
Figura 2.1	Vista Frontal de la Montaña.....	32
Figura 2.2	Vista Topográfica: Primera Lectura.....	33
Figura 2.3	Vista Topográfica: Segunda Lectura.....	33
Figura 2.4	Vista Topográfica: Tercera Lectura.....	34
Figura 2.5	Vista Topográfica: Cuarta Lectura.....	35
Figura 2.6	Vista Topográfica: Quinta Lectura.....	35
Figura 2.7	Vista Topográfica: Sexta lectura.....	36
Figura 3.1	Diagrama de Pareto de Electrodo Producidos.....	41
Figura 3.2	Diagrama de Flujo del Proceso de Fabricación de Electrodo.....	42
Figura 3.3	Lay-out de la Fábrica de Electrodo.....	46
Figura 3.4	Gráfico para el Cálculo de Warm-Up y Número de Réplicas..	66
Figura 4.1	Diagrama de Pareto #1.....	90
Figura 4.2	Diagrama de Pareto #2.....	92
Figura 4.3	Diagrama de Pareto #3.....	94
Figura 4.4	Diagrama de Pareto #4.....	95
Figura 4.5	Diagrama de Pareto #5.....	103
Figura 4.6	Diagrama de Pareto #6.....	105
Figura 5.1	Opciones Seleccionadas para Optimización.....	115
Figura 5.2	Gráfico de Medida del Desempeño.....	116
Figura 5.3	Resultados Experimentales Obtenidos.....	117

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Lista de Electrodo s Producidos.....	40
Tabla 2	Jornadas de Trabajo de las Estaciones de la Fábrica.....	48
Tabla 3	Entidades del Modelo de Simulación.....	50
Tabla 4	Locaciones del Modelo de Simulación.....	51
Tabla 5	Recursos del Modelo de Simulación.....	54
Tabla 6	Asignación de Jornadas Diarias a Locaciones.....	55
Tabla 7	Atributos del Modelo de Simulación.....	57
Tabla 8	Variables del Modelo de Simulación.....	58
Tabla 9	IC del Throughput de Containers.....	68
Tabla 10	IC del TH de Rumas producidas Tipo 90.....	68
Tabla 11	IC del THt de Rumas producidas Tipo 120.....	69
Tabla 12	IC del Tiempo de Formación de una Ruma Tipo 90.....	69
Tabla 13	IC del Tiempo de Formación de una Ruma Tipo 120.....	70
Tabla 14	IC del Tiempo Total de Presecado.....	70
Tabla 15	IC del TH de Producto Final.....	71
Tabla 16	Nomenclatura de Factores y Niveles.....	85
Tabla 17	Parámetros de los Escenarios Creados.....	86
Tabla 18	Resultados Replicados de cada Escenario #1.....	88
Tabla 19	Estimaciones de Efectos #1.....	89
Tabla 20	Valores p de Efectos Seleccionados #1.....	91
Tabla 21	Valores p de Efectos Seleccionados #2.....	93
Tabla 22	Valores p de Efectos Seleccionados #3.....	94
Tabla 23	Valores p de Efectos Seleccionados #4.....	96
Tabla 24	Medias de Efectos Seleccionados #1.....	97
Tabla 25	Niveles que Maximizan el TH de Cajas Empacadas #1.....	98
Tabla 26	Resultados Replicados de cada Escenario #2.....	101
Tabla 27	Estimaciones de Efectos #2.....	102
Tabla 28	Valores p de Efectos Seleccionados #5.....	104
Tabla 29	Valores p de Efectos Seleccionados #6.....	105
Tabla 30	Medias de Efectos Seleccionados #2.....	106
Tabla 31	Niveles que Maximizan el TH de Cajas Empacadas #2.....	107
Tabla 32	Cuadro comparativo de Resultados Experimentales.....	108
Tabla 33	IC de la Variable de Respuesta.....	109
Tabla 34	Cuadro Comparativo entre Situación Actual y Propuesta.....	121

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Instalaciones de la Fábrica de Electroodos para Soldar

INTRODUCCIÓN

Muchas de las técnicas tradicionales para mejorar el rendimiento de un proceso de manufactura, desarrollar nuevos procesos o conseguir la información necesaria para tomar una correcta decisión para adaptar la empresa ante un problema o cambio de preferencias del mercado, se han vuelto obsoletas debido a su complejidad y cantidad de tiempo y recursos necesarios a invertir para obtener lo deseado. Pero así mismo, existen técnicas que han vuelto a resurgir trabajando en conjunto con las técnicas modernas de mejoramiento de procesos y toma de decisiones; creando una alianza beneficiosa en la que sus debilidades se complementan con las fortalezas de la otra técnica.

Este es el caso del Diseño de Experimentos, una técnica desarrollada por sir Ronald A. Fischer y empleada en el campo industrial en la década de 1930; la cual es aplicada, en esta investigación, en conjunto con la Simulación, que ha probado ser no sólo una excelente herramienta estratégica para las empresas y sino que también puede ser utilizada como una herramienta táctica en el día a día de cualquier compañía. Esta combinación de técnicas permite a los tomadores de decisiones obtener suficiente información fundamentada en datos reales y estudios estadísticos para poder escoger la mejor solución a sus problemas.

Este estudio se realiza en base a datos obtenidos de una fábrica de electrodos para soldadura, para lograr determinar los principales factores que influyen en el desempeño del proceso productivo de fabricación de electrodos para soldadura y establecer los niveles óptimos de operación de los mismos con el fin de maximizar la tasa de producción semanal de empaques finales de electrodos para soldar; utilizando para ello las técnicas de Diseño de Experimentos y de Optimización.

El procedimiento de este estudio tiene tres puntos principales; el primero de ellos es crear y validar el modelo de simulación del sistema, en este caso de la fábrica de electrodos para soldadura, el cuál será adaptado para realizar diferentes pruebas y experimentos. El segundo paso es la aplicación de la técnica de Diseño de Experimentos, cuyo objetivo es encontrar los niveles preliminares de los factores y entre ellos, definir los que más influyen a la variable de respuesta escogida; en este caso, maximizar la tasa de producción. El tercer y último paso es la aplicación de la técnica de Optimización, donde se hace un estudio más detallado de los niveles de los factores, partiendo de los establecidos durante el Diseño de Experimentos, obteniendo así, el mejor escenario para mejorar el desempeño de la fábrica.

CAPÍTULO 1

1. GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En la ciudad de Guayaquil existe una empresa manufacturera que, entre sus distintas líneas de producción, mantiene una fábrica de electrodos para soldar con alrededor de 19 operarios y 5 administradores. Esta fábrica de electrodos revestidos para soldar mantiene un sistema productivo continuo Make-to-Stock con una sola línea de producción distribuida por producto, ya que tiene un alto volumen de fabricación y una baja variedad. Produce 23 ítems diferentes de electrodos para soldar, de los cuales, el electrodo llamado C-13 es el que abarca cerca del 90% de su producción total.

Esta fábrica en sus 15 años de funcionamiento se ha interesado poco o nada en la optimización de su línea para llegar a obtener una

utilización eficiente de sus recursos; su personal desconoce el significado y la importancia de ciertos parámetros que pueden determinar el desempeño de su línea, como es el tiempo de ciclo (CT), el producto en proceso (WIP) y la tasa de producción (TH); además, aún no tienen correctamente definido cual es la estación que dirige su producción, es decir, no reconocen su cuello de botella. De igual forma, no han realizado un correcto estudio sobre el número de máquinas que requieren en su línea de producción, por esta razón hay estaciones con poca capacidad para satisfacer las necesidades de ingreso de la estación siguiente, así mismo existen estaciones con una sobrecapacidad que ayudan al crecimiento del producto en proceso entre estaciones. Esto indica que la línea no se encuentra correctamente balanceada.

Actualmente la fábrica tiene un serio problema con la determinación del tiempo de ciclo de un lote de electrodos producido, y por lo tanto, en la reducción del mismo. Esto ha provocado que el producto en proceso se elevara entre algunas estaciones de trabajo, pasando días sin ser procesado; y que la tasa de producción disminuyera exigiendo a sus trabajadores laborar fines de semana y mantener doble turno de trabajo durante los días hábiles.

Para encontrar la solución a este problema utilizaremos dos técnicas que permiten encontrar los parámetros y sus condiciones para mejorar y alcanzar nuestro objetivo, ya sea maximizando el beneficio o minimizando el problema según sea lo requerido. Estas técnicas son: El Diseño de Experimentos y la Optimización. Estas técnicas tendrán como base un modelo de simulación del proceso productivo de la fábrica de electrodos, utilizando el software ProModel, el cuál proporcionará los datos necesarios de los diferentes escenarios planteados para su posterior análisis mediante las técnicas antes mencionadas.

1.2. Objetivo General

Determinar los principales factores que influyen en el desempeño del proceso productivo de fabricación de electrodos para soldadura y establecer los niveles óptimos de operación de los mismos con el fin de maximizar la tasa de producción semanal de empaques finales de electrodos para soldar; utilizando para ello, técnicas de Diseño de Experimentos y de Optimización.

1.3. Objetivos Específicos

- ✓ Realizar un modelo de simulación del proceso productivo de la fábrica de electrodos de soldadura.

- ✓ Efectuar un estudio y análisis de un modelo de Diseño de Experimentos para determinar los principales factores y sus respectivos niveles que afectan la variable objetivo, la tasa de producción.

- ✓ Identificar los niveles óptimos de operación de los factores encontrados con el fin de maximizar la tasa de producción semanal de empaques finales de electrodos para soldar, a través de la aplicación de técnicas de optimización.

- ✓ Exponer un conjunto de herramientas que facilitan la toma de decisiones gerenciales para mejorar el desempeño de la planta de producción.

1.4. Metodología

Este trabajo comienza, como se observa en este primer capítulo, detallando los antecedentes de la fábrica objeto de estudio, sus principales características y planteando el problema al que se desea encontrar una solución. Además se exponen los objetivos, general y específicos, que se persiguen al realizar este estudio.

El segundo capítulo describe en que consiste la herramienta empleada para la obtención de datos: el paquete de simulación ProModel; y las técnicas aplicadas para encontrar el mejor escenario, estableciendo los parámetros y sus respectivos niveles, para mejorar el desempeño de la línea productiva: el Diseño de Experimentos y la Optimización con el software SimRunner.

En el capítulo número tres se describe en detalle el proceso productivo de esta fábrica, las actividades que realizan, los recursos que intervienen y el proceso de transformación que se realiza. Así mismo se describe el modelo de simulación de este sistema con su respectiva validación; indicando las principales asunciones que fueron empleadas y las diferentes programaciones lógicas realizadas para poder modelar con mayor exactitud la realidad.

Dentro del capítulo cuatro se encuentra la ejecución de la técnica de Diseño de Experimentos, planteando inicialmente una variable de respuesta; posteriormente se establecen los primeros parámetros o factores con sus respectivos niveles, así como el diseño experimental en el que se aplican los datos obtenidos del modelo de simulación y realizar su respectiva evaluación de resultados, para encontrar los factores más influyentes en el desempeño de la línea de producción.

Una vez obtenidos los principales factores con sus respectivos niveles, en el quinto capítulo se ejecuta la técnica de Optimización, que con la ayuda del software SimRunner, se logra encontrar niveles más óptimos para un mejor desempeño de la línea de producción.

Finalmente, las conclusiones obtenidas de este estudio y las diferentes recomendaciones planteadas para esta fábrica de electrodos, las empresas en general e investigadores interesados en realizar futuros trabajos a partir de esta tesis, se presentan en el sexto capítulo.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Simulación con ProModel

En años recientes, el advenimiento de nuevos y mejores desarrollos en le área de la computación ha traído consigo innovaciones igualmente importantes en los terrenos de la toma de decisiones y el diseño de procesos y productos [3]. En este sentido, una de las técnicas de mayor impacto es la simulación.

Hoy en día, el analista tiene a su disposición una gran cantidad de software de simulación que le permite tomar decisiones en temas muy diversos, como determinar la mejor localización de una nueva planta, diseñar un nuevo sistema de trabajo o efectuar el análisis productivo de un proceso ya existente pero que requiere mejoras. Cada vez resulta más sencillo encontrar paquetes de software con

gran capacidad de análisis, así como mejores animaciones y características para generación de reportes. En general, dichos paquetes nos proveen de una enorme diversidad de herramientas estadísticas que permiten un manejo más eficiente de la información relevante bajo análisis, y una mejor presentación e interpretación de la misma [3].

Al simular se busca predecir aspectos del comportamiento de un sistema creando un modelo apegado a la realidad. Estos modelos dan al analista y a los tomadores de decisiones la capacidad de probar diferentes escenarios del tipo “¿Que pasaría si...?” y cual es el impacto de ellos en el negocio. Cualquier proceso puede ser simulado de una forma precisa de acuerdo con la realidad permitiendo examinar los más complejos sistemas, con altos niveles de aleatoriedad e interdependencia entre los componentes individuales del sistema [8].

El modelo de simulación de un sistema puede ser utilizado para predecir el impacto en indicadores claves y reducir significativamente el riesgo asociado con las decisiones empresariales. Gracias a la simulación se puede experimentar todo tipo de cambios o pruebas en una ambiente libre de riesgos, con la

confianza de obtener con el más alto nivel de certeza los resultados anticipadamente.

Es por esto que la simulación se ha convertido en una poderosa y eficiente herramienta para tomar decisiones en comparación con las técnicas tradicionales como son el empleo de las hojas de cálculo las cuales son estáticas y a menudo no ofrecen variabilidad e interdependencias. La simulación es dinámica y permite que indicadores claves sean monitoreados con el tiempo.

ProModel es uno de los paquetes de software comercial para simulación más usados en el mercado. Cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados confiables con respecto de las decisiones a tomar [3].

ProModel permite simular cualquier tipo de sistema de manufactura, logística, manejo de materiales, entre otros. Pueden simularse bandas de transporte, grúas viajeras, actividades de ensamble, corte, talleres, y muchos más recursos empleados [8]. Básicamente, este producto se enfoca a procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros.

ProModel es un paquete de simulación que no requiere programación, aunque sí lo permite. Funciona en equipos 486 en adelante y utiliza la plataforma Windows®. Tiene la combinación perfecta entre facilidad de uso y flexibilidad para aplicaciones complejas [8]. Actualmente existe una séptima versión de ProModel, mejorada, que facilita la navegación sobre el programa y la interpretación de los resultados; pero para la elaboración de este estudio se ha aplicado la versión 4.22, que funciona estadísticamente igual, obteniendo los mismos resultados y permitiéndonos realizar el mismo análisis e interpretación.

Una vez realizado un modelo de simulación del sistema en estudio, éste puede ser manipulado con el fin de ser optimizado para encontrar los niveles o valores de los factores o parámetros claves del modelo, que permitan acercarse al valor óptimo de cierta variable respuesta. Algunos ejemplos incluyen determinar la mejor combinación de factores para maximizar producción minimizando costo, minimizar el número de camiones sin penalizar el servicio, o cualquier otro resultado que se desee optimizar o mejorar. El módulo de optimización nos ayuda a encontrar rápidamente la solución más óptima, en lugar de solamente hacer prueba y error [8].

Los beneficios claves del uso del paquete simulación de ProModel son:

- ✓ Es el único software de simulación con Optimización plenamente integrada
- ✓ La creación de modelos es rápida, sencilla y flexible.
- ✓ Los modelos realizados son optimizables.
- ✓ Incluye elementos de Logística, Manejo de Materiales, y Operaciones. (Bandas de transporte, Grúas Viajeras, Operadores).
- ✓ Los resultados son probados.
- ✓ Permite la importación del Layout de Autocad, o cualquier herramienta de CAD / CAE / Diseño, así como de fotografías digitales.
- ✓ Permite la integración con Excel, Lotus, Visual Basic y herramientas de Microsoft.
- ✓ Genera en automático las gráficas en 3 dimensiones para tener una visualización en el espacio tridimensional [8].

2.2. Diseño de Experimentos y Simulación

La experimentación juega un papel fundamental en virtualmente todos los campos de la investigación y el desarrollo. El objetivo de la

experimentación es obtener información de calidad. Información que permita desarrollar nuevos productos y procesos, comprender mejor un sistema (un proceso industrial, un procedimiento analítico) y tomar decisiones sobre como optimizarlo y mejorar su calidad, comprobar hipótesis científicas, entre otros [2].

Obviamente la experimentación se debe planificar (diseñar) cuidadosamente para que proporcione la información buscada. Dicha planificación debe considerar dos aspectos importantes relacionados con toda experimentación:

1. La experimentación es normalmente cara. La capacidad de experimentar está limitada por el coste en tiempo y en recursos. Por lo tanto, una organización óptima de la experimentación deberá contemplar el menor número de experimentos que permita obtener la información buscada.
2. El resultado observado de un experimento (y) tiene incertidumbre:

$$y = \eta + e$$

donde η es el resultado “verdadero” (desconocido) del experimento y e es una contribución aleatoria, que varía cada vez que se repite el experimento. Por ello, la Estadística, disciplina que proporciona las herramientas para trabajar en

ambientes de incertidumbre, juega un papel fundamental en el diseño de los experimentos y en la evaluación de los resultados experimentales [2].

El análisis de los resultados experimentales permitirá obtener conclusiones sobre el sistema en estudio y decidir actuaciones futuras. Tanto por la importancia de las decisiones que se pueden tomar, como por el coste elevado de la experimentación no parece adecuado dejar la elección de los experimentos y la evaluación de los resultados a la mera intuición del experimentador. Parece más razonable utilizar una metodología matemática y estadística que indique como planificar (diseñar, organizar) la secuencia de experimentos de una forma óptima, de modo que se minimice tanto el coste de la experimentación como la influencia del error experimental sobre la información buscada. Dicha planificación y análisis es el principal objetivo del Diseño de Experimentos [2].

La experimentación forma parte natural de la mayoría de las investigaciones científicas e industriales, en muchas de las cuales, los resultados del proceso de interés se ven afectados por la presencia de distintos factores, cuya influencia puede estar oculta por la variabilidad de los resultados muestrales. Es fundamental

conocer los factores que influyen realmente y estimar esta influencia. Para conseguir esto es necesario experimentar, variar las condiciones que afectan a las unidades experimentales y observar la variable respuesta. Del análisis y estudio de la información recogida se obtienen las conclusiones [12].

La forma tradicional que se utilizaba en la experimentación, para el estudio de estos problemas, se basaba en estudiar los factores uno a uno, esto es, variar los niveles de un factor permaneciendo fijos los demás. Esta metodología presenta grandes inconvenientes:

- ✓ Es necesario un gran número de pruebas.
- ✓ Las conclusiones obtenidas en el estudio de cada factor tiene un campo de validez muy restringido.
- ✓ No es posible estudiar la existencia de interacción entre los factores.
- ✓ No es viable, en muchos casos, por problemas de tiempo o costo [12].

Las técnicas de Diseño de Experimentos se basan en estudiar simultáneamente los efectos de todos los factores de interés, son más eficaces y proporcionan mejores resultados con un menor coste [12].

Los modelos de Diseño de Experimentos son modelos estadísticos clásicos cuyo objetivo es averiguar si unos determinados factores influyen en la variable de interés y si existe influencia de algún factor, cuantificarla.

La metodología del diseño de experimentos se basa en la experimentación. Es conocido que si se repite un experimento, en condiciones indistinguibles, los resultados presentan variabilidad que puede ser grande o pequeña. Si la experimentación se realiza en un laboratorio donde la mayoría de las causas de variabilidad están muy controladas, el error experimental será pequeño y habrá poca variación en los resultados del experimento. Pero si se experimenta en procesos industriales, administrativos, la variabilidad es grande en la mayoría de los casos [12].

El objetivo del diseño de experimentos es estudiar si utilizar un determinado tratamiento produce una mejora en el proceso o no. Para ello se debe experimentar utilizando el tratamiento y no utilizándolo. Si la variabilidad experimental es grande, sólo se detectará la influencia del uso del tratamiento cuando éste produzca grandes cambios en relación con el error de observación [12].

Los modelos de diseño de experimentos se fundamentan en el correcto análisis de los resultados que se obtienen de un experimento bien planificado. En muy pocas ocasiones es posible utilizar estos métodos a partir de datos disponibles o datos históricos, aunque también se puede aprender de los estudios realizados a partir de datos recogidos por observación, de forma aleatoria y no planificada. En el análisis estadístico de datos históricos se pueden cometer diferentes errores, los más comunes son los siguientes:

- ✓ Inconsistencia de los datos. Los procesos cambian con el tiempo, por ejemplo, se producen cambios en el personal, o cambios en las máquinas. Estos cambios tienen influencia en los datos recogidos, lo que hace que los datos históricos sean poco fiables, sobre todo si se han recogido en un amplio espacio de tiempo.
- ✓ Variables con fuerte correlación. Puede ocurrir que en el proceso existan dos o más variables altamente correlacionadas que pueden llevar a situaciones confusas. Por ejemplo, en el proceso hay dos variables X_1 y X_2 fuertemente correlacionadas que influyen en la respuesta, pero si en los datos que se tiene aumenta al mismo tiempo el valor de las dos variables no es posible distinguir si la influencia es debida a una u otra o a

ambas variables (confusión de los efectos). Otra situación problemática se presenta si solo se dispone de datos de una variable (por ejemplo de X_1 y no de X_2), lo que puede llevar a pensar que la variable influyente es la X_1 cuando, en realidad, la variable influyente es la X_2 (variable oculta).

- ✓ El rango de las variables controladas es limitado. Si el rango de una de las variables importantes e influyentes en el proceso es pequeño, no se puede saber su influencia fuera de ese. Esto suele ocurrir cuando se utilizan los datos recogidos al trabajar el proceso en condiciones normales y no se experimenta para observar el comportamiento del proceso en situaciones nuevas [12].

Uno de los principales objetivos de los modelos estadísticos y, en particular, de los modelos de diseño de experimentos, es controlar la variabilidad de un proceso estocástico que puede tener diferente origen. De hecho, los resultados de cualquier experimento están sometidos a tres tipos de variabilidad cuyas características son las siguientes:

- ✓ Variabilidad sistemática y planificada.

Esta variabilidad viene originada por la posible dispersión de los resultados debida a diferencias sistemáticas entre las distintas

condiciones experimentales impuestas en el diseño por expreso deseo del experimentador. Es el tipo de variabilidad que se intenta identificar con el diseño estadístico.

- ✓ Variabilidad típica de la naturaleza del problema y del experimento.

Es la variabilidad debida al ruido aleatorio. Este término incluye, entre otros, a la componente de variabilidad no planificada denominada error de medida. Es una variabilidad impredecible e inevitable.

Sin embargo, bajo el aparente caos, existe un patrón regular de comportamiento en esas medidas: todas ellas tenderán a fluctuar en torno a un valor central y siguiendo un modelo de probabilidad que será importante estimar.

Esta variabilidad es inevitable pero, si el experimento ha sido bien planificado, es posible estimar su valor, lo que la hace tolerable.

- ✓ Variabilidad sistemática y no planificada.

Esta variabilidad produce una variación sistemática en los resultados y es debida a causas desconocidas y no planificadas.

La presencia de esta variabilidad supone la principal causa de conclusiones erróneas y estudios incorrectos al ajustar un modelo estadístico.

Existen dos estrategias básicas para tratar de evitar la presencia de este tipo de variabilidad: la aleatorización y la técnica de bloques [12].

El hecho de poder incluir principalmente la variabilidad del sistema en el estudio, hace del Diseño de Experimentos una herramienta muy atractiva para la toma de decisiones de mejora a un sistema, característica comúnmente pasada por alto por los tomadores de decisiones, ya que la mente humana no está acostumbrada a percibirla. Pero uno de los obstáculos más grandes del Diseño de Experimentos es la complejidad y el costo implicado para recopilar datos exactos y actuales, ya que eso implica salir de los parámetros normales de funcionamiento del sistema en estudio, y dependiendo de la cantidad de factores se incrementa considerablemente la cantidad de experimentos a realizar.

La solución a este obstáculo, manteniendo la cualidad más atractiva del Diseño de Experimentos, se lo encontró en la simulación. Un modelo de simulación estocástico de un sistema puede mantener y producir la misma variabilidad que ocurre dentro de su entorno real; y permite realizar cualquier tipo de variación o alteración al modelo de simulación sin tener que dedicarle mucho tiempo, recursos, ni

esfuerzo; facilitando así, la incursión a una mayor cantidad de experimentos permitiendo un mejor entendimiento de las reacciones de la variable de interés provocadas por diferentes factores.

En los últimos años se han realizado muchas investigaciones en procesos productivos, utilizando estos dos instrumentos a la vez. Algunas de estas investigaciones científicas se han hecho públicas y de esta forma la aplicación del Diseño de Experimentos con Simulación se ha hecho cada vez más popular y la información respecto a este tema así como su aplicación, es muy variada.

Existen varios autores y documentos respaldando y fomentando la combinación de estas dos poderosas herramientas como es el caso, de Daniel Villareal, Director de Decisiones Inteligentes, SA DE CV y representante exclusivo de ProModel Corporation en México, en su ensayo “Simulación y Optimización de Procesos Discretos y Continuos: Estado del Arte y Tendencias” [13], donde menciona explícitamente que deben incluirse, hoy en día, el Diseño de Experimentos en conjunto de la Simulación dentro del pensum académico de las Universidades e Instituciones que se ocupan del campo de la Ingeniería Industrial.

En cuanto a papers que han tratado este tema existe “Designing Simulation Experiments” [1], donde Russell R. Barton propone algunas técnicas para la planeación de una serie de corridas, con el objetivo de tener cierta intuición sobre el comportamiento del sistema. Barton en conjunto con W. David Kelton introducen ideas, temas, retos, soluciones y oportunidades para decidir como experimentar con modelos de simulación y aprender sobre su comportamiento, en su ensayo “Experimental Design for Simulation” [6], ellos aseguran que la planeación y el diseño de una simulación experimental ahorra mucho tiempo, esfuerzo proveyendo una eficiente forma para estimar efectos de la información de salida provocados por los cambios de datos de entrada.

Susan M. Sánchez en su ensayo “Work Smarter, Not Harder: Guidelines for Designing Simulation Experiments” [11], menciona la importancia actual del uso de la simulación para el diseño experimental, ya que permite al analista examinar muchos más factores que lo que hubiera logrado bajo otros métodos, mientras permite hacerse una idea que comúnmente no podrían ser concebidos a prueba y error o mediante muestreos de un solo factor a la vez.

Cada vez la aplicación de estas dos herramientas se hace más común y necesaria para lograr una correcta toma de decisiones, en cualquier aspecto y bajo cualquier circunstancia; como lo demuestran Kaushik Balakrishnam, Sam Anand y David Kelton en su ensayo “Integrating Simulation and Design of Experiments to Identify Factors for Layout Design” [5], donde su objetivo es diseñar eficientemente un layout llevando a cabo un diseño experimental factorial full entre los diferentes factores que pudieran afectar su productividad. Su análisis ayuda a identificar los factores más significativos que afecten al tiempo de una parte en el sistema y finalmente diseñar las nuevas instalaciones de la planta eficientemente.

Actualmente existe una gran variedad de información y aplicaciones, promoviendo el empleo de esta relativa nueva tendencia; usando estos dos métodos de forma simultánea, aprovechando las ventajas de un método para superar los obstáculos del otro, y así optimizar los recursos para lograr tomar decisiones de forma más confiable y eficiente.

2.3. Simulación y Optimización

Las herramientas de simulación son comúnmente empleadas para predecir y mejorar el desempeño de un sistema o para establecer las relaciones entre varios elementos del sistema. Al modelar la situación actual de unas instalaciones o un sistema, uno puede llevar a cabo análisis de prueba y error, para determinar la forma más óptima para mejorar el desempeño del sistema. A esto se le llama, proceso de optimización [10].

Optimización es el proceso de probar diferentes combinaciones de valores para ciertas variables que puedan ser controladas, para buscar la combinación de valores que provea la mejor salida deseada del modelo de simulación [4].

El modelo de simulación puede ser considerado como una caja negra que imita un sistema real. Cuando se presentan entradas a la caja negra, esta produce salidas que estiman cómo responderá el sistema real. Las entradas son comúnmente llamadas Variables de Decisión o Factores. La medida de desempeño de interés se calcula de las salidas estocásticas del modelo de simulación cuando las variables de decisión se encuentran fijadas a ciertos valores

específicos. La medida del desempeño es comúnmente llamada la Función Objetivo [4].

El valor esperado de la Función Objetivo es estimado promediando las salidas del modelo obtenidas de múltiples réplicas o grupos de intervalo. El problema de Optimización de una simulación se encuentra formalmente establecida como:

$$\text{MIN ó MAX } E[f(X_1, X_2, \dots, X_n)]$$

Sujeto a: Límite Inferior_i ≤ X_i ≤ Límite Superior_i ; para i = 1, 2, ..., n
donde E[f(X₁, X₂, ..., X_n)] es el valor esperado de la función objetivo [4].

La búsqueda de la solución óptima puede llevarse a cabo de forma manual o automática, con algoritmos específicamente diseñados para buscar la solución óptima sin tener que evaluar todas las posibles soluciones.

Relacionar algoritmos de optimización que pueden generar soluciones automáticamente y evaluarlas en modelos de simulación es un esfuerzo que vale la pena porque:

- ✓ Automatiza parte del proceso de análisis, ahorrando una gran cantidad de tiempo al analista.

- ✓ Se utiliza un método lógico para explorar eficientemente el conjunto de posibles soluciones, encontrando la mejor de ellas.
- ✓ El método generalmente encuentra varias soluciones ejemplares para ser consideradas por el analista [4].

Si la salida del modelo de simulación para todos los posible valores de las variables de decisión son registradas y graficadas, el gráfico resultante se llamaría superficie de respuesta. Para problemas con uno o dos variables de decisión, la solución óptima sería fácilmente identificada. Sin embargo, cuando existen más de dos variables de decisión, es mucho más complicado visualizar la superficie de respuesta, debido a que hay demasiadas soluciones a evaluar en una cantidad de tiempo razonable. Por esto, se debe encontrar un balance entre encontrar la solución óptima y el tiempo empleado para realizar la búsqueda [4].

Debido a esto, se han llevado a cabo numerosas investigaciones para encontrar métodos de optimización que puedan encontrar la solución óptima de forma rápida, segura y sin tener que enumerar cada una de las posibles alternativas; lo cual ha sido un poco complicado debido a la complejidad y aleatoriedad de los problemas de la vida real. Las superficies de respuesta producidas por modelos

de simulación estocásticos pueden ser no-lineales, multimodales y con mucho ruido; pueden contener variables de decisión tanto discretas como continuas y puede no proveer observaciones independientes e idénticamente distribuidas [4].

Existen Técnicas Heurísticas que proveen buenas soluciones o incluso unas muy cercanas a la óptima, dentro de una cantidad de tiempo razonable; pero el problema es que puede no siempre encontrar la solución óptima a un problema.

Las Técnicas Directas trabajan, como su nombre lo dice, directamente con las salidas generadas desde el sistema de interés y no requiere información adicional sobre las funciones que generan estas salidas. Estas técnicas son ideales para optimización cuando no se tienen los modelos matemáticos del sistema, cuyos gradientes pueden ser calculados para guiar la búsqueda de la solución óptima; o cuando el costo de estimar o calcular dicho gradiente es elevado. Lo cual es comúnmente el caso de un modelo de simulación estocástico [4].

Los investigadores inmediatamente notaron los beneficios de combinar la simulación y las técnicas directas de búsqueda. Por

ejemplo, Pegden y Gately (1977) desarrollaron un módulo de optimización para el software de simulación GASP IV. Su paquete de optimización estaba basado en una variante del método de búsqueda directa desarrollada por Hooke y Jeeves (1961) [4].

Los algoritmos de búsqueda directa han mejorado considerablemente en la actualidad para la optimización de modelos de simulación. Usando estos nuevos algoritmos, la herramienta de optimización para modelos de simulación SimRunner fue desarrollada en 1995, cuyo diseño del módulo de optimización está basado en algoritmos evolutivos, la cuál es una técnica de búsqueda directa; e inmediatamente otros dos vendedores de software de simulación añadieron el paquete de optimización a sus productos, estos son OptQuest96 introducido en 1996 usado con modelos de simulación contruidos con el software Micro Saint, y actualmente con modelos desarrollados con ProModel; y Witness Optimizer introducido en 1997 y usado con modelos de simulación desarrollados en el software Witness [4].

2.4. SimRunner como Herramienta de Optimización

En 1995, ProModel Corporation y Decision Science, Incorporated, desarrollaron SimRunner basados en las investigaciones del Dr. Royce Bowden (1992) sobre modernos algoritmos de optimización, para optimización basada en simulación y aprendizaje de máquinas. SimRunner ayuda a utilizar conceptos avanzados de optimización para buscar la mejor solución partiendo del modelo de simulación, utilizando el método basado en algoritmos evolutivos [4].

2.4.1. Algoritmos Evolutivos

Un algoritmo evolutivo es una técnica de optimización numérica basada en la evolución de la simulación. Se lo llama evolutivo debido a que la forma en que trabaja esta técnica está basada en el concepto de la teoría evolutiva de las especies, en la que se manifiesta que las especies deben adaptarse a su medio para sobrevivir. El algoritmo evolutivo manipula una población de soluciones a un problema de tal forma que las malas soluciones van desapareciendo y las buenas soluciones evolucionan continuamente en busca de la respuesta óptima [10].

Los Algoritmos Evolutivos difieren de las tradicionales técnicas de optimización no-lineal en varios aspectos. La diferencia más significativa es que buscan la superficie de respuesta usando una población de soluciones, en lugar de una simple solución. Esto le permite a los Algoritmos Evolutivos recoger información acerca de la superficie de respuesta desde varios puntos diferentes de forma simultánea. Los Algoritmos Evolutivos usan la información registrada de múltiples lugares de la superficie de respuesta, en lugar de un simple punto, para guiar la búsqueda de la solución óptima. Esta aproximación de la población incrementa las oportunidades de encontrar la solución óptima global. Diferentes investigaciones se han llevado a cabo para demostrar la característica convergente de los Algoritmos Evolutivos y para desarrollar pruebas matemáticas para la convergencia global (por ejemplo ver Bäck y Schwefel 1993) [4].

El funcionamiento de los Algoritmos Evolutivos puede ser descrito de forma general en estos cuatro pasos:

Paso 1: Generar una población inicial de soluciones al problema distribuyéndolas a través de todo el espacio de soluciones.

Paso 2: Calcular con precisión la concordancia de cada solución.

Paso 3: Basado en la concordancia de las soluciones, seleccionar las mejores y aplicar operadores genéticos tipo idealizados para producir una nueva generación de soluciones.

Paso 4: Regresar al Paso 2 mientras el algoritmo siga encontrando mejores respuestas [4].

Para ayudar a entender el funcionamiento del proceso de optimización de SimRunner se utilizará la siguiente analogía de unos exploradores que tratan de encontrar la cima de una montaña. Si un grupo de exploradores se encuentra en las faldas de la montaña, en la oscuridad, sin nada más que radios y altímetros, ¿cómo se encontraría la cima? [10]



FIGURA 2.1. VISTA FRONTAL DE LA MONTAÑA

El primer paso sería establecer la altitud actual de cada uno de los exploradores, registrando la lectura de los altímetros de cada uno [10].

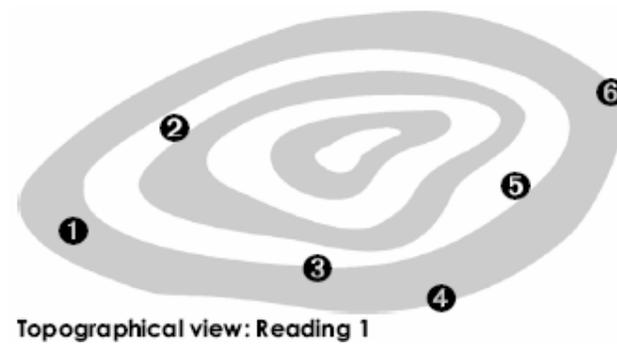


FIGURA 2.2. VISTA TOPOGRÁFICA: PRIMERA LECTURA

Después, se ordenaría a los exploradores a deambular en cualquier dirección por una cierta distancia, después se detienen y se registran los nuevos valores del altímetro. En la segunda lectura se verá que algunos exploradores ahora se encuentran más abajo y algunos más arriba que antes [10].

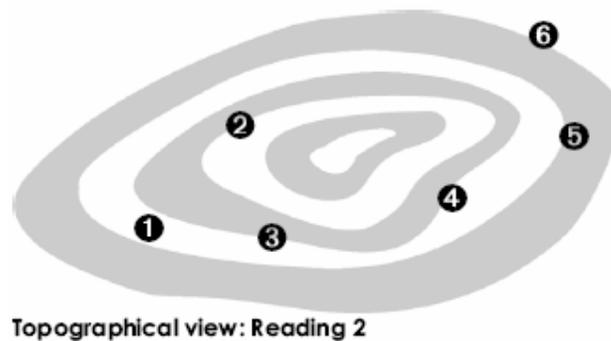


FIGURA 2.3. VISTA TOPOGRÁFICA: SEGUNDA LECTURA

Comparando las lecturas de cada uno de los altímetros, se puede determinar la dirección general por la cual seguir. Ya que se quiere llegar a la cima de la montaña, se sigue la dirección general de aquel que haya tenido la lectura más alta (en este caso el explorador número 2). Nuevamente, después que todos se movieron una cierta distancia, se vuelven a detener y se registran las nuevas lecturas del altímetro [10].

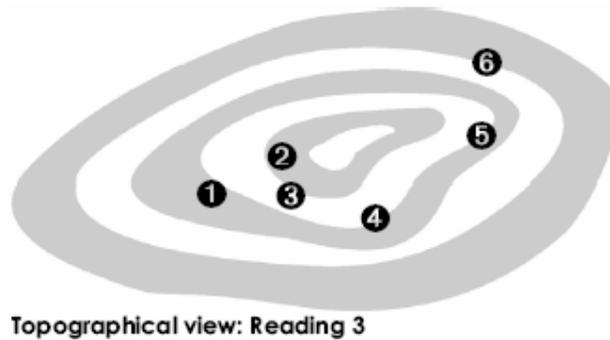
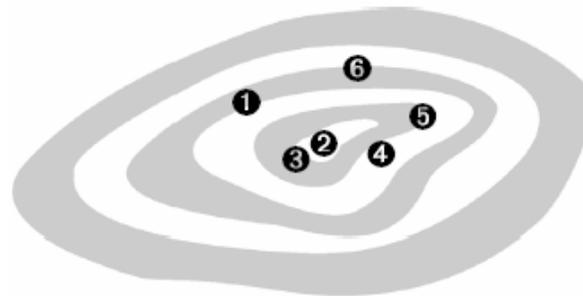


FIGURA 2.4. VISTA TOPOGRÁFICA: TERCERA LECTURA

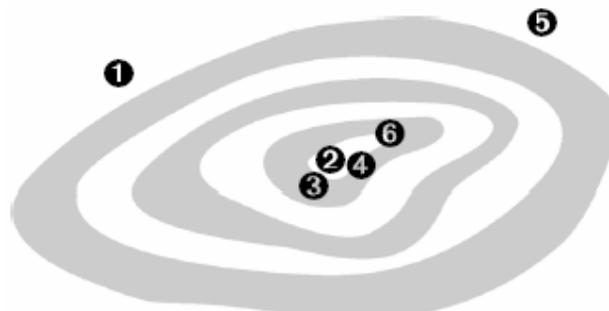
Si se promedian las nuevas lecturas de los altímetros de cada uno de los exploradores, se verá que lectura grupal ha aumentado. Esto confirma que se están moviendo en la dirección correcta, pero sólo para asegurarse se repite el proceso y se toman nuevas lecturas [10].



Topographical view: Reading 4

FIGURA 2.5. VISTA TOPOGRÁFICA: CUARTA LECTURA

Se puede notar, en este ejemplo, que todo el grupo de exploradores está empezando a converger en un solo punto. Mientras más se repita el proceso de recolección de lectoras (información), más cerca estará el grupo uno de otro, y con mayor certeza se estará sobre la cima o por llegar a ella. Y sólo para asegurar que se está en el lado indicado, se enviarán miembros del grupo a partes remotas del terreno para asegurarse que no hay otro lugar más alto que el que ya se ha identificado [10].



Topographical view: Reading 5

FIGURA 2.6. VISTA TOPOGRÁFICA: QUINTA LECTURA

Una vez que el promedio de las lecturas grupales iguala a la mejor lectura del grupo, es porque se ha encontrado la cima y se puede asegurar que se ha alcanzado la meta [10].

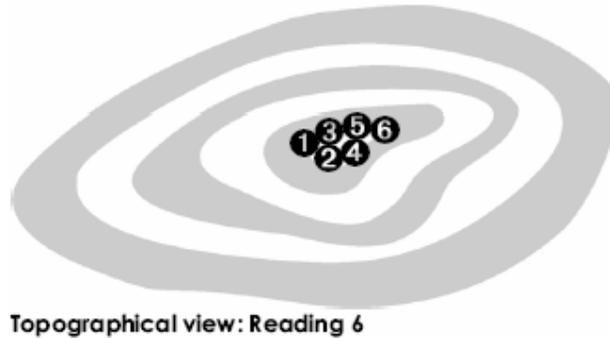


FIGURA 2.7. VISTA TOPOGRÁFICA: SEXTA LECTURA

Conceptualmente, esta es la forma en que funciona SimRunner, sólo la terminología es diferente. En lugar de altímetros, exploradores y pruebas, se utilizan funciones objetivo, factores de entrada y réplicas. Cada vez que los exploradores se mueven, SimRunner llama a esto una *generación* [10].

Por su forma de operación, varios investigadores, entre ellos, Biethahn y Nissen (1994), Bäck et al. (1995), y Bäck y Schwefel (1993), reportaron que los Algoritmos Evolutivos son muy apropiados para la optimización por las siguientes razones:

- ✓ No requieren asunciones o conocimiento previo sobre la topología de la superficie de respuesta que está siendo buscada; haciéndolos así, técnicas ampliamente aplicables.
- ✓ Son muy apropiadas para problemas con superficies de respuesta que son altamente dimensionales, multimodales, discontinuas, no-diferenciables, y estocásticos, e incluso para problemas con superficies de repuesta móviles o dinámicas.
- ✓ Son técnicas de búsqueda muy fiables y relativamente fáciles de usar [4].

Una potencial desventaja de usar Algoritmos Evolutivos para la optimización de simulación es que algunas veces requiere evaluar muchas soluciones; esto significa realizar un nuevo enlace con el modelo de simulación, lo que podría ser un obstáculo si el tiempo para los cálculos computacionales es limitado. Y existe una remota posibilidad que el algoritmo se confunda converja prematuramente a uno de los varios óptimos locales, debido al ruido de la superficie de respuesta.

A pesar que SimRunner es un optimizador fácil de usar y una herramienta muy fiable para encontrar la solución óptima, no hay que caer en la trampa de dejarlo convertir en el tomador de las decisiones; se debería estudiar y analizar las mejores soluciones presentadas por el software, ya que no existe una perfecta ni completa garantía que la mejor solución encontrada por SimRunner es de hecho la solución óptima al problema. Por lo tanto, hay que recordar siempre que los optimizadores no son los tomadores de decisión, sólo sugieren una posible ruta para la acción y es responsabilidad del analista tomar la decisión final [4].

CAPÍTULO 3

3. DESCRIPCIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN

3.1. Descripción del Proceso

La fábrica de electrodos produce actualmente nueve tipos de electrodos de diferentes diámetros, uno de ellos es del tipo celulósico, ya que su revestimiento es a base de celulosa; y los restantes son denominados especiales, ya que utilizan componentes químicos más refinados para elaborar su revestimiento y por ende son más caros. Existen además otros tipos de electrodos que son importados y comercializados bajo la misma marca de la empresa, pero que no serán considerados ya que se está realizando un estudio de la actividad productiva de esta compañía.

En la Tabla 1, que se muestra a continuación, se encuentran detallados los 23 productos que son producidos en esta empresa.

TABLA 1
LISTA DE ELECTRODOS PRODUCIDOS

CATEGORÍA	TIPO DE ELECTRODO	DIÁMETRO (Ø - pulg)
Celulósico	C-13	1/8
		3/16
		3/32
		5/32
Especial	B-80	1/8
		3/16
		5/32
Especial	B-83	1/8
		3/16
		5/32
Especial	B-84	1/8
		3/16
		5/32
Especial	B-85	1/8
		3/16
		5/32
Especial	X-41	1/8
Especial	X-44	1/8
		5/32
Especial	X-48	1/8
		5/32
Especial	X-99	1/8
		5/32

De todos estos diferentes electrodos que son producidos, se considera como producto estrella al C-13, un electrodo de tipo celulósico, con diámetro de 1/8 de pulgadas, es decir, utiliza una varilla de 3,25 mm de diámetro. Como se puede observar en el

siguiente Diagrama de Pareto de Electrodo Producidos, en la figura 3.1, este ítem en particular se produce en una cantidad considerablemente mayor al resto de productos.

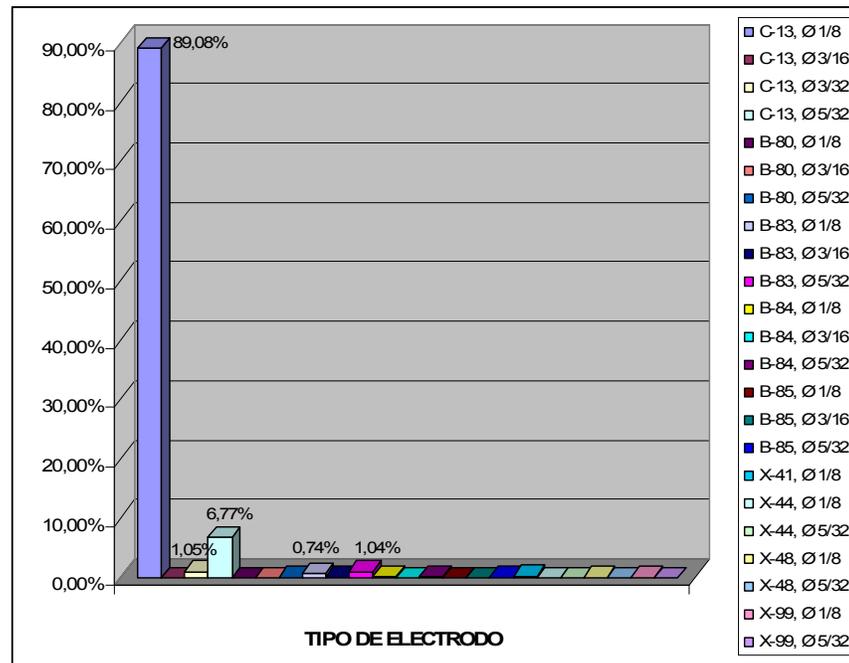


FIGURA 3.1. DIAGRAMA DE PARETO DE ELECTRODOS PRODUCIDOS

Se puede apreciar claramente que el electrodo C-13, Ø1/8 ocupa aproximadamente el 89% de la capacidad productiva de la fábrica y los otros 22 productos ocupan, en conjunto, tan sólo el 10%. Esta es la razón por la cual el levantamiento de datos, y por ende el estudio realizado para encontrar el mejor desempeño del proceso productivo, estará basado en este ítem. Cabe recalcar que enfocarse en este ítem no perjudica el desempeño del resto de

electrodos, más bien se espera que las mejoras influyan de forma positiva al resto de productos, ya que todos siguen el mismo flujo del proceso productivo.

El proceso productivo consta de ocho procesos principales, donde se transforman básicamente tres tipos de materia prima: el Alambión, que es un gran rollo de acero utilizado para formar las varillas del electrodo; los Componentes Químicos en Polvo y, que en conjunto con los Silicatos, que hacen la función de aglutinantes, forman el revestimiento de la varilla para formar el electrodo.

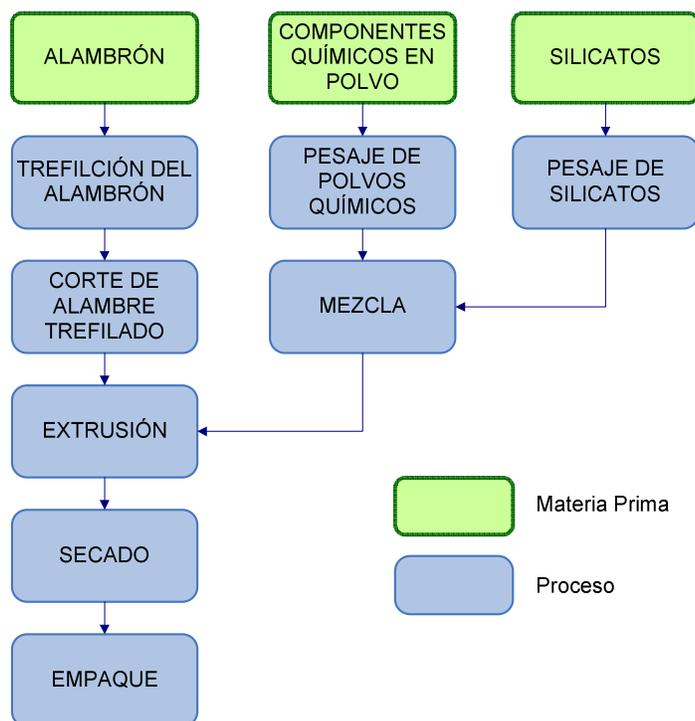


FIGURA 3.2. DIAGRAMA DE FLUJO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE ELECTRODOS

Como se puede observar en el Diagrama de Flujo para la Fabricación de Electrodo mostrado anteriormente, los principales procesos que se llevan a cabo son:

1. Trefilación del Alambón: En este proceso el alambón entra a una operación de decapado, en la que debido a la fricción contra unos rodillos, se le retira el óxido ferroso para después pasar por una serie de etapas de trefilado hasta obtener un alambre de cierto diámetro requerido. Antes de cada una de estas etapas, el alambre pasa por unas soluciones de jabón lubricante en polvo. Finalmente pasa por una solución de kerex para eliminar el jabón lubricante y poder utilizar el alambre enrollado en una bobina.
2. Corte del alambre trefilado: Para realizar los cortes del alambre trefilado y formar pequeñas varillas, primero este tiene que ser enderezado, ya que este sale enrollado del proceso de trefilado. Al igual que en el proceso de trefilado, en este proceso se suelda la punta del rollo que está por entrar a la cortadora con la punta final del que ya se está terminando de cortar, para poder mantener un proceso continuo. Las varillas cortadas se acumulan y almacenan en unas cajas especiales alimentadoras de la extrusora.
3. Pesaje de Polvos Químicos: Dependiendo de cada tipo de electrodo que se va a realizar se utiliza una receta confidencial

que indica los ingredientes a utilizar con su respectiva proporción. Para esto, con una balanza montada sobre unos rieles, se recorre la bodega de polvos químicos vertiendo sobre un mismo container cada componente y cantidad requerida.

4. Pesaje de Silicatos: Este proceso es realizado de forma automática mediante el uso de una balanza digital y un PLC (Power Line Communication – Comunicación mediante Línea de Energía). Los silicatos fluyen por tuberías a un recipiente y el sensor cierra el flujo en el momento que se alcanzó la cantidad requerida por la receta.
5. Mezcla: Se vierten y amasan en la mezcladora los componentes químicos en polvo, a los que se denomina Mezcla Seca. Luego, se añaden los silicatos y se amasa la mezcla ahora denominada Húmeda. Así se forma el revestimiento de los electrodos. Finalmente, la masa entra a una prensa de briquetas para formar un tocho, que es la masa compactada en unos moldes.
6. Extrusión: Se vacía una caja de varillas cortadas en la tolva de entrada de la extrusora. En la extrusora las varillas son impulsadas y revestidas de la mezcla producida; al salir, los electrodos pasan por una operación de cepillado para retirar un pedazo de masa del extremo final del mismo y después se lija la punta del extremo inicial para permitir un correcto contacto al

momento de soldar; después se rotula indicado el tipo de electrodo y el lote de producción. Por último, se recogen los electrodos en unas bandejas y se acumulan unas encima de otras formando rumas para un mejor manejo y transporte.

7. Secado: Primero se realiza un presecado, dejando reposar las rumas al aire libre por unas 24 horas, después se completa el secado en un horno a 120°C por una hora y luego se deja enfriar las rumas dentro del horno, a puertas abiertas, por un tiempo aproximado de una hora y media.
8. Empaque: Antes que un lote de electrodos sea aprobado y empacado, se le realizan pruebas de calidad y funcionalidad en un laboratorio. En el proceso de empaque se pesan electrodos hasta alcanzar el peso indicado para la presentación final; se enfundan y se los coloca en cajas de cartón que después son paletizadas en grupos de cien y embaladas para ser almacenadas en la bodega de producto terminado.

Un mejor detalle de las operaciones que se realizan en cada proceso y las máquinas, recursos y operarios que intervienen en ellas se encuentra en el Diagrama de Proceso de Fabricación de Electrodo que se encuentra en el Apéndice A.

Todas estas operaciones son realizadas en unas instalaciones que mantiene un proceso continuo y con un flujo de materiales que puede ser apreciado en el lay-out de la fábrica. Ver figura 3.3.

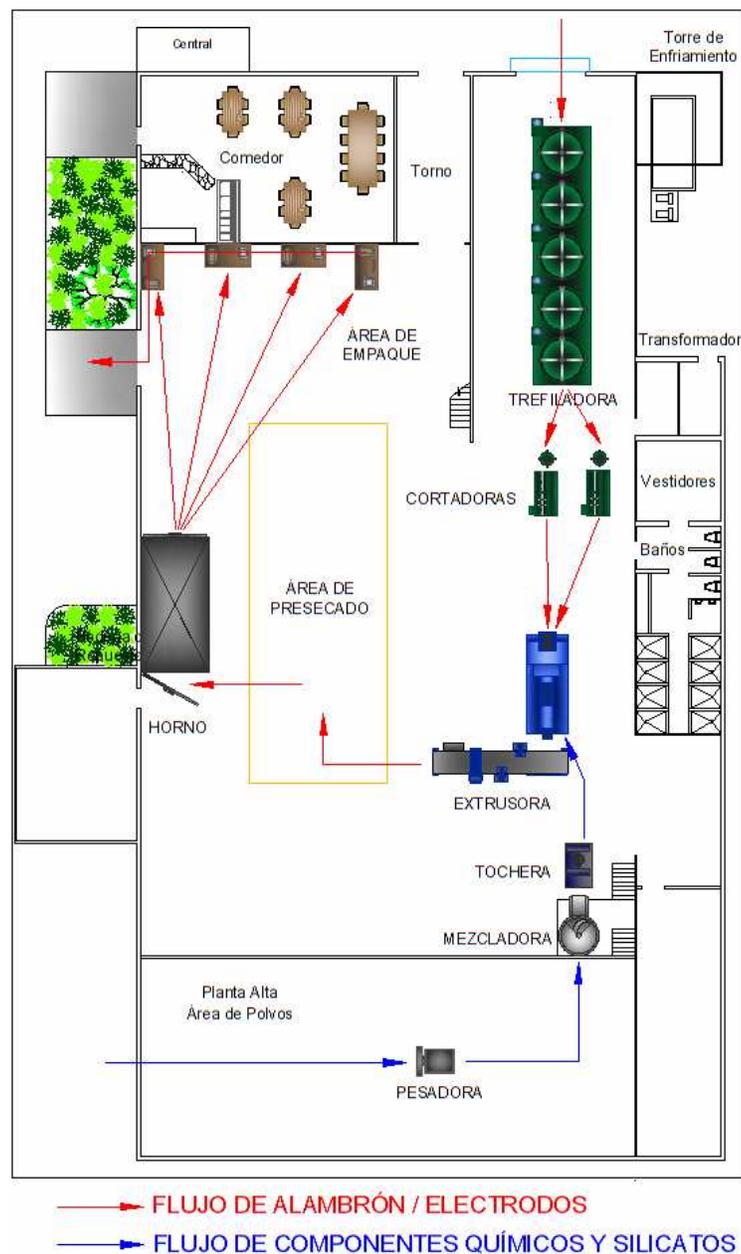


FIGURA 3.3. LAY-OUT DE LA FÁBRICA DE ELECTRODOS

3.2. Descripción del Modelo

Los datos necesarios para realizar el modelo de simulación del sistema de producción de la fábrica de electrodos se obtuvieron mediante una medición directa de tiempos, durante un tiempo prudencial en el que se podrían observar las diferentes variaciones que ocurren en este; así mismo, se utilizaron diferentes datos históricos que se registran de las máquinas, como las veces que estas se han dañado y el tiempo que se empleó en su reparación. Además, se tomó en cuenta las actividades y hábitos de los trabajadores y las diferentes normas exigidas por los jefes y administradores.

La capacidad productiva de la fábrica difiere con respecto al día de la semana; los días hábiles, de lunes a viernes, se trabaja doble turno, el sábado un simple turno y el domingo es de descanso, motivo por el cual se simuló el proceso de forma semanal, aplicando los horarios reales de trabajo diario para cada una de las estaciones, ya que no todas estas estaciones de trabajo tienen una jornada de trabajo con la misma cantidad de horas por turno; esto se logró mediante el uso de la herramienta de ProModel: "Shift Editor", donde se pueden programar las horas exactas de producción y de

descanso, ya que hay que considerar que para cada día de trabajo se tuvo que restar media hora destinada al almuerzo, media hora para la cena, dependiendo de la jornada de trabajo, media hora para la preparación y limpieza de las máquinas al inicio de cada turno y media hora destinada para la limpieza general al finalizar cada turno. En la tabla número 2, se presenta finalmente las horas productivas por jornada de trabajo, dependiendo de cada estación de trabajo.

TABLA 2
JORNADAS DE TRABAJO DE LAS ESTACIONES DE LA FÁBRICA

PROCESO	NÚMERO DE TURNOS	JORNADA DIARIA (horas)	JORNADA PRODUCTIVA (horas)
Trefilación	2	15	12,5
Corte	2	15	12,5
Extrusión	2	12	10,5
Pesaje	1	12	10,5
Mezcla	2	12	10,5
Tochera	2	12	10,5
Empaque	1	8,5	7
Horno	2	12	10,5

El modelo de simulación abarca todas las operaciones desde que inicia el proceso de transformación de las materias primas hasta el proceso de empaque y paletizado del producto final; sin tomar en cuenta las bodegas de materia prima ni producto terminado, por lo que se programó que el sistema nunca se desabastece de materia

prima y que arriba directamente a la primera estación de trabajo, según corresponde.

Para armar el modelo se crearon diferentes aspectos representativos del sistema real, entre ellos están las entidades que son la representación de los flujos de entrada a un sistema; son los elementos responsables de que el estado del sistema cambie.

Como entidades se tiene a la representación de las materias primas, que en este caso son el Alambrón para formar las varillas y los Contenedores de Polvos Químicos para hacer el revestimiento. Durante el modelo de simulación, estas entidades se van procesando, agrupando o transformando, razón por la cual se crean muchas otras entidades que dependen de una original. Incluso, por motivos de programación lógica y para adaptar la realidad al modelo de simulación se crearon ciertas entidades ficticias, que, si bien estas no existen en el sistema real, tampoco perjudican ni alteran las actividades o resultados del modelo.

En la Tabla 3, se presenta con mayor detalle las entidades creadas en el modelo de simulación, indicando en la descripción de cada una de ellas lo que representan.

TABLA 3
ENTIDADES DEL MODELO DE SIMULACIÓN

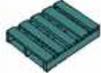
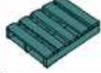
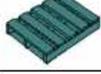
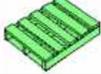
GRÁFICO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	ALAMBRON	Materia Prima. Rollo de Acero.
	ROLLO_TREFILADO	Entidad que resulta al procesar el alambón por la estación de trefilado.
	CAJA	El rollo trefilado, al salir del proceso de corte, se transforma en cajas de varillas cortadas.
	HILERA	Entidad resultante de procesar cajas en la extrusora. Destinadas, según el atributo, a crear rumas de 90 o 120 bandejas.
	GRUPO_90	Entidad Ficticia. Entidad en la que se agrupan hileras con atributo de 90, para poder crear rumas de un mismo atributo.
	GRUPO_120	Entidad Ficticia. Entidad en la que se agrupan hileras con atributo de 120, para poder crear rumas de un mismo atributo.
	RUMA	Conjunto de tres hileras tipo 90 o 120.
	RUMA8	Entidad Ficticia. Entidad en la que se agrupan 8 rumas antes de entrar al horno de secado.
	CONTAINER	Materia Prima. Conjunto de polvos que forman el revestimiento del electrodo.
	TOCHO	Entidad que resulta de procesar los polvos químicos en la tochera.
	TOCHOS_7	Entidad Ficticia. Agrupación de 7, tochos los cuales se transportan en carritos hacia la extrusora.
	CAJA_EMPACADA	Entidad resultante del proceso de empaque, al colocar los electrodos en su presentación final.
	PALLET_FINAL	Agrupación de 100 cajas empacadas de la presentación final del producto.

Las locaciones creadas en el modelo de simulación son todos aquellos lugares en los que la pieza o entidad puede detenerse para ser transformada o esperar a serlo, como es el caso de las estaciones de trabajo [3]. En este caso, existen locaciones que representan las máquinas de transformación de la materia prima, espacios destinados para acumular o almacenar producto en proceso y también locaciones ficticias necesarias para una correcta programación lógica del sistema real. Las locaciones que se crearon en el modelo de simulación son los siguientes:

TABLA 4
LOCACIONES DEL MODELO DE SIMULACIÓN

GRÁFICO	NOMBRE	CAPACIDAD	DESCRIPCIÓN
	CABALLETE	1	Locación donde se cargan los rollos de alambtrn.
	AREA_TREFILACION	6	Locación Ficticia. Donde un alambtrn se transforma en 6 entidades: rollo_trefilado.
	TREFILADORA	1	Mquina Trefiladora.
	WIP_TREFILADORA	Infinito	Locación que representa el rea donde se almacenan los rollos trefilados.
	CORTADORA 1	1	Mquina Cortadora #1.
	CORTADORA 2	1	Mquina Cortadora #2.
	GRUPO_CAJAS1	2	Locación Ficticia. Donde dos rollos trefilados se agrupan para formar una caja de varillas cortadas por la cortadora 1.

	GRUPO_CAJAS2	2	Locación Ficticia. Donde dos rollos trefilados se agrupan para formar una caja de varillas cortadas por la cortadora 2.
	WIP_CORTE	Infinito	Locación donde se almacenan las cajas de varillas cortadas. La caja, según el atributo, se transforma en 3 o 4 entidades: hilera.
	HILERA90	Infinito	Locación Ficticia. Donde se acumulan las 4 hileras con atributo 90 y se agrupan 12 de ellas.
	HILERA120	Infinito	Locación Ficticia. Donde se acumulan las 3 hileras con atributo 120 y se agrupan 3 de ellas.
	DESAGRUPAR	Infinito	Locación Ficticia. Donde se desagrupan todas las hileras independientemente del atributo.
	ESPERA_HILERA	1	Locación Ficticia. Sirve como puerta para bloquear el acceso de otras entidades hasta calcular el tiempo de formación de una ruma.
	EXTRUSORA	1	Máquina Extrusora.
	ARMADO_RUMAS	3	Locación Ficticia. Se agrupan tres hileras de un mismo atributo para formar una ruma.
	PRE_SECADO	Infinito	Área donde se almacenan las rumas producidas para un presecado previo a entrar al horno de secado.
	GRUPO_PRESECADO	Infinito	Locación Ficticia. Se agrupan 8 rumas independientemente de su atributo para entrar al horno.
	ACCESO_HORNO	1	Locación Ficticia. Restringe la entrada de entidades al horno cuando este se encuentra ocupado.
	PUERTA_HORNO	1	Locación Ficticia. Cierra la entrada al horno que se encuentra en la locación acceso_horno.
	HORNO	1	Horno de Secado.
	SALIDA_HORNO	1	Locación Ficticia. Envía la señal a acceso_horno para permitir el paso de una nueva entidad.
	HORNO_ESPERA	8	Locación Ficticia. Donde se desagrupan las 8 rumas antes de ir al proceso de empacado.
	AREA_EMPAQUE	8	Locación que representa el espacio de espera de las rumas para ser empacadas.
	ESTACION1	1	Estación de Empacado #1.
	ESTACION2	1	Estación de Empacado #2.

	ESTACION3	1	Estación de Empacado #3.
	ESTACION4	1	Estación de Empacado #4.
	GRUPO_PALLET1	100	Locación Ficticia. Donde se agrupan y paletizan 100 cajas creadas en el proceso de empaque de la estación 1.
	GRUPO_PALLET2	100	Locación Ficticia. Donde se agrupan y paletizan 100 cajas creadas en el proceso de empaque de la estación 2.
	GRUPO_PALLET3	100	Locación Ficticia. Donde se agrupan y paletizan 100 cajas creadas en el proceso de empaque de la estación 3.
	GRUPO_PALLET4	100	Locación Ficticia. Donde se agrupan y paletizan 100 cajas creadas en el proceso de empaque de la estación 4.
	AREA_ESPERA	Infinito	Locación donde esperan los pallets de producto terminado.
	BODEGA_POLVOS	Infinito	Representa al lugar de almacenamiento de polvos químicos.
	PESADORA_POLVOS	1	Máquina Pesadora de Polvos.
	WIP_MEZCLA	1	Espacio que representa el lugar donde se almacena el container con polvos pesados.
	MEZCLADORA	1	Máquina Mezcladora.
	TOCHERA	1	Máquina Tochera. Se crean 21 tochos a partir del container de polvos.
	GRUPO_TOCHOS	8	Locación Ficticia. Donde se agrupan 7 tochos transportados en carritos a la extrusora.
	ESPERA_TOCHOS	1	Locación Ficticia. Restringe la entrada de más tochos cuando ya existen 7 procesándose.
	CARGA_TOCHOS	1	Locación Ficticia. Donde se simula el tiempo de carga de los tochos a la extrusora. Cierra el paso de tochos en espera_tochos.
	USO_TOCHOS	1	Locación Ficticia. Se simula el tiempo de uso de los tochos cargados. Permite el acceso de entidades a la extrusora.
	SALIDA_TOCHOS	1	Locación Ficticia. Cierra el acceso de entidades a la extrusora y permite el paso de tochos en espera_tochos.

Los recursos empleados en el modelo de simulación son aquellos dispositivos necesarios para llevar a cabo una operación dentro del sistema, es una herramienta necesaria para realizar un proceso pero que no forma parte de una locación específica, sino que es trasladada de acuerdo con los requerimientos de aquel [3]; en este caso un tecele o un puente grúa utilizado para transportar una entidad o pieza de una locación a otra. La utilización de recursos permite limitar el traslado de entidades de una locación a otra y simular de mejor manera la realidad, como en el caso de las Cortadoras; ya que existen dos de ellas, puede darse el caso que ambas tengan una entidad lista para enviar a la siguiente locación pero como sólo existe un tecele, una de las cortadoras tendrá que esperar mientras la otra es atendida. A continuación se presenta los recursos creados en el modelo de simulación con su respectiva descripción.

TABLA 5
RECURSOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN

GRÁFICO	NOMBRE	DESCRIPCIÓN
	TECLE	Recurso utilizado para transporta el rollo trefilado de la Trefiladora a la Cortadora.
	PUENTE_GRUA	Recurso empleado para transportar las cajas de varillas cortadas al WIP de corte.

Los arribos, que son llegadas de las entidades al sistema [3], fueron programados para las materias primas. El Alambión fue programado para arribar a la locación Caballete y el Container fue programado para arribar a la locación Bodega_Polvos, de tal forma que no existe escasez de ellos en el sistema.

Como se explicó anteriormente con la herramienta “Shift Editor” se programaron las jornadas diarias de ciertas estaciones de trabajo principales, las cuales fueron asignadas a las respectivas locaciones que las representan en el modelo de simulación. A continuación se presenta en una tabla el horario de trabajo de las locaciones para los días laborales de lunes a sábado:

TABLA 6

ASIGNACIÓN DE JORNADAS DIARIAS A LOCACIONES

7:00 a 22:00	7:00 a 19:00
CABALLETE	EXTRUSORA
TREFILADORA	PESADORA_POLVOS
CORTADORA 1	MEZCLADORA
CORTADORA 2	TOCHERA
7:00 15:30	7:30 a 15:00
ESTACION1	PUERTA_HORNO
ESTACION2	HORNO
ESTACION3	
ESTACION4	

Una vez creadas entidades, locaciones, recursos, arribos y la asignación de turnos y horarios de trabajo, se inicia la programación lógica del modelo en la que se representan las operaciones del sistema, donde se aplican con diferentes atributos y variables.

El atributo representa una característica cualquiera de una entidad. Sirven para diferenciar entidades sin necesidad de generar una entidad nueva y pueden adjudicarse al momento de la creación de la entidad, o asignarse y/o cambiarse durante el proceso [3]. El principal atributo que se utiliza en este modelo es el tipo de ruma que forma o formará una cierta entidad. Existen rumas con una capacidad de apilamiento de 3 hileras de 30 bandejas, es decir, una ruma con 90 bandejas de electrodos; y otra ruma con una capacidad para apilar 3 hileras de 40 bandejas, es decir, una ruma de 120 bandejas de electrodos. Por lo tanto, durante el proceso, a las entidades se les asigna un atributo que toma valores de 90 o 120 para identificarla, dependiendo el caso. Por cuestiones de programación cuando se agrupan ciertas entidades para formar una nueva entidad, esta última pierde las características de sus predecesores. Por lo que, para asignarle el mismo atributo a la nueva entidad se tuvo que crear un nuevo atributo que cumple las mismas funciones que el explicado anteriormente.

En la tabla que se presenta a continuación, se detallan estos dos atributos creados, en adición de un atributo que aplicado en conjunto con el comando "clock()" permite calcular el tiempo de ciclo de una operación específica.

TABLA 7
ATRIBUTOS DEL MODELO DE SIMULACIÓN

NOMBRE	TIPO	DESCRIPCIÓN
TIPO_CAJA	Entero	Toma el valor de 90 o 120, el cual se asocia a la entidad "caja" en la locación "wip_corte", para formar rumas de 90 o 120 bandejas de electrodos.
TEP	Real	Utilizado junto al comando "clock()" para calcular el Tiempo de Espera de Presecado de cada ruma que sale del proceso de extrusión.
ATRUMA	Entero	Atributo que toma los mismos valores de Tipo_Caja, para preservar el mismo atributo que tenía durante el proceso de extrusión pero que se pierde al agruparse; se asocia a la entidad "ruma" en la locación "armado_rumas".

Las variables presentes en el modelo de simulación, son condiciones cuyos valores se crean y se modifican por medio de ecuaciones matemáticas y relaciones lógicas [3]. Aplicados frecuentemente para realizar conteos de ciertas entidades específicas; así como, lograr ciertas operaciones que permiten calcular el tiempo de formación de una ruma, restringir el paso de

entidades hacia una locación específica, trabajar en conjunto con los atributos para traspasar la característica de una entidad vieja a una recién creada, entre otras. El uso de estas variables se presenta de forma más específica en la siguiente tabla:

TABLA 8
VARIABLES DEL MODELO DE SIMULACIÓN

APLICACIÓN	NOMBRE	TIPO	DESCRIPCIÓN
Calcular el Tiempo de Formación de una ruma.	PUERTA_TIEMPO_RUMA	Entero	Sirve como puerta que controla la entrada de hileras a la extrusora hasta calcular el tiempo de formación de una ruma.
	CH	Entero	Contabiliza las hileras que entran a la extrusora. Al llegar a tres se encera.
	V90	Real	Guarda el tiempo en que entró la primera de tres hileras con atributo 90 a la extrusora.
	V120	Real	Guarda el tiempo en que entró la primera de tres hileras con atributo 120 a la extrusora.
	TIEMPO_RUMA90	Real	Guarda el tiempo de formación de una ruma de tres hileras con atributo 90.
	TIEMPO_RUMA120	Real	Guarda el tiempo de formación de una ruma de tres hileras con atributo 120.

Mantener y Pasar el atributo de la entidad origen a la entidad resultante de una agrupación.	PUERTA_ATRIBUTO_RUMA	Entero	Sirve como puerta que controla la salida de hileras de la extrusora hasta que se ha asignado el atributo a la ruma formada.
	CONTH	Entero	Contabiliza las hileras que salen de la extrusora. Al llegar a tres se resetea.
	VAT	Entero	Guarda el valor del atributo Tipo_Caja para asignárselo al nuevo atributo Atruma.
Restringir y controlar el paso de rumas al horno.	VAR	Entero	Sirve como puerta que controla la entrada de rumas al horno.
	AA	Entero	Guarda el valor del día de simulación.
	ENTRADA_HORNO	Entero	Contabiliza la cantidad de grupos de rumas que entran al horno por día
Simular las actividades paralelas pero dependientes entre la tochera y extrusora.	CONT_CARGA_TOCHOS	Entero	Sirve como puerta que restringe la entrada de tochos al área de carga, cuando ya existen unos en uso.
	CONT_USO_TOCHOS	Entero	Sirve como puerta que controla la entrada de hileras a la extrusora sólo cuando existen tochos en uso.
	WIPEXT	Entero	Controla que los tochos sean usados cuando existe una hilera procesándose en la extrusora.

Contabilizar la formación de hileras, rumas, cajas, pallets y tochos.	CONTH90	Entero	Contabiliza la cantidad de hileras con atributo 90 procesadas en la extrusora. Al llegar a cuatro se resetea.
	CONTH120	Entero	Contabiliza la cantidad de hileras con atributo 120 procesadas en la extrusora. Al llegar a tres se resetea.
	CONT_RUMA90	Entero	Contabiliza la cantidad de rumas formadas, con atributo 90.
	CONT_RUMA120	Entero	Contabiliza la cantidad de rumas formadas, con atributo 120.
	CONT_CAJA	Entero	Contabiliza la cantidad de cajas producidas por todas las estaciones de empaque.
	CONT_CAJA1	Entero	Contabiliza la cantidad de cajas producidas por la estación de empaque #1.
	CONT_CAJA2	Entero	Contabiliza la cantidad de cajas producidas por la estación de empaque #2.
	CONT_CAJA3	Entero	Contabiliza la cantidad de cajas producidas por la estación de empaque #3.
	CONT_CAJA4	Entero	Contabiliza la cantidad de cajas producidas por la estación de empaque #4.
	CONT_PALLET	Entero	Contabiliza la cantidad de pallets producidos por todas las estaciones de empaque.

CONT_PALLET1	Entero	Contabiliza la cantidad de pallets producidos por la estación de empaque #1.
CONT_PALLET2	Entero	Contabiliza la cantidad de pallets producidos por la estación de empaque #2.
CONT_PALLET3	Entero	Contabiliza la cantidad de pallets producidos por la estación de empaque #3.
CONT_PALLET4	Entero	Contabiliza la cantidad de pallets producidos por la estación de empaque #4.
CONT_7TOCHOS	Entero	Contabiliza la cantidad de grupos de 7 tochos que se han producido.
CONT_7TOCHOS_USADOS	Entero	Contabiliza la cantidad de grupos de 7 tochos que se han utilizado.

Para mayor información y un mejor entendimiento de la programación del modelo de simulación de esta fábrica de electrodos, se puede consultar el Apéndice B donde se encuentra la programación escrita en el lenguaje y formato empleado por ProModel.

CAPÍTULO 4

4. APLICACIÓN DE DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El principal problema y así mismo, lo más importante del diseño de experimentos, es la obtención de los datos. Si los datos empleados son incorrectos, los resultados del diseño serán incorrectos y no habrá servido de nada los recursos empleados ni el análisis realizado.

La obtención tradicional de datos, variando los factores de interés en diferentes niveles dentro del sistema real y esperando los resultados, presenta varios inconvenientes. Uno de los principales está en que es inevitable interrumpir las actividades normales de la empresa para poder realizar las variaciones necesarias de las condiciones del experimento. Mientras mayor es la cantidad de factores o niveles que se desean investigar, mayor es la cantidad de experimentos a realizar; sólo para desarrollar un estudio de 5 factores a 2 niveles, sin tomar en cuenta la realización de réplicas, se deben realizar 32 experimentos; por lo tanto se

aplican diseños experimentales menos precisos y rigurosos, ya que se realizan arreglos para poder hacer una menor cantidad de pruebas. Aún así, la realización de experimentos implica la inversión de recursos y una gran influencia en los costos de la empresa por un tiempo considerablemente prolongado hasta la finalización de los experimentos. Además, esto significa que los experimentos están limitados a los recursos y capacidades de la empresa; es decir, sería muy complicado realizar experimentos de un sistema aumentando la cantidad de máquinas u operarios, o cambiando un equipo por uno más moderno y automatizado.

Todos estos inconvenientes logran superarse con la aplicación de técnicas de simulación. En lugar de realizar variaciones al sistema de producción real, se realiza un modelo de simulación validado que representa de forma confiable y precisa a las operaciones que se llevan a cabo en la empresa. Esto permite que se realicen cualquier tipo de variaciones, pruebas y experimentos sin necesidad de incurrir en grandes costos ni recursos de la empresa, no se interrumpen sus actividades normales de producción, toma poco tiempo y pueden variarse sin problema los factores de capacidad de los equipos o recursos de la empresa; por lo que pueden ser probados una mayor cantidad de factores,

inclusive con la posibilidad de replicar los resultados para obtener un mejor análisis estadístico.

Para aplicar el modelo de simulación validado de la fábrica de electrodos para soldar como campo experimental y fuente de datos, se tuvieron que realizar ciertos ajustes que permitirían variar los factores de interés dentro de los niveles escogidos. Entre estos ajustes está la creación de un recurso, macros, escenarios y lógicas de programación; los cuales serán explicados más adelante, en la sección 4.3 según corresponda cada factor. El principal cambio realizado, fue el tipo de rumas, puesto que la gerencia de la fábrica cambiará todas sus rumas a una capacidad de 120 bandejas, por lo que ya no se utilizarán los atributos y ciertas locaciones especializadas para diferenciar y manejar los dos tipos de rumas diferentes.

Para un mayor entendimiento, de las variaciones realizadas, se puede revisar el Apéndice C, en el que se encuentra el código fuente del modelo de simulación del sistema para la realización de experimentos.

4.1. Descripción del Problema

La fábrica de electrodos no tiene la cultura de registrar datos de desempeño de la línea de producción, como son el tiempo de ciclo, el producto en proceso ni el througput (TH) o tasa de producción. Además, no se ha realizado un correcto estudio de la capacidad de de las estaciones de trabajo que intervienen en el sistema, ya que la gerencia suele tomar decisiones correctivas a ciertos síntomas de falta de abastecimiento que se presentaron en algún momento, sin un correcto estudio de las causas reales de ese problema. Esto ha provocado que la gerencia necesite conocer las correctas capacidades de ciertas estaciones de trabajo que permita maximizar la tasa de producción y por ende, disminuir su tiempo de ciclo.

4.2. Selección de la Variable de Respuesta

El cálculo del tiempo de ciclo es un poco complicado en este sistema de producción, ya que se manejan entidades o productos que cambian de unidades varias veces durante el proceso. De un alambrón después de ser trefilado, salen seis rollos; dos de ellos se utilizan para crear una caja de varillas y de una caja se puede realizar una ruma de 120 bandejas de electrodos, que para entrar al

horno de presecado tiene que esperar siete ruma más y finalmente de una sola ruma se obtienen 20 cajas empacadas para después formar un pallet de 100 cajas de producto final. Esto hace que sea muy complicado conocer el tiempo de ciclo de un solo electrodo o de una ruma.

Se ha escogido como variable de respuesta el throughput de las cajas empacadas en una unidad de tiempo de una semana, con el fin de encontrar el escenario que logre maximizarlo. Además por la ley de Little se conoce que si se aumenta el throughput de una línea de producción, manteniendo un nivel de WIP constante, el tiempo de ciclo disminuye.

Los valores que representan a la variable de respuesta seleccionada son tomados de la columna de Total Exits de la variable creada "CONT_CAJA" que se obtiene en la hoja de resultados de ProModel al finalizar la corrida del modelo.

4.3. Selección de Factores y Niveles

La selección de factores se la realizó consultando los intereses de la gerencia y los conocimientos de los operarios ya que son quienes

mejor conocen la línea de producción y tienen una mejor idea de las mejoras que pueden ser aplicadas para obtener los resultados deseados, además de conocer las limitaciones que existen por falta de espacio, recursos, conocimiento, entre otros; que impidan el manejo de los factores a diferentes niveles.

Después de algunas conversaciones, tomando en cuenta lo que a la gerencia le interesa conocer y sabiendo las situaciones que realmente pueden ser modificadas y que se consideran influyentes a la variable de respuesta, se escogieron los siguientes factores:

- ✓ Número de Cortadoras: En la actualidad existen dos cortadoras que trabajan en paralelo, éstas se encuentran después de la trefiladora para cortar el rollo trefilado en varillas que serán el cuerpo del electrodo. Sobre la cantidad de cortadoras existentes en la planta existen dos opiniones, hay quienes dicen que la línea de producción trabajaría de igual manera con una sola máquina y hay quienes dicen que la producción mejoraría con una tercera cortadora, y que existe la posibilidad de adquirir una nueva cortadora de ser necesario, se ha decidido probar estas dos situaciones establecidas. Como nivel bajo se probaría este factor con una sola cortadora y con tres cortadoras en el nivel

alto. Para poder modelar este factor se creó una macro llamada “NUM_CORTADORAS” y un ruteo en la lógica del proceso.

Nivel Bajo: 1 Cortadora

Nivel Alto: 3 Cortadoras

- ✓ Velocidad de Cambio: Este factor mide el tiempo que toma realizar un cambio de utillajes en la cortadora, como son las cuchillas que se gastan al cortar las varillas. Actualmente, este tiempo se distribuye como una Gamma con una media de 12,668 minutos el cuál se ha establecido como el nivel alto de este factor. Mediante un estudio de TPM previamente realizado, se puede reducir este tiempo de espera a la mitad y establecer como nivel bajo de este factor un tiempo de cambio de utillajes de 6.334 minutos. A este factor le corresponde una macro llamada “VELOCIDAD_CAMBIO” que reemplaza el valor de escala de la distribución Gamma que representa al tiempo empleado para el cambio de utillajes.

Nivel Bajo: 6.334 minutos

Nivel Alto: 12.668 minutos

- ✓ Capacidad de la Tochera: La máquina tochera es la que se encarga de compactar la masa de sustancias químicas que sale de la mezcladora para formar un bloque de forma cilíndrica para que encaje dentro de la extrusora. El consumo de la extrusora es

de siete tochos por cada parada; pero suele darse el caso que estos se consumen mucho más rápido de lo que se demora en producirlos. Esto ha provocado la inquietud de pensar en la opción de duplicar la capacidad de la tochera ya que la gerencia dice que la extrusora no debería dejar de trabajar en ningún momento; por esta razón se plateó especificar como nivel bajo de prueba una tochera con capacidad de un solo tocho y como nivel alto de prueba para este factor, se estableció una capacidad de dos tochos. Para este factor se creó una macro llamada “CAP_TOCHERA” que reemplaza el valor de la capacidad asignada a la locación al momento de crearla.

Nivel Bajo: 1 tocho

Nivel Alto: 2 tochos

- ✓ Número de Rumas: Las rumas se producen después que los electrodos son formados al recubrir las varillas con la masa de químicos producida; los electrodos se recogen en bandejas y estas se las apilan en rumas de tres hileras. Ya que se desea estandarizar las rumas con una capacidad de 120 bandejas de electrodos, la decisión queda en conocer cuantas estructuras para rumas son realmente necesarias. Actualmente existen 100 estructuras para rumas, pero para poder notar si existe alguna influencia al usar más o menos estructuras se decidió establecer

niveles con una variación de 20 rumas; es decir, un nivel bajo de 80 estructuras y un nivel alto de 120 estructuras para rumas. Este factor se modeló creando un recurso llamado “PLATAFORMA” y una macro llamada “NUM_RUMAS” que reemplaza el valor de unidades del recurso.

Nivel Bajo: 80 rumas

Nivel Alto: 120 rumas

- ✓ Número de Empacadoras: Las empacadoras son las estaciones donde se recibe las rumas de electrodos completamente secadas, para que estas sean pesadas y empacadas en las cajas que son la presentación final del producto para su comercialización. A pesar que está establecido que cuatro estaciones trabajen en empaque, actualmente por problemas de salud se ha trabajado sólo con tres estaciones y se está considerando la posibilidad de mantener este número de estaciones, a pesar que anteriormente se había pensado en aumentar la capacidad a cinco estaciones de trabajo, por lo que se quiere conocer la influencia de utilizar tres estaciones, como el nivel bajo; contra el uso de cinco estaciones de empaque, que sería el nivel alto de este factor. Para este factor se creó una macro llamada “NUM_EMPACADORAS” y se modeló un ruteo en la lógica del proceso.

Nivel Bajo: 3 Estaciones de Empaque

Nivel Alto: 5 Estaciones de Empaque

4.4. Selección del Diseño Experimental

Existen cinco factores que han sido escogidos para la realización de los experimentos y observar el impacto que tienen sobre la variable respuesta, por lo tanto, es necesario realizar un Diseño Factorial, ya que estos son los más eficientes para estudiar los efectos producidos por dos o más factores. Por diseño factorial se entiende aquel en el que se investigan todas las posibles combinaciones de los niveles de los factores en cada ensayo completo o réplica del experimento. El efecto de un factor se define como el cambio en la respuesta, producido por un cambio en el nivel del factor.

Los diseños factoriales tienen como dificultad que a medida que se aumenta el número de factores, aumenta sensiblemente el número de experimentos elementales que es necesario realizar, y en consecuencia, el aumento del costo del experimento. Si se tienen por ejemplo un modelo de 3 factores con 3, 4 y 5 niveles respectivamente, este modelo se representa como un Diseño Factorial "3x4x5", indicando así por una parte el número de factores

y sus niveles, y por otra parte, que son necesarios 60 experimentos elementales. Si se replica el mismo experimento tres veces, se necesitaría realizar 180 experimentos.

Este tipo de diseños se hace impracticable a partir de un momento dado, por llevar los costos a niveles inaccesibles. Además, con mucha frecuencia, sólo una parte de factores son activos, o sea, tienen una influencia realmente significativa sobre la variable respuesta, mientras que los demás son factores inertes. Para reducir el número de observaciones se requiere tomar algunas medidas como eliminar factores, disminuir niveles o no tomar observaciones en todas las combinaciones posibles. Esto puede lograrse a partir de la aplicación de Diseños Factoriales a 2 Niveles, también conocidos como diseños 2^k , donde k es el número de factores a estudiar.

En la industria, los diseños más utilizados, con una gran diferencia sobre los demás, son los diseños factoriales a 2 niveles; es decir, diseños del tipo 2^k . En este caso los valores correspondientes a los dos niveles se codifican, asignando al nivel bajo el valor -1 y al alto +1. Si el factor fuese cualitativo, a un nivel seleccionado arbitrariamente se le asigna -1 y al otro +1.

La gran difusión industrial de los Diseños 2^k y la razón por la cuál será utilizado en este estudio se basa en los siguientes motivos:

- ✓ Proporcionan una excelente relación entre el esfuerzo experimental y la información obtenida.
- ✓ Son sencillos de construir, realizar e interpretar.
- ✓ Son fáciles de combinar entre ellos para obtener diseños más complejos.
- ✓ Existen programas informáticos que han desarrollado excelentes herramientas destinadas para el análisis completo de los Diseños Factoriales a 2 Niveles, facilitando el manejo de los datos y la interpretación de los resultados.

Ya que todos los datos y resultados se los obtiene del modelo de simulación, no existe un mayor esfuerzo experimental ni costos elevados por la realización de los mismos, por lo tanto, la cantidad de experimentos a realizar no es un verdadero problema como sería si se los tendría que ejecutar físicamente en la fábrica de electrodos, por lo que es posible darse el lujo de replicar los experimentos. Como son 5 los factores en estudio, cada uno a dos niveles, se tiene un Diseño 2^5 , que equivale a 32 experimentos elementales, y se ha determinado realizar tres réplicas para cada experimento, obteniendo así un equivalente de 96 experimentos a realizar.

Por lo tanto, para este estudio, el modelo estadístico lineal, del Diseño 2^5 con tres réplicas, se presenta a continuación:

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmn} = & \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (AD)_{il} + \\
 & (AE)_{im} + (BC)_{jk} + (BD)_{jl} + (BE)_{jm} + (CD)_{kl} + (CE)_{km} + (DE)_{lm} \\
 & + (ABC)_{ijk} + (ABD)_{ijl} + (ABE)_{ijm} + (ACD)_{ikl} + (ACE)_{ikm} + \\
 & (ADE)_{ilm} + (BCD)_{jkl} + (BCE)_{jkm} + (BDE)_{jlm} + (CDE)_{klm} + \\
 & (ABCD)_{ijkl} + (ABCE)_{ijkm} + (ABDE)_{ijlm} + (ACDE)_{iklm} + \\
 & (BCDE)_{jklm} + (ABCDE)_{ijklm} + e_{ijklmn}
 \end{aligned}$$

Donde μ es un parámetro común a todos los tratamientos, denominado media global; A, B, C, D, E son los diferentes parámetros escogidos denominados efectos; i, j, k, l, m son los niveles respectivos de cada parámetro, llamados tratamientos del experimento, n es el número de réplicas y e_{ijklmn} es la componente aleatoria del error.

Los niveles de los parámetros y el número de réplicas se encuentra definido por:

$$\begin{array}{lll}
 i = 1, 2 & j = 1, 2 & k = 1, 2 \\
 l = 1, 2 & m = 1, 2 & n = 1, 2, 3
 \end{array}$$

Para un mejor entendimiento de las siguientes secciones de este capítulo hay que tomar en cuenta la nomenclatura utilizada para los factores seleccionados y sus niveles establecidos, que se muestra en la Tabla 16, presente a continuación.

TABLA 16
NOMENCLATURA DE FACTORES Y NIVELES

	A	B	C	D	E
	Número de Cortadoras	Velocidad de Cambio	Capacidad Tochera	Número de Rumas	Número de Empacadoras
-1	1	6.334	1	80	3
+1	3	12.668	2	120	5

4.5. Desarrollo del Experimento

Para modelar los experimentos a realizar en la simulación se empleó la opción de crear escenarios, que son un grupo de parámetros definidos por el investigador mediante el uso de macros en el modelo. Los escenarios permiten alterar varios parámetros del modelo para correr varias situaciones diferentes sin tener que cambiar directamente el código fuente de la simulación.

Como se está trabajando con un Diseño 2^5 , se requiere crear 32 escenarios diferentes donde cambia cada parámetro o factor según el nivel superior o inferior previamente establecido. Los escenarios

creados con sus respectivos parámetros modificados se presentan en la tabla siguiente.

TABLA 17
PARÁMETROS DE LOS ESCENARIOS CREADOS

A	B	C	D	E	Número Cortadoras	Velocidad Cambio	Capacidad Tochera	Número Rumas	Número Empacadoras
-	-	-	-	-	1	6.334	1	80	3
+	-	-	-	-	3	6.334	1	80	3
-	+	-	-	-	1	12.668	1	80	3
+	+	-	-	-	3	12.668	1	80	3
-	-	+	-	-	1	6.334	2	80	3
+	-	+	-	-	3	6.334	2	80	3
-	+	+	-	-	1	12.668	2	80	3
+	+	+	-	-	3	12.668	2	80	3
-	-	-	+	-	1	6.334	1	120	3
+	-	-	+	-	3	6.334	1	120	3
-	+	-	+	-	1	12.668	1	120	3
+	+	-	+	-	3	12.668	1	120	3
-	-	+	+	-	1	6.334	2	120	3
+	-	+	+	-	3	6.334	2	120	3
-	+	+	+	-	1	12.668	2	120	3
+	+	+	+	-	3	12.668	2	120	3
-	-	-	-	+	1	6.334	1	80	5
+	-	-	-	+	3	6.334	1	80	5
-	+	-	-	+	1	12.668	1	80	5
+	+	-	-	+	3	12.668	1	80	5
-	-	+	-	+	1	6.334	2	80	5
+	-	+	-	+	3	6.334	2	80	5
-	+	+	-	+	1	12.668	2	80	5
+	+	+	-	+	3	12.668	2	80	5
-	-	-	+	+	1	6.334	1	120	5
+	-	-	+	+	3	6.334	1	120	5
-	+	-	+	+	1	12.668	1	120	5
+	+	-	+	+	3	12.668	1	120	5
-	-	+	+	+	1	6.334	2	120	5
+	-	+	+	+	3	6.334	2	120	5
-	+	+	+	+	1	12.668	2	120	5
+	+	+	+	+	3	12.668	2	120	5

A pesar que uno de los requisitos del diseño de experimentos, así como de cualquier otro método estadístico, es la aleatorización, en este caso de los experimentos, ya que ayuda a evitar el error de los resultados eliminando los efectos de factores extraños que no son parte del experimento; en este caso, eso no presenta mayor problema, ya que en el modelo de simulación se asegura que no influye ningún otro parámetro o factor más que los previamente diseñados y determinados en cada escenario, además cada réplica del experimento se genera utilizando diferentes semillas generadoras de números aleatorios, lo que permite tener una incertidumbre igual a la realidad y una independencia entre los resultados obtenidos de un mismo escenario, manteniendo los experimentos en el orden establecido.

El modelo empleado para la experimentación tiene los mismos requerimientos de recursos, variables y secuencia lógica que el original, así como los mismos turnos de trabajo de cada máquina, para programadas y no programadas y un mismo nivel de warm-up que los establecidos en el capítulo anterior. Por lo que simplemente se deben correr los escenarios establecidos, obteniendo así tres valores de throughput de cajas empacadas producidas en una semana, las cuales se presentan en la tabla posterior.

TABLA 18
RESULTADOS REPLICADOS DE CADA ESCENARIO #1

A	B	C	D	E	TH de Cajas Empacadas		
					Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
-	-	-	-	-	1060	820	1120
+	-	-	-	-	1760	1920	1920
-	+	-	-	-	800	960	1120
+	+	-	-	-	1600	1760	1380
-	-	+	-	-	960	960	960
+	-	+	-	-	1860	1540	1760
-	+	+	-	-	1120	860	800
+	+	+	-	-	1600	1920	1760
-	-	-	+	-	1060	820	1120
+	-	-	+	-	1760	1920	1920
-	+	-	+	-	800	960	1120
+	+	-	+	-	1600	1760	1380
-	-	+	+	-	960	960	960
+	-	+	+	-	1860	1540	1760
-	+	+	+	-	1120	860	800
+	+	+	+	-	1600	1920	1760
-	-	-	-	+	1120	960	960
+	-	-	-	+	1760	1860	1920
-	+	-	-	+	800	960	960
+	+	-	-	+	1920	1760	1920
-	-	+	-	+	1120	960	800
+	-	+	-	+	1920	1920	1760
-	+	+	-	+	860	1120	800
+	+	+	-	+	1600	1760	1920
-	-	-	+	+	1120	960	960
+	-	-	+	+	1760	1860	1920
-	+	-	+	+	800	960	960
+	+	-	+	+	1920	1760	1920
-	-	+	+	+	1120	960	800
+	-	+	+	+	1920	1920	1760
-	+	+	+	+	860	1120	800
+	+	+	+	+	1600	1760	1920

4.6. Análisis Estadístico

Con ayuda del software Minitab 14 se calcularon las estimaciones de cada efecto, las cuales se presentan a continuación.

TABLA 19
ESTIMACIONES DE EFECTOS #1

EFECTOS	ESTIMACIONES
MEDIA	1370
A	826,667
B	-68,333
C	-20
D	0
E	46,667
AB	-15
AC	6,667
AD	0
AE	56,667
BC	35
BD	0
BE	11,667
CD	0
CE	-10
DE	0
ABC	15
ABD	0
ABE	28,333
ACD	0
ACE	-20
ADE	0
BCD	0
BCE	-48,333
BDE	0
CDE	0
ABCD	0
ABCE	-65
ABDE	0
ACDE	0
BCDE	0
ABCDE	0

Como ayuda para visualizar de mejor manera los resultados y poder tomar decisiones correctas sobre cuales son los efectos activos en el experimento, se utilizó el Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados.

Los resultados obtenidos al admitir todos los posibles efectos del experimento, produjo la siguiente información.

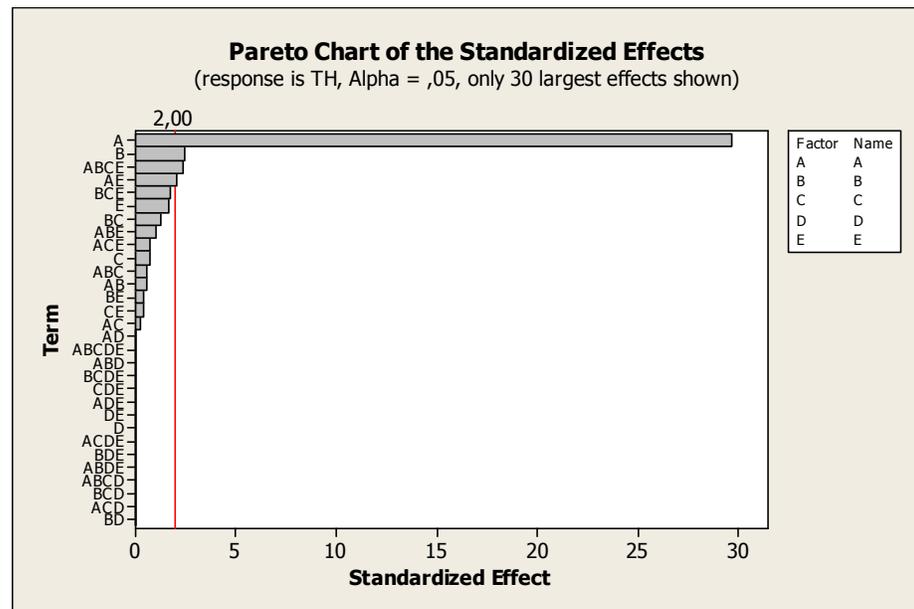


FIGURA 4.1. DIAGRAMA DE PARETO #1

Según este gráfico se puede notar claramente la influencia que tiene el factor A, Número de Cortadoras, sobre la variable respuesta. Además que existen varios efectos que no influyen de ninguna

forma; entre estos, un efecto principal, el factor D, Número de Rumas. Para tomar decisiones con mayor certeza, se analiza la tabla de efectos estimados, con su respectivo valor p; y como el valor α determinado para este estudio es de 0,05, para todo efecto cuyo valor p sea mayor a este, se considera no significativo en los resultados del experimento.

TABLA 20

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #1

Estimated Effects and Coefficients for TH
(coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1370,00	13,93	98,38	0,000
A	826,67	413,33	13,93	29,68	0,000
B	-68,33	-34,17	13,93	-2,45	0,017
C	-20,00	-10,00	13,93	-0,72	0,475
D	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
E	46,67	23,33	13,93	1,68	0,099
A*B	-15,00	-7,50	13,93	-0,54	0,592
A*C	6,67	3,33	13,93	0,24	0,812
A*D	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
A*E	56,67	28,33	13,93	2,03	0,046
B*C	35,00	17,50	13,93	1,26	0,213
B*D	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
B*E	11,67	5,83	13,93	0,42	0,677
C*D	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
C*E	-10,00	-5,00	13,93	-0,36	0,721
D*E	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
A*B*C	15,00	7,50	13,93	0,54	0,592
A*B*D	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
A*B*E	28,33	14,17	13,93	1,02	0,313
A*C*D	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
A*C*E	-20,00	-10,00	13,93	-0,72	0,475
A*D*E	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
B*C*D	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
B*C*E	-48,33	-24,17	13,93	-1,74	0,087
B*D*E	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
C*D*E	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
A*B*C*D	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
A*B*C*E	-65,00	-32,50	13,93	-2,33	0,023
A*B*D*E	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
A*C*D*E	0,00	0,00	13,93	0,00	1,000
B*C*D*E	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000
A*B*C*D*E	-0,00	-0,00	13,93	-0,00	1,000

S = 136,443 R-Sq = 93,41% R-Sq(adj) = 90,22%

Considerando sólo las interacciones de 5, 4 y 3 factores, que de por sí, son interacciones en las que existe una probabilidad muy ligera de que realmente ocurran e influyan en los resultados, como se puede notar analizando la Tabla 20, sus valores P son muy superiores al valor α determinado, llegando muchas veces a uno, es decir, no son efectos influyentes en este experimento por lo que serán descartados para el siguiente análisis, a excepción de una interacción de cuatro factores ABCE, “Número de Cortadoras, Velocidad de Cambio, Capacidad Tochera y Número de Empacadoras” que parece ser un efecto influyente en los resultados.

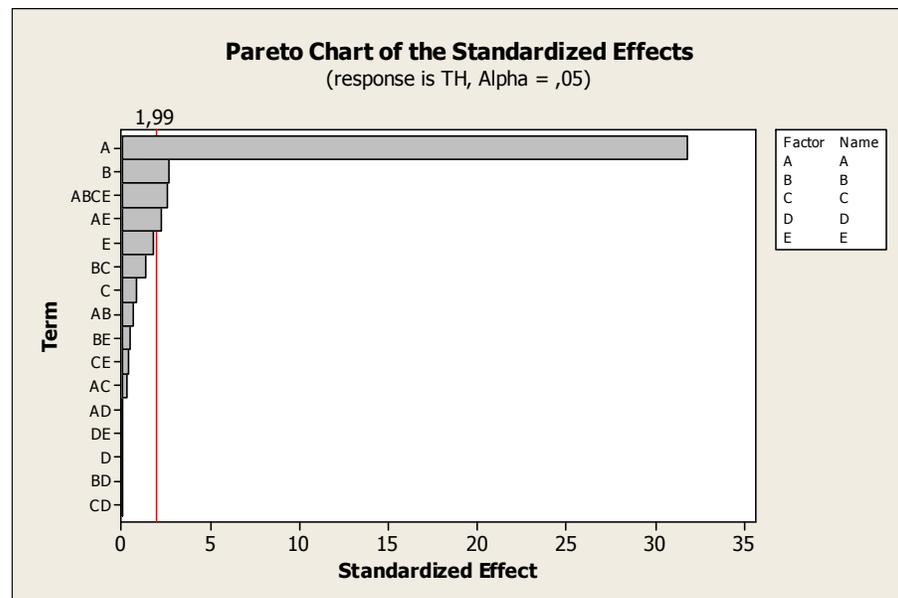


FIGURA 4.2. DIAGRAMA DE PARETO #2

TABLA 21

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #2

Estimated Effects and Coefficients for TH (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1370,00	13,00	105,38	0,000
A	826,67	413,33	13,00	31,79	0,000
B	-68,33	-34,17	13,00	-2,63	0,010
C	-20,00	-10,00	13,00	-0,77	0,444
D	0,00	0,00	13,00	0,00	1,000
E	46,67	23,33	13,00	1,79	0,077
A*B	-15,00	-7,50	13,00	-0,58	0,566
A*C	6,67	3,33	13,00	0,26	0,798
A*D	-0,00	-0,00	13,00	-0,00	1,000
A*E	56,67	28,33	13,00	2,18	0,032
B*C	35,00	17,50	13,00	1,35	0,182
B*D	0,00	0,00	13,00	0,00	1,000
B*E	11,67	5,83	13,00	0,45	0,655
C*D	-0,00	-0,00	13,00	-0,00	1,000
C*E	-10,00	-5,00	13,00	-0,38	0,702
D*E	-0,00	-0,00	13,00	-0,00	1,000
A*B*C*E	-65,00	-32,50	13,00	-2,50	0,014

S = 127,379 R-Sq = 92,91% R-Sq(adj) = 91,47%

Observando el Gráfico 4.2 y la Tabla 21, se procede a analizar los efectos de dos interacciones, de los cuales sólo se puede considerar significativo al efecto AE, “Número de Cortadoras y Número de Empacadoras”, el resto tiene un valor P por encima de 0,05 que es el valor de α empleado en este estudio, por lo que serán eliminados para el siguiente análisis.

Los resultados obtenidos al eliminar los efectos no influyentes de las interacciones de dos se obtuvieron los resultados que se presentan en la gráfica y tabla que se encuentra a continuación.

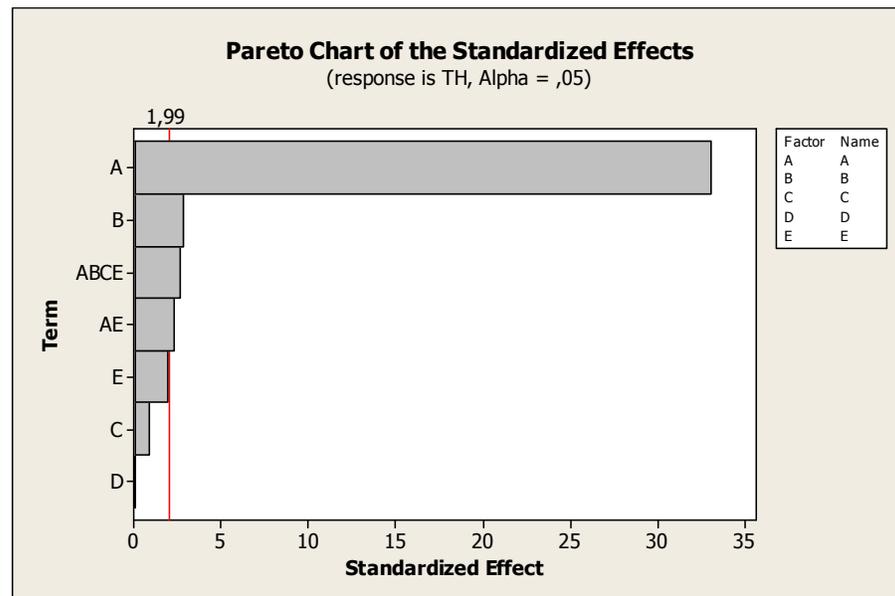


FIGURA 4.3. DIAGRAMA DE PARETO #3

TABLA 22

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #3

Estimated Effects and Coefficients for TH (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1370,00	12,52	109,46	0,000
A	826,67	413,33	12,52	33,02	0,000
B	-68,33	-34,17	12,52	-2,73	0,008
C	-20,00	-10,00	12,52	-0,80	0,426
D	0,00	0,00	12,52	0,00	1,000
E	46,67	23,33	12,52	1,86	0,066
A*E	56,67	28,33	12,52	2,26	0,026
A*B*C*E	-65,00	-32,50	12,52	-2,60	0,011

S = 122,629 R-Sq = 92,68% R-Sq(adj) = 92,10%

En este caso los factores principales inertes o no influyentes en la variable respuesta son C, D y E; “Capacidad Tochera”, “Número de Rumas” y “Número de Empacadoras”, respectivamente. De estos

factores, C y E, a pesar de no influir por sí solos a la variable respuesta, en conjunto con los efectos principales activos A y B, “Número de Cortadoras” y “Velocidad de Cambio”, respectivamente, si influyen a la variable respuesta, a través de la interacción ABCE; por lo que no podrían ser eliminados. Esto no ocurre con el factor principal D, ya que no influye por sí mismo ni mediante una interacción con otros factores, por lo que puede ser eliminado del análisis obteniendo así los siguientes resultados finales.

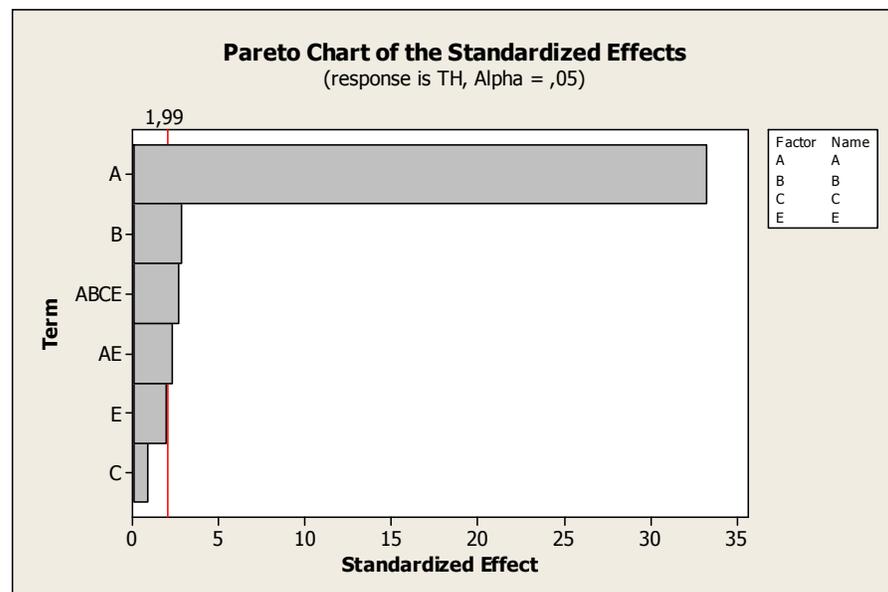


FIGURA 4.4. DIAGRAMA DE PARETO #4

TABLA 23

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #4

Estimated Effects and Coefficients for TH (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1370,00	12,45	110,08	0,000
A	826,67	413,33	12,45	33,21	0,000
B	-68,33	-34,17	12,45	-2,75	0,007
C	-20,00	-10,00	12,45	-0,80	0,424
E	46,67	23,33	12,45	1,87	0,064
A*E	56,67	28,33	12,45	2,28	0,025
A*B*C*E	-65,00	-32,50	12,45	-2,61	0,011

S = 121,938 R-Sq = 92,68% R-Sq(adj) = 92,19%

Una vez determinados los factores activos y los efectos influyentes en la variable respuesta, se deben definir los niveles de cada uno de los factores. A pesar que A y B son factores activos, existe un efecto de cuatro factores influyente que contiene a estos dos factores y una interacción de dos factores que contiene al factor activo A; por lo que para elegir los mejores niveles no se puede escoger según lo que cada factor influye individualmente sobre el TH de cajas empacadas semanalmente, sino hay que escoger los niveles según la mejor influencia que tenga la interacción sobre la variable de respuesta. En este caso hay que analizar las medias de los efectos de la interacción ABCE, para escoger el mayor valor entre ellos, ya que lo que se desea es maximizar la variable respuesta. Los datos necesarios para este análisis se encuentran en la Tabla 24 de Medias de los Efectos Seleccionados #1.

TABLA 24
MEDIAS DE EFECTOS SELECCIONADOS #1

Least Squares Means for TH					
		Mean	SE	Mean	
A					
-1		956,7		17,60	
1		1783,3		17,60	
B					
-1		1404,2		17,60	
1		1335,8		17,60	
C					
-1		1380,0		17,60	
1		1360,0		17,60	
E					
-1		1346,7		17,60	
1		1393,3		17,60	
A*E					
-1	-1	961,7		24,89	
1	-1	1731,7		24,89	
-1	1	951,7		24,89	
1	1	1835,0		24,89	
A*B*C*E					
-1	-1	-1	-1	973,3	32,93
1	-1	-1	-1	1808,3	32,93
-1	1	-1	-1	970,0	32,93
1	1	-1	-1	1675,0	32,93
-1	-1	1	-1	1018,3	32,93
1	-1	1	-1	1723,3	32,93
-1	1	1	-1	885,0	32,93
1	1	1	-1	1720,0	32,93
-1	-1	-1	1	1028,3	32,93
1	-1	-1	1	1846,7	32,93
-1	1	-1	1	895,0	32,93
1	1	-1	1	1843,3	32,93
-1	-1	1	1	943,3	32,93
1	-1	1	1	1891,7	32,93
-1	1	1	1	940,0	32,93
1	1	1	1	1758,3	32,93

Partiendo de las medias obtenidas del efecto ABCE, se puede observar que el mayor TH se obtiene cuando el Factor A se encuentra en su nivel superior, 3 cortadoras, el Factor B se encuentra en su nivel inferior, una media de cambio de utillajes de 6.334 minutos, el Factor C en su nivel superior, una tochera con capacidad para dos tochos y el factor E en su nivel superior, 5

empacadoras; obteniendo así una media de 1891,7 cajas empacadas por semana. De igual manera el factor A cuando interactúa con E, presenta un mayor desempeño cuando ambos están en sus niveles superiores, como se definió anteriormente. Y el factor D, en este caso puede ser cualquier valor de los dos niveles escogidos ya que no influye en los resultados; o se puede tomar otra factor de decisión como el costo, ya que es preferible mantener 80 plataformas para armar las rumas que 120 de ellas, se puede escoger sin problema el nivel inferior para este factor, obteniendo así los resultados que se presentan en la siguiente tabla.

TABLA 25

NIVELES QUE MAXIMIZAN EL TH DE CAJAS EMPACADAS #1

NIVELES ESCOGIDOS	
A +	3 Máquinas Cortadoras
B -	6.334 minutos en Cambio de Utillaje
C +	Tochera con capacidad de 2
D -	80 Plataformas para Rumas
E +	5 Estaciones de Empaque

Al estudiar estos resultados podemos notar claramente que es mucho más conveniente tener, por ejemplo, tres cortadoras en lugar de una o cinco estaciones de empaque en lugar de tres, pero no se ha podido comprobar si es necesario tener precisamente tres cortadoras, o sólo con dos de ellas se lograría un desempeño

similar; al igual que con las estaciones de empaque, es probable que manteniendo sólo cuatro estaciones consiga un desempeño igual o inclusive mejor que si utilizo cinco estaciones de empaque.

Debido a que los experimentos son realizados en un modelo de simulación, podemos aprovechar la ventaja que realizar los experimentos no representa un costo significativo, ni una utilización de tiempo ni recursos considerable, por lo que es posible realizar un nuevo experimento probando los niveles que no han sido tomados en cuenta. Además, esto es una solución factible ya que los niveles de estos factores en cuestión no se encuentran tan espaciados entre sí, por lo que no existe gran dificultad por incertidumbre al escoger que otros niveles probar.

Para los factores B y C, “Velocidad de Cambio” y “Capacidad Tochera” respectivamente, sólo existen los dos niveles previamente establecidos; el factor D, “Número de Rumas” además de que posee niveles bastante espaciados entre sí y por ende varias posibilidades que serían difícilmente analizadas con un diseño de experimentos, este es un factor no influyente. Pero del factor A, “Número de Cortadoras”, se encontró como mejor nivel el utilizar tres cortadoras; ya que los recursos no permiten utilizar cuatro cortadoras, queda la

incertidumbre de probar el desempeño de la línea con dos cortadoras. Así mismo, el factor E, “Número de Empacadoras”, ya que el nivel resultante fue de cinco estaciones en lugar de tres, no es necesario probar con una o dos estaciones de trabajo pero sí sería necesario probar con cuatro estaciones de empaque. Por esta razón, se realizaron nuevos experimentos empleando la misma variable respuesta y los mismos factores, pero modificando los niveles de algunos de ellos.

En este experimento se probará el factor Número de Cortadoras (A) con un nivel bajo de 2 cortadoras y un nivel alto de 3 cortadoras, el factor Velocidad de Cambio (B) con un nivel bajo de 6.334 minutos y un nivel alto de 12.668 minutos por cambio de utillajes, el factor Capacidad Tochera (C) con un nivel bajo de uno y un nivel alto de dos tochos, el factor Número de Rumas (D) con un nivel bajo de 80 plataformas y un nivel alto de 120 plataformas para rumas, y por último el factor Número de Empacadoras (E) con un nivel bajo de cuatro estaciones y un nivel alto de cinco estaciones de trabajo. Al realizar los experimentos bajo estas condiciones y replicando cada uno de ellos tres veces, se obtuvieron los resultados que se muestran en la Tabla 26.

TABLA 26
RESULTADOS REPLICADOS DE CADA ESCENARIO #2

A	B	C	D	E	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3
-	-	-	-	-	2160	1760	1760
+	-	-	-	-	1920	1760	1920
-	+	-	-	-	1920	1920	1760
+	+	-	-	-	1600	1760	1600
-	-	+	-	-	1920	1920	1920
+	-	+	-	-	1760	2060	1760
-	+	+	-	-	1760	1760	1920
+	+	+	-	-	1760	1920	1760
-	-	-	+	-	2160	1760	1760
+	-	-	+	-	1920	1760	1920
-	+	-	+	-	1920	1920	1760
+	+	-	+	-	1600	1760	1600
-	-	+	+	-	1920	1920	1920
+	-	+	+	-	1760	2060	1760
-	+	+	+	-	1760	1760	1920
+	+	+	+	-	1760	1920	1760
-	-	-	-	+	1920	1600	1920
+	-	-	-	+	1760	1860	1920
-	+	-	-	+	1920	1760	1600
+	+	-	-	+	1920	1760	1920
-	-	+	-	+	2080	1760	1760
+	-	+	-	+	1920	1920	1760
-	+	+	-	+	1600	1600	1480
+	+	+	-	+	1600	1760	1920
-	-	-	+	+	1920	1600	1920
+	-	-	+	+	1760	1860	1920
-	+	-	+	+	1920	1760	1600
+	+	-	+	+	1920	1760	1920
-	-	+	+	+	2080	1760	1760
+	-	+	+	+	1920	1920	1760
-	+	+	+	+	1600	1600	1480
+	+	+	+	+	1600	1760	1920

Con estos resultados se realizó el análisis de Diseño Experimental, similar al realizado anteriormente ya que es igualmente un Diseño 2^5 y se obtuvieron las siguientes estimaciones de los efectos.

TABLA 27
ESTIMACIONES DE EFECTOS #2

EFFECTOS	ESTIMACIONES
MEDIA	1814,167
A	5
B	-105
C	-13,333
D	0
E	-43,333
AB	18,333
AC	30
AD	0
AE	80
BC	-36,667
BD	0
BE	-6,667
CD	0
CE	-45
DE	0
ABC	46,667
ABD	0
ABE	50
ACD	0
ACE	-15
ADE	0
BCD	0
BCE	-58,333
BDE	0
CDE	0
ABCD	0
ABCE	-15
ABDE	0
ACDE	0
BCDE	0
ABCDE	0

Si se compara las estimaciones de la media de estos experimentos, con la media de los resultados experimentales del Diseño anterior, que se encuentra en la Tabla 19, Estimaciones de Efectos #1, se

puede notar claramente que en este diseño se obtuvo una media más elevada de la variable respuesta, por lo que podría suceder que aquí se encuentre una solución aún mejor que el caso pasado. Para comprobarlo se realiza el análisis del Diagrama de Pareto de Efectos Estandarizados y los Valores P de los efectos seleccionados.

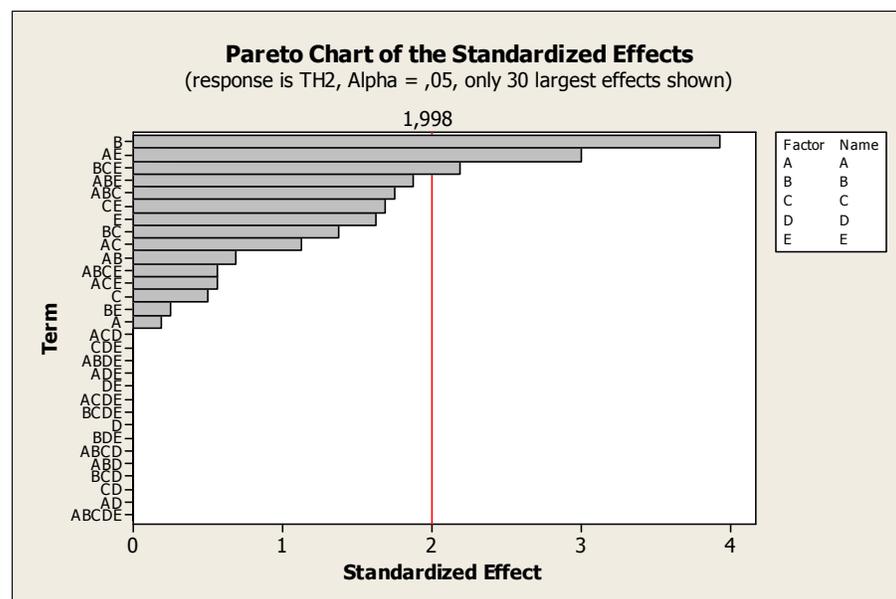


FIGURA 4.5. DIAGRAMA DE PARETO #5

Se puede observar claramente que existen una gran cantidad de efectos que no influyen en la variable de respuesta, lo cual será analizado de mejor manera con los datos de la tabla que se expone a continuación.

TABLA 28

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #5

Estimated Effects and Coefficients for TH2 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1814,17	13,35	135,86	0,000
A	5,00	2,50	13,35	0,19	0,852
B	-105,00	-52,50	13,35	-3,93	0,000
C	-13,33	-6,67	13,35	-0,50	0,619
D	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
E	-43,33	-21,67	13,35	-1,62	0,110
A*B	18,33	9,17	13,35	0,69	0,495
A*C	30,00	15,00	13,35	1,12	0,265
A*D	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
A*E	80,00	40,00	13,35	3,00	0,004
B*C	-36,67	-18,33	13,35	-1,37	0,175
B*D	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
B*E	-6,67	-3,33	13,35	-0,25	0,804
C*D	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
C*E	-45,00	-22,50	13,35	-1,69	0,097
D*E	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
A*B*C	46,67	23,33	13,35	1,75	0,085
A*B*D	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
A*B*E	50,00	25,00	13,35	1,87	0,066
A*C*D	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
A*C*E	-15,00	-7,50	13,35	-0,56	0,576
A*D*E	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
B*C*D	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
B*C*E	-58,33	-29,17	13,35	-2,18	0,033
B*D*E	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
C*D*E	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
A*B*C*D	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
A*B*C*E	-15,00	-7,50	13,35	-0,56	0,576
A*B*D*E	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
A*C*D*E	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000
B*C*D*E	-0,00	-0,00	13,35	-0,00	1,000
A*B*C*D*E	0,00	0,00	13,35	0,00	1,000

S = 130,831 R-Sq = 41,73% R-Sq(adj) = 13,50%

Todos los efectos que tienen un valor P mayor al valor de α determinado, será eliminado del experimento, primero se eliminan los efectos de 5 factores, después los de 4 y así sucesivamente hasta llegar a los factores principales; ya que este procedimiento es similar al realizado anteriormente, se presentarán los resultados finalmente obtenidos.

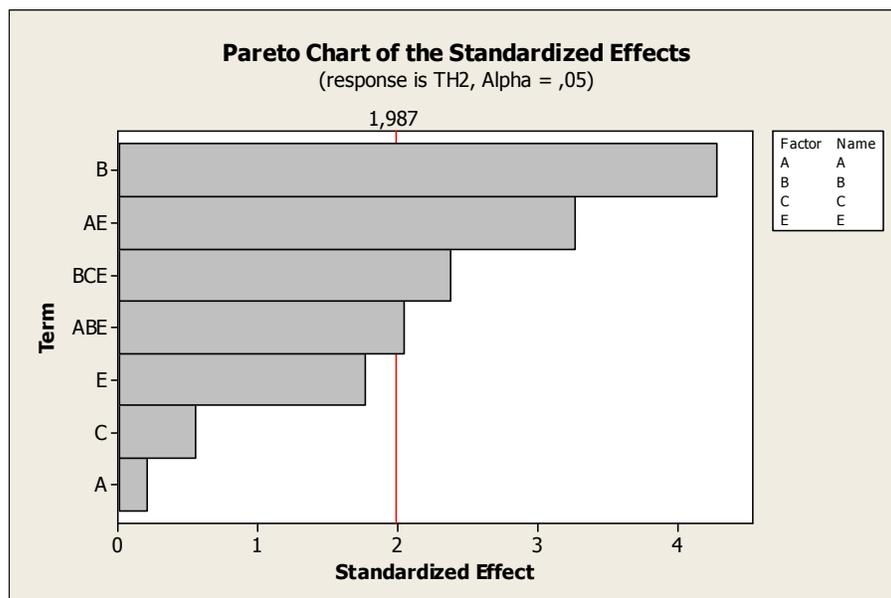


FIGURA 4.6. GRÁFICO DE PARETO #6

TABLA 29

VALORES P DE EFECTOS SELECCIONADOS #6

Estimated Effects and Coefficients for TH2 (coded units)

Term	Effect	Coef	SE Coef	T	P
Constant		1814,17	12,26	147,95	0,000
A	5,00	2,50	12,26	0,20	0,839
B	-105,00	-52,50	12,26	-4,28	0,000
C	-13,33	-6,67	12,26	-0,54	0,588
E	-43,33	-21,67	12,26	-1,77	0,081
A*E	80,00	40,00	12,26	3,26	0,002
A*B*E	50,00	25,00	12,26	2,04	0,044
B*C*E	-58,33	-29,17	12,26	-2,38	0,020

S = 120,139 R-Sq = 32,44% R-Sq(adj) = 27,06%

A pesar que los factores A, C y E no son influyentes por si mismo, estos son influyentes cuando interactúan entre sí y en conjunto con el factor activo B, por lo que no pueden ser eliminados.

TABLA 30
MEDIAS DE EFECTOS SELECCIONADOS #2

Least Squares Means for TH2

	Mean	SE Mean
A		
-1	1812	17,34
1	1817	17,34
B		
-1	1867	17,34
1	1762	17,34
C		
-1	1821	17,34
1	1808	17,34
E		
-1	1836	17,34
1	1793	17,34
A*E		
-1 -1	1873	24,52
1 -1	1798	24,52
-1 1	1750	24,52
1 1	1835	24,52
A*B*E		
-1 -1 -1	1901	30,03
1 -1 -1	1876	30,03
-1 1 -1	1846	30,03
1 1 -1	1721	30,03
-1 -1 1	1828	30,03
1 -1 1	1863	30,03
-1 1 1	1673	30,03
1 1 1	1808	30,03
B*C*E		
-1 -1 -1	1924	27,42
1 -1 -1	1761	27,42
-1 1 -1	1853	27,42
1 1 -1	1806	27,42
-1 -1 1	1823	27,42
1 -1 1	1776	27,42
-1 1 1	1868	27,42
1 1 1	1704	27,42

Ya que existen interacciones de tres y dos factores influyentes a la variable respuesta, se debe analizar las mejores combinaciones de estos y no individualmente el nivel de cada factor. Observando la Tabla 30, Medias de Efectos Seleccionados #2, se puede notar que el máximo TH de cajas empacadas para el efecto BCE es cuando

todos sus niveles son bajos, así mismo ocurre con el efecto ABE y AE, en los que se encuentra un mejor desempeño cuando todos sus factores está a nivel bajo. En cuanto al factor D, en este caso tampoco influyó de ninguna manera a la variable respuesta, por lo que por cuestiones de costos se lo puede mantener igualmente en el nivel más bajo. Así se obtiene que la mejor combinación para estos factores, es cuando se encuentran en el nivel más bajo de este experimento, lo cual queda expresado en la Tabla 31.

TABLA 31

NIVELES QUE MAXIMIZAN EL TH DE CAJAS EMPACADAS #2

NIVELES ESCOGIDOS	
A -	2 Máquinas Cortadoras
B -	6.334 minutos en Cambio de Utillaje
C -	Tochera con capacidad de 1
D -	80 Plataformas para Rumas
E -	4 Estaciones de Empaque

4.7. Evaluación de Resultados del Diseño de Experimentos

En el primer experimento se obtuvo una combinación de niveles de los factores que maximizaba la variable respuesta a un promedio de 1793.6 cajas empacadas/semana, cuando se utilizan 3 Máquinas Cortadoras, 6.334 minutos en Cambios de Utillaje, una Tochera con capacidad para dos tochos, 80 Plataformas para Rumas y 5

Estaciones de Empaque. En el segundo experimento se obtuvo en cambio, un media de 1797.7 cajas empacadas/semana, empleando 2 Máquinas Cortadoras, 6.334 minutos en Cambios de Utillaje, una Tochera con capacidad para un solo tochos, 80 Plataformas para Rumas y 4 Estaciones de Empaque, como se puede apreciar en la Tabla 32; y si se observan los intervalos de confianza de las variables de respuesta obtenidos por la mejor situación de ambos experimentos en la Tabla 33, fácilmente se puede notar que no existe diferencia estadística entre ambas situaciones, por lo que se podría simplemente optar por mantener como mejor situación las del segundo experimento ya que esta representa una menor aplicación de recursos y ahorro en cuanto a inversiones por compra de máquinas o contratación de nuevos operarios.

TABLA 32

CUADRO COMPARATIVO DE RESULTADOS EXPERIMENTALES

EXPERIMENTO 1		EXPERIMENTO 2	
FACTOR / NIVEL	DESCRIPCIÓN	FACTOR / NIVEL	DESCRIPCIÓN
A +	3 Máquinas Cortadoras	A -	2 Máquinas Cortadoras
B -	6.334 min. Cambio Utillaje	B -	6.334 min. Cambio Utillaje
C +	Tochera con capacidad 2	C -	Tochera con capacidad 1
D -	80 Plataformas Rumas	D -	80 Plataformas Rumas
E +	5 Estaciones Empaque	E -	4 Estaciones Empaque
TH	1793.6 cajas/semana	TH	1797.7 cajas/semana

TABLA 33

IC DE LA VARIABLE RESPUESTA

Level	N	Mean	StDev	Individual 95% CIs For Mean Based on Pooled StDev
Experimento 1	44	1793,6	148,3	(-----*-----)
Experimento 2	44	1797,7	152,4	(-----*-----)

1750 1775 1800 1825

Si el primer experimento hubiese sido realizado realmente en la fábrica de electrodos para soldar, no hubiera habido la posibilidad de emplear más recursos para la realizar el segundo experimento, lo que provocaría la toma de una decisión errónea.

Pero este problema surgió en primera instancia por aplicar sólo dos niveles por cada factor, y resulta evidente que los diseños en los que cada factor sólo varía a dos niveles, tienen un grave inconveniente: sólo permiten estudiar relaciones lineales. Aunque este inconveniente queda en parte compensado dado que el investigador es quien escoge los niveles, por lo que siempre puede escogerlos lo suficientemente cercanos como para que una recta sea una buena aproximación a la verdadera forma de la respuesta en la región de interés. Ahora se puede aprovechar también el beneficio de los modelos de simulación para realizar la cantidad de experimentos y pruebas que se deseen, aunque con la limitación de escoger niveles relativamente cercanos. El problema renace cuando existen pruebas que se desean hacer con niveles necesariamente distantes, como

es el caso de factor D, "Número de Rumas", ya que es muy probable que la cantidad de plataformas necesarias sea incluso menor al nivel inferior establecido, 80 plataformas, sin que altere al desempeño normal del sistema. Pero probar 80 diferentes niveles posibles que existen entre 1 y 80 plataformas mediante un diseño de experimentos, se vuelve tedioso e injustificable. Para esto se puede contar con la herramienta de optimización una vez reducida la cantidad de factores de interés, lo cuál se llevará a cabo en el siguiente capítulo de este estudio.

CAPÍTULO 5

5. OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO

5.1. Selección de Factores Críticos

El factor crítico es el factor seleccionado como variable para optimizar la función objetivo seleccionada; no necesariamente tiene que ser el factor activo más influyente a la variable respuesta que se encontró en el diseño de experimentos, sino aquel factor que presente una mayor cantidad de niveles de interés que aún se desean probar. El diseño de experimentos sirve como pauta para saber escoger un rango más conveniente de niveles del factor escogido para realizar la optimización. La optimización con SimRunner es una herramienta de la que se desea aprovechar la capacidad de probar un rango de valores de cierta variable escogida, para maximizar o minimizar una variable de respuesta que mide el desempeño del sistema.

En este estudio la variable escogida es el factor D, “Número de Rumas”, a pesar que no fue ni siquiera un factor influyente para la variable de respuesta seleccionada, existe una gran cantidad de niveles que no han sido estudiados. Es probable que entre los niveles previamente escogidos para el diseño de experimentos no exista mayor diferencia en el desempeño de la línea, pero puede encontrarse un valor fuera de este rango que sí influya en el desempeño. De lo contrario, simplemente puede encontrarse el mínimo valor posible que no altere; en este caso, que no disminuya el TH de cajas empacadas/semana.

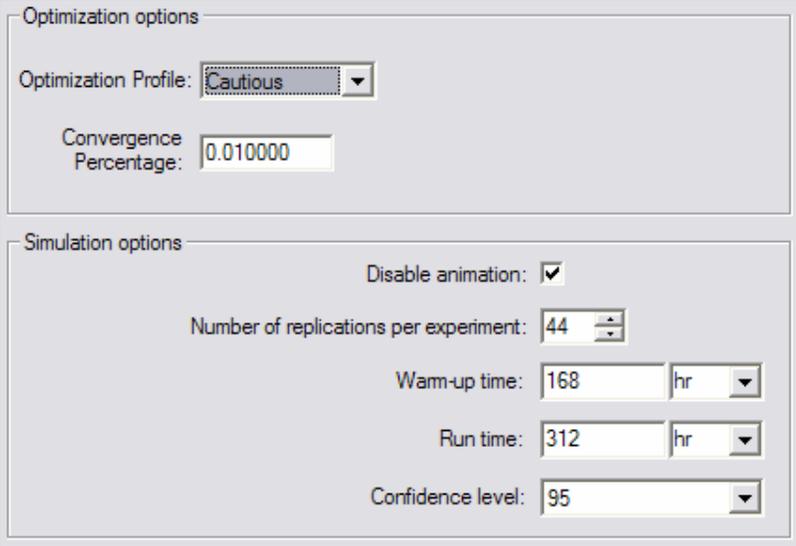
Para escoger el rango de valores a probar en el optimizador, hay que partir de los resultados obtenidos en el diseño de experimentos. Se encontró que no existe diferencia entre tener 80 o 120 plataformas para armar rumas; ya que no existe tal diferencia, por costos se escogió el menor valor, es decir, 80 plataformas. Pero es posible que se encuentre un valor menor a éste permitiendo que la fábrica tenga un mayor ahorro y una mejor organización por tener menor cantidad de producto en proceso sin tener que alterar su productividad. Por lo tanto se escogió un rango que va de 60 a 80 plataformas, lo cual indica que se realizarán 21 experimentos para encontrar el valor óptimo.

5.2. Optimización a través de SimRunner

El primer paso para la optimización a través de SimRunner es escoger y seleccionar la función objetivo o variable de respuesta y determinar si se desea maximizarlo o minimizarlo; en este caso se desea maximizar el TH de cajas empacadas/semana que se lo mide a través de los datos de la columna Total Changes de la Variable “CONT_CAJAS” en la hoja de respuestas de ProModel. Después se selecciona el factor de entrada; es decir, la variable que será modificada hasta encontrar el valor que maximice la función objetivo. Este factor de entrada tiene que estar establecido mediante una macro que tenga el rango definido para las pruebas a realizar; en este caso se selecciona la macro “NUM_RUMAS” correspondiente al factor D, que tiene un rango establecido desde 60 hasta 80 plataformas para armar las rumas.

Es preciso indicar que las otras variables o factores escogidos quedaron establecidos en los niveles previamente seleccionados como resultado del diseño de experimentos, es decir, las pruebas serán realizadas con 2 máquinas cortadoras, 6.334 minutos en cambio de utillajes, la tochera con capacidad de uno y cuatro estaciones de empaque.

Una vez seleccionadas las variables, se colocan los datos necesarios para la realización de pruebas. Primero se escoge el perfil de la optimización, el cual puede ser: Cauteloso, Moderado o Agresivo. De esto depende el tamaño de la población, que será utilizado para los experimentos, lo cual define el número de soluciones que evaluará el algoritmo de optimización. Una población pequeña de evaluaciones corresponde al perfil de optimización Agresivo, una mediana población corresponde al perfil Moderado y una población grande de evaluaciones corresponde al perfil de optimización Cauteloso; éste último fue escogido para la presente investigación. El porcentaje de convergencia es un valor que SimRunner utiliza de referencia para comparar entre la media de la función objetivo de toda la población y el mejor valor (el más alto) de la función objetivo que se ha logrado obtener hasta ese momento; cuando estos valores tienen una diferencia igual al porcentaje de convergencia escogido, el optimizador se detiene y ya no se realizan más experimentos. Así mismo, se coloca el número de réplicas tiempo de corrida y warm-up, que serán los mismos calculados en la sección 3.3.2, y un nivel de confianza del 95%.



The image shows a software dialog box with two main sections: "Optimization options" and "Simulation options".

Optimization options:

- Optimization Profile: Cautious (selected in a dropdown menu)
- Convergence Percentage: 0.010000 (text input field)

Simulation options:

- Disable animation:
- Number of replications per experiment: 44 (spin button)
- Warm-up time: 168 (text input) hr (dropdown)
- Run time: 312 (text input) hr (dropdown)
- Confidence level: 95 (dropdown)

FIGURA 5.1. OPCIONES SELECCIONADAS PARA OPTIMIZACIÓN

Una vez colocados los datos de entrada como se presenta en la figura anterior se procede a correr el programa de optimización; debido a que se escogió un perfil de optimización Cauteloso se realizó experimentos con cada uno de los niveles que se encontraba entre los rangos escogidos, es decir, 21 experimentos. A continuación se presenta el Gráfico de Medida del Desempeño, donde se observa con línea verde los valores de la función objetivo que se obtuvieron con cada experimento; en este gráfico se puede apreciar la forma en que trabaja este algoritmo, a medida que se realizan los experimentos, se va acercando al valor que maximiza la función objetivo y cada vez va marcando el máximo encontrado con la línea roja hasta que se terminan todos los experimentos.

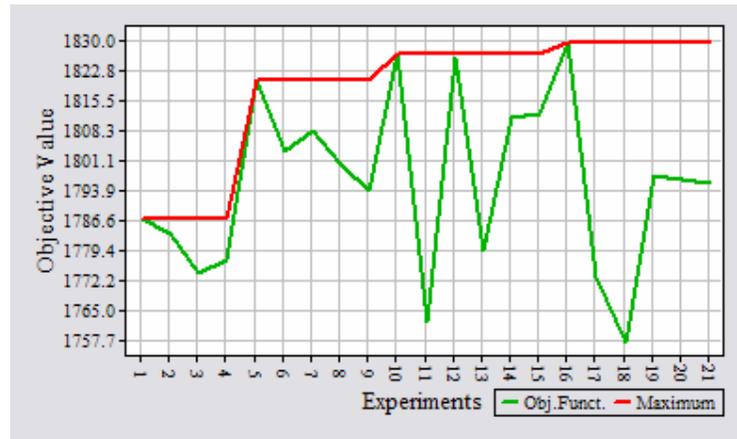


FIGURA 5.2. GRÁFICO DE MEDIDA DEL DESEMPEÑO

Una vez terminadas las pruebas, SimRunner presenta los datos de cada uno de los experimentos realizados en orden jerárquico, colocando en primer lugar al que maximiza la función objetivo hasta el último que dio como resultado al menor valor de la función objetivo. Se puede observar en la figura siguiente que al utilizar 78 rumas se obtiene un TH de 1830 cajas empacadas/semana, muy de cerca están los valores obtenidos con 62 y 77 rumas.

Convergence Status

Phase 1: Phase 2:

Generation: 2 Experiment: 21

Optimization Converged

Experiment	Objective Function	CONT_CAJA: Total Changes	NUM_RUMAS	Low CI	Hi CI
16	1830.000	1830.000	78.000	1782.151	1877.8
10	1827.273	1827.273	62.000	1789.830	1864.7
12	1826.364	1826.364	77.000	1785.505	1867.2
5	1820.909	1820.909	79.000	1779.765	1862.0
15	1812.727	1812.727	61.000	1775.875	1849.5
14	1811.818	1811.818	71.000	1756.877	1866.7
7	1808.636	1808.636	60.000	1774.286	1842.9
6	1803.636	1803.636	73.000	1759.500	1847.7
8	1800.455	1800.455	72.000	1755.711	1845.1
19	1797.727	1797.727	80.000	1752.695	1842.7
20	1796.818	1796.818	68.000	1758.840	1834.7
21	1795.909	1795.909	76.000	1749.787	1842.0
9	1794.091	1794.091	65.000	1748.840	1839.3
1	1787.727	1787.727	70.000	1744.390	1831.0
2	1784.091	1784.091	69.000	1734.753	1833.4
13	1780.000	1780.000	66.000	1736.987	1823.0
4	1777.727	1777.727	63.000	1733.371	1822.0
3	1774.545	1774.545	64.000	1720.765	1828.3
17	1773.636	1773.636	75.000	1723.886	1823.3
11	1762.727	1762.727	67.000	1722.392	1803.0
18	1757.727	1757.727	74.000	1703.621	1811.8

FIGURA 5.3. RESULTADOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS

5.3. Evaluación de Resultados de la Optimización

Pese a que SimRunner define cuál es el valor que maximiza la variable de respuesta, se debe analizar los primeros valores de la lista ya que el verdadero valor óptimo puede ser diferente al escogido por el programa debido a ciertas limitaciones o conveniencias definidas por el sistema o el personal y gerencia.

Si se observan los tres primeros valores de la lista presentada en la figura 5.3, se puede notar que la función objetivo que se obtiene al utilizar 78, 62 o 77 plataformas es muy similar; es más, si se observan los intervalos de confianza que se encuentran en la columna derecha de la figura, es correcto decir que no existe diferencia estadística entre estos tres valores. Por lo que por conveniencia en cuanto a costos de la fábrica, reducción de producto en proceso y maximización del espacio en planta, es preferible trabajar empleando tan sólo 62 plataformas para rumas de las 100 que actualmente mantienen.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- ✓ Hechos los estudios necesarios mediante las herramientas de Diseño de Experimentos y Optimización, se obtuvo que el mejor escenario que permite maximizar la tasa de producción de cajas empacadas por semana se logra manteniendo los siguientes niveles: 2 Máquinas Cortadoras, cambio de Utillajes de las Cortadoras a un tiempo medio de 6.334 minutos, una sola Tochera con capacidad de uno, 62 Plataformas para rumas de 120 bandejas de electrodos y 4 Estaciones de Empaque. Los únicos factores que difieren de las condiciones usadas actualmente son el tiempo medio de cambio de utillajes que es de 12.668 minutos y la cantidad de plataformas que actualmente tienen para montar 100 rumas. Con estos resultados se puede decir que no es necesario realizar inversiones costosas en cuanto a incremento de maquinaria y personal.

- ✓ Dentro de las posibilidades de cambio de la fábrica, de realizar actualmente una inversión, de incrementar la capacidad de su maquinaria y personal, o de mejorar la organización de la planta; se puede concluir que no existe la posibilidad de incrementar la tasa de producción de cajas empacadas de electrodos por semana, como puede observarse en los resultados obtenidos entre la situación actual y la situación propuesta que se presenta en la Tabla 34; pero se encontraron otros beneficios igualmente favorables para la empresa, como es la reducción del WIP o producto en proceso, ya que se obtiene una misma tasa de producción produciendo 100 rumas o tan sólo 62 rumas de electrodos. Esta reducción de WIP beneficia especialmente en el área de presecado, que es donde más se acumulan las rumas producidas; esto a su vez, beneficia a la fábrica en cuanto a reducción de costos de inventario y mantenimiento de las rumas producidas de más. El costo de cada ruma es de aproximadamente \$1440, por lo que el costo de oportunidad de mantener un WIP de 100 rumas es de \$11289.60, utilizando la tasa de interés pasiva efectiva para un plazo de un año igual a 7.84%, según el Banco Central del Ecuador. El costo de oportunidad de mantener un WIP de 62 rumas es de \$6999.55, lo que implica un ahorro constante \$4290.05. Además de esto, también mejora su organización permitiendo disponer de mayor espacio para un mejor flujo de material

o para que este sea aprovechado para otras actividades. Así mismo, como no es necesario producir tanto, pueden reducirse las cargas horarias de los empleados y disminuir el trabajo en horas extras, lo cual afecta sólo a la empresa. Permitiendo así ahorrar para futuras inversiones y cambios más significativos para obtener mejoras más productivas.

TABLA 34
CUADRO COMPARATIVO ENTRE SITUACIÓN ACTUAL Y PROPUESTA

SITUACIÓN ACTUAL		SITUACIÓN PROPUESTA		BENEFICIO
2 Máquinas Cortadoras		2 Máquinas Cortadoras		Ahorro de \$54720, Costo de Oportunidad igual a \$4290.05
12.668 min. Cambio de Utilaje		6.334 min. Cambio de Utilaje		
Tochera con capacidad de 1		Tochera con capacidad de 1		
100 Plataformas para Rumas		62 Plataformas para Rumas		
4 Estaciones de Empaque		4 Estaciones de Empaque		
TH	1799.7 cajas/semana	TH	1797.7 cajas/semana	

- ✓ El factor más influyente, con gran ventaja con respecto a los demás factores, es el número de cortadoras, pero aún así es más eficiente utilizar dos cortadoras como se ha trabajado hasta el momento, que utilizar tres como se había pensado hacerlo y por lo que incluso se procedió a la compra de una tercera cortadora. Decisión que por no haber sido correctamente estudiada con anterioridad hará que la misma productividad de la fábrica sea ahora más costosa. Porque siendo el número de cortadoras un factor tan influyente, no necesariamente indica que al aumentar en uno la cantidad de

máquinas se genere un gran impacto; es muy probable que el factor influya en niveles más distanciados. Para analizar esto último sería necesario un estudio costo-beneficio, ya que significaría una inversión muy grande.

- ✓ De los resultados encontrados, para los próximos pasos de este estudio, se puede recomendar hacer un estudio de TPM centrado en la aplicación de SMED para las cortadoras, y poder disminuir así el tiempo de cambio de utillajes, ya que existen muchos problemas de organización y asignación de recursos necesarios para realizar los trabajos en las maquinarias. Así mismo, se puede realizar un estudio del WIP que mantiene la fábrica, ya que se pudo observar que no es necesario tener 100 rumas sino tan sólo 62 para maximizar la tasa de producción, lo que indica que existe una cantidad innecesaria de producto en proceso; inclusive podría encontrarse el nivel de WIP óptimo mediante un estudio CONWIP.

- ✓ A pesar que no sería aplicable a la realidad, ya que la fábrica no tiene posibilidad de realizar inversiones fuertes, es recomendable para futuras investigaciones probar niveles más altos para el factor “Número de Cortadoras”, y así comprobar si existe un impacto significativo en el uso de una mayor cantidad de estas maquinarias.

- ✓ Las decisiones para mejorar el desempeño de un sistema no es algo que debe ser tomado a la ligera, a pesar que las exigencias del mercado tan cambiante como el de la actualidad reclame una pronta solución a diferentes problemas que se presentan; si estos no son correctamente estudiados, la empresa es la única que resulta perjudicada. Es por esto que la aplicación de Diseño de Experimentos y Optimización en base a un modelo de Simulación frecuentemente actualizado y validado con respecto al sistema real, permite estudiar diferentes posibilidades de cambios y mejoras, con datos certeros y en muy poco tiempo, con la capacidad de interpretar fácilmente los resultados obtenidos. Lo que permite que estas se conviertan en herramientas de diaria aplicación para fundamentar inclusive las decisiones correctivas que deben ser tomadas con gran prontitud.

- ✓ El principal problema del Diseño de Experimentos es la incapacidad de utilizar un diseño experimental completo y detallado debido a la dificultad de recopilar la información necesaria y de forma adecuada por la cantidad de experimentos que se deberían realizar; pero esto queda resuelto mediante la utilización de un modelo de simulación del sistema. Otro problema del Diseño de Experimentos es que para poder utilizar diseños experimentales fáciles de interpretar, es preferible estudiar la menor cantidad de niveles de un mismo factor,

pero esto se soluciona mediante la aplicación del software de Optimización, que permite estudiar de forma más precisa una mayor cantidad de niveles de un mismo factor; el único problema de esta herramienta es que mientras mayor es la cantidad de factores y niveles, mayor es la cantidad de pruebas que se deben realizar y mayor el tiempo que emplea la computadora en llevar a cabo esas pruebas; pero, así mismo, este problema tiene solución en la aplicación del Diseño de Experimentos, ya que mediante esta herramienta es sencillo estudiar una gran cantidad de factores para encontrar aquellos que son más influyentes. Es por esto que se presenta como metodología para el uso de estas herramientas para la toma de decisiones, los siguientes pasos:

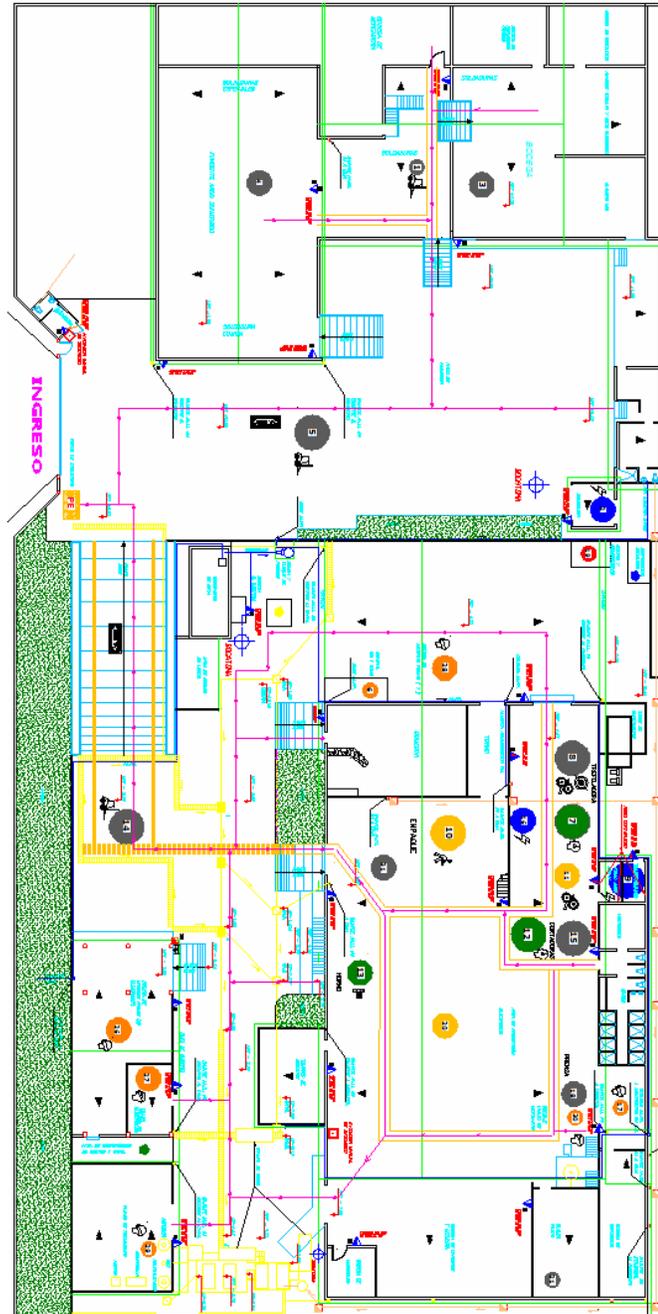
1. Realizar y validar el modelo de simulación.
2. Aplicar técnicas de Diseño de Experimentos (recomendablemente un diseño factorial de dos niveles) para probar todos los posibles factores que puedan influir a la variable respuesta.
3. Identificar los factores más influyentes.
4. Aplicar técnicas de Optimización para obtener niveles más certeros de los factores influyentes o algún otro factor de interés que sea necesario profundizar en su estudio y análisis a diferentes niveles.

5. Presentar el escenario que mejora el desempeño de lo escogido como variable de respuesta. Cada uno de los factores con sus respectivos niveles.
- ✓ Para un mejor funcionamiento de esta herramienta de toma de decisiones, es preferible utilizar niveles más separados entre sí durante la aplicación del Diseño de Experimentos, ya que esto da una pauta del “sector” donde se encuentra ubicado el nivel que mejora el desempeño de la variable respuesta, el cual es encontrado con el software de Optimización, después de fijar un rango de valores cercanos al nivel que resultó favorecido en el Diseño de Experimentos.
 - ✓ Es recomendable, inicialmente, identificar y comprobar una mayor cantidad de factores mediante el Diseño de Experimentos, para descartar todos los que no sean factores realmente influyentes y mantener los factores activos. De esta manera se puede asegurar que no existe algún factor que no ha sido considerado pero que influye en la variable de respuesta.

PLANOS

PLANO 1

INSTALACIONES DE LA FABRICACIÓN DE ELECTRODOS PARA SOLDAR



APÉNDICES

APÉNDICE A

DIAGRAMA DE PROCESO DE FABRICACIÓN DE ELECTRODOS

PROCESO	OPERACIÓN	SÍMBOLOS	RECURSOS	MÁQUINAS	OPERARIOS
Trefilación del Alambón	Se cargan dos rollos de alambón sobre caballete	● ⇨ D □ ▽	Montacargas		Ayudante de Trefilación
	Se cortan las amarras de los rollos de alambón	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Ayudante de Trefilación
	Se detiene la Trefiladora	○ ⇨ ● □ ▽		Operación Manual	Operario de Trefiladora
	La punta inicial se suelda a la punta de la cola del rollo por terminar	● ⇨ D □ ▽	Soldadora	Operación Manual	Ayudante de Trefilación
	Se reinicia la Trefiladora	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario de Trefiladora
	Decapado del alambón	● ⇨ D □ ▽		Trefiladora	
	Lubricado antes de cada etapa de trefilado	● ⇨ D □ ▽		Trefiladora	
	Trefilado en cinco etapas	● ⇨ D □ ▽		Trefiladora	
	Limpieza del alambre trefilado	● ⇨ D □ ▽		Trefiladora	
	Se enrolla el alambre en una bobina	● ⇨ D □ ▽		Trefiladora	
	Se detiene la Trefiladora	○ ⇨ ● □ ▽		Operación Manual	Operario de Trefiladora
	Se saca el rollo de alambre trefilado	● ⇨ D □ ▽	Teclé 1	Operación Manual	Operario de Trefiladora y Ayudante de Trefilación
	Se colocan amarras al rollo de alambre	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Ayudante de Trefilación
	Se codifica el rollo de alambre	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario de Trefiladora y Ayudante de Trefilación
	Se transporta el rollo al área de transición para rollos trefilados	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 1	Operación Manual	Ayudante de Trefilación
Se almacena momentáneamente el rollo de alambre trefilado	○ ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Ayudante de Trefilación	
Corte de Alambre Trefilado	Se toma un rollo de alambre trefilado y se lo coloca sobre dispositivo giratorio	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 1	Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se cortan las amarras de los rollos de alambre	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se apaga la Cortadora	○ ⇨ ● □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	La punta inicial se suelda a la punta de la cola del rollo por terminar	● ⇨ D □ ▽	Soldadora	Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se enciende la Cortadora	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se endereza el alambre	● ⇨ D □ ▽		Cortadora 1 y 2	
	Se realiza el corte del alambre en varillas	● ⇨ D □ ▽		Cortadora 1 y 2	
	Recolección de varillas en bandeja	● ⇨ D □ ▽		Cortadora 1 y 2	
	Se recogen las varillas con la mano para realizar una inspección visual	○ ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se colocan las varillas en cajas alimentadoras de la extrusora	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se codifican las cajas alimentadoras	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se transportan las cajas llenas al área de almacenamiento de cajas	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 2	Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
	Se almacenan las cajas alimentadoras	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 2	Operación Manual	Operario Cortadora 1 y 2
Pesaje de Polvos Químicos	Se desliza una balanza móvil por el área de almacenamiento de polvos químicos	○ ⇨ D □ ▽	Balanza Móvil	Operación Manual	Encargado de Pesaje
	Se vierten los componentes en un container sobre la balanza móvil	● ⇨ D □ ▽	Balanza Móvil	Operación Manual	Encargado de Pesaje
	Se pesan los componentes químicos en polvo	● ⇨ D □ ▽	Balanza Móvil	Operación Manual	Encargado de Pesaje
	Se translada el container al área de almacenamiento de containers	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 3	Operación Manual	Encargado de Pesaje
	Se almacenan los containers con polvo químico	○ ⇨ D □ ▽	Teclé 3	Operación Manual	Encargado de Pesaje
	Se codifica el container	● ⇨ D □ ▽		Operación Manual	Encargado de Pesaje
Pesaje de Silicatos	Se vierte el silicato en un tanque, por tuberías	● ⇨ D □ ▽	PLC y Balanza Digital		
	Se pesa el silicato con balanza digital	● ⇨ D □ ▽	PLC y Balanza Digital		
	Sensor indica cuando el peso requerido de silicato es correcto	● ⇨ D □ ▽	PLC y Balanza Digital		
	Se detiene el paso de silicato	● ⇨ D □ ▽	PLC y Balanza Digital		

PROCESO	OPERACIÓN	SÍMBOLOS					RECURSOS	MÁQUINAS	OPERARIOS
Mezcla	Se recoge un container con polvo químico almacenado	○	→	D	□	▽	Teclé 3	Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se vierten en la mezcladora el container con los componentes químicos en polvo	●	⇨	D	□	▽	Teclé 3	Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se amasa la mezcla seca	●	⇨	D	□	▽		Mezcladora	
	Se abre la válvula y se vierten los silicatos en la Mezcladora	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se amasa la mezcla húmeda por un tiempo	●	⇨	D	□	▽		Mezcladora	
	Se detiene la Mezcladora	○	⇨	■	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se abre la compuerta superior de la Mezcladora	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se limpian las paredes de la Mezcladora	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se añade agua a la mezcla	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se cierra la compuerta superior	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se amasa la mezcla húmeda	●	⇨	D	□	▽		Mezcladora	
	Se abre la compuerta inferior para que se deslice la mezcla a la prensa de briquetas (tochera)	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Mezcladora
	Se coloca la mezcla en los moldes	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Operario Tochera
	Se compacta la masa formando tochos	●	⇨	D	□	▽		Tochera	
	Se sacan los tochos y se los coloca en un carrito	●	⇨	D	□	▽	Carrito	Operación Manual	Operario Tochera
Se transportan siete tochos en un carrito hacia la extrusora	○	→	D	□	▽	Carrito	Operación Manual	Operario Tochera	
Extrusión	Se toma una caja alimentadora con varillas cortadas	○	→	D	□	▽	Teclé 2	Operación Manual	Vanillero
	Se carga en la Extrusora la caja alimentadora	●	⇨	D	□	▽	Teclé 2	Operación Manual	Vanillero
	Se revisa que la entrada de varillas a la Extrusora sea correcta	○	⇨	D	■	▽		Operación Manual	Vanillero
	Se cargan siete tochos en la Extrusora	●	⇨	D	□	▽	Carrito	Operación Manual	Operario de Extrusora
	Se impulsan las varillas a través de la extrusora y se reviste de la masa	●	⇨	D	□	▽		Extrusora	
	Se saca una muestra de los electrodos producidos y se inspecciona	○	⇨	D	■	▽		Operación Manual	Operario de Extrusora
	Se remueve un pedazo de masa del extremo final del electrodo (Cepillado)	●	⇨	D	□	▽		Extrusora	
	Se lija la punta del extremo inicial del electrodo	●	⇨	D	□	▽		Extrusora	
	Se rotulan los electrodos en ambos extremos del electrodo	●	⇨	D	□	▽		Extrusora	
	Se recogen los electrodos en bandejas	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Bandejeros 1 y 2
	Se revisa visualmente el estado de los electrodos	○	⇨	D	■	▽		Operación Manual	Bandejeros 1 y 2
	Se colocan las bandejas en los soportes de rumas	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Bandejeros 1 y 2
	Se transportan las rumas de electrodos al área de pre-secado	○	→	D	□	▽	Transporta Pallet	Operación Manual	Bandejeros 1 y 2
Secado	Se deja reposar las rumas un periodo de 24 horas	●	⇨	D	□	▽			
	Se transportan ocho rumas de electrodos al horno	○	→	D	□	▽	Transporta Pallet	Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se hornean la rumas a 120°C por una hora	●	⇨	D	□	▽		Horno	
	Se abren las puertas del horno	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se deja enfriar a las rumas dentro del horno aproximadamente por una hora y media	●	⇨	D	□	▽			
Empaque	Se trasladan las rumas homeadas al área de empaque	○	→	D	□	▽	Transporta Pallet	Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se realizan pruebas de calidad y funcionalidad con una muestra de electrodos para aprobar el lote	○	⇨	D	■	▽		Operación Manual	Laboratorio
	Se inspecciona visualmente cada electrodo	○	⇨	D	■	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se pesan los electrodos hasta alcanzar el peso indicado para el empaque final	●	⇨	D	□	▽	Balanza	Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se enfundan los electrodos	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se colocan en cajas de producto terminado	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se codifican las cajas	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se palletiza un gupo de cien cajas	●	⇨	D	□	▽		Operación Manual	Empacadores 1-8
	Se almacena en la bodega de producto terminado	○	⇨	D	□	▽	Montacargas	Operación Manual	Empacador

APÉNDICE B

CÓDIGO FUENTE DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE LA FÁBRICA DE ELECTRODOS

```
*****
*
*                               Formatted Listing of Model:
* C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de Electroodos\0. Fábrica de Electroodos - Modelo
Validado.MOD *
*
*****
```

```
Time Units:           Minutes
Distance Units:      Feet
```

```
*****
*                               Locations
*
*****
```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
CABALLETE	1	1	Time Series	Oldest,	
AREA_TREFILACION	6	1	Time Series	Oldest,	
TREFILADORA	1	1	Time Series	Oldest,	
WIP_TREFILADORA	INF	1	Time Series	Oldest,	
CORTADORA1	1	1	Time Series	Oldest,	
CORTADORA2	1	1	Time Series	Oldest,	
CRUPO_CAJAS1	2	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_CAJAS2	2	1	Time Series	Oldest,	
WIP_CORTE	INF	1	Time Series	Oldest,	
EXTRUSORA	1	1	Time Series	Oldest,	
ARMADO_RUMAS	3	1	Time Series	Oldest,	
PRE_SECADO	INF	1	Time Series	Oldest,	
HORNO	1	1	Time Series	Oldest,	
AREA_EMPAQUE	8	1	Time Series	Oldest,	
ESTACION4	1	1	Time Series	Oldest,	
ESTACION3	1	1	Time Series	Oldest,	
ESTACION2	1	1	Time Series	Oldest,	
ESTACION1	1	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_PRESECADO	INF	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_PALLET1	100	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_PALLET2	100	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_PALLET3	100	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_PALLET4	100	1	Time Series	Oldest,	
ESPERA_TOCHOS	1	1	Time Series	Oldest,	
TOCHERA	1	1	Time Series	Oldest,	
MEZCLADORA	1	1	Time Series	Oldest,	
PESADORA_POLVOS	1	1	Time Series	Oldest,	
BODEGA_POLVOS	INF	1	Time Series	Oldest,	
WIP_MEZCLA	1	1	Time Series	Oldest,	
GRUPO_TOCHOS	8	1	Time Series	Oldest,	
HILERSAS90	INF	1	Time Series	Oldest,	
HILERSAS120	INF	1	Time Series	Oldest,	
DESAGRUPAR	INF	1	Time Series	Oldest,	

```

AREA_ESPERA      INF 1      Time Series Oldest, ,
HORNO_ESPERA    8 1      Time Series Oldest, ,
CARGA_TOCHOS    1 1      Time Series Oldest, ,
USO_TOCHOS      1 1      Time Series Oldest, ,
SALIDA_TOCHOS   1 1      Time Series Oldest, ,
PUERTA_HORNO    1 1      Time Series Oldest, ,
ESPERA_HILERA   1 1      Time Series Oldest, ,
EMPAQUE         1 1      Time Series Oldest, ,
SALIDA_HORNO    1 1      Time Series Oldest, ,
ACCESO_HORNO    1 1      Time Series Oldest, ,

```

```

*****
*                               Clock downtimes for Locations                               *
*****

```

Loc	Frequency	First Time	Priority	Scheduled	Disable	Logic
TREFILADORA	G(0.8912, 5059.4)		99	No	No	WAIT E(123)// TIEMPO DE FALLA
	W(1.4771, 2953.8)	(null)	99	Yes	No	WAIT G(3.6173, 15.162)// CAMBIO DE DADOS
	W(1.3587, 12550)	(null)	99	No	No	WAIT W(2.1883, 43.992)// FALLA DE EQUIPOS (MONTACARGAS Y SOLDADORA)
CORTADORA1	E(69842.1567)		99	No	No	WAIT L(6.0748, 0.5774)// TIEMPO DE FALLAS
	W(1.1305, 7826.9)	(null)	99	No	No	WAIT T(28.945, 45, 65.063)// CAMBIO DE UTILLAJE
CORTADORA2	W(0.92082, 49404)		99	No	No	WAIT W(1.7424, 251.6)// TIEMPO DE FALLAS
	W(0.98981, 6618.2)	(null)	99	No	No	WAIT G(3.9177, 12.668)// CAMBIO DE UTILLAJE
EXTRUSORA	W(1.3531, 4190.4)		99	No	No	WAIT E(228.833)// TIEMPO DE FALLAS
MEZCLADORA	W(1.1975, 24301)		99	No	No	WAIT W(0.88218, 427.59)// TIEMPO DE FALLAS
	B(0.34691, 0.96914, 1440, 61920)	(null)		99	No	No

VARIOS

```

*****
*                               Entry downtimes for Locations                               *
*****

```

Loc	Frequency	First Occurrence	Logic
TREFILADORA	1		WAIT W(2.259, 7.939) // TIEMPO DE SACADO DE LA MAQ (1)
	6		WAIT B(0.46376, 0.86264, 9.24, 26.56) // TIEMPO EN SOLDAR ALAMBRONES
CORTADORA1	1		WAIT W(2.189, 9.5002) // TIEMPO EN SOLDAR Y PREPARAR
CORTADORA2	1		WAIT W(3.9828, 7.0787) // TIEMPO EN SOLDAR Y PREPARAR
TOCHERA	21		WAIT L(0.2212, 0.2622) // LIMPIEZA ENTRE PARADAS DE MASA
MEZCLADORA	1		WAIT G(3.2289, 0.9489) //CAE TODO EL POLVO DE LA OLLA

```

*****
*                               Entities                                                 *
*****

```

Name	Speed (fpm)	Stats	Cost
ALAMBRON	150	Time Series	
ROLLO_TREFILADO	150	Time Series	
CAJA	150	Time Series	
HILERA	150	Time Series	
RUMA	150	Time Series	
CAJA_EMPACADA	150	Time Series	
PALLET_FINAL	150	Time Series	
CONTAINER	150	Time Series	

TOCHO 150 Time Series
 TOCHOS_7 150 Time Series
 GRUPO90 150 Time Series
 GRUPO120 150 Time Series
 RUMA8 150 Time Series

 * Resources *

Name	Units	Stats	Res Search	Ent Search Path	Motion	Cost
PUENTE_GRUA	1	By Unit	None	oldest	Empty: 150 fpm Full: 150 fpm	
TECLE	1	By Unit	None	oldest	Empty: 150 fpm Full: 150 fpm	

 * Processing *

Process			Routing				
Entity	Location	Operation	Blk	Output	Destination	Rule	Move Logic
ALAMBRON	CABALLETE		1	ALAMBRON	AREA_TREFILACION	FIRST 1	
ALAMBRON	AREA_TREFILACION	CREATE 6 AS ROLLO_TREFILADO	1	ALAMBRON	EXIT	FIRST 1	
ROLLO_TREFILADO	AREA_TREFILACION		1	ROLLO_TREFILADO	TREFILADORA	FIRST 1	
ROLLO_TREFILADO	TREFILADORA	WAIT W(10.073, 17.806) //	1	ROLLO_TREFILADO	WIP_TREFILADORA	FIRST 1	GET TECLE MOVE FOR W(1.5199, 2.5466)// TIEMPO EN
MOVERO ROLLO	BUFFER (2)						
ROLLO_TREFILADO	WIP_TREFILADORA		1	ROLLO_TREFILADO	CORTADORA1	FIRST 1	FREE TECLE GET TECLE MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ				ROLLO_TREFILADO	CORTADORA2	FIRST	FREE TECLE GET TECLE MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ							FREE TECLE
ROLLO_TREFILADO	CORTADORA1	WAIT W(14.196, 43.818) //	1	ROLLO_TREFILADO	CRUPO_CAJAS1	FIRST 1	
ROLLO_TREFILADO	CORTADORA2	WAIT W(11.193, 41.287) //	1	ROLLO_TREFILADO	GRUPO_CAJAS2	FIRST 1	
ROLLO_TREFILADO	CRUPO_CAJAS1	GROUP 2 AS CAJA					
ROLLO_TREFILADO	GRUPO_CAJAS2	GROUP 2 AS CAJA					
CAJA	CRUPO_CAJAS1		1	CAJA	WIP_CORTE	FIRST 1	GET PUENTE_GRUA MOVE FOR G(3.6024, 0.5423) // TIEMPO DE
MOVER CAJA HASTA BUFFER							FREE PUENTE_GRUA
CAJA	GRUPO_CAJAS2		1	CAJA	WIP_CORTE	FIRST 1	GET PUENTE_GRUA

MOVER CAJA HASTA BUFFER

CAJA WIP_CORTE

TIPO_CAJA=NO_CAJA()

```
IF TIPO_CAJA=90 THEN
BEGIN
CREATE 4 AS HILERA
END
```

```
IF TIPO_CAJA=120 THEN
BEGIN
CREATE 3 AS HILERA
END
```

HILERA

WIP_CORTE

```
WAIT 1 HR 1 CAJA EXIT FIRST 1
IF TIPO_CAJA=90 THEN ROUTE 1
```

```
ELSE
ROUTE 2 2 HILERA HILERAS90 FIRST 1
HILERA HILERAS120 FIRST 1
```

HILERA
GRUPO90
GRUPO90
HILERA
GRUPO120
GRUPO120
HILERA
HILERA

HILERAS90
HILERAS90
DESAGRUPAR
HILERAS120
HILERAS120
DESAGRUPAR
DESAGRUPAR
ESPERA_HILERA

```
GROUP 12 AS GRUPO90 1 GRUPO90 DESAGRUPAR FIRST 1
```

```
UNGROUP
GROUP 3 AS GRUPO120 1 GRUPO120 DESAGRUPAR FIRST 1
```

```
UNGROUP 1 HILERA ESPERA_HILERA FIRST 1
```

HILERA

EXTRUSORA

```
WAIT UNTIL PUERTA_TIEMPO_RUMA=0 1 HILERA EXTRUSORA FIRST 1
```

```
WAIT UNTIL CONT_USO_TOCHOS = 1
///  
DISPLAY "ENTRA HILERA (USO=1)"
```

```
INC WIPEXT
INC CH
IF CH=1 THEN
```

```
BEGIN
IF TIPO_CAJA=90 THEN
```

```
BEGIN
V90=CLOCK(MIN)
///  
DISPLAY "v90: ", v90
END
```

```
IF TIPO_CAJA=120 THEN
BEGIN
V120=CLOCK(MIN)
///  
DISPLAY "v120: ", v120
END
```

```
END
IF CH=3 THEN
```

```
BEGIN
PUERTA_TIEMPO_RUMA=1
CH=0
END
```

```
///  
DISPLAY "ATRIBUTO", TIPO_CAJA
IF TIPO_CAJA=90 THEN
```

```
BEGIN
WAIT N(3.876, 0.33)
INC CONTH90
```

```
///  
DISPLAY "PROCESÓ EXTRUSORA HILERA 90 #",CONTH90
///  
TIEMPO DE PROCESO DE UNA HILERA
```

MOVE FOR G(3.6024, 0.5423) // TIEMPO DE

FREE PUENTE_GRUA

```

END
ELSE
BEGIN
    WAIT W(7.8021, 5.6206)
    INC CONTH120
    ///DISPLAY "PROCESÓ EXTRUSORA HILERA 120 #", CONTH120
    ///TIEMPO DE PROCESO DE UNA HILERA
END

IF CONTH90=4 THEN
BEGIN
    CONTH90=0
    ///DISPLAY "RESTEO DE CONTH90"
END
IF CONTH120=3 THEN
BEGIN
    CONTH120=0
    ///DISPLAY "RESTEO DE CONTH120"
END

WAIT UNTIL PUERTA_ATRIBUTO_RUMA=0
              1 HILERA          ARMADO_RUMAS  FIRST 1  DEC WIPEXT
HILERA      ARMADO_RUMAS
INC CONTH
///DISPLAY "#" $ CONTH $ " - ATRIBUTO: " $ TIPO_CAJA
IF CONTH = 3 THEN
BEGIN
    PUERTA_ATRIBUTO_RUMA=1
    IF TIPO_CAJA=90 THEN
    BEGIN
        ///DISPLAY "HORA 90: ", CLOCK()
        TIEMPO_RUMA90=CLOCK()-V90
    END
    IF TIPO_CAJA=120 THEN
    BEGIN
        ///DISPLAY "HORA 120: ", CLOCK()
        TIEMPO_RUMA120=CLOCK()-V120
    END
    PUERTA_TIEMPO_RUMA=0

    ///DISPLAY "RUMA: " $ TIPO_CAJA $ " - CONT= " $ CONTH
    VAT=TIPO_CAJA
    CONTH=0
    ///GROUP 3 AS RUMA
END
RUMA      ARMADO_RUMAS
GROUP 3 AS RUMA
ATRUMA=VAT
///DISPLAY VAT
PUERTA_ATRIBUTO_RUMA=0
///DISPLAY ATRUMA

IF CLOCK()>10080 THEN
BEGIN
    IF ATRUMA=90 THEN INC CONT_RUMA90
    IF ATRUMA=120 THEN INC CONT_RUMA120
END
RUMA      PRE_SECADO  FIRST 1  MOVE FOR T(0.5827, 0.83, 2.3083)
RUMA      PRE_SECADO
TEP=CLOCK(MIN)
///DISPLAY ATRUMA
///IF CLOCK()>10080 THEN INC CONTRUMA
WAIT B(0.9945, 1.6689, 1590, 6798.6)

```

```

RUMA      GRUPO_PRESECADO  //DISPLAY "HAY ", CONTENTS(GRUPO_PRESECADO, RUMA)
                                     1 RUMA GRUPO_PRESECADO FIRST 1
LOG "TIEMPO ESPERA PRESECADO", TEP
GROUP 8 AS RUMA8

RUMA8     GRUPO_PRESECADO  //DISPLAY "1. VAR: "$VAR$" - EH: "$ENTRADA_HORNOS" - AA: "$AA
RUMA8     ACCESO_HORNO    WAIT UNTIL VAR=0 1 RUMA8 ACCESO_HORNO FIRST 1
                                     1 RUMA8 PUERTA_HORNO FIRST 1
RUMA8     PUERTA_HORNO    VAR=1
                                     //DISPLAY "PUERTA CERRADA"
                                     1 RUMA8 HORNO FIRST 1
AL HORNO  MOVE FOR W(6.5985, 7.8504)//MOVER RUMAS
RUMA8     HORNO           IF AA<>CALDAY() THEN ENTRADA_HORNO=0
                                     INC ENTRADA_HORNO
                                     //DISPLAY "2. ENTRADA_HORNO: "$ENTRADA_HORNOS" - AA: "$AA
                                     WAIT B(1.4158, 1.7353, 132, 180)
RUMA8     SALIDA_HORNO    AA=CALDAY() 1 RUMA8 SALIDA_HORNO FIRST 1
                                     VAR=0
                                     //DISPLAY "PUERTA ABIERTA"
                                     1 RUMA8 HORNO_ESPERA FIRST 1
RUMA8     HORNO_ESPERA    UNGROUP MOVE FOR T(2.2209, 6.05, 10.656)
RUMA      HORNO_ESPERA    //DISPLAY ATRUMA 1 RUMA AREA_EMPAQUE FIRST 1
RUMA      AREA_EMPAQUE    RUMA ESTACION4 0.250000 1
                                     RUMA ESTACION3 0.250000
                                     RUMA ESTACION2 0.250000
                                     RUMA ESTACION1 0.250000

RUMA      ESTACION1      IF CALHOUR()< 12 THEN
BEGIN
  IF ATRUMA=90 THEN
  BEGIN
    //DISPLAY "E1: 1 Emp - Ruma 90 - ",clock()
    WAIT G(31.208, 0.99741)// UN EMPACADOR RUMA90
    CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA
  END
  ELSE
  BEGIN
    //DISPLAY "E1: 1 Emp - Ruma 120 - ",clock()
    WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120
    CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
  END
END
ELSE
BEGIN
  IF ATRUMA=90 THEN
  BEGIN
    //DISPLAY "E1: 2 Emp - Ruma 90 - ",clock()
    WAIT G(38.578, 0.66743)// DOS EMPACADORES RUMA90
    CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA
  END
  ELSE
  BEGIN
    //DISPLAY "E1: 2 Emp - Ruma 120 - ",clock()
    WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120
    CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
  END
END

CAJA_EMPACADA ESTACION1  //DISPLAY "E1: 1 Emp - Ruma 90 - ",clock()
                                     1 RUMA EXIT FIRST 1
IF CLOCK(>10080 THEN INC CONT_CAJA1
IF CLOCK(>10080 THEN INC CONT_CAJA
                                     1 CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET1 FIRST 1

```

CAJA_EMPACADA PALLET_FINAL PALLET_FINAL	GRUPO_PALLET1 GRUPO_PALLET1 AREA_ESPERA	GROUP 100 AS PALLET_FINAL 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1 WAIT 2 HR IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_PALLET1 IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_PALLET 1 PALLET_FINAL EXIT FIRST 1
RUMA	ESTACION2	IF CALHOUR()< 12 THEN BEGIN IF ATRUMA=90 THEN BEGIN //DISPLAY "E2: 1 Emp - Ruma 90 - ",clock() WAIT G(31.208, 0.99741)// UN EMPACADOR RUMA90 CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA END ELSE BEGIN //DISPLAY "E2: 1 Emp - Ruma 120 - ",clock() WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120 CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA END END ELSE BEGIN IF ATRUMA=90 THEN BEGIN //DISPLAY "E2: 2 Emp - Ruma 90 - ",clock() WAIT G(38.578, 0.66743)// DOS EMPACADORES RUMA90 CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA END ELSE BEGIN //DISPLAY "E2: 2 Emp - Ruma 120 - ",clock() WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120 CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA END END 1 RUMA EXIT FIRST 1
CAJA_EMPACADA	ESTACION2	IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_CAJA2 IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_CAJA 1 CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET2 FIRST 1
CAJA_EMPACADA PALLET_FINAL PALLET_FINAL	GRUPO_PALLET2 GRUPO_PALLET2 AREA_ESPERA	GROUP 100 AS PALLET_FINAL 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1 WAIT 2 HR IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_PALLET2 IF CLOCK()>10080 THEN INC CONT_PALLET 1 PALLET_FINAL EXIT FIRST 1
RUMA	ESTACION3	IF CALHOUR()< 12 THEN BEGIN IF ATRUMA=90 THEN BEGIN //DISPLAY "E3: 1 Emp - Ruma 90 - ",clock() WAIT G(31.208, 0.99741)// UN EMPACADOR RUMA90 CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA END ELSE BEGIN //DISPLAY "E3: 1 Emp - Ruma 120 - ",clock() WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120 CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA END END

```

END
ELSE
BEGIN
IF ATRUMA=90 THEN
BEGIN
//DISPLAY "E3: 2 Emp - Ruma 90 - ",clock()
WAIT G(38.578, 0.66743)// DOS EMPACADORES RUMA90
CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA
END
ELSE
BEGIN
//DISPLAY "E3: 2 Emp - Ruma 120 - ",clock()
WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END
END
1 RUMA EXIT FIRST 1
CAJA_EMPACADA ESTACION3 IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_CAJA3
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_CAJA
1 CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET3 FIRST 1
CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET3 GROUP 100 AS PALLET_FINAL
PALLET_FINAL GRUPO_PALLET3 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1
PALLET_FINAL AREA_ESPERA
WAIT 2 HR
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_PALLET3
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_PALLET
1 PALLET_FINAL EXIT FIRST 1
RUMA ESTACION4 IF CALHOUR(<) 12 THEN
BEGIN
IF ATRUMA=90 THEN
BEGIN
//DISPLAY "E4: 1 Emp - Ruma 90 - ",clock()
WAIT G(31.208, 0.99741)// UN EMPACADOR RUMA90
CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA
END
ELSE
BEGIN
//DISPLAY "E4: 1 Emp - Ruma 120 - ",clock()
WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END
END
ELSE
BEGIN
IF ATRUMA=90 THEN
BEGIN
//DISPLAY "E4: 2 Emp - Ruma 90 - ",clock()
WAIT G(38.578, 0.66743)// DOS EMPACADORES RUMA90
CREATE 15 AS CAJA_EMPACADA
END
ELSE
BEGIN
//DISPLAY "E4: 2 Emp - Ruma 120 - ",clock()
WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END
END
1 RUMA EXIT FIRST 1
CAJA_EMPACADA ESTACION4 IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_CAJA4
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_CAJA
1 CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET4 FIRST 1
CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET4 GROUP 100 AS PALLET_FINAL

```

```

PALLET_FINAL GRUPO_PALLET4 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1
PALLET_FINAL AREA_ESPERA WAIT 2 HR// TIEMPO EN HACER PRUEBAS DE SOLDADURA
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_PALLET4
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_PALLET

CONTAINER BODEGA_POLVOS 1 PALLET_FINAL EXIT FIRST 1
CONTAINER PESADORA_POLVOS 1 CONTAINER PESADORA_POLVOS FIRST 1
WAIT G(2.0489, 0.2945)// PREPARACION ANTES DE PESAR
WAIT G(22.401, 0.3115)// SELECCION DE POLVOS Y PESAJE

MOVER CONTENEDOR 1 CONTAINER WIP_MEZCLA FIRST 1
CONTAINER WIP_MEZCLA 1 CONTAINER MEZCLADORA FIRST 1
CONTAINER MEZCLADORA WAIT W(4.7109, 0.7496)// COGER CONTENEDOR Y LLENARLO
WAIT W(10.673, 13.272)// MEZCLA 1
WAIT B(0.4045, 0.9545, 1.57, 5.15)// LIMPIEZA
WAIT W(4.0466, 11.198)// MEZCLA 2

EL POLVO DE LA OLLA Y SE HACE UN TOCHO CONTAINER TOCHERA FIRST 1
CONTAINER TOCHERA CREATE 21 AS TOCHO
TOCHO TOCHERA WAIT W(3.1562, 0.5942) // TIEMPO EN HACER UN TOCHO
TOCHO GRUPO_TOCHOS 1 TOCHO GRUPO_TOCHOS FIRST 1
TOCHOS_7 GRUPO_TOCHOS GROUP 7 AS TOCHOS_7
IF CLOCK(>)10080 THEN BEGIN
INC CONT_7TOCHOS
//DISPLAY CONT_7TOCHOS
END
TOCHOS_7 ESPERA_TOCHOS 1 TOCHOS_7 ESPERA_TOCHOS FIRST 1
WAIT UNTIL CONT_CARGA_TOCHOS = 0
//DISPLAY "ENTRA TOCHO A CARGAR (CARGA=0)"
TOCHOS_7 CARGA_TOCHOS 1 TOCHOS_7 CARGA_TOCHOS FIRST 1
CONT_CARGA_TOCHOS = 1
//DISPLAY "se CIERRA entrada de TOCHO (CARGA=1)"
//WAIT G(1.9042, 1.6495)// TIEMPO DE CARGA DE TOCHOS "NO ES"
WAIT B(0.34824, 0.59905, 1.92, 6.92)// TIEMPO DE CARGA DE TOCHOS
TOCHOS_7 USO_TOCHOS 1 TOCHOS_7 USO_TOCHOS FIRST 1
CONT_USO_TOCHOS = 1
//DISPLAY "se ABRE entrada de HILERA (USO=1)"
WAIT UNTIL WIPEXT=1
WAIT B(0.9423, 0.40539, 1.4, 5.57)//TIEMPO QUE TRABAJA EXTRUSORA
//DISPLAY "CAMBIO DE TOCHO"
TOCHOS_7 SALIDA_TOCHOS 1 TOCHOS_7 SALIDA_TOCHOS FIRST 1
CONT_CARGA_TOCHOS = 0
//DISPLAY "se CIERRA entrada de HILERA (USO=0)"
CONT_USO_TOCHOS = 0
//DISPLAY "se ABRE entrada de TOCHO (CARGA=0)"
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_7TOCHOS_USADOS
1 TOCHOS_7 EXIT FIRST 1

```

```

*****
* Arrivals *
*****

```

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
ALAMBRO	CABALLETE	1	INF		50 MIN	
CONTAINER	BODEGA_POLVOS	1	INF		10 MIN	

 * Shift Assignments *

Locations	Resources	Shift Files	Priorities	Disable	Logic
CABALLETE		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
TREFILADORA		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
CORTADORA1 CORTADORA2		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
EXTRUSORA		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
HORNO PUERTA_HORNO		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
ESTACION1 ESTACION2 ESTACION3 ESTACION4		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
PESADORA_POLVOS		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
MEZCLADORA TOCHERA		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	

 * Attributes *

ID	Type	Classification
TIPO_CAJA	Integer	Entity
TEP	Real	Entity
ATRUMA	Integer	Entity

 * variables (global) *

ID	Type	Initial value	Stats
CONT_USO_TOCHOS	Integer	0	Time Series
CONT_CARGA_TOCHOS	Integer	0	Time Series
CONT_RUMA90	Integer	0	Time Series
CONT_RUMA120	Integer	0	Time Series
VAT	Integer	0	Time Series
CH	Integer	0	Time Series
CONTH	Integer	0	Time Series
PUERTA_TIEMPO_RUMA	Integer	0	Time Series
PUERTA_ATRIBUTO_RUMA	Integer	0	Time Series
V90	Real	0	Time Series
V120	Real	0	Time Series
TIEMPO_RUMA90	Real	0	Time Series
TIEMPO_RUMA120	Real	0	Time Series

```

CONT_CAJA           Integer      0           Time Series
CONT_CAJA1          Integer      0           Time Series
CONT_CAJA2          Integer      0           Time Series
CONT_CAJA3          Integer      0           Time Series
CONT_CAJA4          Integer      0           Time Series
CONT_PALLET         Integer      0           Time Series
CONT_PALLET1        Integer      0           Time Series
CONT_PALLET2        Integer      0           Time Series
CONT_PALLET3        Integer      0           Time Series
CONT_PALLET4        Integer      0           Time Series
CONT_7TOCHOS        Integer      0           Time Series
CONT_7TOCHOS_USADOS Integer      0           Time Series
AA                  Integer      1           Time Series
ENTRADA_HORNO       Integer      0           Time Series
VAR                 Integer      0           Time Series
CONTH90             Integer      0           Time Series
CONTH120            Integer      0           Time Series
WIPEXT             Integer      0           Time Series

```

```

*****
*                               Macros                               *
*****

```

```

ID           Text
-----
ABC

```

```

*****
*                               User Distributions                    *
*****

```

ID	Type	Cumulative	Percentage	Value
NO_CAJA	Discrete	No	51 49	90 120

```

*****
*                               External Files                          *
*****

```

ID	Type	File Name
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\caballete.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\trefiladora2.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\cortadora.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\extrusora.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\horno.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\empaque.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\pesaje.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\tochera.sft	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de

APÉNDICE C

CÓDIGO FUENTE DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA PARA LA REALIZACIÓN DE EXPERIMENTOS

```
*****
*
*                               Formatted Listing of Model:
* C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de Electrodo\Fábrica de Electrodo -
Experimentos.MOD *
*
*****
```

```
Time Units:           Minutes
Distance Units:      Feet
```

```
*****
*                               Locations
*
*****
```

Name	Cap	Units	Stats	Rules	Cost
CABALLETE	1	1	Time Series Oldest	,	
AREA_TREFILACION	6	1	Time Series Oldest	,	
TREFILADORA	1	1	Time Series Oldest	,	
WIP_TREFILADORA	INF	1	Time Series Oldest	,	
CORTADORA1	1	1	Time Series Oldest	,	First
CORTADORA2	1	1	Time Series Oldest	,	
CORTADORA3	1	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_CAJAS1	2	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_CAJAS2	2	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_CAJAS3	2	1	Time Series Oldest	,	
WIP_CORTE	INF	1	Time Series Oldest	,	
EXTRUSORA	1	1	Time Series Oldest	,	
ARMADO_RUMAS	3	1	Time Series Oldest	,	
PRE_SECADO	INF	1	Time Series Oldest	,	
HORNO	1	1	Time Series Oldest	,	
AREA_DE_EMPAQUE	8	1	Time Series Oldest	,	
ESTACION1	1	1	Time Series Oldest	,	First
ESTACION2	1	1	Time Series Oldest	,	
ESTACION3	1	1	Time Series Oldest	,	
ESTACION4	1	1	Time Series Oldest	,	
ESTACION5	1	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PRESECADO	INF	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PALLET1	100	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PALLET2	100	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PALLET3	100	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PALLET4	100	1	Time Series Oldest	,	
GRUPO_PALLET5	100	1	Time Series Oldest	,	
ESPERA_TOCHOS	1	1	Time Series Oldest	,	
TOCHERA	CAP_TOCHERA	1	Time Series Oldest	,	
MEZCLADORA	1	1	Time Series Oldest	,	

```

PESADORA_POLVOS 1 1 Time Series Oldest, ,
BODEGA_POLVOS INF 1 Time Series Oldest, ,
WIP_MEZCLA 1 1 Time Series Oldest, ,
GRUPO_TOCHOS 8 1 Time Series Oldest, ,
AREA_ESPERA INF 1 Time Series Oldest, ,
HORNO_ESPERA 8 1 Time Series Oldest, ,
CARGA_TOCHOS 1 1 Time Series Oldest, ,
USO_TOCHOS 1 1 Time Series Oldest, ,
SALIDA_TOCHOS 1 1 Time Series Oldest, ,
PUERTA_HORNO 1 1 Time Series Oldest, ,
ESPERA_HILERA 1 1 Time Series Oldest, ,
EMPAQUE 1 1 Time Series Oldest, ,
SALIDA_HORNO 1 1 Time Series Oldest, ,
ACCESO_HORNO 1 1 Time Series Oldest, ,

```

```

*****
*                               Clock downtimes for Locations                               *
*****

```

Loc	Frequency	First Time	Priority	Scheduled	Disable	Logic
TREFILADORA	G(0.8912, 5059.4)		99	No	No	WAIT E(123)// TIEMPO DE FALLA
	W(1.4771, 2953.8)	(null)	99	Yes	No	WAIT G(3.6173, 15.162)// CAMBIO DE DATOS
	W(1.3587, 12550)	(null)	99	No	No	WAIT W(2.1883, 43.992)// FALLA DE EQUIPOS (MONTACARGAS Y SOLDADORA)
CORTADORA1	W(0.92082, 49404)		99	No	No	WAIT W(1.7424, 251.6)// TIEMPO DE FALLAS
	W(0.98981, 6618.2)	(null)	99	No	No	WAIT G(3.9177, VELOCIDAD_CAMBIO)// CAMBIO DE UTILLAJE
CORTADORA2	W(0.92082, 49404)		99	No	No	WAIT W(1.7424, 251.6)// TIEMPO DE FALLAS
	W(0.98981, 6618.2)	(null)	99	No	No	WAIT G(3.9177, VELOCIDAD_CAMBIO)// CAMBIO DE UTILLAJE
CORTADORA3	W(0.92082, 49404)		99	No	No	WAIT W(1.7424, 251.6)// TIEMPO DE FALLAS
	W(0.98981, 6618.2)	(null)	99	No	No	WAIT G(3.9177, VELOCIDAD_CAMBIO)// CAMBIO DE UTILLAJE
EXTRUSORA	W(1.3531, 4190.4)		99	No	No	WAIT E(228.833)// TIEMPO DE FALLAS
MEZCLADORA	W(1.1975, 24301)		99	No	No	WAIT W(0.88218, 427.59)// TIEMPO DE FALLAS
VARIOS	B(0.34691, 0.96914, 1440, 61920)	(null)		99	No	No WAIT W(1.6052, 185.96)// TIEMPOS MUERTOS POR PROBLEMAS

```

*****
*                               Entry downtimes for Locations                               *
*****

```

Loc	Frequency	First Occurrence	Logic
TREFILADORA	1		WAIT W(2.259, 7.939) // TIEMPO DE SACADO DE LA MAQ (1)
	6		WAIT B(0.46376, 0.86264, 9.24, 26.56)// TIEMPO EN SOLDAR ALAMBRONES
CORTADORA1	1		WAIT W(3.9828, 7.0787) // TIEMPO EN SOLDAR Y PREPARAR
CORTADORA2	1		WAIT W(3.9828, 7.0787) // TIEMPO EN SOLDAR Y PREPARAR
CORTADORA3	1		WAIT W(3.9828, 7.0787) // TIEMPO EN SOLDAR Y PREPARAR
TOCHERA	21		WAIT L(0.2212, 0.2622) // LIMPIEZA ENTRE PARADAS DE MASA
MEZCLADORA	1		WAIT G(3.2289, 0.9489)//CAE TODO EL POLVO DE LA OLLA

```

*****
*                               Entities                               *
*****

```

Name	Speed (fpm)	Stats	Cost
ALAMBRON	150	Time Series	


```

MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ
3 ROLLO_TREFILADO CORTADORA1 FIRST 1 FREE TECLE
GET TECLE
MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ
ROLLO_TREFILADO CORTADORA2 FIRST FREE TECLE
GET TECLE
MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ
ROLLO_TREFILADO CORTADORA3 FIRST FREE TECLE
GET TECLE
MOVE FOR L(0.7866, 0.6264) // TIEMPO EN
PONER ROLLO EN LA MAQ
FREE TECLE
ROLLO_TREFILADO CORTADORA1 WAIT W(11.193, 41.287) // TIEMPO DE PROCESO
1 ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS1 FIRST 1
ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS1 GROUP 2 AS CAJA 1 CAJA WIP_CORTE FIRST 1 GET PUENTE_GRUA
MOVE FOR G(3.6024, 0.5423) // TIEMPO DE
MOVER CAJA HASTA BUFFER FREE PUENTE_GRUA
ROLLO_TREFILADO CORTADORA2 WAIT W(11.193, 41.287) // TIEMPO DE PROCESO
1 ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS2 FIRST 1
ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS2 GROUP 2 AS CAJA 1 CAJA WIP_CORTE FIRST 1 GET PUENTE_GRUA
MOVE FOR G(3.6024, 0.5423) // TIEMPO DE
MOVER CAJA HASTA BUFFER FREE PUENTE_GRUA
ROLLO_TREFILADO CORTADORA3 WAIT W(11.193, 41.287) // TIEMPO DE PROCESO
1 ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS3 FIRST 1
ROLLO_TREFILADO GRUPO_CAJAS3 GROUP 2 AS CAJA 1 CAJA WIP_CORTE FIRST 1 GET PUENTE_GRUA
MOVE FOR G(3.6024, 0.5423) // TIEMPO DE
MOVER CAJA HASTA BUFFER FREE PUENTE_GRUA
CAJA WIP_CORTE CREATE 3 AS HILERA
WAIT 1 HR 1 CAJA EXIT FIRST 1
HILERA WIP_CORTE 1 HILERA ESPERA_HILERA FIRST 1
HILERA ESPERA_HILERA WAIT UNTIL PUERTA_TIEMPO_RUMA=0
1 HILERA EXTRUSORA FIRST 1
HILERA EXTRUSORA WAIT UNTIL CONT_USO_TOCHOS = 1
///DISPLAY "ENTRA HILERA (USO=1)"
INC WIPEXT
INC CH
IF CH=1 THEN
BEGIN
V120=CLOCK(MIN)
///DISPLAY "V120: ", V120
END
IF CH=3 THEN
BEGIN
PUERTA_TIEMPO_RUMA=1
CH=0
END
WAIT W(7.8021, 5.6206)
INC CONTH120
///DISPLAY "PROCESÓ EXTRUSORA HILERA 120 #",CONTH120

```

```

//TIEMPO DE PROCESO DE UNA HILERA
IF CONTH120=3 THEN
BEGIN
  CONTH120=0
  ///DISPLAY "RESTEO DE CONTH120"
END
  1 HILERA ARMADO_RUMAS FIRST 1 DEC WIPEXT
HILERA ARMADO_RUMAS
INC CONTH
//IF CONTH = 1 THEN GET PLATAFORMA
IF CONTH = 3 THEN
BEGIN
  //DISPLAY "HORA 120: ", CLOCK()
  TIEMPO_RUMA120=CLOCK()-V120
  PUERTA_TIEMPO_RUMA=0
  CONTH=0
END
RUMA ARMADO_RUMAS
GROUP 3 AS RUMA
GET PLATAFORMA
IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONT_RUMA120
  1 RUMA PRE_SECADO FIRST 1 MOVE FOR T(0.5827, 0.83, 2.3083)
RUMA PRE_SECADO
TEP=CLOCK(MIN)
//IF CLOCK(>)10080 THEN INC CONTRUMA
WAIT B(0.9945, 1.6689, 1590, 6798.6)
  1 RUMA GRUPO_PRESECADO FIRST 1
RUMA GRUPO_PRESECADO //DISPLAY "HAY ", CONTENTS(GRUPO_PRESECADO, RUMA)
LOG "TIEMPO ESPERA PRESECADO", TEP
GROUP 8 AS RUMA8
RUMA8 GRUPO_PRESECADO 1 RUMA8 ACCESO_HORNO FIRST 1
RUMA8 ACCESO_HORNO //DISPLAY "1. VAR: "$VAR$" - EH: "$ENTRADA_HORNOS$" - AA: "$AA
WAIT UNTIL VAR=0 1 RUMA8 PUERTA_HORNO FIRST 1
RUMA8 PUERTA_HORNO VAR=1
//DISPLAY "PUERTA CERRADA"
  1 RUMA8 HORNO FIRST 1 MOVE FOR W(6.5985, 7.8504)//MOVER RUMAS AL
HORNO HORNO
IF AA<>CALDAY() THEN ENTRADA_HORNO=0
INC ENTRADA_HORNO
//DISPLAY "2. ENTRADA_HORNO: "$ENTRADA_HORNOS$" - AA: "$AA
WAIT B(1.4158, 1.7353, 132, 180)
RUMA8 SALIDA_HORNO 1 RUMA8 SALIDA_HORNO FIRST 1
RUMA8 SALIDA_HORNO VAR=0
//DISPLAY "PUERTA ABIERTA"
  1 RUMA8 HORNO_ESPERA FIRST 1 MOVE FOR T(2.2209, 6.05, 10.656)
RUMA8 HORNO_ESPERA UNGROUP
RUMA HORNO_ESPERA 1 RUMA AREA_DE_EMPAQUE FIRST 1
RUMA AREA_DE_EMPAQUE
IF NUM_EMPACADORAS=1 THEN ROUTE 1
IF NUM_EMPACADORAS=2 THEN ROUTE 2
IF NUM_EMPACADORAS=3 THEN ROUTE 3
IF NUM_EMPACADORAS=4 THEN ROUTE 4
IF NUM_EMPACADORAS=5 THEN ROUTE 5
  1 RUMA ESTACION1 FIRST 1
  2 RUMA ESTACION1 FIRST 1
  RUMA ESTACION2 FIRST
  3 RUMA ESTACION1 FIRST 1
  RUMA ESTACION2 FIRST
  RUMA ESTACION3 FIRST
  4 RUMA ESTACION1 FIRST 1
  RUMA ESTACION2 FIRST
  RUMA ESTACION3 FIRST
  RUMA ESTACION4 FIRST

```



```

CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET3 GROUP 100 AS PALLET_FINAL 1 CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET3 FIRST 1
PALLET_FINAL GRUPO_PALLET3 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1
RUMA ESTACION4
IF CALHOUR() < 12 THEN
BEGIN
//DISPLAY "E4: 1 Emp - ",clock()
WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120
FREE PLATAFORMA
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END
ELSE
BEGIN
//DISPLAY "E4: 2 Emp - ",clock()
WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120
FREE PLATAFORMA
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END

CAJA_EMPACADA ESTACION4 IF CLOCK() > 10080 THEN INC 1 RUMA EXIT FIRST 1
CONT_CAJA
CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET4 FIRST 1
CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET4 GROUP 100 AS PALLET_FINAL 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1
PALLET_FINAL GRUPO_PALLET4 ESTACION5
IF CALHOUR() < 12 THEN
BEGIN
//DISPLAY "E5: 1 Emp - ",clock()
WAIT B(229.05, 158.73, -121.91, 157.48)// UN EMPACADOR RUMA120
FREE PLATAFORMA
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END
ELSE
BEGIN
//DISPLAY "E5: 2 Emp - ",clock()
WAIT B(9.131, 529.57, 11.96, 1337.3)// DOS EMPACADORES RUMA120
FREE PLATAFORMA
CREATE 20 AS CAJA_EMPACADA
END

CAJA_EMPACADA ESTACION5 IF CLOCK() > 10080 THEN INC 1 RUMA EXIT FIRST 1
CONT_CAJA
CAJA_EMPACADA GRUPO_PALLET5 FIRST 1
PALLET_FINAL GRUPO_PALLET5 1 PALLET_FINAL AREA_ESPERA FIRST 1
PALLET_FINAL AREA_ESPERA
WAIT 2 HR // TIEMPO EN HACER PRUEBAS DE SOLDADURA
IF CLOCK() > 10080 THEN INC 1 CONT_PALLET
PALLET_FINAL EXIT FIRST 1
CONTAINER BODEGA_POLVOS 1 CONTAINER PESADORA_POLVOS FIRST 1
CONTAINER PESADORA_POLVOS WAIT G(2.0489, 0.2945)// PREPARACION ANTES DE PESAR
WAIT G(22.401, 0.3115)// SELECCION DE POLVOS Y PESAJE
CONTAINER WIP_MEZCLA FIRST 1 MOVE FOR T(-0.0077, 0.17, 0.7342)// MOVER
CONTENEDOR WIP_MEZCLA 1 CONTAINER MEZCLADORA FIRST 1
CONTAINER MEZCLADORA WAIT W(4.7109, 0.7496)// COGER CONTENEDOR Y LLENARLO
CONTAINER WAIT W(10.673, 13.272)// MEZCLA 1
CONTAINER WAIT B(0.4045, 0.9545, 1.57, 5.15)// LIMPIEZA
CONTAINER WAIT W(4.0466, 11.198)// MEZCLA 2
CONTAINER TOCHERA FIRST 1 MOVE FOR W(2.7319, 1.0528) // CAE TODO EL
POLVO DE LA OLLA Y SE HACE UN TOCHO
CONTAINER TOCHERA CREATE 21 AS TOCHO 1 CONTAINER EXIT FIRST 1
TOCHO TOCHERA WAIT W(3.1562, 0.5942) //TIEMPO EN HACER UN TOCHO

```

```

TOCHO          GRUPO_TOCHOS      GROUP 7 AS TOCHOS_7      1      TOCHO          GRUPO_TOCHOS      FIRST 1
TOCHOS_7      GRUPO_TOCHOS      IF CLOCK(>)>10080 THEN
                BEGIN
                INC CONT_7TOCHOS
                //DISPLAY CONT_7TOCHOS
                END          1      TOCHOS_7      ESPERA_TOCHOS      FIRST 1
TOCHOS_7      ESPERA_TOCHOS      WAIT UNTIL CONT_CARGA_TOCHOS = 0
                ///DISPLAY "ENTRA TOCHO A CARGAR (CARGA=0)"
                1      TOCHOS_7      CARGA_TOCHOS      FIRST 1
TOCHOS_7      CARGA_TOCHOS      CONT_CARGA_TOCHOS = 1
                ///DISPLAY "se CIERRA entrada de TOCHO (CARGA=1)"
                //WAIT G(1.9042, 1.6495)// TIEMPO DE CARGA DE TOCHOS "NO ES"
                WAIT B(0.34824, 0.59905, 1.92, 6.92)// TIEMPO DE CARGA DE TOCHOS
                1      TOCHOS_7      USO_TOCHOS      FIRST 1
TOCHOS_7      USO_TOCHOS      CONT_USO_TOCHOS = 1
                ///DISPLAY "se ABRE entrada de HILERA (USO=1)"
                WAIT UNTIL WIPEXT=1
                WAIT B(0.9423, 0.40539, 1.4, 5.57)//TIEMPO QUE TRABAJA EXTRUSORA
                ///DISPLAY "CAMBIO DE TOCHO"
                1      TOCHOS_7      SALIDA_TOCHOS      FIRST 1
TOCHOS_7      SALIDA_TOCHOS      CONT_CARGA_TOCHOS = 0
                ///DISPLAY "se CIERRA entrada de HILERA (USO=0)"
                CONT_USO_TOCHOS = 0
                ///DISPLAY "se ABRE entrada de TOCHO (CARGA=0)"
                IF CLOCK(>)>10080 THEN INC CONT_7TOCHOS_USADOS
                1      TOCHOS_7      EXIT          FIRST 1

```

```

*****
*                               Arrivals                               *
*****

```

Entity	Location	Qty each	First Time	Occurrences	Frequency	Logic
ALAMBRON	CABALLETE	1		INF	50 MIN	
CONTAINER	BODEGA_POLVOS	1		INF	10 MIN	

```

*****
*                               Shift Assignments                       *
*****

```

Locations	Resources	Shift Files	Priorities	Disable	Logic
CABALLETE		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
TREFILADORA		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
CORTADORA1		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
CORTADORA2					
CORTADORA3					
EXTRUSORA		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
HORNO		C:\Documents and Settings\Este	99,99,99,99	No	
PUERTA_HORNO					

```

ESTACION1          C:\Documents and Settings\Este 99,99,99,99 No
ESTACION2
ESTACION3
ESTACION4
ESTACION5

PESADORA_POLVOS    C:\Documents and Settings\Este 99,99,99,99 No

MEZCLADORA         C:\Documents and Settings\Este 99,99,99,99 No
TOCHERA

```

```

*****
*                               Attributes                               *
*****

```

```

ID      Type      Classification
-----
TEP     Real      Entity

```

```

*****
*                               Variables (global)                       *
*****

```

```

ID      Type      Initial value Stats
-----
CONT_USO_TOCHOS    Integer    0      Time Series
CONT_CARGA_TOCHOS  Integer    0      Time Series
CONT_RUMA120       Integer    0      Time Series
CH                Integer    0      Time Series
CONTH              Integer    0      Time Series
PUERTA_TIEMPO_RUMA Integer    0      Time Series
V120               Real       0      Time Series
TIEMPO_RUMA120    Real       0      Time Series
CONT_CAJA          Integer    0      Time Series
CONT_PALLET        Integer    0      Time Series
CONT_7TOCHOS       Integer    0      Time Series
CONT_7TOCHOS_USADOS Integer    0      Time Series
AA                 Integer    1      Time Series
ENTRADA_HORNO      Integer    0      Time Series
VAR                Integer    0      Time Series
CONTH120           Integer    0      Time Series
WIPEXT            Integer    0      Time Series

```

```

*****
*                               Macros                                   *
*****

```

```

ID      Text
-----
ABC
NUM_CORTADORAS    2
VELOCIDAD_CAMBIO  12.668
CAP_TOCHERA       1
NUM_RUMAS         100
NUM_EMPACADORAS  4

```

```

*****
*                               External Files                               *
*****

```

ID	Type	File Name
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\caballete.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\trefiladora2.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\cortadora.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\extrusora.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\horno.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\empaque.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\pesaje.sft	(null)	Shift
(null)	Shift	C:\Documents and Settings\Esteban Espinoza\My Documents\ESTEBAN\TESIS\Modelo Final - Planta de
Electrodos\tochera.sft		

BIBLIOGRAFÍA

1. BARTON RUSSELL R., Designing Simulation Experiments, Winter Simulation Conference, 2004
2. FERRÉ JOAN, RIUS F. XAVIER, Introducción al Diseño Estadístico de Experimentos, Universitat Rovira i Virgili, España
3. GARCÍA DUNNA EDUARDO, GARCÍA REYES HERIBERTO, CÁRDENAS BARRÓN LEOPOLDO E., Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel, Primera Edición, Editorial Pearson Educación, México, 2006
4. HARRELL CHARLES, GHOSH BIMAN K., BOWDEN JR. ROYCE O., Simulation Using ProModel, Segunda Edición, Editorial Mc Graw Hill, USA, 2003
5. KAUKISH BALAKRISHNAN, SAN ANAND, DAVID KELTON, Integrating Simulation and Design of Experiments to Identify Factors for Layout Design, University of Cincinnati, Cincinnati
6. KELTON W. DAVID, RUSSELL R. BARTON, Experimental Design for Simulation, Winter Simulation Conference, 2003

7. MONTGOMERY DOUGLAS C., Diseño y Análisis de Experimentos, Grupo Editorial Iberoamérica, México, 1991
8. PROMODEL CORPORATION, Decision Making Tools and Techniques – ProModel, Página Web Oficial de ProModel, 1996 – 2008, <http://www.promodel.com/> (Consultado en Febrero del 2008)
9. PROMODEL CORPORATION, ProModel User Guide, Versión 7, 2006
10. PROMODEL CORPORATION, SimRunner User Guide, 2002
11. SANCHEZ SUSAN M., Work Smarter, Not Harder: Guidelines for Designing Simulation Experiments, Winter Simulation Conference, 2006
12. VILAR FERNÁNDEZ JUAN M., Estadística 2, Página Web para Segundo Curso de Estadística, Universidade da Coruña, España, <http://www.udc.es/dep/mate/estadistica2/cap2.html> (Consultado en Febrero del 2008)
13. VILLAREAL DANIEL, Simulación y Optimización de Procesos Discretos y Continuos: Estado del Arte y Tendencias, México, Monterrey NL