

FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA

MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA



MODELO MATEMÁTICO PARA UN PLAN DE  
PRODUCCIÓN DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO  
DE PRODUCTOS DE LENTES ÓPTICOS

TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS

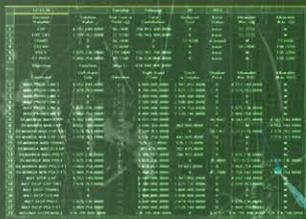


Tabla de datos con múltiples columnas y filas, posiblemente un modelo matemático o un plan de producción. El contenido es ilegible debido a la resolución.

Director de Tesis  
Dra. Quetzalli Aguilar Virgen  
Codirector de Tesis  
Dr. Paul Adolfo Taboada González

Octubre 2013  
Tijuana B C

Presenta  
Cesar Ismael Lopez Barreras

## CONTENIDO

- 1 Marco Contextual
- 2 Delimitación del problema
- 3 Marco teórico
- 4 Metodología
- 5 Resultados
- 6 Conclusiones y Recomendaciones
- 7 Bibliografía
- 8 Índice de figuras y tablas

$X_1 = 90$

$X_2$

$X_1 + X_2 = 150$

$2X_1 + X_2 = 180$

Optimizar Z: 
$$c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n$$

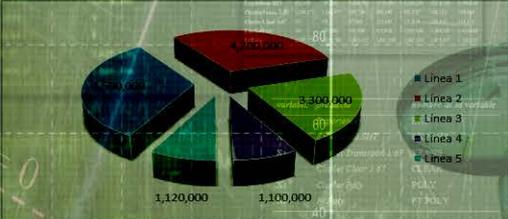
Sujeto a:

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m$$

Donde todas las  $X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$



$(1) 0.4000\text{Seg} + 0.3200\text{Seg} + 0.6720\text{Seg} + 0.4070\text{Seg} = 2.8000\text{Seg}$   
 $(2) 1.0000\text{Seg} + 0.2000\text{Seg} + 0.1000\text{Seg} + 0.6670\text{Seg} + 0.1000\text{Seg} = 2.0670\text{Seg}$   
 $(3) 1.0000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(4) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 0.6000\text{Seg} + 0.4000\text{Seg} = 4.0000\text{Seg}$   
 $(5) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(6) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(7) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(8) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(9) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$   
 $(10) 1.0000\text{Seg} + 1.2000\text{Seg} + 0.8000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} + 1.1000\text{Seg} = 5.2000\text{Seg}$

Producto	Producción	Costo	Beneficio	Alcance	Alcance
OP1	3,100,000	80,000	375,000,000	100%	77,500,000
OP2	2,100,000	120,000	252,000,000	100%	80,000,000
OP3	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP4	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP5	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP6	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP7	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP8	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP9	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000
OP10	1,100,000	150,000	165,000,000	100%	80,000,000

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

*FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA*

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**"MODELO MATEMÁTICO PARA UN PLAN DE  
PRODUCCIÓN DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO  
DE PRODUCTOS DE LENTES ÓPTICOS"**

**TESIS PARA OBTENER EL GRADO DE:  
MAESTRO EN CIENCIAS**

**Presenta**

**Cesar Ismael López Barreras**

**Director de Tesis  
Dra. Quetzalli Aguilar Virgen  
Codirector de Tesis  
Dr. Paul Adolfo Taboada González**

**Tijuana, B. C.**

**Octubre 2013**

**Universidad Autónoma de Baja California**  
**FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS E INGENIERÍA**  
**COORDINACIÓN DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

FOLIO No. 105

Tijuana, B. C., a 15 de octubre de 2013

**C. Cesar Ismael López Barreras**  
**Pasante de: Maestro en Ciencias**  
**Presente**

El tema de trabajo y/o tesis para su examen profesional, en la  
Opción TESIS

Es propuesto, por los CC. Dra. Quetzalli Aguilar Virgen y Paul Adolfo Taboada  
González.

Quienes serán los responsables de la calidad de trabajo que usted presente,  
referido al tema "MODELADO MATEMÁTICO PARA UN PLAN DE PRODUCCIÓN  
DE UNA PLANTA DE PROCESAMIENTO DE PRODUCTOS DE LENTES ÓPTICOS".

El cual deberá usted desarrollar, de acuerdo con el siguiente orden:

- I.- Marco Contextual
- II.- Delimitación del problema
- III.- Marco Teórico
- IV.- Metodología
- V.- Resultados
- VI.- Conclusiones y recomendaciones generales
- VII.- Bibliografía
- VIII.- Índice de Figuras y Tablas

  
\_\_\_\_\_  
Q. Noemí Hernández Hernández  
**Sub-Director Secretario**



  
\_\_\_\_\_  
Dra. Quetzalli Aguilar Virgen  
**Director de Tesis**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Paul Adolfo Taboada González  
**Co-Director de Tesis**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luis Enrique Palafox Maestre  
**Director**

## **Resumen**

El Ingeniero industrial como parte de su quehacer científico y emprendedor utiliza métodos científicos y modelos matemáticos de investigación de operaciones para tomar decisiones gerenciales con el fin de mejorar los indicadores de rentabilidad del producto y bienestar de la propia empresa. En la presente investigación se presenta una aproximación de la forma más adecuada al estado del arte del modelado matemático de la programación lineal y se muestra la potencialidad de las técnicas para resolver problemas de ingeniería industrial. A partir de la literatura disponible acerca de programación de producción, tanto de materiales, transporte y localización, entre otros, se lograron identificar los modelos matemáticos que se referencian en este documento. El desempeño de los modelos desarrollados están optimizados de acuerdo a las características y complejidad de los problemas abordados.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	MARCO CONTEXTUAL.....	7
1.1	La compañía Carl Zeiss Vision.....	7
1.2	Estructura de la Fundación Carl Zeiss Vision.....	7
1.2.1	Carl Zeiss de México.....	7
1.2.2	Carl Zeiss Tijuana.....	8
1.3	Productos.....	8
1.4	Descripción de los procesos de producción.....	9
1.5	Materia prima e insumos utilizada en el proceso.....	10
2.	DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA.....	11
2.1	Líneas de producción de Carl Zeiss Tijuana.....	11
2.2	Los precios de venta de Carl Zeiss Tijuana.....	11
2.3	El Costo de Producción de Carl Zeiss Tijuana.....	12
2.4	Distribución de la capacidad Instalada de Carl Zeiss Tijuana.....	12
2.4.1	Área crítica: Producción.....	14
2.4.2	Características generales del área de producción de Carl Zeiss Tijuana.....	15
2.5	Planteamiento, formulación y sistematización del problema.....	15
2.6	Preguntas de investigación.....	16
2.7	Objetivos de la investigación.....	16
2.8	Justificación de la investigación.....	17
2.9	Hipótesis de investigación.....	17
3.	MARCO TEÓRICO.....	18
3.1	Definición de Investigación de Operaciones.....	18
3.2	Fases de un estudio de Investigación de Operaciones.....	18
3.2.1	Primera fase: Definición del problema.....	19
3.2.2	Segunda fase: Construcción del modelo.....	19
3.2.3	Tercera fase: Solución del modelo.....	19
3.2.4	Cuarta fase: Validación del modelo.....	19
3.2.5	Quinta fase: Implantación de los resultados finales.....	20
3.3	Modelos de Investigación de Operaciones.....	20
3.3.1	Modelos Matemáticos.....	20
3.3.2	Modelos de Investigación de operaciones alternos.....	21
3.4	Aplicaciones de la Investigación de Operaciones.....	21
3.5	Supuestos de Programación Lineal.....	24
3.6	Análisis de Posóptimo para Programación Lineal.....	26
3.7	Software utilizado en Investigación de Operaciones.....	27
4.	METODOLOGIA.....	27
4.1	Fuentes y técnicas de recolección de información.....	28
4.2	Tratamiento de la información y procedimiento de análisis.....	28

4.2.1	Definición del problema y recolección de datos relevantes.....	29
4.2.2	Identificación de las alternativas de decisión.....	30
4.2.3	Restricciones y requisitos del sistema.....	31
5.	RESULTADOS.....	32
<b>5.1</b>	<b>Formulación del modelo matemático para el problema en el primer escenario.....</b>	<b>32</b>
5.1.1	Solución al primer escenario.....	34
5.1.2	Prueba del modelo y mejoramiento.....	36
5.1.3	Análisis de sensibilidad.....	37
5.1.4	Análisis de sensibilidad: Holgura.....	37
5.1.5	Análisis de sensibilidad: Cambios en la función objetivo.....	38
5.1.6	Análisis de sensibilidad: Cambios en las restricciones.....	40
<b>5.2</b>	<b>Formulación del modelo matemático para el problema en el segundo escenario.....</b>	<b>41</b>
5.2.1	Solución al segundo modelo.....	43
5.2.2	Prueba del modelo y mejoramiento.....	44
5.2.3	Análisis de sensibilidad: Holguras.....	45
5.2.4	Análisis de sensibilidad: cambios en la función objetivo.....	46
5.2.5	Análisis de sensibilidad: cambios en las restricciones.....	47
<b>5.3</b>	<b>Formulación del modelo matemático para el problema en el tercer escenario.....</b>	<b>48</b>
5.3.1	Solución del tercer escenario.....	49
5.3.2	Prueba del modelo y mejoramiento.....	50
5.3.3	Análisis de sensibilidad: Holguras.....	50
5.3.4	Análisis de sensibilidad: Cambios en la función Objetivo.....	51
5.3.5	Análisis de sensibilidad: cambio en las restricciones.....	52
<b>5.4</b>	<b>Comparación de los tres escenarios.....</b>	<b>52</b>
<b>5.5</b>	<b>Preparación para la aplicación del Modelo prescrito por la administración.....</b>	<b>56</b>
<b>5.6</b>	<b>Puesta en marcha.....</b>	<b>56</b>
<b>5.7</b>	<b>Observación de resultados y retroalimentación.....</b>	<b>57</b>
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES.....	57
<b>6.1</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones para el primer escenario.....</b>	<b>58</b>
<b>6.2</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones para el segundo escenario.....</b>	<b>58</b>
<b>6.3</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones para el tercer escenario.....</b>	<b>59</b>
<b>6.4</b>	<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>59</b>
<b>6.5</b>	<b>Recomendaciones generales.....</b>	<b>62</b>
7.	BIBLIOGRAFIA.....	63
8.	INDICE DE FIGURAS Y TABLAS.....	66
<b>8.1</b>	<b>Índice de Figuras:.....</b>	<b>66</b>
<b>8.2</b>	<b>Índices de Tablas:.....</b>	<b>66</b>

## **INTRODUCCION**

En todas las empresas y a toda hora se toman decisiones; puede ser acerca del programa diario de producción, el uso de algún material en específico, la asignación de algún recurso. Frecuentemente, la mayoría de las empresas no utilizan el método de toma de decisiones más adecuado o simplemente no se tiene un método para ello. La creciente globalización hace que todas las empresas incorporadas al sector industrial se vean en la urgente necesidad de mejorar la calidad de sus productos sin dejar a un lado la productividad del mismo y su costo.

La presente investigación aborda una situación que enfrenta Carl Zeiss Vision Tijuana que se dedica a producir lentes para el cuidado de la visión ocular, entre otros productos. La situación que se menciona es una problemática en el área de producción, determinar un plan óptimo de producción anual. El problema se resuelve con un modelo matemático basado en programación lineal del área de investigación de operaciones. El documento desarrolla tres escenarios en los cuales se vierten una amplia gama de variables que en conjunto forman el sistema general de Carl Zeiss. Tales escenarios son realizados con la finalidad de obtener un modelo lineal que arroje como resultado las inferencias necesarias para llegar a tomar una decisión acerca del plan de producción, lo que indica que tal modelo comprende todas las áreas involucradas con producción, siendo estas: mercadotecnia, compras-ventas, inventario o almacén y entre otras. Además de identificar otras áreas de oportunidad para el resto de las áreas, no solamente producción. Esta investigación sirve de propuesta a la administración de Carl Zeiss Vision de Tijuana, ya que se presenta con fundamento en la investigación de operaciones para la toma de decisiones, por lo tanto, más confiables dado al carácter científico por el que esta creado. Finalmente se recomienda la estrecha cooperación entre los departamentos para obtener más y mejores resultados.

## **1. MARCO CONTEXTUAL.**

A continuación se identifica el entorno en el que esta investigación fue desarrollada y se da una idea clara de la importancia del caso de estudio, así como la ubicación de la compañía Carl Zeiss Vision dentro del entorno empresarial, económico y social.

### **1.1 La compañía Carl ZeissVision**

Una compañía con locaciones a nivel mundial, dedicada a la fabricación de diversos productos ópticos, Aproximadamente 40 compañías de ventas y más de 100 filiales fuera de Alemania, además de 17 fábricas en el mundo.

La empresa se ha caracterizado por ser líder internacional en los campos de la óptica y optoelectrónica.

En los mercados de soluciones industriales, soluciones Investigación, Tecnología Médica y Óptica de consumo, Carl Zeiss ha contribuido al progreso tecnológico en todo el mundo desde hace más de 160 años y mejora la calidad de vida de muchas personas en todo el mundo.

### **1.2 Estructura de la Fundación Carl Zeiss Vision**

El propietario de ambos AG Carl Zeiss AG y SCHOTT es la Fundación Carl Zeiss (Carl-Zeiss-Stiftung). Carl Zeiss AG y Schott Glas AG tiene un número de filiales nacionales y extranjeras que se han combinado en dos organizaciones, el Grupo Carl Zeiss y el Grupo Schott.

#### **1.2.1 Carl Zeiss de México**

Dicha compañía tiene una larga presencia en el mercado mexicano, en la fabricación de productos de altos requerimientos, líder tecnológico e innovador en los campos de óptica, mecánica de precisión y visualización electrónica, que ha impuesto a nivel mundial estándares novedosos y tecnológicamente complejos para observar, experimentar, medir, analizar y procesar un amplio espectro de objetos.

Carl Zeiss de México es sede de la división regional en la República Mexicana, América Central y el Caribe, además de algunos países de América del Sur. En México operan tres diferentes divisiones comerciales que ofrecen soluciones integrales a las necesidades específicas de sus clientes:

1. Microscopía óptica y Electrónica.
2. Metrología Industrial.
3. Equipo de Oftalmología y Equipo Quirúrgico

### 1.2.2 Carl Zeiss Tijuana

Una de las empresas de manufactura de Carl Zeiss México se encuentra en la ciudad de Tijuana Baja California, que es donde se realizó el presente documento. Actualmente la empresa, antes llamada *Óptica Sola (1985)*, recientemente adquirida por *Carl Zeiss (2005)*, se encuentra ubicada en avenida De Los Insurgentes, 22580 Tijuana, Baja California como *Carl Zeiss Vision Manufactura De México, S. De R.L. De C.V.* la cual nos referiremos en esta investigación como Carl Zeiss Tijuana.

### 1.3 Productos

A través de los años, Carl Zeiss ha venido produciendo una buena cantidad de productos, en ocasiones depende de la temporada del año para sacar uno u otro. La tabla 1 nos muestra los productos que actualmente se están elaborando, de acuerdo con información proporcionada por el departamento de Producción de la planta:

*Tabla 1: Tipos de Productos*

<b>Categoría</b>	<b>Descripción</b>
<b>Premium</b>	Experience
	Clarlet Poly
	Clarlet 1.67 Transition
	Experience SHT
<b>SV Zeiss</b>	FT Poly
	Clarlet Clear 1.67
<b>Regular</b>	Instinctive
	Sola One
<b>Stock Picks</b>	ASL Poly
	SV CR
<b>FT Filler</b>	CR FT

Existen los métodos, equipo y elementos en general necesarios para su correcta elaboración, así como la mano de obra requerida. El complejo industrial es bastante grande, algunas de áreas con las que cuenta la planta son las siguientes: Cuarto de máquinas, cisterna, estacionamiento temporal, cámara fría, tratamiento de aguas de proceso, planta de tratamiento de aguas residuales, oficinas administrativas, almacén de polímeros y otros

químicos, estación de gasolina, estación de gas LP, cámara de llenado, taller de reparación de vehículos, comedor y baños, lavado de empaque 1 y 2, taller y almacén de reparaciones industriales.

#### 1.4 Descripción de los procesos de producción

Este apartado tiene como finalidad describir las áreas que intervienen en el proceso de producción que Carl Zeiss lleva a cabo para obtener su producto final. La figura 1 muestra las etapas de elaboración de las lentes de mica de resina:

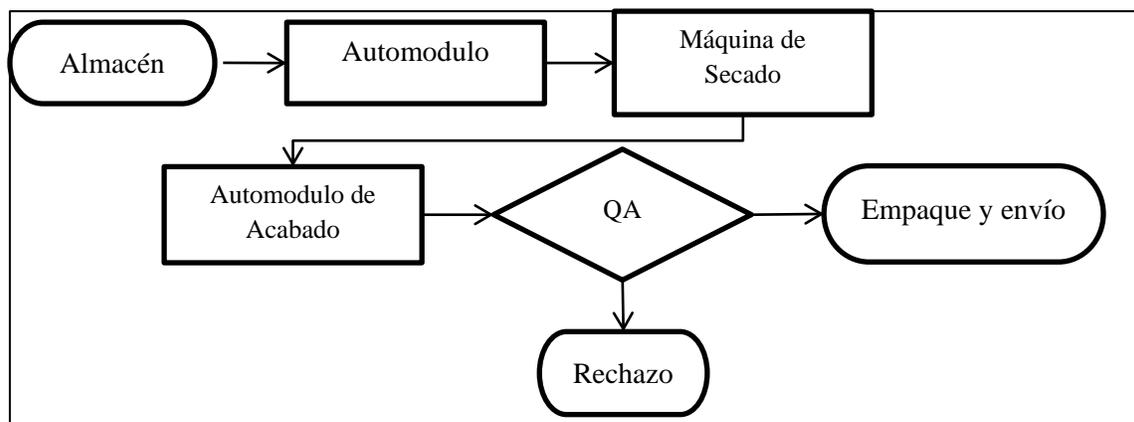


Figura 1: Proceso general de producción

- a) **Almacén** provee a producción de las materias primas: policarbonato, llamados *supersacos* o costales con el material en forma granulada, estas son llevadas en ciertas cantidades dependiendo del plan diario.
- b) **Automodulos**. Una vez en el área de producción este material es colocado en unos moldes de metal en forma de anillos, estos moldes son elaborados en la misma planta, estos moldes, los moldes a su vez, son puestos en charolas, en cantidades de 8, 12 o 24, dependiendo del tamaño o del tipo de producto las cuales son calentados a más de 300° Centígrados en el auto módulo de tal manera que el material granulado del policarbonato se derrita en el molde, este proceso dura de 20 a 40 minutos aproximadamente dependiendo de las cantidades que se quiere derretir.
- c) **Máquina de Secado**. Una vez terminado el proceso de Automodulo, estas son transportadas en una banda transportadora, al área de secado, donde el policarbonato en los moldes metálicos, se le da un lavado con agua y otros

solventes, en la cual también se le da a la superficie del policarbonato un acabado rustico con el uso de otros químicos. Al final se tiene la mica de policarbonato en semiacabado.

- d) **Automodulo de acabado.** En seguida las charolas son transportadas por bandas a la máquina de acabado, esta se encarga de darle un acabado fino a la superficie de la mica de policarbonato, mediante la aplicación de una resina epoxica, una vez aplicada entra a un proceso de pulido, el cual le da un acabo final.
- e) **Inspección de calidad (QA).** Las charolas son transportadas por medio de bandas al área de inspección, donde los colaboradores revisan el acabado del producto. En caso de haber producto no conformante, este es llevado a un área de rechazo, las charolas de producto conformante se llevan al área de empaque.
- f) **Empaque y envíos.** El material es empacado y listo para pasar hacia otra área de la planta donde es enmarcada la mica en los armazones o transportados a otros clientes.

### **1.5 Materia prima e insumos utilizada en el proceso**

En esta sección se presentan y describen los insumos y materias primas que Carl Zeiss utiliza en su proceso principalmente para obtener el producto final.

- a) **Policarbonato.** Material en forma de polvo granulado es la principal materia prima usada para los procesos que en este documento se analizan. Llamadas por su nombre en el área de producción y almacén como supersacos de poly.
- b) **Resina Epoxica.** Este material es una mezcla especial en forma líquida-plasma y es principalmente para darle el acabado final a las micas de policarbonato.
- c) **Charolas y moldes metálicos,** estos son usados para el proceso en sí, pero se consideran insumos. Al igual, solventes y otros químicos como: Alcohol Isopropilico, acetona, nitrógeno líquido (usado en los auto-módulos), toallas de limpieza con tratamiento químico, entre otras.
- d) **Material de empaque.** Toda la materia terminada es colocada en cajas de corrugado especialmente diseñadas, también se utiliza la espuma de poliuretano y bolsas plastificadas y/o metalizadas según sea el tipo de producto.

## 2. DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA

El análisis llevado en este documento se centra en el departamento de producción, del área de elaboración de micas de policarbonato, de la planta Carl Zeiss México ubicada en Tijuana Baja California. También abarca parte de la información dada por otras áreas que le dan soporte, ya sea: almacén, mercadotecnia, ingeniería, calidad y ventas.

### 2.1 Líneas de producción de Carl Zeiss Tijuana

La tabla 2 nos describe los tipos de productos analizados en este documento, además de las líneas en que se producen:

*Tabla 2: Líneas de producción*

<b>Línea</b>	<b>Producto</b>
1	Experience Experience SHT
2	Clarlet 1.67 Clear Clarlet Poly Clarlet 1.67
3	Transition FT poly

### 2.2 Los precios de venta de Carl Zeiss Tijuana

La tabla 3 nos muestra como la empresa maneja la siguiente información sobre los precios de venta de sus diferentes presentaciones:

*Tabla 3: Precios de Venta*

<b>Producto</b>	<b>Precio de venta/mica</b>
Experience	\$54.99
Experience SHT	\$49.89
Clarlet Transition 1.67	\$45.51
Clarlet Clear 1.67	\$35.24
Clarlet Poly	\$26.64
Ft Poly	\$20.75

Haciendo un análisis sobre el estado actual de Carl Zeiss, en el departamento de producción específicamente se tiene la siguiente información sobre la producción en

charolas físicas de todos sus productos en todas sus presentaciones desde 2007 hasta el 2012.

### 2.3 El Costo de Producción de Carl Zeiss Tijuana.

La tabla 4 nos presenta información de cuánto le cuesta a Carl Zeiss Tijuana producir una charola de cualquier producto. Se debe aclarar que para cualquier cálculo que se haga se utilizara el costo real de producción.

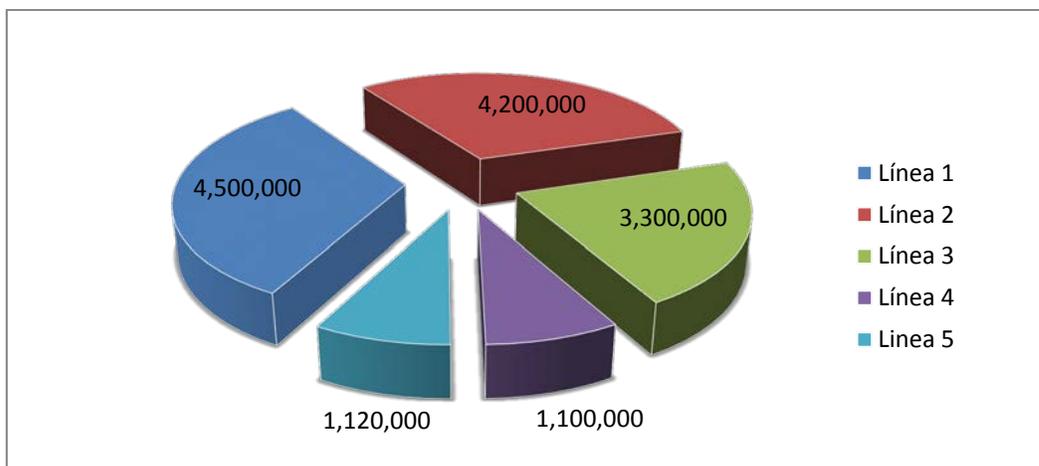
*Tabla 4: Costo real de producción*

Tipo de costo	de Exp.	Exp. SHT	Clarlet Trans	Clarlet Clear	Clarlet Poly	FT Poly
Costo Real	33.26	23.49	17.76	30.34	36.66	13.83

### 2.4 Distribución de la capacidad Instalada de Carl Zeiss Tijuana.

A continuación la figura 2, nos muestra como está distribuida la capacidad de producción de las líneas 1 al 5:

*Figura 2: Distribución de la capacidad instalada de producción por línea*



Hay que hacer notar que en la figura anterior se encuentran expuestas también la línea 4 y 5, tales líneas son tomadas solo como referencia para poder hacer la comparativa junto con el resto de las líneas, estas no son objeto de investigación dado que no se utilizan para los productos analizados en la tabla 2.

La tabla 5 presenta la capacidad de producción en charolas por hora (CPH). Como se puede observar existe un 27% de capacidad sin utilizar, lo que nos representa costos innecesarios.

*Tabla 5: Utilización de la capacidad instalada de producción*

<b>Capacidad de Producción</b>	<b>Capacidad Utilizada</b>	<b>Capacidad sin Utilizar</b>
11,700,000	8,487,297	3,212,703
100%	73%	<b>27%</b>

Un análisis del comportamiento de los productos en los últimos años en lo que a producción real se refiere, nos muestran las cantidades que aparecen como producción real (Tabla 6) que el departamento de Ventas junto con el de Mercadeo de Carl Zeiss Tijuana, proporcionan a producción.

*Tabla 6: Producción Real en Charolas*

<b>Tipo de Producto</b>	<b>Producto</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>	<b>2011</b>	<b>2012</b>
	Experience	2,393,230	2,931,538	3,088,536	3,411,868	3,688,268	4,052,148
	Experience SHT	471,428	797,202	1,208,783	1,753,001	2,136,258	2,578,263
Poly	Clarle Transition 1.67	1,266,272	1,146,377	897,759	686,399	601,325	526,123
Carbonate	Clarlet Clear 1.67			97,963	125,824	175,956	203,425
	ClarletPoly		167,180	631,438	871,016	1,025,236	1,306,187
	Ft Poly	2,350,776	2,099,789	1,906,415	1,802,300	1,860,254	1,878,857
<b>TOTAL</b>		<b>6,481,706</b>	<b>7,142,086</b>	<b>7,830,894</b>	<b>8,650,408</b>	<b>9,487,297</b>	<b>10,545,003</b>

Los datos totales mostrados desde 2007 hasta el año 2012, se puede observar una tendencia hacia el incremento en los volúmenes de producción de un año a otro.

En Base a la tabla 5 el producto *Experience SHT* desde 2007 hasta el 2012 muestra un incremento promedio en la producción de 331,784 charolas año con año.

El caso del *Experience* no es muy diferente del anterior; existe un incremento promedio mayor con respecto a la primera de 421,367 charolas año con año. Es 89,583 más que *Experience SHT*. Es notable, existe demanda ascendente.

El caso de *Clarlet Transition 1.67* salta a la vista un notable decremento promedio en la producción de 148,030 charolas de un año a otro. De 2007 a 2012 la producción se redujo en 740,149 Charolas.

Sin producción hasta el año de 2009, la producción de *Clarlet Clear 1.67* se incrementó en 22,861 charolas de 2009 al 2010, un incremento anual promedio de 35,154; por el momento lleva una tendencia hacia la alta.

Desde su lanzamiento en 2008 la presentación de *Clarlet Poly* ha venido teniendo un incremento promedio anual de 284,752 charolas. La diferencia entre el primer año y el último es de 1,139,007 charolas.

En otras palabras ha aumentado aproximadamente 8 veces más de su lanzamiento inicial. Este es un producto que ha dejado mucho beneficio económico a la empresa.

Por último aparece la trayectoria que ha venido el producto de *FT Poly*, que es el tercero en orden de volúmenes de producción de esta familia de productos que Carl Zeiss Tijuana elabora. Con un decremento promedio de 182,825 charolas hasta el 2009; en el año 2010 un pequeño incremento de 57,954 tiene lugar con respecto a 2009; sin embargo en su último ciclo (2012) tuvo un decremento hasta el momento con respecto al 2011. Lo cual podemos hacer una inferencia de que este producto tiene un comportamiento variable de producción, tal situación no es favorable para su futuro, de acuerdo al departamento de ingeniería.

Como se puede apreciar, existe una diversidad de comportamientos en los productos de la familia de Carl Zeiss, debido a diferentes factores que no se analizan en esta investigación, pero todos guardan un aspecto en común, la tendencia.

Conociendo los comportamientos históricos de los productos, es importante identificar un buen plan óptimo de producción que, además de decir cuánto producir, conduzca a la mejor utilización de los recursos disponibles.

#### **2.4.1 Área crítica: Producción**

Como se ha visto a través del análisis de la producción, existe incertidumbre sobre la temporada 2014-2015, algo que preocupa al gerente de producción, así como a todos sus colaboradores. “Se sabe que contar con un plan óptimo de producción trae beneficios en muchos aspectos” (Banks, J y Gibson, 1997), en este caso el “área crítica” es Producción, porque es este el departamento que debe asegurarse de:

- 1. Contar con plan de producción para todos sus productos y presentaciones*
- 2. Aprovechar al máximo su capacidad productiva y,*
- 3. Mantener en almacén los niveles de materia prima e insumo en niveles óptimos*

### 2.4.2 Características generales del área de producción de Carl Zeiss Tijuana

Ya se ha indicado que la empresa tiene funcionando 5 líneas de producción, pero solamente se analizan las líneas 1, 2 y 3. El tipo de proceso de producción que se maneja es en línea. La tabla 7 nos muestra el personal con el que cuenta la empresa:

Tabla 7: Personal de Producción

<b>Total de personal</b>	<b>Personal sindicalizado</b>	<b>Personal no sindicalizado</b>
199	125	74

Un dato importante que textualmente no debe faltar es el del costo de producir para Carl Zeiss Tijuana, para este caso se toma el dato de la tabla 4 y se la anexa el costo estándar de producción como referencia en futuras consultas.

Tabla 8: Comparativa de Costos de Producción

<b>Producto</b>	<b>Costo estándar*</b>	<b>Costo real*</b>
Clarlet Poly	36.81	36.66
Experience	33.34	33.26
Clarlet Clear	30.34	30.34
Experience SHT	23.49	23.49
Clarlet Trans	17.76	17.76
FT Poly.	13.83	13.83

\*Los costos están en dolares

En los almacenes de Carl Zeiss Tijuana se mantiene un inventario de tres días de producto terminado. A partir de allí el producto terminado se agota y si no se tiene cuidado puede traer deficiencias económicas a la empresa.

### 2.5 Planteamiento, formulación y sistematización del problema

La empresa Carl Zeiss Tijuana, al menos anualmente debe tomar una decisión respecto al programa de producción anual. La estructuración de dicho programa en tiempo y forma es indispensable ya que de él derivan otras decisiones, como por ejemplo, la incorporación de mano de obra y la adquisición de equipo e insumos en procesos específicos. El caso de estudio se enfoca en las micas de policarbonato de marca Carl ZeissVision,. Toda la información necesaria para el caso es proporcionada por el departamento de producción de la planta y es incorporada a la metodología de Investigación de Operaciones para casos que se adapten a la técnica de Programación

Lineal. Producción de Carl Zeiss, desea obtener un plan óptimo para su siguiente temporada; para ello, el documento enfoca sus análisis en el área de producción de micas de policarbonato, para el programa de producción 2014-2015 (Misser, H. J. 1997). Tal plan se tiene que generar una temporada antes, es decir en la temporada 2013-2014.

Una consideración importante es que el modelo matemático de Investigación de Operaciones que se presenta supone que los recursos permanecen constantes y no considera cambio alguno. Sin embargo, se incluye un apartado sobre Análisis de Sensibilidad y/o Validación en el que se sugiere un intervalo a considerar en la disponibilidad de recursos.

Por todo lo anterior, la empresa desea conocer el programa óptimo de producción de la planta utilizando Investigación de Operaciones sabiendo que cuenta con varias presentaciones para sus productos, todos con diferentes contribuciones a la utilidad y demandas en el mercado; además se sabe también que está desperdiciando el 27% de su capacidad productiva.

Dicho en otras palabras, el problema formulado queda de la siguiente manera:

*¿Qué cantidad de cada producto de micas de policarbonato de Carl Zeiss se debe elaborar para que se aproveche mejor el recurso disponible y se obtengan mayores utilidades, considerando las limitaciones del equipo y/o restricciones del sistema?*

## **2.6 Preguntas de investigación**

1. ¿Cuál es el volumen de producción más conveniente para la empresa para la temporada 2014-2015?
2. ¿Qué recursos están siendo mal aprovechados y pueden optimizarse?
3. Si la planta busca incrementar sus utilidades, ¿Qué recursos deben aumentar y/o disminuir?
4. ¿Cuánta capacidad de producción instalada se estará desperdiciando?

## **2.7 Objetivos de la investigación**

Determinar un modelo matemático para poder realizar un plan de producción de micas de policarbonato que produce Carl ZeissVision planta Tijuana para la temporada 2014 – 2015 empleando la herramienta de programación lineal.

## Objetivos Específicos

1. Optimizar el proceso de producción mediante la determinación de los recursos que no se utilizan o están siendo mal utilizados.
2. Definir la capacidad real del equipo y las instalaciones de la compañía.
3. Recomendar a la compañía diversas opciones para mejorar sus ingresos.
4. Proponer un programa de investigación de operaciones para la toma de decisiones.

### **2.8 Justificación de la investigación**

El uso de modelos matemáticos de investigación de operaciones permite conocer mejor el comportamiento o capacidad de un proceso de producción, dado que en estas se integran variables a un modelo, en función a recursos limitados, como en este caso, la capacidad instalada real de producción, disponibilidad de insumos, materia prima y mano de obra, entre otros, datos que el programa actual de producción no contempla, lo que significa que se obtienen mejores resultados e información que antes se ignoraba, la cual bien interpretada y manipulada trae grandes beneficios.

La implementación de investigación de operaciones en el caso de la empresa de productos ópticos ayudara a mejorar los actuales procesos productivos, reduciendo costos y de tal manera aumentando el rendimiento de las mismas.

Los resultados pueden ayudar a crear un nuevo proceso o mejorar el actual ya que se da la pauta para, por ejemplo, reducir o aumentar la capacidad de las líneas, agregar o quitar un producto. La metodología propuesta para el análisis del caso, pueden modificar los resultados que hasta ahora se han estado obteniendo, por lo que el uso de la técnica de Programación Lineal de Investigación de Operaciones supera a la actualmente utilizada: Pronósticos. De hecho, los pronósticos forman sólo un componente del modelo y que, al igual que todos los otros componentes, son sumamente importantes. El documento ofrece un modelo matemático como resultado de la integración los componentes requeridos por la metodología adoptada para estos casos.

### **2.9 Hipótesis de investigación**

1. Dado que en el actual programa de producción no se contemplan factores que en el modelo matemático si se hace, al utilizar Investigación de operaciones para determinar el

programa de producción anual para la empresa se obtendrán ahorros en costos para producción.

2. La toma de decisiones basada en los resultados dados por la investigación de operaciones permite mejorar la productividad de la empresa al tener un mayor y mejor uso de la capacidad de producción y de la maquinaria en el proceso analizado.

### **3. MARCO TEÓRICO**

Una de las metodologías más útiles para la toma de decisiones es: La Investigación de Operaciones. Por ello, en este apartado se citan las teorías, estableciendo similitudes y diferencias, resultados de investigación que apoyen tales teorías y se indican los tipos de estudios que se han realizado: de caso o experimentales, cuantitativos o cualitativos y finalmente se elige una teoría justificando su pertinencia al objeto de la investigación.

#### **3.1 Definición de Investigación de Operaciones**

Según Prawda (1993) hace hincapié en la definición más completa y, que ha sido tomada de referencia por varios autores de libros en sus textos, es la que presentada por Churchman, Ackoff y Arnoff en el año de 1968 que a la letra dice:

La Investigación de Operaciones es la aplicación, por grupos interdisciplinarios, del método científico a problemas relacionados con el control de las organizaciones ó sistemas (hombre-máquina) a fin de que se produzcan soluciones que mejor sirvan a los objetivos de toda organización.

A continuación se expone la definición de Investigación de Operaciones, según los siguientes autores:

*La Investigación de Operaciones aspira a determinar el mejor curso de acción óptimo de un problema de decisión con la restricción de recursos limitados, aplicando técnicas matemáticas para representarlo por medio de un modelo y analizar problemas de decisión.*  
*Taha, 1998*

Significa hacer investigación sobre las operaciones referentes a la conducción y coordinación de actividades dentro de una organización aplicada a una gama extraordinariamente amplia.

*Hillier - Lieberman, 2002*

#### **3.2 Fases de un estudio de Investigación de Operaciones**

Según Hillier-Lieberman, (2002) las principales fases a través de las cuales pasaría el equipo a fin de efectuar un estudio de IO son:

1. Definición del problema
2. Construcción del modelo
3. Solución del modelo
4. Validación del modelo
5. Implantación de los resultados finales

### **3.2.1 Primera fase: Definición del problema**

La primera fase del estudio necesita de una definición del problema. Desde el punto de vista de IO esto indica tres aspectos principales:

- a) Una descripción de la o del objetivo del estudio
- b) Una identificación de las alternativas de decisión del sistema
- c) Un reconocimiento de las limitaciones, restricciones y requisitos del sistema

### **3.2.2 Segunda fase: Construcción del modelo**

Dependiendo de la definición del problema, el equipo de IO deberá decidir el modelo más adecuado para la representación del problema. Tal modelo deberá especificar expresiones cuantitativas para el objetivo y restricciones del problema en función de sus variables de decisión. Si el modelo resultante se ajusta a uno de los modelos matemáticos comunes (por ejemplo Programación Lineal), puede obtenerse una solución conveniente mediante técnicas matemáticas.

### **3.2.3 Tercera fase: Solución del modelo**

En modelos matemáticos esto se logrará usando técnicas de optimización bien definidas y se dice que el modelo proporcionara una solución “óptima”.

Además de la solución (óptima), del modelo uno también debe asegurar siempre que sea posible, información adicional sobre el comportamiento de la solución debida a cambios en los parámetros del sistema. Usualmente esto se conoce como “Análisis de Sensibilidad”.

### **3.2.4 Cuarta fase: Validación del modelo**

Un modelo es válido si, independientemente de sus inexactitudes al representar el problema, puede dar una predicción confiable del comportamiento del sistema. Un método común para probar la validez de un modelo es comparar su funcionamiento con algunos

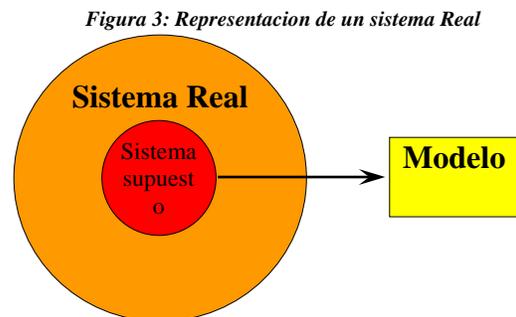
datos pasados disponibles del sistema actual. El modelo será válido si bajo condiciones similares de entradas puede reproducir el funcionamiento pasado del sistema.

### 3.2.5 Quinta fase: Implantación de los resultados finales

Implica la traducción de los resultados e instrucciones de operación detallada, emitidas en una forma comprensible a los individuos que administrarán y operarán el sistema después. La interacción de equipo de IO y el personal de operación llegará a su máximo en esta fase. La comunicación entre estos grupos puede mejorarse buscando la participación del personal de operación al desarrollar el plan de implantación.

## 3.3 Modelos de Investigación de Operaciones

Un modelo es una representación ideal de un sistema y la forma en que este opera (figura 3). El objetivo es analizar el comportamiento del sistema o bien predecir su comportamiento futuro. Los siguientes autores manifiestan la conceptualización de modelo:



Es el vehículo para resumir un problema de decisión, en forma tal que haga posible la identificación y evaluación sistemática de todas las alternativas de decisión del problema. Después se llega a una decisión seleccionando la alternativa que se juzgue mejor.

*Taha, 1998*

Son representaciones idealizadas, que extraen la esencia de la materia de estudio, muestran interrelaciones y facilitan su análisis.

*Hillier – Lieberman, 2002*

### 3.3.1 Modelos Matemáticos

Un modelo es producto de una abstracción de un sistema real: eliminando las complejidades y haciendo suposiciones pertinentes, se aplica una técnica matemática y se obtiene una representación simbólica del mismo, el cual es el modelo aplicado a este documento. Un modelo matemático consta al menos de tres conjuntos básicos de elementos:

- a) Variables de decisión y parámetros. Las variables de decisión son incógnitas que deben ser determinadas a partir de la solución del modelo.

- b) Restricciones. Las restricciones son relaciones entre las variables de decisión y magnitudes que dan sentido a la solución del problema y las acotan a valores factibles.
- c) Función Objetivo. La función objetivo es una relación matemática entre las variables de decisión, parámetros y una magnitud que representa el objetivo o producto del sistema.

### **3.3.2 Modelos de Investigación de operaciones alternos**

En ocasiones dos a más caminos que conducen a un mismo lugar. Las técnicas que tiene la Investigación de Operaciones no son la excepción. Algunos problemas de Programación Lineal se pueden resolver utilizando otras técnicas que se adapten al método de análisis. El analista de Investigación de Operaciones debe ser muy cuidadoso en este aspecto: cuidar lo sumo posible en guardar todas las características que distinguen un método de otro; para que, al momento de elegir el método de solución, no se equivoque.

Existe por ejemplo la Programación lineal, Análisis de redes, Programación dinámica, Programación entera (mixta, binaria), Programación no lineal, Simulación, Teoría de juegos, Cadenas de Markov, Teoría de colas, Teoría de inventarios, Pronósticos, Procesos Markovianos de decisión, Análisis de decisión; todos y cada una de éstas técnicas tienen una serie de variantes, lo que hace de la herramienta de Investigación de Operaciones un abanico de opciones para la toma de decisiones.

### **3.4 Aplicaciones de la Investigación de Operaciones**

Existe una gran diversidad de métodos de solución para los modelos de Investigación de Operaciones. Esta diversidad se debe básicamente a las variantes que cada modelo puede tener. Taha (1998) dice que las principales variantes son “primero: Si las variables del problema son discretas o continuas y, segundo: Si las restricciones son lineales o no lineales”.

Los principales campos de aplicación de la Investigación de Operaciones son:

- a) Relativa a personas: Organización y gerencia, Ausentismo y relaciones de trabajo, Economía, Decisiones individuales, Investigaciones de mercado.
- b) Relativa a personas y máquinas: Eficiencia y productividad, Organización de flujos en fábricas, Métodos de control de calidad,

inspección y muestreo, Prevención de accidentes, Organización de cambios tecnológicos.

- c) Relativa a movimientos: Transporte, Almacenamiento, distribución y manipulación, Comunicaciones.

La condición de factibilidad, dada una solución básica factible inicial al problema, garantiza la generación de nuevas soluciones básicas que son siempre factibles.

La condición de optimalidad que asegura que el vector no básico seleccionado por la condición de factibilidad mejorará el valor objetivo o de otra manera indicará que no se pueden hacer mejoras al modelo mediante la generación de nuevas soluciones básicas.

- a) La función objetivo es de tipo "maximizar".
- b) Las restricciones son ecuaciones (no desigualdades)
- c) Las variables de decisión,  $X_i$ , son no- negativas.

El término independiente colocado del lado derecho de cada restricción es no-negativo "Maximizar" puede ser reemplazado por "Minimizar".

Akbay (1996) señala que “los modelos de IO pueden ser de diferentes maneras. A veces se pueden utilizar ecuaciones matemáticas para describir el comportamiento del sistema y, cuando esto sucede, es posible optimizar una situación haciendo uso de Programación Lineal”. Por otro lado, Prawda (1993) menciona que la forma estándar de un modelo de PL es la siguiente:

Optimizar Z:

$$(1) \quad cX$$

$$(2) \quad AX \leq B$$

$$(3) \quad X \geq 0$$

Dónde:

X = Las variables del problema

Z = Contribución a la utilidad (función objetivo)

c = Vector renglón de costos ó utilidades unitarias de cada variable

A = Matriz (m x n) de los coeficientes tecnológicos ó consumo unitario de cada recurso por cada variable.

b = Vector columna de los recursos limitados (restricciones)

Aquí, la función lineal (1) se llama: “Función Objetivo”; las desigualdades (2) se llaman: “Restricciones” y a (3) se le conoce como: “Condición de No – Negatividad”. La palabra “Optimizar”, puede significar: “Maximizar” ó “Minimizar”. Entonces, si tenemos “m” restricciones y “n” variables, la estructura del modelo quedaría de la siguiente manera:

Optimizar Z:

$$c_1X_1 + c_2X_2 + \dots + c_nX_n$$

Sujeto a:

$$a_{11}X_1 + a_{12}X_2 + \dots + a_{1n}X_n \leq b_1$$

$$a_{21}X_1 + a_{22}X_2 + \dots + a_{2n}X_n \leq b_2$$

$$a_{m1}X_1 + a_{m2}X_2 + \dots + a_{mn}X_n \leq b_m$$

Donde todas las  $X_1, X_2, \dots, X_n \geq 0$

El procedimiento más común para resolver un modelo matemático de PL y, en el cual está basado la mayoría del software existente sobre Investigación de Operaciones, se llama: El Método Simplex.

A continuación se presenta un ejemplo de iniciación del método:

En primer lugar, hay que introducir tantas variables de holgura como restricciones haya, una variable para cada restricción, y se convierten en igualdades:

$$a_1X_1 + b_1X_2 + X_3 = C_1$$

$$a_2X_1 + b_2X_2 + X_4 = C_2$$

$$a_3X_1 + b_3X_2 + X_5 = C_3$$

Es decir, la función objetivo tiene el siguiente formato:

$$Z = AX_1 + BX_2 + 0X_3 + 0X_4 + 0X_5$$

Antes de aplicar el método, conviene construir el siguiente esquema de datos:

		$Z_j \Rightarrow$	A	B	0	0	0
Bases	$C_k$	$P_0$	x1	x2	x3	x4	x5
x3	0	c1	a1	b1	1	0	0
x4	0	c2	a2	b2	0	1	0
x5	0	c3	a3	b3	0	0	1
$C_j - Z_j \Rightarrow$		$C_k \cdot P_0$	-A	-B	0	0	0

Donde:

$Z_j$  : representa el coeficiente de cada variable en la función objetivo

Bases : representa las variables de holgura, una por cada restricción

$C_k$  : son los coeficientes de las variables de holgura en la función objetivo

$P_0$  : son los términos independientes de las restricciones

$x_1, x_2, x_3, x_4, x_5$  : son los valores de los coeficientes de las variables en las restricciones

$C_j - Z_j$  : es la fórmula  $\sum C_k \cdot x_i - Z_j$ , donde  $x_i$  es una columna de las variables

$C_k \cdot P_0$  : es la fórmula  $\sum C_k \cdot P_0$  que va maximizando la función

Cuando se ha obtenido la primera tabla se inicia con el proceso del Símplex.

“La Programación Lineal es una técnica dinámica y cuantitativa de evaluación de alternativas que se distingue por la asignación de recursos limitados entre actividades competitivas (de recursos escasos) de la mejor manera posible, es decir, en forma óptima”.

El método de solución será por medio de la utilización de un software de computadora llamado QSB+ (Quantitative Systems For Business Plus), versión 2.0 de Yih – Long Chang del Georgia Institute of Technology. Las diferentes pantallas de soluciones serán desplegadas directamente del software y serán adheridas a este documento. El software facilita los cálculos de las iteraciones y ahorra tiempo que puede ser utilizado en un análisis más detallado de los diferentes despliegues de soluciones.

La metodología a seguir es la que requieren los estudios de Investigación de Operaciones para casos que se adapten a la técnica de Programación Lineal, a saber:

1. Observar el sistema y definir el problema considerando el objetivo que se persigue con el estudio. Además, identificar las variables y restricciones que intervienen en el sistema e influyan en el objetivo propuesto.
2. Plantear (formular) el modelo matemático que representa el comportamiento del sistema a la luz del objetivo de optimización perseguido.
3. Derivar soluciones teóricas óptimas a partir de algoritmos matemáticos apropiados.
4. Probar (validar) el modelo matemático.
5. Preparar la implementación de la solución teórica óptima.
6. Implementar la solución óptima.

Observar los resultados reales y retroalimentar si la solución teórica difiere “realmente” de la real.

### **3.5 Supuestos de Programación Lineal**

Todos los supuestos o suposiciones de la Programación Lineal están implícitos en la formulación del modelo antes mencionado. Éstas se utilizan para evaluar si una técnica es adecuada para un problema dado. De este modo se asegura que la formulación proporciona una formulación satisfactoria del problema.

Suposición de Proporcionalidad. La proporcionalidad es una suposición sobre la función objetivo y sobre las restricciones.

*La contribución de cada actividad al valor de la función objetivo  $Z$  es proporcional al nivel de actividad  $x_i$ , como lo representa el término  $c_j x_j$  en la función objetivo. De manera similar, la contribución de cada actividad al lado izquierdo de cada restricción funcional es proporcional al nivel de la actividad  $x_j$ , en la forma en que lo representa el término  $a_{ij} x_j$ , en la restricción. En consecuencia, esta suposición elimina cualquier exponente diferente a 1 para las variables en cualquier término de las funciones (ya sea la función objetivo o la función en el lado izquierdo de cada una de las restricciones funcionales) en un modelo de Programación Lineal.<sup>1</sup>Hillier y Lieberman (2002)*

Suposición de Aditividad. Aunque la suposición de Proporcionalidad elimina los exponentes diferentes de 1, no prohíbe los términos de productos cruzados (términos que incluyen el producto de dos o más variables). La suposición de Aditividad sí elimina ésta posibilidad.

*Cada función en un modelo de Programación Lineal (ya sea la función objetivo o la función en el lado izquierdo de cada una de las restricciones funcionales) es la suma de las contribuciones individuales de las actividades respectivas. Hillier y Lieberman (2002)*

Suposición de Divisibilidad. Se refiere a los valores permitidos para las variables de decisión.

*Las variables de decisión de un modelo de Programación Lineal pueden tomar cualquier valor, incluyendo valores no enteros, que satisfagan las restricciones funcionales y de no negatividad. Así éstas variables no están restringidas a solo valores enteros. Como cada variable de decisión representa el nivel de alguna actividad, se supondrá que se pueden realizar a niveles fraccionales. Hillier y Lieberman (2002)*

Suposición de Certidumbre. Se refiere a los parámetros del modelo, es decir, a los coeficientes  $c_j$  en la función objetivo, los coeficientes  $a_{ij}$  en las restricciones funcionales y, los coeficientes  $b_i$  en el lado derecho de las restricciones funcionales.

*Se supone que los valores asignados a cada parámetro de un modelo de Programación Lineal son constantes conocidas. Hillier y Lieberman (2002)*

En los problemas reales, muy pocas veces se satisface por completo la suposición de certidumbre. Casi siempre se formula un modelo de Programación Lineal para elegir el curso de acción a seguir en el futuro. Entonces, los valores de los parámetros que se emplean están basados en una predicción de las condiciones futuras, lo que inevitablemente introduce un cierto grado de incertidumbre. Por esta razón, siempre es importante realizar un Análisis de Sensibilidad después de encontrar una solución óptima para los valores

---

<sup>1</sup> Cuando la función incluye algún término de producto cruzado, la proporcionalidad debe interpretarse en el sentido en que los cambios en el valor de la función son proporcionales a los cambios en cada variable ( $x_j$ ) en forma individual, dados cualesquiera valores fijos para las otras variables. Por lo tanto un término de producto cruzado satisface la proporcionalidad siempre que cada variable en el término tenga el exponente de 1. (Por otro lado, cualquier término de producto cruzado viola la suposición de Aditividad)

supuestos de los parámetros. Es importante recordar que el modelo matemático de Programación Lineal intenta ser solo una representación idealizada del problema real. Por lo general se requieren aproximaciones y suposiciones de simplificación para que el problema se pueda manejar.

Hillier y Lieberman (2002) dicen que “*agregar demasiados detalles y precisión puede hacer que el modelo sea difícil de manejar para llevar a cabo un análisis útil del problema*”; luego añaden que “[...] *todo lo que se necesita es que exista una correlación relativamente alta entre la predicción del modelo y lo que de hecho pasaría en el problema real*”. Este consejo es muy útil en el caso de la Programación Lineal. Es muy frecuente en las aplicaciones reales de esta técnica que casi ninguna se cumpla. Excepto quizá en lo que se refiere a la suposición de Divisibilidad, deben esperarse pequeñas disparidades. Esto es cierto en especial para la suposición de Certidumbre, de manera que es normal que deba aplicarse al Análisis de Sensibilidad para compensar la violación de ésta suposición.

### **3.6 Análisis de Posóptimo para Programación Lineal**

Es aquel que se lleva a cabo después de encontrar una solución óptima, y constituye una parte muy importante de los estudios de IO.

*En cierto modo, el Análisis Posóptimo implica llevar a cabo un Análisis de Sensibilidad para determinar qué parámetros del modelo son los más críticos (sensibles) al determinar la solución. La definición de “Parámetro sensible” es: Para un modelo matemático con valores específicos para todos sus parámetros, los parámetros sensibles del modelo son aquellos cuyos valores no se pueden cambiar sin que la solución óptima cambie. Hillier y Lieberman (2002)*

Es importante identificar muy bien éstos parámetros sensibles, porque éstos determinan aquellos cuyos valores deben asignarse con mayor cuidado para evitar distorsiones en los resultados del modelo. Por lo general, alguno o todos estos parámetros son estimaciones de alguna cantidad (por ejemplo, ganancia unitaria) cuyo valor exacto se conocerá sólo después de haber puesto en marcha la solución. Por tanto, después de identificar los parámetros sensibles, se deben realizar estimaciones más cercanas y cuidadosas de cada uno de ellos, o por lo menos del intervalo de valores posibles. Después se busca una solución que sea buena para todas las combinaciones de los valores posibles de los parámetros sensibles. Taha (1998) comenta:

*El Análisis de Sensibilidad da al modelo una característica dinámica que permite al analista estudiar el comportamiento de la solución óptima, al efectuar cambios en los parámetros del modelo. El objetivo final del análisis es obtener información acerca de*

*posibles soluciones óptimas nuevas (correspondientes a cambios en os parámetros), con un mínimo de cálculos adicionales. Es muy adecuado para estudiar el efecto en la solución óptima de cambios en los coeficientes de costo / ganancia y, en las cantidades de recursos disponibles.*

### **3.7 Software utilizado en Investigación de Operaciones**

Los programas utilizados para simular las distintas operaciones de un proceso de producción tuvieron origen a mediados de los años cincuenta. En aquel entonces fueron creados los lenguajes de programación como FORTRAN, BASIC y C; aunque antes ya se usaban las tarjetas perforadas y la Programación Binaria, estos lenguajes fueron los que dieron pauta al surgimiento de los programas actuales como: GPSS/H, SLAM II, SIMAN/V, STORM, QSB+, LINDO/V, GAMS/MINOS, TORA, MPSIII, CPLEX, OR COURSEWARE, XPRESS – MP, AMPL, LINGO, MathPro, entre otros. El utilizado en esta investigación es:

**QSB+** (Quantitative Systems For Business Plus), version 3.0 de Yih – Long Chang del Georgia Institute of Technology. Éste es un paquete que explora un amplio intervalo de algoritmos de resolución de problemas de administración. La versión 3.0 añade nuevos módulos sobre Estadística, Programación no lineal y Análisis Financiero (Mathur y Solow, 1996).

## **4. METODOLOGIA**

La metodología a utilizar para el desarrollo del trabajo, será la propuesta por Hillier and Lieberman (2002). Es una metodología sencilla de aplicar y fácil de seguir, de ahí que se haya elegido como método de solución. Se proyectarán tres escenarios, el primer escenario, es aquel que presenta la situación real de la empresa, es decir, su sistema como actualmente está trabajando. El segundo escenario, es la representación del resultado de la aplicación los cambios necesarios para optimizar el primer escenario, es decir, el “mejorado”.

El tercer escenario, nos representaran un esquema o visión de lo “ideal” o el punto donde “todo está bien”, que no necesariamente sería la mejor opción (dado a las atenuantes que más adelante se dan). Con la cooperación de los empleados de la empresa, el respaldo del jefe de producción y el resto del equipo de ingeniería, consideran los tres escenarios como la representación equilibrada del sistema.

#### **4.1 Fuentes y técnicas de recolección de información**

Las fuentes de información utilizadas para recabar los datos que integran la investigación en su mayoría provienen directamente de la empresa donde se llevó el estudio.

El departamento de producción y así como el personal de ingeniería se muestra abierto a compartir la información que tiene a su alcance con fines únicos y exclusivos para investigación. Información tales como: volúmenes de producción, costos de producción, precios de venta, capacidades de producción, etc.

El departamento de ventas y mercadotecnia, al igual que producción, aporta información importante para la investigación, también bajo la consigna de usarlos única y exclusivamente con fines de investigación, datos como: demandas anuales, cuartas de año y mensuales, pronósticos de ventas, comportamiento de la demanda, etc.

El departamento de materiales contribuye con datos clave en la construcción del modelo matemático propuesto, datos como por ejemplo: tipos de materiales utilizados, cantidades de compra (requisiciones), puntos de reordenamiento de inventario, y costos incurridos en esta área.

#### **4.2 Tratamiento de la información y procedimiento de análisis**

Una vez consideradas las bases y fundamento teórico del documento se procede, paso a paso, al desarrollo de la aplicación modelando y solucionando con Investigación de Operaciones como herramienta para la toma de decisiones. Las principales fases en las que este estudio de investigación de operaciones se basa son:

1. Definición del problema de interés y **recolección de datos relevantes**.
2. Formulación de un modelo matemático que represente al problema.
3. Desarrollo de un procedimiento basado en computadora para derivar una solución al problema a partir del modelo.
4. Prueba del modelo y mejoras (según sea necesario).
5. Preparación para la aplicación del modelo prescrito por la administración.
6. Puesta en marcha.
7. Observación de los resultados.

#### 4.2.1 Definición del problema y recolección de datos relevantes

Determinar el plan óptimo de producción de la planta en el área de micas de policarbonato para los periodos 2014-2015 usando Investigación de Operaciones, tomando en cuenta varias presentaciones de sus productos, las diferentes contribuciones a la utilidad y demandas en el mercado, y al mismo tiempo que se desperdicia un 27% de su capacidad productiva. Esto nos lleva a expresarlo de la siguiente manera:

*¿Qué cantidad de cada presentación de lentes oftalmológicos de policarbonato se debe elaborar para que se aproveche mejor el recurso disponible y se obtengan mayores utilidades, considerando las limitaciones del equipo y restricciones del sistema?*

Continuando con el estudio, primero se obtienen los datos que son necesarios para el modelo, se muestra en la tabla 9 la producción anual de lentes de policarbonato y sus diferentes presentaciones, considerando solamente este rango de productos, y que el resto está fuera del alcance de este estudio.

Tabla 9: Producciones anuales y demanda para 2014-2015

Producto	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Experience	2,393,230	2,931,538	3,088,536	3,411,868	3,688,268	4,052,148	2,157,326
Experience SHT	471,428	797,202	1,208,783	1,753,001	2,136,258	2,578,263	3,890,100
Clarlet Trans. 1.67	1,266,272	1,146,377	897,759	686,399	601,325	526,123	500,098
Clarlet Clear 1.67	NP	NP	97,963	125,824	175,956	203,425	191,311
Clarlet Poly	NP	167,180	631,438	871,016	1,025,236	1,306,187	1,011,093
Ft Poly	2,350,776	2,099,789	1,906,415	1,802,300	1,860,254	1,878,857	1,599,115

Fuente: Depto. De Mercadotecnia/Producción.

La empresa maneja la información de la siguiente manera, por ejemplo en el 2007, aparecen las cantidades que se produjeron en la temporada 2008-2009; luego, los datos de 2008 son las cantidades producidas en el 2009-2010, y así sucesivamente. Entonces las cantidades de la columna del 2013 son las que se pretende producir en la temporada 2014-2015, que vendría siendo en este caso, la demanda que se tiene programada hasta el momento, por esta razón el estudio se enfoca en esta temporada.

La primera columna de la tabla 9 muestra los 6 tipos de productos, que serán los que se analizarán para este análisis. Las columnas marcadas con los años 2007 hasta el 2012 son los niveles de producción que se alcanzaron en sus respectivas temporadas. Mercadotecnia y/o Ventas utilizan sus técnicas de pronóstico para el ciclo 2013. Sin embargo, se ignora qué tipo de técnica estén utilizando. La tabla 10 nos muestra los márgenes de utilidad generados por cada charola producida.

Tabla 10: Márgenes de utilidad por Charola

<b>Producto</b>	<b>Costo Producir Charola</b>	<b>Unidades Por Charola</b>	<b>Precio Venta Unitario</b>	<b>Márgenes Utilidad Charola</b>	<b>De Por</b>
<i>Experience</i>	\$ 33.26	8	\$ 15.00	\$	86.74
<i>Experience SHT</i>	\$ 23.49	8	\$ 12.00	\$	72.51
<i>Clarlet Transition 1.6</i>	\$ 17.76	12	\$ 7.00	\$	66.24
<i>Clarlet Clear 1.67</i>	\$ 30.34	12	\$ 9.00	\$	77.66
<i>ClarletPoly</i>	\$ 36.66	24	\$ 6.50	\$	119.34
<i>Ft Poly</i>	\$ 13.83	24	\$ 3.50	\$	70.17

Fuente: Departamento de Producción, unidades en dólares.

Los costos de producción están dados por charola de unidades producidas, cada charola para este tipo de producto consta de 8, 12 y 24 unidades de micas oftálmicas de policarbonato. Después veremos cómo se integra en nuestro caso práctico.

Cada línea de producción en análisis de esta investigación, tiene su capacidad limitada, es importante verificar que productos corren por cada línea a fin de que nuestro modelo resultante no se introduzca información errónea, la siguiente tabla 11 nos muestra tal información:

Tabla 11: Líneas de producción en análisis y tipos de producto de cada una

<b>Línea</b>	<b>Producto</b>
<i>línea 1</i>	<i>Experience</i>
<i>línea 2</i>	<i>Experience SHT / Clarlet 1.67 Clear/ Clarlet Poly</i>
<i>línea 3</i>	<i>Clarlet 1.67 Transition / Ft Poly</i>

Fuente: Producción

Los almacenes de materiales e insumos de la empresa se puede disponer de la cantidad exacta de insumo al año para producir 116,000,000 de micas oftalmológicas de policarbonato. La cantidad puede variar dependiendo del tipo de producto a elaborar. Este dato es interno, es decir, la empresa controla sus sistemas de inventario.

Es obvio que una cantidad a producir para una temporada dada no debe exceder lo que se dispone en los almacenes.

#### 4.2.2 Identificación de las alternativas de decisión

Para alcanzar el objetivo trazado, se determina en conjunción con el staff de ingeniería de la planta y de producción que las alternativas de decisión elegidas son las seis

presentaciones del principal producto que se elabora en la planta. La siguiente tabla 12 presenta los nombres de las variables asignadas al tipo de lente:

*Tabla 12: Variables asignadas al tipo de producto*

<i>variable</i>	<i>producto</i>	<i>nombre de la variable</i>
X <sub>1</sub>	<i>Experience</i>	EXP
X <sub>2</sub>	<i>Experience SHT</i>	EXP SHT
X <sub>3</sub>	<i>Clarlet Transition 1.67</i>	TRANS
X <sub>4</sub>	<i>Clarlet Clear 1.67</i>	CLEAR
X <sub>5</sub>	<i>Clarlet Poly</i>	POLY
X <sub>6</sub>	<i>Ft Poly</i>	FT POLY

La elección de estas alternativas de decisión está basada mayormente en los niveles de producción, demandas y, las ganancias que cada una de ellas proporcionan. Cabe señalar que el 71.15 % de la producción total corresponde a las micas oftalmológicas de policarbonato, el resto (28.85%) queda para los productos restantes.

Las unidades de medición que se utilizarán para efecto de cálculo serán “charolas por año”. Los insumos para la elaboración del producto son adquiridos con los proveedores.

#### **4.2.3 Restricciones y requisitos del sistema**

Las restricciones que se consideran para este estudio son básicamente tres: la capacidad de producción, la demanda para cada tipo de producto y, la disponibilidad de insumo para la elaboración del producto de cada temporada.

La capacidad se determina basándose en las características técnicas del equipo; esto es así porque la empresa considera que la cantidad y el tipo de mano de obra no representan una limitante para el desarrollo de su proceso. La empresa está en la mejor disposición de adquirir tanto la cantidad como el tipo de mano de obra en el momento que sea necesario.

La demanda para cada tipo de producto y la disponibilidad de insumos se relacionan porque son datos observados en el comportamiento histórico. La presentación que se presenta es la única que se pudo recabar, dado las limitantes para el acceso a la información, no se pudo obtener más información importante para el estudio.

## 5. RESULTADOS

### 5.1 Formulación del modelo matemático para el problema en el primer escenario

El modelo sólo se involucran costos directos (de producción), por lo tanto la utilidad que se obtenga será parcial. El modelo no presenta los costos indirectos anuales (de administración) y otros costos, la inclusión de estos se deja a juicio para el gerente de producción y la administración de la empresa; para obtener la utilidad real para la empresa se deben introducir los costos totales, es decir costos directos más costos indirectos. Dada toda la información anterior y, conociendo datos como la utilidad y demanda de cada una de las presentaciones de este producto, se procede con la construcción del modelo.

Después de algunas pruebas con diferentes modelos se llega al “primer escenario” que el equipo de ingeniería y gerente de producción consideran es el más adecuado para iniciar el análisis.

Anteriormente se mencionó que se adoptaría la teoría de Ward (1989), la cual asegura que es más práctico para un estudio de IO construir modelos simples, que modelos complejos. Para simplificar el procedimiento de solución del problema se utiliza tecnología disponible, en este caso una computadora personal que soporte el software WinQSB+. Las variables de decisión podrán tomar valores continuos.

Para el primer escenario se modela la información recolectada, donde:

1. Las variables  $X_i$  son los 6 productos de micas de policarbonato en cuestión (Ver tabla 12).
2. Los datos de la función objetivo, **Maximize**, son las utilidades aportadas por cada tipo de producto en su diferente presentación. Esta información está desplegada en la tabla de información de costos y utilidad. La cual se toman el precio de venta unitario de cada mica y este se multiplica por la cantidad de micas en cada charola producidas y al resultado se le resta del costo de producir una charola. Las unidades son dólares estadounidenses.
3. Los datos de las primeras seis restricciones, **MAX PROD LINE**, representan la producción que cada una de las líneas puede producir anualmente de cada tipo de producto respectivamente. La unidad de medición es por charolas producidas.
4. Los datos de las restricciones de la 7 a la 16, **DEMANDA MIN/MAX**, representan las demandas pronosticadas para el ciclo 2014-2015, con sus limitantes mínimos y

máximos. Solamente cabe recordar que mercadotecnia proporciona datos de pronósticos de ventas. Estos pronósticos son enviados a producción como base para iniciar operaciones, el cual es el que aparece en la última columna de la tabla 9. En el modelo aparecen dos niveles de demanda, máximos y mínimos, para cada tipo de producto, a excepción del nivel mínimo para los productos **TRANS** y **CLEAR**, que están limitadas a incrementarse por encima del nivel especificado. En el caso de los otros productos el nivel superior es la demanda pronosticada de antemano, y el nivel mínimo o inferior es una cantidad que Ventas pide que se respete y no se altere. Igual que con la demanda pronosticada se desconoce la forma que se calculó este límite inferior, dado que este dato no afecta a la solución se acordó tomar este dato como una restricción válida. Por ejemplo, la restricción **R10** y **R11** que revelan que el producto **EXP** debe ser:  $3, 688,268 \leq X1 \leq 4, 552,148$ . La unidad de medición es por charolas producidas.

5. Los datos de las restricciones 17 a la 22 representan el recurso disponible en lo que a material se refiere, como charolas, moldes de preparación, etc. Estas charolas son utilizadas para transportar el producto final hacia almacenes en los cuales permanecen hasta su venta directa. La unidad de medición son charolas al año. El departamento de almacén mantiene un riguroso control de sus inventarios. Dicho almacén se divide en dos: materiales y de insumos. Estas restricciones en este caso, revelan las cantidades disponibles de charolas y moldes disponibles para todo el año. Por ejemplo la restricción R17 dice que se tienen de  $X1 \rightarrow 4, 500,000$  de charolas disponibles, lo que significa que en micas de policarbonato son 4, 500,000 charolas por 8 micas en cada una, serían 36, 000,000 de micas por año de esta presentación. Recordando solamente que son “charolas / año”.
6. Los datos de la última restricción, R23, representan al recurso disponible en cuanto insumo se refiere, principalmente los polímeros necesarios para la elaboración de la mica epoxica que vendría siendo el principal producto directo. La cantidad del lado derecho representa la cantidad máxima de charolas que se pueden producir con el insumo disponible reservado para ese ciclo, 116,000,000. No se obtienen datos sobre la “mezcla” de dichos polímeros, solamente sus componentes. Los datos del centro, 8, 12, 16, 24, representan la cantidad de micas que cada charola puede tener, dependiendo del tipo de producto.

El Modelo matemático es el siguiente:

$$\mathbf{Max Z = 86.74X_1 + 72.51X_2 + 66.24X_3 + 77.66X_4 + 119.34X_5 + 70.17X_6}$$

Sujeto a:

$R_1 \leq 4,500,000$	$R_9 \leq 2,578,263$	$R_{17} \leq 4,500,000$
$R_2 \leq 2,200,000$	$R_{10} \geq 2,136,258$	$R_{18} \leq 2,200,000$
$R_3 \leq 1,000,000$	$R_{11} \leq 526,123$	$R_{19} \leq 350,000$
$R_4 \leq 500,000$	$R_{12} \leq 203,425$	$R_{20} \leq 450,000$
$R_5 \leq 1,500,000$	$R_{13} \leq 1,306,187$	$R_{21} \leq 1,400,000$
$R_6 \leq 2,000,000$	$R_{14} \geq 1,025,236$	$R_{22} \leq 1,900,000$
$R_7 \leq 4,552,148$	$R_{15} \leq 1,878,857$	$R_{23} \leq 116,000,000$
$R_8 \geq 3,688,268$	$R_{16} \geq 1,860,254$	

### 5.1.1 Solución al primer escenario.

El modelo matemático fue resuelto con el software WinQSB 2.0, usando el módulo de regresión lineal. El sistema utiliza el método Simplex revisado para la solución en un total de iteraciones en menos de 1 segundo. Los resultados del modelo que representa el primer escenario son importantes (figura 4), ya que son el punto de partida para desarrollar más inferencias, las cuales proporcionan información necesaria tras su análisis y generar un segundo escenario mejorado.

Figura 4: Resultado generado del primer escenario

	23:25:15		Wednesday	October	24	2012		
	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	EXP	3.707.272,0000	86,7400	321.568.800,0000	0	basic	72,5100	M
2	EXP SHT	2.136.258,0000	72,5100	154.900.100,0000	0	basic	-M	86,7400
3	TRANS	0	66,2400	0	-63,8700	at bound	-M	130,1100
4	CLEAR	0	77,6600	0	-52,4500	at bound	-M	130,1100
5	POLY	1.025.236,0000	119,3400	122.351.700,0000	0	basic	-M	260,2200
6	FT POLY	1.860.254,0000	70,1700	130.534.000,0000	0	basic	-M	260,2200
	Objective	Function	(Max.) =	729.354.500,0000				
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	MAX PROD LINE1	3.707.272,0000	<=	4.500.000,0000	792.728,0000	0	3.707.272,0000	M
2	MAX PROD LINE2	2.136.258,0000	<=	2.200.000,0000	63.742,0000	0	2.136.258,0000	M
3	MAX PROD LINE3	0	<=	1.000.000,0000	1.000.000,0000	0	0	M
4	MAX PROD LINE2	0	<=	500.000,0000	500.000,0000	0	0	M
5	MAX PROD LINE2	1.025.236,0000	<=	1.500.000,0000	474.764,0000	0	1.025.236,0000	M
6	MAX PROD LINE3	1.860.254,0000	<=	2.000.000,0000	139.746,0000	0	1.860.254,0000	M
7	DEMANDA MAX EXP	3.707.272,0000	<=	4.552.148,0000	844.876,0000	0	3.707.272,0000	M
8	DEMANDA MIN EXP	3.707.272,0000	>=	3.688.268,0000	19.004,0000	0	-M	3.707.272,0000
9	DEMANDA MAX EXP SHT	2.136.258,0000	<=	2.578.263,0000	442.005,0000	0	2.136.258,0000	M
10	DEMANDA MIN EXP SHT	2.136.258,0000	>=	2.136.258,0000	0	-14,2300	1.343.530,0000	2.155.262,0000
11	DEMANDA MAX TRANS	0	<=	526.123,0000	526.123,0000	0	0	M
12	DEMANDA MAX CLAR	0	<=	203.425,0000	203.425,0000	0	0	M
13	DEMANDA MAX POLY	1.025.236,0000	<=	1.306.187,0000	280.951,0000	0	1.025.236,0000	M
14	DEMANDA MIN POLY	1.025.236,0000	>=	1.025.236,0000	0	-140,8800	760.993,4000	1.031.571,0000
15	DEMANDA MAX POLY FT	1.860.254,0000	<=	1.878.857,0000	18.603,0000	0	1.860.254,0000	M
16	DEMANDA MIN POLY FT	1.860.254,0000	>=	1.860.254,0000	0	-190,0500	1.596.011,0000	1.866.589,0000
17	MAT DISP EXP	3.707.272,0000	<=	4.500.000,0000	792.728,0000	0	3.707.272,0000	M
18	MAT DISP EXP SHT	2.136.258,0000	<=	2.200.000,0000	63.742,0000	0	2.136.258,0000	M
19	MAT DISP TRANS	0	<=	350.000,0000	350.000,0000	0	0	M
20	MAT DISP CLEAR	0	<=	450.000,0000	450.000,0000	0	0	M
21	MAT DISP POLY	1.025.236,0000	<=	1.400.000,0000	374.764,0000	0	1.025.236,0000	M
22	MAT DISP FT POLY	1.860.254,0000	<=	1.900.000,0000	39.746,0000	0	1.860.254,0000	M
23	INSUMO DISPONIBLE	116.000.000,0000	<=	116.000.000,0000	0	10,8425	115.848.000,0000	122.341.800,0000

Los resultados iniciales del modelo (tabla 13) para la temporada 2014-2015, primer escenario son:

Tabla 13: charolas a producir según primer escenario

variable	nombre de la variable	charolas a producir/año
X <sub>1</sub>	EXP	<b>3,707,272</b>
X <sub>2</sub>	EXP SHT	<b>2,136,258</b>
X <sub>3</sub>	TRANS	<b>0</b>
X <sub>4</sub>	CLEAR	<b>0</b>
X <sub>5</sub>	POLY	<b>1,025,236</b>
X <sub>6</sub>	FT POLY	<b>1,860,254</b>

Con este programa de producción se alcanzan utilidades anuales parciales, por la cantidad de \$729,354,500.00 dólares. Como se puede observar, a pesar que el modelo llega a una solución óptima para este primer escenario, aparecen algunos detalles, tales como no

se alcanza a cubrir la demanda de cada una de los productos y otros que no toman valor en la solución.

### 5.1.2 Prueba del modelo y mejoramiento

En esta etapa se comprueban que los resultados obtenidos en la corrida anterior realmente se puedan aplicar en la planta. Junto al personal de producción e ingeniería se determina a “cambiar” algunos de los parámetros iniciales del modelo. Por tales motivos se lleva a cabo un análisis de sensibilidad. Algunos de los cambios que este primer escenario incluye son: inicialmente el modelo constaba además de las restricciones de capacidad total de las líneas de producción, R1 al R6, otras tres más, que representan las capacidades máximas de las líneas de producción, estas últimas se eliminan por resultar redundantes. Además, las restricciones de demanda solo se limitaban al mínimo, por lo que se agregaron límites superiores a R1, 2, 5, 6. Más adelante se explica la razón. Para concluir, no se contaba con la restricción del recurso disponible que refiere a la cantidad de materiales e insumos necesarios.

Un cambio significativo para este escenario, fue el de agregar restricciones que limiten por ambos lados los niveles de las demandas de los productos, es decir, se colocaron límites inferiores y superiores a cada demanda. Se utilizó el método de regresión lineal con los pronósticos comparativos e históricos de la empresa. Para el caso de los productos **TRANS** y **CLEAR** se limita su límite superior dado que su demanda histórica ha ido a la baja, ventas y mercadotecnia consideran conveniente no incrementar su producción por el momento. Las otras cuatro si presentan un límite inferior y superior en demanda.

Otro cambio fue el de agregar restricciones del recurso disponible, **MAT DISP**, en lo que material se refiere, tales como: charolas, tapas de charolas, y material de empaque, entre otros, para cada tipo de mica. La empresa considera esto de vital importancia dado que es imposible producir si no se tienen charolas suficientes para empaquetar su producto. Por consiguiente, también se agregó por último la restricción de disponibilidad de polímeros, **INSUMO DISPONIBLE**, la cantidad de charolas que la empresa se dispone a producir en el siguiente ciclo 2014-2015. La empresa planea incrementar su disponibilidad a este nivel; por ahora solo se tiene el 87.01% (100,931,600) de lo que el modelo representa. Este proyecto se prolonga para el ciclo 2014-2015. Tanto producción como ingeniería estuvieron de acuerdo en utilizar este incremento. Todos estos cambios se

incluyen en este modelo para mejorar su salida y representar al sistema de producción de la planta.

### 5.1.3 Análisis de sensibilidad

La información del análisis de sensibilidad es importante en dos sentidos. Primero, identifica los parámetros más importantes en los que se debe poner atención especial para poder determinar estimaciones cercanas y seleccionar una solución que contenga un buen desempeño para la mayoría de los valores posibles. Segundo, se identifican los parámetros que serán necesarios observar cuando el sistema se ponga en marcha. Si se descubre que el valor real de un parámetro está fuera de su intervalo de valores permisibles, esta es una señal de cambiar la solución.

### 5.1.4 Análisis de sensibilidad: Holgura

En este apartado se consideran las holguras del sistema, es decir, lo que aún no se utiliza por el sistema. La figura 5 nos presenta el análisis generado de acuerdo al primer escenario:

Figura 5: Análisis de Sensibilidad para el primer escenario

Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
MAX PROD LINE1	3.707.272,0000	<=	4.500.000,0000	792.728,0000	0
MAX PROD LINE2	2.136.258,0000	<=	2.200.000,0000	63.742,0000	0
MAX PROD LINE3	0	<=	1.000.000,0000	1.000.000,0000	0
MAX PROD LINE2	0	<=	500.000,0000	500.000,0000	0
MAX PROD LINE2	1.025.236,0000	<=	1.500.000,0000	474.764,0000	0
MAX PROD LINE3	1.860.254,0000	<=	2.000.000,0000	139.746,0000	0
DEMANDA MAX EXP	3.707.272,0000	<=	4.552.148,0000	844.876,0000	0
DEMANDA MIN EXP	3.707.272,0000	>=	3.688.268,0000	19.004,0000	0
DEMANDA MAX EXP SHT	2.136.258,0000	<=	2.578.263,0000	442.005,0000	0
DEMANDA MIN EXP SHT	2.136.258,0000	>=	2.136.258,0000	0	-14,2300
DEMANDA MAX TRANS	0	<=	526.123,0000	526.123,0000	0
DEMANDA MAX CLAR	0	<=	203.425,0000	203.425,0000	0
DEMANDA MAX POLY	1.025.236,0000	<=	1.306.187,0000	280.951,0000	0
DEMANDA MIN POLY	1.025.236,0000	>=	1.025.236,0000	0	-140,8800
DEMANDA MAX POLY FT	1.860.254,0000	<=	1.878.857,0000	18.603,0000	0
DEMANDA MIN POLY FT	1.860.254,0000	>=	1.860.254,0000	0	-190,0500
MAT DISP EXP	3.707.272,0000	<=	4.500.000,0000	792.728,0000	0
MAT DISP EXP SHT	2.136.258,0000	<=	2.200.000,0000	63.742,0000	0
MAT DISP TRANS	0	<=	350.000,0000	350.000,0000	0
MAT DISP CLEAR	0	<=	450.000,0000	450.000,0000	0
MAT DISP POLY	1.025.236,0000	<=	1.400.000,0000	374.764,0000	0
MAT DISP FT POLY	1.860.254,0000	<=	1.900.000,0000	39.746,0000	0
INSUMO DISPONIBLE	116.000.000,0000	<=	116.000.000,0000	0	10,8425
Objective	Function	(Max.) =	729.354.500,0000		

La información que aparece en la sexta columna con el nombre de “*slack or surplus*” representa la holgura o lo que no se utiliza en la línea en cuestión para cada tipo de producto.

Si las holguras son positivas, es que el recurso no se utiliza en su totalidad, es decir, es “abundante”, mientras que la holgura sea cero, indica que el recurso se consume en totalidad.

Este análisis nos muestra que la capacidad instalada está muy cerca de ser alcanzada o rebasada por la demanda o producción real. El ejemplo más crítico se encuentra en la R2 con solo 63,742 charolas de holgura, algo que debe atenderse de inmediato. El hecho de que las restricciones de demanda nos reflejen holguras, es indicador de que no se llega a la meta de producción prescrita por mercadotecnia y ventas. De ahí que se deben de incrementar los niveles de insumos y materiales. R23 no tiene holgura, lo que significa que sus insumos se han agotado por completo y por ello no se satisface la demanda total anual. Un incremento de esta restricción tendrá como consecuencia un aumento en la productividad de la maquinaria y en las utilidades mismas. Dado que los recursos reservados son escasos, se les debe prestar especial atención. Esto tal vez signifique para la empresa tener que expandir almacenes para sus recursos.

#### **5.1.5 Análisis de sensibilidad: Cambios en la función objetivo.**

En la figura 5 se observan los cambios que pueden efectuarse en cada uno de los coeficientes de la función objetivo.

Recordando lo siguiente: Cuando la variable es una variable básica en la solución óptima, su costo reducido es cero automáticamente; cuando la variable es una variable no básica, su costo reducido proporciona información útil para el modelo. Esta variable es cero porque su coeficiente en la función es muy pequeño al maximizar para justificar que se realice la actividad representada por la variable. El costo reducido indica cuanto se puede aumentar este coeficiente antes de que cambie la solución óptima y esta variable se convierta en básica. Esta información se deriva del intervalo permisible para continuar óptima para el coeficiente de esta variable en la función objetivo. El costo reducido para una variable no básica es solo el aumento permitido, al maximizar, a partir del valor actual del coeficiente, para quedar dentro de su intervalo permisible para continuar óptimo (Hillier y LieberMan, 2002).

Visto esto, en la columna “*UnitCostorProfit C*” da el valor actual de cada coeficiente, las dos columnas siguientes: “*Allowable Min C*” y “*Allowable Max C*”, que son los datos de disminución permisible y aumento permisible. Por lo tanto:

$$86.74 - 72.51 \leq X_1 \leq 86.74 + M$$

Donde M: infinito.

De manera que:

$$14.23 \leq X_1 \leq 86.74$$

Tal ecuación representa el intervalo permisible para X1 para el cual la solución óptima actual permanecerá óptima; esto suponiendo que todos los demás valores permanecen sin cambio alguno.

De este modo se obtienen los intervalos de cada uno de los coeficientes de la función objetivo. Se debe notar que se pueden asignar valores permitidos por el modelo de tal modo que se encuentren posibles combinaciones con los diferentes productos; por ejemplo: al incrementar el valor de alguna variable de decisión puede conducir a una solución diferente.

Por otro lado, se tiene el caso del costo reducido (*Reduced Cost*, cuarta columna). Esto se ilustra mejor con un ejemplo utilizando los resultados proporcionados por el software, notando el resultado para X3 y X4. Para analizar estos datos, se toma en cuenta que los costos reducidos representan una tasa neta de decremento del valor objetivo óptimo que se obtiene al incrementar la variable no básica asociada; en programación lineal esto se refiere a las n-m variables que se hacen igual a cero como variables no básicas y a las variables M restantes como variables básicas.

El costo reducido representa la diferencia neta entre el costo del recurso usado para producir “una unidad” de X1 (entrada) y su ganancia por unidad (salida). Por lo tanto: si el costo por unidad de los recursos excede al de la ganancia, el costo reducido es positivo y no se tendrá ventaja económica al producir este elemento. Esta es la principal razón por la que una variable no básica, con un costo reducido negativo, siempre es un candidato para volverse positiva en la solución óptima.

En la figura 6 se observa que existen dos actividades económicas no utilizadas, es decir, dos variables no básicas, que pueden resultar económicamente viables de dos

maneras: disminuyendo su uso por unidad de recurso, o incrementando su ganancia por unidad.

Figura 6: Análisis de sensibilidad para la función objetivo, primer escenario

10-31-2012 23:11:57	Decision Variable	Solution Value	Reduced Cost	Unit Cost or Profit C(j)	Allowable Min. C(j)	Allowable Max. C(j)
1	EXP	3.707.272,0000	0	86,7400	72,5100	M
2	EXP SHT	2.136.258,0000	0	72,5100	-M	86,7400
3	TRANS	0	-63,8700	66,2400	-M	130,1100
4	CLEAR	0	-52,4500	77,6600	-M	130,1100
5	POLY	1.025.236,0000	0	119,3400	-M	260,2200
6	FT POLY	1.860.254,0000	0	70,1700	-M	260,2200

En sentido económico sería lógico pensar que la primera opción es más viable dado que significa que cualquier mejora se lleva a cabo mediante un mejor uso de los recursos. Por otra parte, en ocasiones, aumentar los precios puede no ser viable, debido factores como la demanda y competencia. Para este caso en particular la administración decidirá qué movimiento hacer con estas dos variables. Sin embargo, por los resultados obtenidos en el modelo se recomienda no producir estos productos.

### 5.1.6 Análisis de sensibilidad: Cambios en las restricciones

En la siguiente figura 7 se presentan los cambios individuales para el lado derecho de las restricciones (*Right-Hand Side*). Estos datos indican que si se cambia la disponibilidad de los recursos dentro de los rangos mínimo y máximos dados, entonces la factibilidad de la solución actual no cambia, lo que sucedería es que cambiaría el valor de algunas variables con su respectivo cambio en la función objetivo.

Recordando lo que se mencionó anteriormente: las restricciones de demanda (R10 → R19) están considerados como recursos limitados ya que aumentar los límites de demanda equivale a ampliar la participación de la compañía en el mercado. En términos monetarios, esto tiene el mismo efecto de incrementar recursos físicos, ya sean insumos y materiales, a través de la asignación de fondos adicionales.

Figura 7: Análisis de sensibilidad para restricciones, primer escenario

11-01-2012 00:01:02	Constraint	Direction	Shadow Price	Right Hand Side	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	MAX PROD LINE1	<=	0	4.500.000,0000	3.707.272,0000	M
2	MAX PROD LINE2	<=	0	2.200.000,0000	2.136.258,0000	M
3	MAX PROD LINE3	<=	0	1.000.000,0000	0	M
4	MAX PROD LINE2	<=	0	500.000,0000	0	M
5	MAX PROD LINE2	<=	0	1.500.000,0000	1.025.236,0000	M
6	MAX PROD LINE3	<=	0	2.000.000,0000	1.860.254,0000	M
7	DEMANDA MAX EXP	<=	0	4.552.148,0000	3.707.272,0000	M
8	DEMANDA MIN EXP	>=	0	3.688.268,0000	-M	3.707.272,0000
9	DEMANDA MAX EXP SHT	<=	0	2.578.263,0000	2.136.258,0000	M
10	DEMANDA MIN EXP SHT	>=	-14,2300	2.136.258,0000	1.343.530,0000	2.155.262,0000
11	DEMANDA MAX TRANS	<=	0	526.123,0000	0	M
12	DEMANDA MAX CLAR	<=	0	203.425,0000	0	M
13	DEMANDA MAX POLY	<=	0	1.306.187,0000	1.025.236,0000	M
14	DEMANDA MIN POLY	>=	-140,8800	1.025.236,0000	760.993,4000	1.031.571,0000
15	DEMANDA MAX POLY FT	<=	0	1.878.857,0000	1.860.254,0000	M
16	DEMANDA MIN POLY FT	>=	-190,0500	1.860.254,0000	1.596.011,0000	1.866.589,0000
17	MAT DISP EXP	<=	0	4.500.000,0000	3.707.272,0000	M
18	MAT DISP EXP SHT	<=	0	2.200.000,0000	2.136.258,0000	M
19	MAT DISP TRANS	<=	0	350.000,0000	0	M
20	MAT DISP CLEAR	<=	0	450.000,0000	0	M
21	MAT DISP POLY	<=	0	1.400.000,0000	1.025.236,0000	M
22	MAT DISP FT POLY	<=	0	1.900.000,0000	1.860.254,0000	M
23	INSUMO DISPONIBLE	<=	10,8425	116.000.000,0000	115.848.000,0000	122.341.800,0000

Mencionando un ejemplo de lo anterior, si se incrementa la disponibilidad de recursos (insumos) hasta 122,341,800.00, que es su máximo permisible, la solución sigue siendo factible, para este escenario; X1 aumenta a 4,500,000.00 y la utilidad incrementa a \$ 798,115,500.00. En el segundo escenario muestra la cantidad necesaria de utilidad. Más adelante se verá esto.

En la columna “*shadow price*” se presentan los valores en los que aumenta o disminuye la función objetivo al aumentar una unidad de cada recurso. Por ejemplo. La restricción **R16** que representa la demanda mínima del producto **POLY FT** tiene un precio sombra de \$-190.050 dólares, esto significa que si se incrementa la producción de este producto en el rango de  $1,860,254 \leq X5 \leq 1,866,589$  la utilidad se vería reducida en \$190.05 dólares por unidad, haciendo referencia a una charola producida de este producto. El hecho que el resto de las restricciones que no contengan precio sombra significa que el incremento de estos recursos para producir más producto no tiene ningún efecto sobre la solución óptima debido a que todos presentan holguras.

## 5.2 Formulación del modelo matemático para el problema en el segundo escenario

Antes de comenzar con el segundo análisis, es necesario recordar que este escenario ha sido preparado con el apoyo del personal de producción e ingeniería de Carl Zeiss. De

común acuerdo se analizan las partes del escenario que han de ser modificadas para que el modelo mejore en la salida de sus resultados. Las directrices que describen la modelo en su totalidad se encuentran en el apartado anterior del primer escenario.

El segundo escenario es similar en algunos aspectos al primero, no refleja cambios en la función objetivo, tampoco se agregan o quitan restricciones. Además las “direcciones” de las restricciones permanecen igual. Los cambios en este modelo son el incremento de los recursos de capacidad, materiales e insumos, tales se describen a detalle a continuación.

1. Capacidades de las líneas de producción. Para el producto **EXP** se registra un incremento que va desde 4,500,000 hasta 6,500,000 charolas/año. Del mismo modo, para el producto **FT POLY**, antes con una cantidad de 2,000,000, ahora de 4,000,000 charolas/año. Producción e ingeniería consideran que este incremento es factible no solo por las cantidades de charolas, sino también por el tiempo restante para el siguiente ciclo de planeación.
2. En los que a materiales se refiere, fueron necesarios algunos ajustes. Se planea incrementar las capacidades actuales de los almacenes de materiales, de tal manera que sea más acorde a la capacidad de producción. Esto se considera de la siguiente manera: si la línea 1 puede producir 6,500,000 charolas de micas epóxica al año, entonces que anualmente se disponga de la misma cantidad de charolas vacías y contenedores necesarios para las charolas, toallas esterilizadas, así como los materiales de empaque y traslado. Otro detalle que sale a consideración es que se incrementan las restricciones **R19** y **R20** de 350,000 a 3,000,000 y de 450,000 a 2,500,000 respectivamente; la pregunta sería porque ya que son productos de baja demanda, tanto así que probablemente su producción desaparezca en poco tiempo. La compañía Carl Zeiss no ha considerado la posibilidad de dejar de producir X3 y X4 al mismo tiempo, pero si se ha contemplado la posibilidad de correr otros productos usando sus materiales e insumos. Por esta razón “[...] se aprovecha el incremento que se va hacer para la capacidad de producción y para los materiales. Hacer estos movimientos después es incurrir en costos adicionales [...]” comenta el gerente de producción. Aun no se tiene definido que producto se correrá por las líneas

en las que se corren X3 y X4, que son tomadas como las principales opciones para correr los nuevos productos.

- Otro cambio que se añade al modelo inicial es el incremento de los insumos. Esta cantidad va desde 116,000,000 a 126,295,050 de charolas máximas a producir. Este ajuste es respaldado bajo un análisis interno que Carl Zeiss dispuso para este estudio. Este incremento implica: ampliar el almacén así como de adquirir el equipo necesario para conservar los polímeros en correcto estado. Recordaremos que el primer escenario marca el incremento de los insumos hasta 122,341,800, sin embargo, aunque la solución fue factible y las utilidades se incrementaron, no son suficientes porque no se logra la demanda de los principales productos (X1 y X2). Por eso se incrementó en este escenario de 122,341,800 (marcado por el resultado del primer escenario) a 126,295,050. El jefe de producción considera que con este aumento si se alcanzan los resultados deseables.

El Modelo matemático resultante es de la siguiente manera:

$$\mathbf{Max Z = 86.74X_1 + 72.51X_2 + 66.24X_3 + 77.66X_4 + 119.34X_5 + 70.17X_6}$$

Sujeto a:

$R_1 \leq 6,500,000$	$R_9 \leq 2,578,263$	$R_{17} \leq 6,500,000$
$R_2 \leq 4,200,000$	$R_{10} \geq 2,136,258$	$R_{18} \leq 4,200,000$
$R_3 \leq 3,000,000$	$R_{11} \leq 526,123$	$R_{19} \leq 3,000,000$
$R_4 \leq 2,500,000$	$R_{12} \leq 203,425$	$R_{20} \leq 2,500,000$
$R_5 \leq 3,500,000$	$R_{13} \leq 1,306,187$	$R_{21} \leq 3,500,000$
$R_6 \leq 4,000,000$	$R_{14} \geq 1,025,236$	$R_{22} \leq 4,000,000$
$R_7 \leq 4,552,148$	$R_{15} \leq 1,878,857$	$R_{23} \leq 126,295,050$
$R_8 \geq 3,688,268$	$R_{16} \geq 1,860,254$	

### 5.2.1 Solución al segundo modelo

Los resultados desplegados en la figura 8 de este “segundo escenario” son el producto de los cambios efectuados por recomendación del jefe de producción del Carl Zeiss.

Figura 8: Resultados del segundo escenario

12:33:26		Tuesday	February	26	2013			
Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)	
1	EXP	4.552.148,0000	86,7400	394.853.300,0000	0	basic	51,7733	M
2	EXP SHT	2.578.263,0000	72,5100	186.949.900,0000	0	basic	51,7733	M
3	TRANS	0	66,2400	0	-11,4200	at bound	-M	77,6600
4	CLEAR	0	77,6600	0	0	basic	66,2400	108,7650
5	POLY	1.025.236,0000	119,3400	122.351.700,0000	0	basic	-M	155,3200
6	FT POLY	1.860.254,0000	70,1700	130.534.000,0000	0	basic	-M	155,3200
	Objective	Function	(Max.) =	834.688.800,0000				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	
1	MAX PROD LINE1	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M	
2	MAX PROD LINE2	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M	
3	MAX PROD LINE3	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0	0	M	
4	MAX PROD LINE2	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0	0	M	
5	MAX PROD LINE2	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0	1.025.236,0000	M	
6	MAX PROD LINE3	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0	1.860.254,0000	M	
7	DEMANDA MAX EXP	<=	4.552.148,0000	0	34,9667	4.247.011,0000	4.552.148,0000	
8	DEMANDA MIN EXP	>=	3.688.268,0000	863.880,0000	0	-M	4.552.148,0000	
9	DEMANDA MAX EXP SHT	<=	2.578.263,0000	0	20,7367	2.273.126,0000	2.578.263,0000	
10	DEMANDA MIN EXP SHT	>=	2.136.258,0000	442.005,0000	0	-M	2.578.263,0000	
11	DEMANDA MAX TRANS	<=	526.123,0000	526.123,0000	0	0	M	
12	DEMANDA MAX CLEAR	<=	203.425,0000	203.425,0000	0	0	M	
13	DEMANDA MAX POLY	<=	1.306.187,0000	280.951,0000	0	1.025.236,0000	M	
14	DEMANDA MIN POLY	>=	1.025.236,0000	0	-35,9800	923.523,5000	1.025.236,0000	
15	DEMANDA MAX POLY FT	<=	1.878.857,0000	18.603,0000	0	1.860.254,0000	M	
16	DEMANDA MIN POLY FT	>=	1.860.254,0000	0	-85,1500	1.758.542,0000	1.860.254,0000	
17	MAT DISP EXP	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M	
18	MAT DISP EXP SHT	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M	
19	MAT DISP TRANS	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0	0	M	
20	MAT DISP CLEAR	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0	0	M	
21	MAT DISP POLY	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0	1.025.236,0000	M	
22	MAT DISP POLY FT	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0	1.860.254,0000	M	
23	INSUMO DISPONIBLE	<=	126.295.000,0000	0	6,4717	126.295.000,0000	128.736.100,0000	

Los resultados del modelo mejorado (tabla 14) para la temporada 2014-2015 se generan las cantidades de charolas a producir:

Tabla 14: Cantidad de charolas a producir según segundo escenario

variable	nombre de la variable	charolas/año
X <sub>1</sub>	EXP	4,552,148
X <sub>2</sub>	EXP SHT	2,578,263
X <sub>3</sub>	TRANS	0
X <sub>4</sub>	CLEAR	0
X <sub>5</sub>	POLY	1,025,236
X <sub>6</sub>	FT POLY	1,860,254

Con este programa se alcanzan utilidades anuales parciales por: \$834,688,800 dólares.

### 5.2.2 Prueba del modelo y mejoramiento

Un dato interesante es que el “segundo escenario” descarta la producción de X<sub>3</sub> y X<sub>4</sub> y la causa principal de esto es que el insumo sigue siendo insuficiente para producirlos.

Sin embargo, a pesar de esto, Carl Zeiss considera los datos interesantes ya que, logra la producción de los principales productos (X1 y X2). Las presentaciones del X5 y X6 se mantienen al mínimo del margen de producción.

Este escenario presenta cambios solo de incremento en algunas de las restricciones. Los resultados obtenidos en este segundo modelo aparentemente pueden dejar “algo más que desear” con respecto a alcanzar los niveles de producción trazados por mercadotecnia y ventas. Producción tienes planes definidos respecto a ambos productos X3 y X4 lo cual es imposible aun tratar en este documento. Posiblemente se planee en un futuro introducir otros productos en las líneas que se producen actualmente estos mismos.

Lo más importante para Carl Zeiss es cumplir plenamente con los planes que se tienen para X1, X2, X5 y X6, aun cuando X5 y X6 se estén manteniendo al margen. Para esto se cuenta con un plan de contingencia.

### 5.2.3 Análisis de sensibilidad: Holguras

Observemos la sexta columna bajo el título “*Slackor Surplus*” de la figura 9. Hasta este punto ya se han aumentado las capacidades y la disponibilidad de los recursos (materiales e insumos), por lo tanto se puede decir que la mayoría de estas restricciones presentaran holguras. Por ejemplo, R1 maneja en la columna “*Left Hand Side*” una demanda de 4,454,153, y la columna “*Right Hand Side*” ofrece una capacidad de 6,500,000; esto significa que R1 tiene holgadamente en “*Slackor Surplus*” 2,045,847 charolas físicas/año pendientes por aplicar.

En este caso nos interesan principalmente las restricciones que tienen demanda máxima de cada una de las presentaciones. Por ejemplo, R7 y R9 no tienen holgura porque se ha cumplido la meta máxima, a diferencia con la R11 y la R12 ya que la instrucción del modelo es no producir estas presentaciones; por ello tienen una holgura que es la misma cantidad de charolas que originalmente se requerían de estas presentaciones, 526,123 y 203,145 respectivamente.

La R14 y R16 revelan que se cumple con los requerimientos mínimos de producción; sin embargo, les falta un poco más para llegar al límite superior y esas cantidades las representan R14 y R16 en la columna “*Slackor Surplus*” que son 100,951 y 18,603 respectivamente. Para esto último se ha preparado un plan de contingencia que

ayude a sacar el faltante. Carl Zeiss no considera conveniente por el momento incrementar más el recurso disponible del insumo.

Figura 9: Holguras para el segundo escenario

02-26-2013 12:37:04	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
1	MAX PROD LINE1	4.552.148,0000	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0
2	MAX PROD LINE2	2.578.263,0000	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0
3	MAX PROD LINE3	0	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0
4	MAX PROD LINE2	0	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0
5	MAX PROD LINE2	1.025.236,0000	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0
6	MAX PROD LINE3	1.860.254,0000	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0
7	DEMANDA MAX EXP	4.552.148,0000	<=	4.552.148,0000	0	34,9667
8	DEMANDA MIN EXP	4.552.148,0000	>=	3.688.268,0000	863.880,0000	0
9	DEMANDA MAX EXP SHT	2.578.263,0000	<=	2.578.263,0000	0	20,7367
10	DEMANDA MIN EXP SHT	2.578.263,0000	>=	2.136.258,0000	442.005,0000	0
11	DEMANDA MAX TRANS	0	<=	526.123,0000	526.123,0000	0
12	DEMANDA MAX CLEAR	0	<=	203.425,0000	203.425,0000	0
13	DEMANDA MAX POLY	1.025.236,0000	<=	1.306.187,0000	280.951,0000	0
14	DEMANDA MIN POLY	1.025.236,0000	>=	1.025.236,0000	0	-35,9800
15	DEMANDA MAX POLY FT	1.860.254,0000	<=	1.878.857,0000	18.603,0000	0
16	DEMANDA MIN POLY FT	1.860.254,0000	>=	1.860.254,0000	0	-85,1500
17	MAT DISP EXP	4.552.148,0000	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0
18	MAT DISP EXP SHT	2.578.263,0000	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0
19	MAT DISP TRANS	0	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0
20	MAT DISP CLEAR	0	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0
21	MAT DISP POLY	1.025.236,0000	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0
22	MAT DISP POLY FT	1.860.254,0000	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0
23	INSUMO DISPONIBLE	126.295.000,0000	<=	126.295.000,0000	0	6,4717
	Objective	Function	(Max.) =	834.688.800,0000		

Como se puede notar, la R23 no presenta holguras en este segundo escenario, es decir, nuevamente se consume totalmente este recurso. Esta es la principal razón por la cual no se producen X3 y X4 y no se alcanza el nivel máximo de X5 y X6; como se menciona anteriormente, Carl Zeiss ya contempla planes de contingencia que cubren estos aspectos.

Lo importante es resaltar el hecho de que no se pretende dar más incrementos en ninguna de las restricciones que el modelo presenta porque eso sería “salirse de lo que a corto plazo se puede hacer”, comenta gerencia de producción Carl Zeiss.

En definitiva, los resultados de este segundo escenario parecen satisfacer las expectativas del personal encargado de producción, tanto Jefe de producción y gerencia. Lo que se logra, con lo que a corto plazo se dispone, es suficiente para planear más adelante las operaciones y ajustes necesarios.

#### 5.2.4 Análisis de sensibilidad: cambios en la función objetivo.

En la figura 10 se observan los cambios que se pueden efectuarse en cada uno de los coeficientes de la función objetivo. La columna “Unit Costo or ProfitC(j)” da el valor actual de cada coeficiente, las dos columnas siguientes “Allowable Min C(j)” y “Allowable

$MaxC(j)$ ” un rango permisible a partir del valor dado por los coeficientes. De ahí que:  $86.74 - 72.51 \leq X1 \leq 72.51 + M$ , de manera que:  $14.23 \leq X1 \leq 72.51$  hasta el infinito (M), vendría siendo el intervalo permisible para X1 en la cual la solución óptima actual seguirá permaneciendo así; esto suponiendo que todos los demás valores permanecen sin ningún cambio. De esta manera se obtienen los intervalos para cada uno de los coeficiente de la función objetivo.

Podemos asignar valores permitidos por el modelo de tal modo que se encuentren posibles combinaciones con los diferentes productos; por ejemplo, incrementar el valor de alguna variable de decisión puede conducir a otra solución con diferente contribución y distinto análisis.

Figura 10: Resultados en el cambio de la función objetivo para el segundo escenario

02-26-2013 12:39:47	Decision Variable	Solution Value	Reduced Cost	Unit Cost or Profit C(j)	Allowable Min. C(j)	Allowable Max. C(j)
1	EXP	4.552.148,0000	0	86,7400	51,7733	M
2	EXP SHT	2.578.263,0000	0	72,5100	51,7733	M
3	TRANS	0	-11,4200	66,2400	-M	77,6600
4	CLEAR	0	0	77,6600	66,2400	108,7650
5	POLY	1.025.236,0000	0	119,3400	-M	155,3200
6	FT POLY	1.860.254,0000	0	70,1700	-M	155,3200

### 5.2.5 Análisis de sensibilidad: cambios en las restricciones

Ahora se presentan los cambios individuales para el lado derecho de las restricciones (Right Hand Side). Por ejemplo, si se incrementa la disponibilidad de recursos (insumos, ultima restricción) hasta 128,376,100 (máximo permisible) suceden varias cosas; primero, la solución sigue siendo factible en este escenario; segundo, X4 ya forma parte de la solución con el valor de 203,420; tercero: la utilidad se incrementa a \$850,486,500 dolares/año (Ver figura 11).

En la columna llamada “Shadow Price” se presentan los valores en los que aumenta o disminuye la función objetivo al aumentar una unidad de cada recurso. En este caso, R7 y R9 de 34.9667 y 20.7367 respectivamente; esto significa que si se incrementa la venta de estos productos (EXP y EXP HT) dentro de los rangos de aumento permisible la utilidad bruta total se verá incrementado en tales cantidades por cada charola que se produzca.

Si el precio dual es negativo, un incremento en ese límite tendrá un efecto adverso en el rendimiento neto; lo cual no existiría ventaja económica (R14 y R16).

El hecho que el resto de las restricciones no tengan precio sombra, significa que el incremento de estos recursos no tiene ningún efecto sobre la solución óptima debido a que presentan holguras.

Figura 11: Resultados en los cambios de las restricciones para el segundo escenario

Constraint	Direction	Shadow Price	Right Hand Side	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
MAX PROD LINE1	<=	0	6.500.000,0000	4.552.148,0000	M
MAX PROD LINE2	<=	0	4.200.000,0000	2.578.263,0000	M
MAX PROD LINE3	<=	0	3.000.000,0000	0	M
MAX PROD LINE2	<=	0	2.500.000,0000	0	M
MAX PROD LINE2	<=	0	3.500.000,0000	1.025.236,0000	M
MAX PROD LINE3	<=	0	4.000.000,0000	1.860.254,0000	M
DEMANDA MAX EXP	<=	34,9667	4.552.148,0000	4.247.011,0000	4.552.148,0000
DEMANDA MIN EXP	>=	0	3.688.268,0000	-M	4.552.148,0000
DEMANDA MAX EXP SHT	<=	20,7367	2.578.263,0000	2.273.126,0000	2.578.263,0000
DEMANDA MIN EXP SHT	>=	0	2.136.258,0000	-M	2.578.263,0000
DEMANDA MAX TRANS	<=	0	526.123,0000	0	M
DEMANDA MAX CLEAR	<=	0	203.425,0000	0	M
DEMANDA MAX POLY	<=	0	1.306.187,0000	1.025.236,0000	M
DEMANDA MIN POLY	>=	-35,9800	1.025.236,0000	923.523,5000	1.025.236,0000
DEMANDA MAX POLY FT	<=	0	1.878.857,0000	1.860.254,0000	M
DEMANDA MIN POLY FT	>=	-85,1500	1.860.254,0000	1.758.542,0000	1.860.254,0000
MAT DISP EXP	<=	0	6.500.000,0000	4.552.148,0000	M
MAT DISP EXP SHT	<=	0	4.200.000,0000	2.578.263,0000	M
MAT DISP TRANS	<=	0	3.000.000,0000	0	M
MAT DISP CLEAR	<=	0	2.500.000,0000	0	M
MAT DISP POLY	<=	0	3.500.000,0000	1.025.236,0000	M
MAT DISP POLY FT	<=	0	4.000.000,0000	1.860.254,0000	M
INSUMO DISPONIBLE	<=	6,4717	126.295.000,0000	126.295.000,0000	128.736.100,0000

### 5.3 Formulación del modelo matemático para el problema en el tercer escenario

En este tercer escenario se incluye una reserva de insumo que se planea crear dentro de Carl Zeiss, esta reserva contempla incrementar la disponibilidad de este recurso para 126,295,000 a 142,240,000 unidades y sería a corto plazo.

Es obvio que un movimiento de esta magnitud requerirá una inversión, sin embargo, contemplando también las utilidades que reportara su aplicación. El hecho que este análisis en particular aparezca en el documento significa que Producción Carl Zeiss lo tomara como punto de referencia para hacer otros cálculos que quedan fuera del alcance de este documento.

El Modelo matemático es de la siguiente manera:

$$\text{Max } Z = 86.74X_1 + 72.51X_2 + 66.24X_3 + 77.66X_4 + 119.34X_5 + 70.17X_6$$

Sujeto a:

$$R_1 \leq 6,500,000$$

$$R_2 \leq 4,200,000$$

$$R_3 \leq 3,000,000$$

$$\begin{array}{lll}
R_4 \leq 2,500,000 & R_{11} \leq 526,123 & R_{18} \leq 4,200,000 \\
R_5 \leq 3,500,000 & R_{12} \leq 203,425 & R_{19} \leq 3,000,000 \\
R_6 \leq 4,000,000 & R_{13} \leq 1,306,187 & R_{20} \leq 2,500,000 \\
R_7 \leq 4,552,148 & R_{14} \geq 1,205,236 & R_{21} \leq 3,500,000 \\
R_8 \geq 3,688,268 & R_{15} \leq 1,878,857 & R_{22} \leq 4,000,000 \\
R_9 \leq 2,578,263 & R_{16} \geq 1,860,254 & R_{23} \leq 142,240,00 \\
R_{10} \geq 2,136,258 & R_{17} \leq 6,500,000 &
\end{array}$$

### 5.3.1 Solución del tercer escenario

El sistema de cómputo nos muestra la solución a continuación (Figura 12):

Figura 12: Resultados para el tercer escenario

	21:30:22		Wednesday	February	27	2013		
	Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)
1	EXP	4.552.148,0000	86,7400	394.853.300,0000	0	basic	0	M
2	EXP SHT	2.578.263,0000	72,5100	186.949.900,0000	0	basic	0	M
3	TRANS	526.123,0000	66,2400	34.850.390,0000	0	basic	0	M
4	CLEAR	203.425,0000	77,6600	15.797.990,0000	0	basic	0	M
5	POLY	1.306.187,0000	119,3400	155.880.400,0000	0	basic	0	M
6	FT POLY	1.878.857,0000	70,1700	131.839.400,0000	0	basic	0	M
	Objective	Function	(Max.) =	920.171.300,0000				
	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	MAX PROD LINE1	4.552.148,0000	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M
2	MAX PROD LINE2	2.578.263,0000	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M
3	MAX PROD LINE3	526.123,0000	<=	3.000.000,0000	2.473.877,0000	0	526.123,0000	M
4	MAX PROD LINE2	203.425,0000	<=	2.500.000,0000	2.296.575,0000	0	203.425,0000	M
5	MAX PROD LINE2	1.306.187,0000	<=	3.500.000,0000	2.193.813,0000	0	1.306.187,0000	M
6	MAX PROD LINE3	1.878.857,0000	<=	4.000.000,0000	2.121.143,0000	0	1.878.857,0000	M
7	DEMANDA MAX EXP	4.552.148,0000	<=	4.552.148,0000	0	86,7400	3.688.268,0000	4.552.283,0000
8	DEMANDA MIN EXP	4.552.148,0000	>=	3.688.268,0000	863.880,0000	0	-M	4.552.148,0000
9	DEMANDA MAX EXP SHT	2.578.263,0000	<=	2.578.263,0000	0	72,5100	2.136.258,0000	2.578.398,0000
10	DEMANDA MIN EXP SHT	2.578.263,0000	>=	2.136.258,0000	442.005,0000	0	-M	2.578.263,0000
11	DEMANDA MAX TRANS	526.123,0000	<=	526.123,0000	0	66,2400	0	526.213,0000
12	DEMANDA MAX CLEAR	203.425,0000	<=	203.425,0000	0	77,6600	0	203.515,0000
13	DEMANDA MAX POLY	1.306.187,0000	<=	1.306.187,0000	0	119,3400	1.205.236,0000	1.306.232,0000
14	DEMANDA MIN POLY	1.306.187,0000	>=	1.205.236,0000	100.951,0000	0	-M	1.306.187,0000
15	DEMANDA MAX POLY FT	1.878.857,0000	<=	1.878.857,0000	0	70,1700	1.860.254,0000	1.878.902,0000
16	DEMANDA MIN POLY FT	1.878.857,0000	>=	1.860.254,0000	18.603,0000	0	-M	1.878.857,0000
17	MAT DISP EXP	4.552.148,0000	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M
18	MAT DISP EXP SHT	2.578.263,0000	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M
19	MAT DISP TRANS	526.123,0000	<=	3.000.000,0000	2.473.877,0000	0	526.123,0000	M
20	MAT DISP CLEAR	203.425,0000	<=	2.500.000,0000	2.296.575,0000	0	203.425,0000	M
21	MAT DISP POLY	1.306.187,0000	<=	3.500.000,0000	2.193.813,0000	0	1.306.187,0000	M
22	MAT DISP POLY FT	1.878.857,0000	<=	4.000.000,0000	2.121.143,0000	0	1.878.857,0000	M
23	INSUMO DISPONIBLE	142.238.900,0000	<=	142.240.000,0000	1.080,0000	0	142.238.900,0000	M

Los resultados obtenidos para el tercer escenario son (tabla 15):

*Tabla 15: Cantidad de charolas a producir*

<i>variable</i>	<i>nombre de la variable</i>	<i>charolas/año</i>
X <sub>1</sub>	EXP	<b>4,552,148</b>
X <sub>2</sub>	EXP SHT	<b>2,578,263</b>
X <sub>3</sub>	TRANS	<b>526,123</b>
X <sub>4</sub>	CLEAR	<b>203,425</b>
X <sub>5</sub>	POLY	<b>1,025,236</b>
X <sub>6</sub>	FT POLY	<b>1,860,254</b>

Con este programa de producción se alcanzan utilidades anuales parciales por la cantidad de \$9201,171,300.00 dólares. Se puede decir que la diferencia de la aplicación del proyecto a corto plazo representa una diferencia de \$85,482,500.00 dólares anuales.

### **5.3.2 Prueba del modelo y mejoramiento**

Este tercer escenario fue concebido por el personal de producción tras la pregunta: *¿Qué pasa si...?*. Después de revisar varios proyectos internos de Carl Zeiss para incrementar la disponibilidad de los recursos se optó por probar que pasaría si se utiliza un determinado proyecto en el cual incluya una reserva de insumo que se planea crear dentro de Carl Zeiss a corto plazo y que incremente la disponibilidad de este recurso en un 11.2%.

### **5.3.3 Análisis de sensibilidad: Holguras**

Este escenario (figura 13) presenta varias holguras, sin embargo R23 (insumos), cubre por completo las exigencias de la demanda presentando una holgura de 1,080 unidades disponibles. Se obvia el hecho que la demanda es basada en datos a la fecha que se creó este documento, por lo que la demanda variaría en estas cantidades dependiendo de la actualidad de los datos en el programa.

Figura 13: Resultado del análisis de holguras para el tercer escenario

02-27-2013 22:01:20	Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price
1	MAX PROD LINE1	4.552.148,00	<=	6.500.000,00	1.947.852,00	0
2	MAX PROD LINE2	2.578.263,00	<=	4.200.000,00	1.621.737,00	0
3	MAX PROD LINE3	526.123,00	<=	3.000.000,00	2.473.877,00	0
4	MAX PROD LINE2	203.425,00	<=	2.500.000,00	2.296.575,00	0
5	MAX PROD LINE2	1.306.187,00	<=	3.500.000,00	2.193.813,00	0
6	MAX PROD LINE3	1.878.857,00	<=	4.000.000,00	2.121.143,00	0
7	DEMANDA MAX EXP	4.552.148,00	<=	4.552.148,00	0	86,74
8	DEMANDA MIN EXP	4.552.148,00	>=	3.688.268,00	863.880,00	0
9	DEMANDA MAX EXP SHT	2.578.263,00	<=	2.578.263,00	0	72,51
10	DEMANDA MIN EXP SHT	2.578.263,00	>=	2.136.258,00	442.005,00	0
11	DEMANDA MAX TRANS	526.123,00	<=	526.123,00	0	66,24
12	DEMANDA MAX CLEAR	203.425,00	<=	203.425,00	0	77,66
13	DEMANDA MAX POLY	1.306.187,00	<=	1.306.187,00	0	119,34
14	DEMANDA MIN POLY	1.306.187,00	>=	1.205.236,00	100.951,00	0
15	DEMANDA MAX POLY FT	1.878.857,00	<=	1.878.857,00	0	70,17
16	DEMANDA MIN POLY FT	1.878.857,00	>=	1.860.254,00	18.603,00	0
17	MAT DISP EXP	4.552.148,00	<=	6.500.000,00	1.947.852,00	0
18	MAT DISP EXP SHT	2.578.263,00	<=	4.200.000,00	1.621.737,00	0
19	MAT DISP TRANS	526.123,00	<=	3.000.000,00	2.473.877,00	0
20	MAT DISP CLEAR	203.425,00	<=	2.500.000,00	2.296.575,00	0
21	MAT DISP POLY	1.306.187,00	<=	3.500.000,00	2.193.813,00	0
22	MAT DISP POLY FT	1.878.857,00	<=	4.000.000,00	2.121.143,00	0
23	INSUMO DISPONIBLE	142.238.912,00	<=	142.240.000,00	1.080,00	0
	<b>Objective</b>	<b>Function</b>	<b>(Max.) =</b>	<b>920.171.264,00</b>		

### 5.3.4 Análisis de sensibilidad: Cambios en la función Objetivo

El sistema de producción cubre sin problemas todas las demandas en su máximo nivel (ver figura 14). El hecho de que no existan costos reducidos significa que todas las variables de decisión forman parte de la solución óptima, por eso su costo es reducido a cero automáticamente.

Figura 14: Resultados en cambio de la función objetivo para el tercer escenario

02-27-2013 22:19:27	Decision Variable	Solution Value	Reduced Cost	Unit Cost or Profit C(j)	Allowable Min. C(j)	Allowable Max. C(j)
1	EXP	4.552.148,00	0	86,74	0	M
2	EXP SHT	2.578.263,00	0	72,51	0	M
3	TRANS	526.123,00	0	66,24	0	M
4	CLEAR	203.425,00	0	77,66	0	M
5	POLY	1.306.187,00	0	119,34	0	M
6	FT POLY	1.878.857,00	0	70,17	0	M

Los límites permisibles van para todas las variables desde cero hasta infinito, esto quiere decir que aunque se incremente el margen de utilidad de cualquiera de las variables la solución óptima no cambia. Lo que cambiaría solamente es la utilidad bruta.

Como ejemplo: si se incrementa a todas las variables de decisión por igual en la función objetivo a un margen de utilidad de \$5,000.00 por cada charola de micras vendidas, lo único que se incrementa es la utilidad bruta; toda la demás información permanecerá

igual. Lo mismo sucedería si se cambia a \$1.00 peso por charola, en este caso la utilidad bruta decae.

### 5.3.5 Análisis de sensibilidad: cambio en las restricciones

En la figura 15 se puede observar que los “precios sombra” son exactamente iguales al margen de contribución que corresponden a cada una de las variables de decisión; por ejemplo, X5 tiene un margen de contribución a la utilidad de \$119.34 dólares por charola producida, al igual que su precio sombra.

Figura 15: Análisis de Sensibilidad para el tercer escenario

02-27-2013 22:35:43	Constraint	Direction	Shadow Price	Right Hand Side	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS
1	MAX PROD LINE1	<=	0	6.500.000,0000	4.552.148,0000	M
2	MAX PROD LINE2	<=	0	4.200.000,0000	2.578.263,0000	M
3	MAX PROD LINE3	<=	0	3.000.000,0000	526.123,0000	M
4	MAX PROD LINE2	<=	0	2.500.000,0000	203.425,0000	M
5	MAX PROD LINE2	<=	0	3.500.000,0000	1.306.187,0000	M
6	MAX PROD LINE3	<=	0	4.000.000,0000	1.878.857,0000	M
7	DEMANDA MAX EXP	<=	86,7400	4.552.148,0000	3.688.268,0000	4.552.283,0000
8	DEMANDA MIN EXP	>=	0	3.688.268,0000	-M	4.552.148,0000
9	DEMANDA MAX EXP SHT	<=	72,5100	2.578.263,0000	2.136.258,0000	2.578.398,0000
10	DEMANDA MIN EXP SHT	>=	0	2.136.258,0000	-M	2.578.263,0000
11	DEMANDA MAX TRANS	<=	66,2400	526.123,0000	0	526.213,0000
12	DEMANDA MAX CLEAR	<=	77,6600	203.425,0000	0	203.515,0000
13	DEMANDA MAX POLY	<=	119,3400	1.306.187,0000	1.205.236,0000	1.306.232,0000
14	DEMANDA MIN POLY	>=	0	1.205.236,0000	-M	1.306.187,0000
15	DEMANDA MAX POLY FT	<=	70,1700	1.878.857,0000	1.860.254,0000	1.878.902,0000
16	DEMANDA MIN POLY FT	>=	0	1.860.254,0000	-M	1.878.857,0000
17	MAT DISP EXP	<=	0	6.500.000,0000	4.552.148,0000	M
18	MAT DISP EXP SHT	<=	0	4.200.000,0000	2.578.263,0000	M
19	MAT DISP TRANS	<=	0	3.000.000,0000	526.123,0000	M
20	MAT DISP CLEAR	<=	0	2.500.000,0000	203.425,0000	M
21	MAT DISP POLY	<=	0	3.500.000,0000	1.306.187,0000	M
22	MAT DISP POLY FT	<=	0	4.000.000,0000	1.878.857,0000	M
23	INSUMO DISPONIBLE	<=	0	142.240.000,0000	142.238.900,0000	M

En este caso, como el modelo formulado no percibe ninguna restricción que pueda modificar el nivel de la contribución total, entonces el mismo precio sombra es su margen de contribución por cada unidad producida.

## 5.4 Comparación de los tres escenarios

A continuación se presenta una comparativa entre los tres escenarios generados, los cuales cada uno representan los estados de producción en los cuales la empresa está trabajando y pudiera encontrarse si en dado caso se aplicaran los datos de entrada aquí utilizados:

1. El primer escenario es la representación del sistema en su estado original, es decir, antes de hacer el análisis del mismo y sin haberle hecho los ajustes necesarios, siendo la base para los otros 2 escenarios e inicio de la investigación.
2. El segundo escenario es la representación del sistema Carl Zeiss y el resultado de los ajustes necesarios tras haber analizado el primer escenario, siendo así, un modelo mejorado que corrige las deficiencias del primero y se agregan datos que mejoran el desempeño de las corridas. Este es el sistema que se encuentra en un estado equilibrado con el sistema real de Carl Zeiss y por lo tanto el más adecuado.
3. El tercer escenario se nos presenta a modo de petición por parte del personal de producción de Carl Zeiss, sobre el “¿Qué pasaría si...?” lo que nos da pie a crear un tercero que nos presenta una característica poco factible a corto plazo, pero ideal para el departamento, siendo este el modelo “ideal”, donde no existen las restricciones.

Todos los demás escenarios juntos muestran claramente lo que *“era, lo que puede ser y lo que sería si...”* y dan un panorama completo de la trayectoria del sistema Carl Zeiss. Sin embargo, la empresa y la misma investigación requieren que se elija un solo escenario que represente en esencia su sistema de producción.

Por lo tanto, una vez visto las características de cada uno de los escenarios, en compañía de los asesores de Carl Zeiss, se llega a la conclusión que el modelo que describe con mayor certeza la condición actual es el “Segundo Escenario”. Cuyo modelo matemático y resultados principales (figura 16) se muestra a continuación:

$$\mathbf{Max Z = 86.74X_1 + 72.51X_2 + 66.24X_3 + 77.66X_4 + 119.34X_5 + 70.17X_6}$$

Sujeto a:

$R_1 \leq 6,500,000$	$R_8 \geq 3,688,268$	$R_{15} \leq 1,878,857$
$R_2 \leq 4,200,000$	$R_9 \leq 2,578,263$	$R_{16} \geq 1,860,254$
$R_3 \leq 3,000,000$	$R_{10} \geq 2,136,258$	$R_{17} \leq 6,500,000$
$R_4 \leq 2,500,000$	$R_{11} \leq 526,123$	$R_{18} \leq 4,200,000$
$R_5 \leq 3,500,000$	$R_{12} \leq 203,425$	$R_{19} \leq 3,000,000$
$R_6 \leq 4,000,000$	$R_{13} \leq 1,306,187$	$R_{20} \leq 2,500,000$
$R_7 \leq 4,552,148$	$R_{14} \geq 1,025,236$	$R_{21} \leq 3,500,000$

$$R_{22} \leq 4,000,000$$

$$R_{23} \leq 126,295,050$$

Figura 16: Resultado para el segundo escenario

00:08:44		Thursday	February	28	2013			
Decision Variable	Solution Value	Unit Cost or Profit c(j)	Total Contribution	Reduced Cost	Basis Status	Allowable Min. c(j)	Allowable Max. c(j)	
1	EXP	4.552.148,0000	86,7400	394.853.300,0000	0	basic	51,7733	M
2	EXP SHT	2.578.263,0000	72,5100	186.949.900,0000	0	basic	51,7733	M
3	TRANS	0	66,2400	0	-11,4200	at bound	-M	77,6600
4	CLEAR	0	77,6600	0	0	basic	66,2400	108,7650
5	POLY	1.025.236,0000	119,3400	122.351.700,0000	0	basic	-M	155,3200
6	FT POLY	1.860.254,0000	70,1700	130.534.000,0000	0	basic	-M	155,3200
Objective		Function	(Max.) =	834.688.800,0000				
Constraint	Left Hand Side	Direction	Right Hand Side	Slack or Surplus	Shadow Price	Allowable Min. RHS	Allowable Max. RHS	
1	MAX PROD LINE1	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M	
2	MAX PROD LINE2	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M	
3	MAX PROD LINE3	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0	0	M	
4	MAX PROD LINE2	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0	0	M	
5	MAX PROD LINE2	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0	1.025.236,0000	M	
6	MAX PROD LINE3	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0	1.860.254,0000	M	
7	DEMANDA MAX EXP	<=	4.552.148,0000	0	34,9667	4.247.011,0000	4.552.148,0000	
8	DEMANDA MIN EXP	>=	3.688.268,0000	863.880,0000	0	-M	4.552.148,0000	
9	DEMANDA MAX EXP SHT	<=	2.578.263,0000	0	20,7367	2.273.126,0000	2.578.263,0000	
10	DEMANDA MIN EXP SHT	>=	2.136.258,0000	442.005,0000	0	-M	2.578.263,0000	
11	DEMANDA MAX TRANS	<=	526.123,0000	526.123,0000	0	0	M	
12	DEMANDA MAX CLEAR	<=	203.425,0000	203.425,0000	0	0	M	
13	DEMANDA MAX POLY	<=	1.306.187,0000	280.951,0000	0	1.025.236,0000	M	
14	DEMANDA MIN POLY	>=	1.025.236,0000	0	-35,9800	923.523,5000	1.025.236,0000	
15	DEMANDA MAX POLY FT	<=	1.878.857,0000	18.603,0000	0	1.860.254,0000	M	
16	DEMANDA MIN POLY FT	>=	1.860.254,0000	0	-85,1500	1.758.542,0000	1.860.254,0000	
17	MAT DISP EXP	<=	6.500.000,0000	1.947.852,0000	0	4.552.148,0000	M	
18	MAT DISP EXP SHT	<=	4.200.000,0000	1.621.737,0000	0	2.578.263,0000	M	
19	MAT DISP TRANS	<=	3.000.000,0000	3.000.000,0000	0	0	M	
20	MAT DISP CLEAR	<=	2.500.000,0000	2.500.000,0000	0	0	M	
21	MAT DISP POLY	<=	3.500.000,0000	2.474.764,0000	0	1.025.236,0000	M	
22	MAT DISP POLY FT	<=	4.000.000,0000	2.139.746,0000	0	1.860.254,0000	M	
23	INSUMO DISPONIBLE	<=	126.295.000,0000	0	6,4717	126.295.000,0000	128.736.100,0000	

En la temporada anterior Carl Zeiss logro utilidades parciales de toda su producción (todos sus productos en general) por \$1,001,804,998.88 dólares anuales. Así mismo, obtuvo utilidades parciales solo por concepto de los 6 productos analizados en este documento la cantidad de \$726,269,393 dólares anuales, ahora se puede lograr con los mismos productos \$834,688,800 dólares anuales, comparadas ambas temporadas sería un aumento del 12.99%.

Un aspecto importante son el conjunto de decisiones que el modelo alcanza. Por ejemplo: X1 y X2 llegan al 100% de su producción, X3 y X4 no se recomienda producir, y X5 y X6 alcanzan un 78% y 99% respectivamente de producción; con respecto X3 y X4, no recomienda producirlos puesto que la tendencia de la demanda está a la baja y la utilidad que se tiene no es lo suficientemente grande.

La proporción de la capacidad de producción instalada que estaba siendo utilizada en la temporada anterior era 9,487,297 de 11,700,000; esto es el 81%, ahora, si se considera que se implementen los cambios antes descritos en la planeación de estos productos, entonces el incremento en la utilización de la capacidad instalada será del 4.5%, es decir un 85.6%, esto representaría un aumento de 528,604 más de charolas producidas al año.

Basándonos en el análisis de sensibilidad del modelo original, se puede observar en los datos de las holguras que es necesario incrementar la capacidad de producción, y que el punto más crítico es R2 con solo 63,742 charolas de holgura, lo cual es algo que debe atenderse de inmediato; a parte que el incremento promedio anual de este producto es mayor que la holgura que presenta. El jefe de producción asegura un incremento no menor de 12,000,000 charolas físicas al año, es decir, doblar la capacidad actual. Lo que se lleva a considerar para la temporada 2014-2015 una capacidad de 23,700,000 charolas anuales. La tabla 16 nos muestra de manera sencilla los incrementos porcentuales de cada línea de producción analizadas en este documento:

*Tabla 16: Incremento en la capacidad de las líneas de producción*

	<i><b>línea 1</b></i>	<i><b>línea 2</b></i>	<i><b>línea 3</b></i>
antes	<b>38%</b>	<b>18%</b>	<b>25%</b>
después	<b>25%</b>	<b>39%</b>	<b>27%</b>

La línea 2 es la que más incremento registra y es en la que se produce X4 (la que no se recomienda producir); cabe mencionar que Carl Zeiss tiene otros planes para esta línea, lo que posiblemente sea introducir nuevos modelos. Esta línea no sufre cambios, la disminución del porcentaje de participación se debe a que el incremento que involucra las primeras tres líneas; sin embargo al hacer la distribución solo afecta el porcentaje de esta, pero físicamente es lo mismo.

De lo anterior se desprende que si se incrementa la disponibilidad del insumo disponible (R23), previa modificación en la capacidad de producción y almacenamiento, de un incremento del 8.15% para la siguiente temporada, se obtienen incrementos en las presentaciones de mayor importancia X1, X2, X5 y X6. Este ajuste es importante al considerar modificaciones en los espacios de almacenamiento tanto de insumos como de

producto terminado en caso de ser necesario (infraestructura) ya que al haber un incremento en las utilidades hay margen para realizar dichos cambios.

### **5.5 Preparación para la aplicación del Modelo prescrito por la administración**

Si el modelo ha de usarse varias veces, es necesario instalar un sistema bien documentado para aplicar el modelo, según lo establecido por las normativas de calidad y producción de la empresa Carl Zeiss. Este sistema debe de incluir el modelo, procedimientos de solución y procedimientos operativos para su implantación, entonces aun cuando el personal cambie, el sistema puede consultarse periódicamente para proporcionar una solución numérica específica. La base de datos y los sistemas de información administrativos pueden proporcionar la entrada actualizada para el modelo cada vez que se use, en cuyo caso se necesitan programas de interfaz. Una vez que se tiene el procedimiento de solución al modelo mediante un programa, es necesario que adicionalmente programas implementen los resultados automáticamente. En algunos otros casos se puede instalar un sistema de soporte de decisiones, para ayudar a la gerencia a usar los datos y los modelos para apoyar y no sustituir su toma de decisiones. Posteriormente otro programa puede generar informes gerenciales, en lenguaje administrativo que interpreten la salida del modelo y sus implicaciones prácticas.

En este tipo de estudios mayormente importantes, se puede requerir de varios meses para desarrollar, probar e instalar estos sistemas de computadora. Parte de este esfuerzo incluye el desarrollo e implantación de un proceso de mantenimiento durante su uso. Al cambiar las condiciones con el tiempo, este proceso debe hacer las modificaciones correspondientes al sistema de computadora, incluyendo el modelo.

### **5.6 Puesta en marcha**

Implementación de la solución óptima. Conociendo las dimensiones de una empresa como Carl Zeiss, los resultados se consideran fácilmente aplicables. La manera en cómo se desglosara el programa de producción propuesto, es decisión única del gerente y del jefe de producción. Se debe dejar claro que a partir de este análisis, da cabida para nuevas investigaciones, ya que se puede utilizar el modelo con información más actualizada. El

modelo es dinámico es ese aspecto, se sustituyen los valores necesarios y se obtendrán resultados más precisos. Esta etapa es la más crítica ya que en esta se obtienen los beneficios del estudio. El éxito de la puesta en marcha depende en gran medida del apoyo que se brinde por parte de gerencia operativa y la administración en general.

Los relacionados con el proyecto de Investigación de operaciones deben dar una explicación a gerencia operativa sobre el nuevo sistema que se pretende adoptar, estos dos grupos de personas son los responsables de desarrollar los procedimientos requeridos para poner el nuevo sistema en marcha. Gerencia operativa se encarga posteriormente de dar capacitación al personal necesario e iniciando con esto operaciones.

### **5.7 Observación de resultados y retroalimentación**

Observar los resultados reales y retroalimentar al sistema en sí, si la solución teórica difiera de la realidad. El equipo de trabajo de investigación de operaciones supervisa la retroalimentación que se debe introducir al sistema. Desde luego si la administración Carl Zeiss decide implementar el sistema a futuro. Si así lo fuera es imperativo observar los datos que arroja el nuevo sistema y de si los supuestos satisfacen. Si en el transcurso ocurren desviaciones significativas de los datos supuestos originales se debe revisar nuevamente el modelo para determinar si se tiene que modificar. Todo debe documentarse como punto de referencia para futuras investigaciones. Recuerde que el documento se presenta como propuesta para la empresa Carl Zeiss Tijuana, esto no significa que necesariamente se implemente.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES GENERALES**

Esta sección presenta un análisis sintetizado de los resultados obtenidos. Al mismo tiempo responder a las preguntas en general y específicas que inicialmente se plantearon, a saber: ¿Cuál es el volumen de producción más conveniente para la empresa para la temporada 2014-2015?, ¿Qué recursos están siendo mal aprovechados y pueden optimizarse?, si la planta busca incrementar utilidades, ¿Qué recursos aumentar y/o disminuir? y ¿Cuánta capacidad de producción instalada se estará desperdiciando? Por otro lado, se verificaran las hipótesis de trabajo propuestas. En seguida se presentan las conclusiones obtenidas en cada escenario.

## **6.1 Conclusiones y recomendaciones para el primer escenario**

Habiendo analizado los datos del primer escenario con la gerencia de producción e ingeniería se vertieron las siguientes conclusiones de manera general:

1. En vista de los incrementos anuales de la demanda es necesario incrementar la capacidad de producción como para poder “soportar” la demanda en el próximo ciclo.
2. La empresa Carl Zeiss Tijuana establece que se debe de mantener un inventario anual de materiales equivalentes a la capacidad de producción, por lo tanto las restricciones  $R1 \rightarrow R22$  se deben incrementar en la medida que incremente la capacidad de producción.
3. Incrementar el nivel de inventario de los insumos (polímeros) para aprovechar al máximo la capacidad de producción, además de cumplir con la demanda.
4. Alimentar el sistema con los datos anteriores para estructurar el siguiente modelo: segundo escenario.

## **6.2 Conclusiones y recomendaciones para el segundo escenario**

De acuerdo con la gerencia de producción de Carl Zeiss se acordó lo siguiente:

1. Se incrementa la capacidad de producción de tal manera que “soporte” la demanda de hoy a tres años.
2. Las restricciones de los materiales (R17 al R22) se incrementa a medida que se incrementa la capacidad de producción.
3. Se recomienda incrementar el nivel de inventario de los insumos para lograr que se aproveche al máximo la capacidad de producción, los materiales y los insumos mismos.
4. Este escenario sin dudas cumple con las expectativas de producción, sin embargo en el siguiente escenario es el que más se asemeja al sistema real y atrae la atención de gerencia de producción.

### 6.3 Conclusiones y recomendaciones para el tercer escenario

Para la empresa Carl Zeiss este tercer escenario, es hasta cierto punto el mejor para el departamento, pero el más difícil, ya que es necesario hacer ajustes en los otros departamentos, no nada más producción, sino también mercadotecnia, proyectos, compras, entre otros. Sin embargo este escenario puede convertirse a la práctica, ya que ahora es el objetivo del departamento de producción.

Se pudiera contribuir con más escenarios que reflejen con más proximidad el comportamiento del sistema de Carl Zeiss; en esta ocasión tal vez no se incluya todo el sistema completo en sí, sino solo una parte de él. Se recomienda que en adelante, y la medida que se pueda, incluir otras variables y/o restricciones que posiblemente contribuyan con la depuración del modelo que se está empleando en este documento.

### 6.4 Conclusiones generales

Una vez considerado el modelo matemático final se puede ver claramente que al dar seguimiento al programa generado, “seguramente” se obtendrán utilidades mayores a las obtenidas en temporadas pasadas; en este caso \$834,688,800 dólares al año.

La implementación de este programa lleva la obtención del incremento del 13% sobre la temporada anterior, además se incrementa la utilización del equipo de producción con el que se cuenta, por ende, se aprovecha al máximo la capacidad instalada.

*Tabla 17: Datos de producción recomendados para periodos 2014-2015*

<i>variable</i>	<i>nombre de la variable</i>	<i>charolas/año</i>
X <sub>1</sub>	EXP	<b>4,552,148</b>
X <sub>2</sub>	EXP SHT	<b>2,578,263</b>
X <sub>3</sub>	TRANS	<b>0</b>
X <sub>4</sub>	CLEAR	<b>0</b>
X <sub>5</sub>	POLY	<b>1,025,236</b>
X <sub>6</sub>	FT POLY	<b>1,860,254</b>

La maquinaria, y por consecuencia el proceso no está siendo utilizados al máximo, siendo que la capacidad de producción del Carl Zeiss está llegando al límite, sin embargo debe considerarse esto como una “oportunidad de mejora”.

Se tiene en consideración la capacidad de producción, los materiales e insumos disponible. Para esto se sugiere un análisis costo-beneficio. (se recomienda la consulta a Garutti, C. y I. Spencer [1993) para la modificación de la infraestructura de los almacenes, en caso de ser necesario.

La proporción de la capacidad instalada para el periodo 2014-2015 era del 81%, la propuesta por el modelo es del 85%, por lo tanto se desperdiciaba un 19% y 15% respectivamente.

Si se reduce la disponibilidad de los recursos al mínimo necesario, la productividad de estos recursos se incrementara porque se utilizaran al máximo. En el caso que se incremente la disponibilidad de los insumos y materia prima, la productividad de la maquinaria aumentaría porque se le da un mayor uso. Todas estas inferencias vienen de la aplicación del modelo que corresponde al segundo escenario.

Se identificó un plan optimo que ayudara a obtener más beneficios económicos y al mismo tiempo ayudar a la administración y al personal involucrado a mejorar los procesos de producción mediante la determinación de los recursos que no se utilizan o están siendo mal utilizados; que se conozca la capacidad real del equipo y las instalaciones de la compañía. Por lo tanto el documento sirve de propuesta para la administración en el que se presentan las ventajas de implementar un programa de investigación de operaciones para la toma de decisiones.

En la empresa se han reconsiderado algunos índices que representan los volúmenes de inventario de materia prima e insumos, además de incrementar la capacidad de producción. Además de encontrarse con recursos mal utilizados, cuando se hacen estos ajustes la empresa incrementa su productividad y las utilidades brutas. Un ejemplo es el caso de las variables de decisión X3 y X4, el modelo no recomienda su producción, esto significa que todos los recursos disponibles que se hubieran utilizado para la producción de estos se canalizan hacia otros que si justifican su producción, tales como X1, X2, X5 y X6, la identificación y constante monitoreo de estas áreas de oportunidad resultan en cuantiosos beneficios para la empresa. Por lo tanto se puede decir que se ha optimizado el proceso de producción de la empresa Carl ZeissVision Tijuana.

El desarrollo de los tres escenarios bajo la base del sistema original trajo consigo recomendaciones de vital importancia para la empresa, tal como impulsar el desarrollo de

un departamento de investigación de operaciones dentro de Carl ZeissVision Tijuana. También se consideró implementar un sistema computarizado que sirva de monitoreo para el departamento de producción, en el cual se incluya el modelo aquí propuesto. Para que el trabajo sea lo más sencillo posible es necesario que los departamentos involucrados cooperen mutuamente, ya sea producción, ventas, compras, almacenes, etc. Al final tras haber analizado los tres escenarios, para la empresa, el escenario segundo fue el que más idóneo dada sus características y el tiempo que se tiene disponible para poder implementarlo.

Cada escenario cuenta con un análisis que le permite al personal poder “jugar” con las variables y poder obtener los resultados deseados, al mismo tiempo que permite cambiarlos o agregar más variables de decisión conforme este evoluciona con su uso.

Durante el tiempo que se visitó la planta se plantearon y discutieron objetivos específicos que tanto producción e ingeniería crean posibles a mediano plazo. Este documento es entregado al departamento de producción de Carl Zeiss Vision Tijuana y queda como antecedente a futuros estudios.

Además de los objetivos específicos, algo que señala el personal que intervino en la preparación de este estudio se percatan que “[...] además de simular cualquier proceso o situación, la investigación de operaciones suministra mucha más información que son importantes [...]” y con el correcto manejo e interpretación ayuda a optimizar cualquier otro de los procesos, y “sin tener que mover un solo dedo en producción” (Urban, L. G. [1993])

Comentarios finales del jefe de producción sobre la aplicación de investigación de operaciones en la empresa Carl Zeiss Vision:

- a) Independientemente del volumen de producción, se observa una estimación de las ganancias parciales que se pueden obtener por temporada o ciclo [...]. Realmente no se contemplaba de esa manera el aspecto financiero en el área de producción.
- b) Logramos identificar otras áreas de oportunidad en las que se presentan más holguras o las que están muy restringidas.

- c) Relacionando lo anterior podemos simplificar las decisiones de administración y el resto de los departamentos ya que se sabe en qué niveles se deben mantener los recursos utilizados.

### **6.5 Recomendaciones generales**

Para integrar el documento tal cual se presenta, fue imprescindible la cooperación de tres de los departamentos involucrados: producción, mercadotecnia, almacén. Los datos proporcionados son determinantes en toda la construcción del modelo matemático presentado. Después de construir y resolver el modelo de programación lineal, es necesario auxiliarse de otra técnica o método para programar adecuadamente la producción mensual que comprende la temporada. Existen otros tipos de programación que puedan ayudar al respecto: programación por metas, programación dinámica, planeación de los requerimientos de los materiales (MRP). Lo anterior se deja a futuras consideraciones. Sea cual sea la situación, se debe recordar que las decisiones que se tomen serán mucho más confiables porque están fundamentadas en un proceso de carácter científico, lo que tenderá a éxito.

## 7. BIBLIOGRAFIA

1. Anderson, D. R., D. J. Sweeney y T. A. Williams (2000) “*An introduction to management Science*”, 9a. ed., West, St. Paul, MN.
2. Ackkof, R. (1997) “The Development of Operational Research as a Science”. Operations Research. Vol. 4.
3. Akbays, K. S. (1996) “Using Simulation Optimization to find the best Solution”. IIE Solutions. Mayo de 1996, Norcross G.A.
4. Armstrong, J. R. (2001) “*Handbook of forecasting principles*”, Kluwer Academy Publishers, boston, MA.
5. Ball, M. T. L. Magnanti, C. Monma y G. L. Nemhauser (1995), “*Network Models*”, Elsevier, New York.
6. Banks, J. and Gibson, R. (1997) “Simulation Modeling: Some programming required”. *IIE Solutions*, Febrero de 1997. Norcross, G.A.
7. Barbolla R., Cerda E., Sans P. (2001) “*Optimización. Cuestiones, ejercicios y aplicaciones a la economía*”.
8. Baumol W. J. y R. C. Bushnell (1967) “*Error produced by linearization in mathematical programming*”, *Econometrica*, 35:447-471, 1967.
9. Bazaraa, M. S., J. J. Jarvis y H. D. Sherali (1990) “*Linear programming and network flows*”, 2da. Ed. Wiley, N. Y.
10. Beale E. M. L. (1995) “*Cycling in the dual simplex algorithm*”. *Naval Research Logistic quarterly*. Vol 2.
11. Beasley, J. E. (1996), “*Advanced in linear an integer programming*”, Oxford University Press, Oxford Inglaterra.
12. Bixby, R. E., M. Fenelon, Z. Gu., E. Rothberg y R. Wunderling (1999), “*MIP: Theory and practice closing gap*”, Proceedings of IFIP TC7 Conference, Cambridge.
13. Chang, Y., Sullivan R., (1990) QSB+. “*Quantitative Systems for business Applications Plus*”. Prentice Hall.
14. Charnes A. (1996) “*Optimality and Degeneracy in linear programming*”. *Econometrica*. Vol. 20.
15. Chiang, A. (1987): “*Metodos fundamentales de economiamatematica*”. Ed. McGraw Hill.

16. Dahir M. (2000) "*Watching You*", The industry standard, Wiley, New York.
17. Dantzig, G. (1963), "*linear programming and extensions*", Princeton University Press, Princeton NY.
18. Dantzig, G. y M. N. Thapa. (1967). "*línear programming 1: Introduction*". Springer, New York.
19. Fortuin, L., P. Van Beek y L. Van Wassenhove. (1996). "*OR at wORK: Practical experiences of operational research*", Taylor and Francis, Bristol, PA.
20. Garuti, C. y I. Spencer (1993), "*Análisis costo beneficio: un análisis tipo bidimensional*". Monografía. Fulcrum ingeniería LTDA.
21. Grass, S. (1990), "*An ilustraded guide to linear programming*", Dover Publish, New york.
22. Glover, F., D. Klingman y N. V. Philips (1992) "*Networks models in optimization an their application in practice*". Wiley, New York.
23. Hamdy A. Taha. (1998). "*Operations Research*", 6ta. Ed. Macmillan Inc.
24. Heras, A., Gutierrez S., Balbas A., Gil J. A. y Vilar J. L. (1990) "*Programación matemática y modelos económicos: un enfoque teórico-práctico*". Ed. AC Madrid.
25. Hillier, Frederick, S. y Lieberman, Gerald J. (2002), "*Investigación de operaciones*". 7a. Ed. McGraw Hill.
26. Hillier, F. S., M. S. Hillier y G. J. Lieberman (2000), "*Introduction to management science: a modeling and case studies approach with spreadsheets*", Irwin/McGraw Hill, Burr Ridge, IL.
27. Hiquet, B. D., Kelly, A. F. and CCAiInc (1998), "*SAP R3: implementation guide: A manager's guide to understanding SAP*", Mcmillan technical publish, Indianapolis. IN.
28. Hoffman, A. I. (1999) "*Cycling the simplex method*". National Bureau of Standars.
29. Horst, R. y P. Pardalos (1995), "*Handbook of global optimization*", Kluwer Academy Publish, Boston MA.
30. Lemke, C. E. (1993), "*The dual method of solving linear programming problem*", Naval Research logistics Quarterly, Vol. 2.
31. Marshall K. T. y R. M. Oliver (1995), "*Decision making and forecasting*", McGraw Hill, New York.

32. Misser H. J. (1997) "The easy chair: Is it possible to have a good definitional description of Operational Research and Management Science?" Interfaces. Noviembre, Diciembre de 1997. USA.
33. Mocholi M. y Sala R. (1993), "*Programación lineal, metodología y problemas*". Ed. Tebar flores, Madrid.
34. Mocholi M. y Sala R. (1999), "*Decisiones de optimización*", Ed. Tirant lo Blanc, Valencia.
35. Philips C. y Meeker M. (2000), "*the B2B internet report: Collaborative commerce*", morgan.
36. Prawda, Juan (1993), "*Metodos y modelos de investigación de operaciones*", Vol 1., Modelos determinísticos, Ed. Limusa.
37. Randor, M. y Rubistein A. H. (1998), "*Implementation in operations research and R and D. in government and business organization*". Operations Research, Vol. 18.
38. Rayward-Smith, V. J., I. H. Osman, C. R. Reeves y G. D. Smith (1997), "*Modern heuristic search method*", Wiley, New York.
39. RiosInsua S. (1995), "*Modelización*". De Alianza, Madrid.
40. RiosInsua S. (1993), "*Investigación operativa*", Optimización, Ed. Centro de estudios Ramón Areces Madrid.
41. Simon, H. A. (1990), "*Prediction and prescription in systems modeling*", operations Research.
42. Sniedovich M. (1991), "*Dynamic programming*", Marcel Dekker, New York.
43. Sodhi M. (2000), "*Getting the most planning technologies*", Supply chain management review – Global supplement., Vol 3, No. 4, pp. 19-23.
44. Thompson, G. L. y Thorse S. (1992), "*Computational Economics*", ed. Scientific press, SF.
45. V. Riley (1958), "*Linear programming and associated techniques*", John opkins Press, Baltimore.
46. Vanderbei, R. J. (1996), "*Linear programming: foundations and extensions*", Kluwer Academy, Boston MA.
47. Wagner H. M. (1994), "*The dual simplex algorithms for bounded variables*", Naval research logistics Quarterly, Vol2.

## 8. INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

### 8.1 Índice de Figuras:

FIGURA 1: PROCESO GENERAL DE PRODUCCIÓN.....	9
FIGURA 2: DISTRIBUCIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE PRODUCCIÓN POR LÍNEA .....	12
FIGURA 3: REPRESENTACION DE UN SISTEMA REAL.....	20
FIGURA 4: RESULTADO GENERADO DEL PRIMER ESCENARIO.....	35
FIGURA 5: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL PRIMER ESCENARIO .....	37
FIGURA 6: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LA FUNCIÓN OBJETIVO, PRIMER ESCENARIO .....	40
FIGURA 7: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA RESTRICCIONES, PRIMER ESCENARIO .....	41
FIGURA 8: RESULTADOS DEL SEGUNDO ESCENARIO.....	44
FIGURA 9: HOLGURAS PARA EL SEGUNDO ESCENARIO .....	46
FIGURA 10: RESULTADOS EN EL CAMBIO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO PARA EL SEGUNDO ESCENARIO .....	47
FIGURA 11: RESULTADOS EN LOS CAMBIOS DE LAS RESTRICCIONES PARA EL SEGUNDO ESCENARIO .....	48
FIGURA 12: RESULTADOS PARA EL TERCER ESCENARIO.....	49
FIGURA 13: RESULTADO DEL ANÁLISIS DE HOLGURAS PARA EL TERCER ESCENARIO .....	51
FIGURA 14: RESULTADOS EN CAMBIO DE LA FUNCIÓN OBJETIVO PARA EL TERCER ESCENARIO .....	51
FIGURA 15: ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA EL TERCER ESCENARIO.....	52
FIGURA 16: RESULTADO PARA EL SEGUNDO ESCENARIO .....	54

### 8.2 Índices de Tablas:

TABLA 1: TIPOS DE PRODUCTOS.....	8
TABLA 2: LÍNEAS DE PRODUCCIÓN .....	11
TABLA 3: PRECIOS DE VENTA .....	11
TABLA 4: COSTO REAL DE PRODUCCIÓN .....	12
TABLA 5: UTILIZACIÓN DE LA CAPACIDAD INSTALADA DE PRODUCCIÓN .....	13
TABLA 6: PRODUCCIÓN REAL EN CHAROLAS .....	13
TABLA 7: PERSONAL DE PRODUCCIÓN.....	15
TABLA 8: COMPARATIVA DE COSTOS DE PRODUCCIÓN .....	15
TABLA 9: PRODUCCIONES ANUALES Y DEMANDA PARA 2014-2015.....	29
TABLA 10: MÁRGENES DE UTILIDAD POR CHAROLA.....	30
TABLA 11: LÍNEAS DE PRODUCCIÓN EN ANÁLISIS Y TIPOS DE PRODUCTO DE CADA UNA .....	30
TABLA 12: VARIABLES ASIGNADAS AL TIPO DE PRODUCTO .....	31
TABLA 13: CHAROLAS A PRODUCIR SEGÚN PRIMER ESCENARIO .....	35
TABLA 14: CANTIDAD DE CHAROLAS A PRODUCIR SEGÚN SEGUNDO ESCENARIO.....	44
TABLA 15: CANTIDAD DE CHAROLAS A PRODUCIR.....	50
TABLA 16: INCREMENTO EN LA CAPACIDAD DELAS LÍNEAS DE PRODUCCIÓN.....	55
TABLA 17: DATOS DE PRODUCCIÓN RECOMENDADOS PARA PERIODOS 2014-2015 .....	59