



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar



**GRACE**  
Enriching Lives, Everywhere.®

**MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE  
LA PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA  
EMPRESA GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA**

**ADRIANA CRISTINA GALINDO MARTÍNEZ  
CARLOS MARIO ROSALES VÉLEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2012**



Universidad  
Tecnológica  
de Bolívar



**GRACE**  
Enriching Lives, Everywhere.®

**MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA OPTIMIZACIÓN DE  
LA PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA  
EMPRESA GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA**

**ADRIANA CRISTINA GALINDO MARTÍNEZ  
CARLOS MARIO ROSALES VÉLEZ**

**Trabajo de Grado para optar el título de Ingeniero Industrial**

**Director del Trabajo:  
Ing. Jairo R. Coronado Hernández**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE BOLÍVAR  
FACULTAD DE INGENIERÍAS  
PROGRAMA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL  
CARTAGENA DE INDIAS D.T. Y C.**

**2012**



Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

Presidente del Jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Cartagena de Indias, 28 Septiembre de 2012



*Dedico este trabajo a Dios, quien ha sido mi guía y me ha dado la sabiduría y la determinación para lograr finalizar este propósito, Señor he aquí el fruto del trabajo sincero de tu hija.*

*A mis padres, Rafael Galindo y Diana Martínez, por su amor y cuidado, por su apoyo incondicional y por darme una educación con firmes valores para ser una persona de bien.*

*A mi hermano Miguel Galindo por apoyarme y alentarme a seguir en este proyecto. A mi Tío Fernando Galindo, por ser mi soporte, por brindar alientos para continuar y no desfallecer, por ser un amigo incondicional y quererme tanto. A mis abuelitos y a toda mi familia, porque creyeron en mí, creyeron en la meta que me planteé y me apoyaron en todo momento con amor y confianza.*

*A mis amigas, Daniella y Claudia, por su gran amistad, por ser más que amigas, mis hermanas, quienes comenzaron conmigo este hermoso pero complicado camino y que aún permanecen a mi lado. Porque nunca será olvidado quien por siempre se recuerda.*

*Adriana Cristina Galindo Martínez*

*Principalmente dedico este trabajo a mi madre Oliva Vélez y a mi padre Mario Rosales, por enseñarme cada día a crecer y a soñar, por educarme y hacerme ser quien soy, por ser un gran ejemplo a seguir, por su apoyo y dedicación para permitirme generar este pequeño aporte a mi futuro.*

*A mis hermanas Angie y Diany, por estar siempre para mí, por su amistad y amor incondicional.*

*A mi novia Oriana Jiménez, por estar conmigo en las buenas y en las malas, por apoyar mis decisiones y aconsejarme cuando más lo he necesitado.*

*A mi sobrino Simón, que en un futuro espero ser para él ejemplo de dedicación y perseverancia.*

*Y por ultimo pero no menos importante a Diosito y mi Virgencita, porque cada tropiezo se convirtió en una gran enseñanza y cada logro obtenido fue solo gracias a su ayuda.*

*Carlos Mario Rosales Vélez*

## AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a:

*Grace Colombia S.A. por permitirnos desarrollar este proyecto y por permitirnos ser parte de su proyecto de crecimiento y desarrollo.*

*Al Ing. Jairo Coronado Hernández, nuestro tutor por guiarnos en el desarrollo del este trabajo, por su apoyo y la confianza depositada en nuestro propósito.*

*A todos nuestros docentes de la UTB, porque nos guiaron y enseñaron con la intención de convertirnos un día en profesionales integrales.*

*Al laboratorio de producción de la UTB por brindarnos las herramientas informáticas requeridas para el desarrollo del trabajo.*

***¡Infinitas gracias a quienes hicieron posible culminar con este propósito!***

## CONTENIDO

	pág.
RESUMEN .....	17
INTRODUCCIÓN .....	18
1. GENERALIDADES .....	21
1.1 DE LA W.R. GRACE & CO. ....	21
1.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA .....	21
1.3 LOCALIZACIÓN DE GRACE CONSTRUCTION .....	22
1.4 DE LA ORGANIZACIÓN.....	24
1.4.1 Nuestra visión .....	24
1.4.2 Nuestro Propósito.....	25
1.4.3 Nuestros valores.....	25
1.4.4 Medio ambiente, salud y seguridad .....	26
1.5 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL.....	28
1.5.1 Organigrama de la empresa .....	28
1.6 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS .....	30
1.7 CLIENTES .....	31
1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....	33
1.9 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	35
1.10 JUSTIFICACIÓN .....	35
1.11 OBJETIVOS .....	36
1.11.1 Objetivo general.....	36

1.11.2	Objetivos específicos .....	36
1.12	DISEÑO METODOLÓGICO .....	37
2.	MARCO TEÓRICO .....	40
2.1	PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	40
2.1.1	Entorno de la planificación de la producción.....	42
2.1.2	Planeación agregada de la producción.....	43
2.1.3	Planificación de la capacidad.....	46
2.1.4	Inventarios .....	48
2.2	PRONÓSTICOS.....	49
2.2.1	Métodos de pronóstico.....	50
2.3	PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	52
2.3.1	Conceptos claves de programación.....	52
2.3.2	Etapas de la programación de operaciones.....	53
2.3.2.1	La asignación .....	53
2.3.2.2	La secuenciación .....	53
2.3.3	Reglas de despacho .....	55
2.3.4	Formas de programación de la producción.....	56
2.4	MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	57
2.4.1	Teoría de Restricciones .....	58
2.4.1.1	Programación entera .....	59
2.4.2	Gusek .....	60
2.4.2.1	Obtener GUSEK.....	60
2.5	MODELOS MATEMÁTICOS PROBLEMA DE LOS TAMAÑOS DE LOTE ..	60
2.5.1	Problema del tamaño de lote: CLSP .....	60

2.6	MODELOS HEURÍSTICOS.....	62
2.7	REVISIÓN DE LA LITERATURA .....	64
3.	CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO Y SU PLANIFICACIÓN .....	67
3.1	ELEMENTOS DEL PROCESO PRODUCTIVO .....	67
3.1.1	Insumos .....	67
3.1.2	Maquinaria .....	68
3.1.3	Recursos.....	68
3.1.3.1	Recursos físicos .....	69
3.1.3.2	Talento humano.....	69
3.2	DESCRIPCIÓN DEL PROCESO .....	69
3.2.1	Análisis del proceso productivo .....	71
3.2.1.1	Diagrama SIPOC.....	73
3.2.1.2	Diagramas Macro .....	76
3.3	PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.....	86
3.3.1	PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN.....	86
3.3.2	PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN .....	88
3.4	CARACTERIZACIÓN DE ATRIBUTOS .....	90
3.4.1	Tiempo.....	91
3.4.2	Recursos.....	93
3.4.3	Productos.....	94

4. MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA PLANIFICACIÓN Y LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE DOS REACTORES CON TIEMPOS DE ALISTAMIENTO DEPENDIENTES DE LA SECUENCIA.....	95
4.1. FORMULACIÓN DEL MODELO .....	95
4.2. IMPLEMENTACIÓN EN GUSEK .....	103
4.3. ORGANIZACIÓN, DESCRIPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE TABLAS .....	106
4.3.1. Primera Fase .....	107
4.3.1.1. Tablas de entrada.....	107
4.3.1.2. Tablas de salida .....	109
4.3.2. Segunda Fase .....	111
4.3.2.1. Tablas de entrada.....	111
4.3.2.2. Tablas de salida .....	113
5. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO .....	114
5.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO .....	114
5.2. CASOS COMPARATIVOS.....	115
5.3. PRIMER CASO.....	116
5.3.1. Aplicación del modelo de programación matemática.....	118
5.3.1.1. Fase I .....	118
5.3.1.2. Fase II .....	120
5.3.2. Comparación de métodos.....	122
5.4. SEGUNDO CASO.....	123
5.4.1. Aplicación del modelo de programación matemática.....	126
5.4.1.1. Fase I .....	126
5.4.1.2. Fase II .....	128
5.4.2. Comparación de métodos.....	130

6. CONCLUSIONES.....	132
7. RECOMENDACIONES .....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	136
ANEXOS.....	138

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1 Reglas de despacho .....	55
Tabla 2. Tiempos de fabricación productos de línea Construction.....	71
Tabla 3. Simbología del cursograma sinóptico. ....	76
Tabla 4. Descripción de actividades. ....	81
Tabla 5. Simbología del diagrama de flujo.....	82
Tabla 6. Descripción de diagrama de flujo para la empresa Grace Colombia S.A. planta Cartagena. ....	84
Tabla 7. Demanda en Kilogramos para productos representativos ofrecidos por Grace Colombia S.A. planta Cartagena en 2012.....	87
Tabla 8. Tiempos de alistamiento .....	89
Tabla 9. Costos de alistamiento.....	90
Tabla 10. Tabla periodo, ejemplo de ingreso de datos .....	107
Tabla 11. Tabla productos, ejemplo de ingreso de datos .....	108
Tabla 12. Tabla reactores, ejemplo de ingreso de datos .....	108
Tabla 13. Tabla demanda, ejemplo de ingreso de datos .....	109
Tabla 14. Tabla alistamiento, ejemplo de salida de datos .....	110
Tabla 15. Tabla inventario, ejemplo de salida de datos.....	110
Tabla 16. Tabla producción, ejemplo de salida de datos .....	111
Tabla 17. Tabla alistamiento, ejemplo de ingreso de datos .....	112
Tabla 18. Tabla productfab, ejemplo de ingreso de datos .....	112
Tabla 19. Tabla SecuenciaProd, ejemplo de salida de datos .....	113
Tabla 20. Demanda de productos, Caso 1 .....	116
Tabla 21. Semana de producción método actual, Caso 1 .....	117
Tabla 22. Inventario de productos método actual, Caso 1.....	117

Tabla 23. Productos a fabricar, Caso 1.....	119
Tabla 24. Inventario de productos aplicación de modelo, Caso 1.....	119
Tabla 25. Ciclos de fabricación, Caso 1.....	120
Tabla 26. Secuenciación de la producción, Reactor 1, Periodo 3, Caso 1 .....	121
Tabla 27. Semana de producción implementación de modelo, Caso 1 .....	121
Tabla 28. Comparación de métodos, Caso 1.....	123
Tabla 29. Demanda de productos, Caso 2 .....	124
Tabla 30. Semana de producción método actual, Caso 2 .....	124
Tabla 31. Inventario de productos método actual, Caso 2.....	125
Tabla 32. Productos a fabricar, Caso 2.....	126
Tabla 33. Inventario de productos aplicación de modelo, Caso 1.....	127
Tabla 34. Ciclos de fabricación, Caso 2.....	128
Tabla 35. Secuenciación de la producción, Reactor 1, Periodo 3, Caso 2 .....	129
Tabla 36. Semana de producción implementación de modelo, Caso 2 .....	129
Tabla 37. Comparación de métodos, Caso 2.....	131

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Localización de GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.....	23
Figura 2. Valores organizacionales de la W.R. GRACE & CO.....	26
Figura 3. Organigrama GRACE COLOMBIA S.A.....	29
Figura 4. Productos ofrecidos por GRACE COLOMBIA S.A. planta Cartagena ....	31
Figura 5. Clientes GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA .....	32
Figura 6. Factores que contribuyen en los principales problemas de la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA .....	34
Figura 7. Horizontes de planeación .....	41
Figura 8. Información requerida para el sistema de planeación de la producción .	42
Figura 9. Jerarquía de decisiones de planeación de la producción .....	44
Figura 10. Estrategias de planificación de la producción .....	45
Figura 11. Tipos de planeación en un horizonte de tiempo .....	47
Figura 12. Métodos de pronóstico.....	51
Figura 13. Componentes de un modelo matemático. ....	58
Figura 14. Formulación de un modelo de programación entera. ....	59
Figura 15. Descripción del proceso productivo de aditivos para cemento y concreto. ....	70
Figura 16. Proceso de recolección de información para el análisis del proceso productivo. ....	73
Figura 17. SIPOC Proceso de fabricación de aditivos químicos para cemento y concreto. ....	75
Figura 18. Cursograma sinóptico procesos GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.....	77
Figura 19. Diagrama de recorrido productos línea Construction.....	80

Figura 20. Diagrama de flujo para la empresa Grace Colombia S.A. planta Cartagena.....	83
Figura 21. Proceso de ejecución de modelo para la planificación de la producción en la empresa Grace Colombia S.A., Etapa 1 del modelo heurístico .....	105
Figura 22. Esquema presentación de modelo en carpetas.....	106

## LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexo A. Clientes Grace Construction S.A. planta Cartagena.....	139
Anexo B. Plano distribución de planta Grace Cartagena .....	142
Anexo C. Tabla de pronósticos y ventas, Enero – Septiembre 2012 .....	143
Anexo D. Tarjeta de control – TDAJ .....	146
Anexo E. Macro creación archivos .csv desde .xls VBA .....	147
Anexo F. Código primer modelo de programación y planificación de la producción en Gusek .....	148
Anexo G. Código primera fase, planificación de la producción .....	150
Anexo H. Macro combinación de valores resultado, primera fase .....	152
Anexo I. Código segunda fase, secuenciación de la producción .....	153
Anexo J. Macro combinación de valores resultado, segunda fase .....	154

## RESUMEN

El presente trabajo de grado consiste en diseñar un modelo de programación matemática que permita la optimización de los tiempos de fabricación de los productos ofrecidos por la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA, enfocándose en la planificación y la programación de la producción para lograr la disminución de los tiempos de alistamiento de los reactores y la secuenciación de los productos a fabricar. Dado que Grace promueve el desarrollo de procesos eficientes, se busca establecer una mejora significativa en el proceso de planificación y programación de la producción, ello empleando las herramientas que brinda la ingeniería Industrial.

A través de la caracterización de los procesos de fabricación, planificación y programación en la empresa, se analizan los aspectos de impacto sobre la temática de estudio que permitan el desarrollo de un modelo cercano a la realidad de las operaciones que logre generar información certera y concluyente. En el seguimiento de la metodología de investigación establecida se llegó al desarrollo de una solución heurística constituida por dos etapas, en ambas se emplean modelos de programación matemática y mediante el lenguaje de programación se codifican para ingresar a al entorno de programación Gusek donde mediante el solver GLPK se ejecutan para obtener los resultados o salidas. La primera etapa permite determinar los tamaños de lote óptimo para los productos a través de la implementación de un modelo CLSPMM<sup>1</sup>, mientras que la segunda se ocupa de la secuenciación de la producción en cada reactor.

Palabras claves: Modelo de programación matemática, modelo heurístico, planeación, programación, tiempos de alistamiento, minimizar costos.

---

<sup>1</sup> Capacitated Lot Sizing Problem Multi-Machine, variación del modelo de CLSP.

## INTRODUCCIÓN

En el actual entorno globalizado el administrar correctamente los recursos productivos es determinante para el desarrollo y crecimiento de una organización. Al administrar las operaciones se lleva a cabo un proceso que conduce a la toma de decisiones acerca de la consecución y utilización de los recursos para la obtención de los productos o servicios creados con miras a la satisfacción de las necesidades del cliente. De ésta manera, la planificación y la programación de la producción se constituyen en procesos de gran importancia que pueden llegar a generar a la empresa una gran ventaja sobre sus competidores en el mercado. La planificación y programación de la producción se constituyen en la principal guía de la empresa dentro del horizonte temporal para la consecución de las metas que establezcan.

Por su parte, la planificación consiste en fijar el curso de acción concreto que ha de seguirse, determinando los principios que habrán de orientar, la secuencia de operaciones para realizarlos y el establecimiento de tiempos y de números necesarios para su realización. Así la *“planificación no es un algo que mejora automáticamente la eficiencia y la efectividad sino que es un proceso integral, que optimiza el uso de recursos de los cuales dispone, que busca nuevas y mejores maneras de hacer las cosas apoyándose en investigaciones, y que da una base en el cuestionamiento sobre los fines que persiguen para que sus esfuerzos tengan sentido”*.<sup>2</sup> La programación de la producción está orientada a la fijación de planes y horarios de la producción de acuerdo a la prioridad de la operación por realizar, determinando así de su inicio y fin para lograr el nivel más eficiente.

---

<sup>2</sup> Capítulo I: La planeación. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en la web:  
<http://www.slideshare.net/jogrear23/planeacion-5240344> [4 de Septiembre 2012].

Ambos procesos se conjugan en búsqueda del desarrollo continuo y la elaboración de productos de calidad bajo el nombre de organización.

El objetivo principal del presente trabajo es el de diseñar un modelo de programación matemática para la optimización de la planificación y programación de la producción en la empresa GRACE COLOMBIA S.A. en su planta en la ciudad de Cartagena. Para ello se desarrollaron una serie de capítulos que constituyen la fundamentación del trabajo como se describe a continuación.

Inicialmente en el capítulo I se abordan las generalidades de GRACE, haciendo un recorrido por su historia y evolución, presentado los elementos del direccionamiento estratégico que caracterizan a la empresa y que le proporcionan una base para la toma de decisiones. En este capítulo también se presenta el diagnóstico inicial de la empresa, así como la descripción y justificación de la problemática determinada de planificación y programación, y se establece la metodología de investigación empleada como guía en el desarrollo del estudio.

En el capítulo II se realiza una descripción teórica de la temática de estudio centrándose en los fundamentos de la planificación y programación de las operaciones, así como los modelos de programación matemática que sirvieron de base para el desarrollo del modelo matemático para Grace.

Para en el capítulo III se establece la caracterización del proceso de fabricación de los productos de la línea Construction lo cual brinda una visión global de las actividades que la empresa desarrolla para la obtención de sus productos en atención a la satisfacción de las necesidades del cliente. Por otra parte en este capítulo se describe el cómo se llevan a cabo actualmente los procesos de planificación y programación de la operaciones en la empresa, qué variables consideran, qué actores intervienen en ello y se da un porqué a la realización del estudio. Adicionalmente se realiza una revisión de la literatura de los autores que

han marcado hitos en la modelación del problema del tamaño de lote y la programación de la producción.

En el capítulo IV, se presenta el modelo diseñado y su traducción al lenguaje de programación usado por el programa tomado como solucionador. Dadas las características del modelo y la información de la empresa no fue posible emplear el modelo inicial, en consecuencia se desarrolla un modelo heurístico el cual se divide en dos fases con sus respectivos modelos matemáticos, ello en la búsqueda de una solución óptima para brindar a la empresa una opción que permita mejorar la manera de realizar los procesos de planificación y programación de la producción, y que pueda verse reflejada en beneficios significativos para su proceso productivo.

Finalmente, en el capítulo v, se presentaron los indicadores de costos y utilización asociados a la implementación de los modelos en un caso comparativo de la producción real de la empresa, así como los beneficios que representa su implementación para Grace en su planta en Cartagena, en términos de planificación y programación de la producción.

## 1. GENERALIDADES

### 1.1 DE LA W.R. GRACE & CO.

W.R. GRACE & CO. es una multinacional que se constituye en un conglomerado químico cuya sede principal está ubicada en Columbia, Maryland, Estados Unidos. Actualmente la empresa cuenta con dos divisiones, **productos químicos Davison** y **productos químicos de rendimiento**.

- La división Davison tiene como objeto a realizar catalizadores químicos, catalizadores de refinación y productos a base de sílice que permiten a otras compañías fabricar productos derivados del petróleo crudo refinado.
- La unidad de productos químicos de rendimiento (Construction) hace aditivos para cemento y hormigón a prueba de fuego, productos químicos y selladores de embalaje.

W.R. GRACE & CO. tiene más de 6.400 empleados en casi 40 países. Como base para desarrollo de este trabajo investigativo se escogió una de las sucursales de la empresa en Colombia, denominada para los efectos del mismo GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA, la cual es dirigida por el Plant Manager (Gerente de planta) Emiliano Orjuela S.

### 1.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LA EMPRESA

GRACE COLOMBIA S.A. proviene de la multinacional W.R. GRACE & CO. Cuyos antecedentes son dados por dos grandes compañías; en el año 1832 en Baltimore, Maryland William T. Davison funda Davison, Kettlewell & Co. empleando la primera cámara de ácido sulfúrico de los Estados Unidos.

Más adelante hacia 1854 en el Perú, William Rossel Grace funda W.R. Grace & Co. estableciendo una línea comercial de barcos de vapor de servicio en las américas, pero no es hasta 1865 cuando Grace es trasladada a Nueva York. Años más tarde comienza el desarrollo de productos tales como selladores para reemplazar la soldadura de plomo, un sustituto sintético del caucho natural, catalizadores de petróleo, entre otros, así también propone el uso del gel de sílice para otras funciones como secado al aire, refrigeración y desecantes para embalaje.

Así con el paso del tiempo llegó a estar constituida por diversas familias de productos que van desde suministros médicos hasta productos para el tratamiento del agua y la construcción, sentando sus bases en Europa y Asia así como en el continente Americano. Actualmente Grace cuenta con sólo dos líneas de producción a nivel mundial: Davinson y Construction (productos químicos de rendimiento); en Sur América, Grace Colombia S.A. lleva 23 años de operación en el país y cuenta con dos sedes ubicadas en Bogotá y Cartagena, las cuales se han dedicado la fabricación y comercialización de sus productos para el sector industrial. En la ciudad de Cartagena la planta Grace cumple aproximadamente 20 meses de funcionamiento, posicionándose como productor y distribuidor de aditivos químicos para el área de la construcción que brindan un mayor rendimiento al concreto y el hormigón, y con clientes a lo largo del país, es una planta que cuenta con amplias expectativas de expansión hacia el mercado internacional en competencia con las compañías fuertemente establecidas en el ámbito de los aditivos para la construcción.

### **1.3 LOCALIZACIÓN DE GRACE CONSTRUCTION**

La planta de GRACE COLOMBIA S.A. de la ciudad de Cartagena se encuentra localizada en el Parque Industrial TLC de las Américas S.A. (PARQUIAMÉRICA),

en la vía Mamonal Kilómetro 6, y se encuentra funcionando en las bodegas 4 y 5 en la manzana G<sup>3</sup>.

La privilegiada ubicación de la ciudad brinda a la empresa la posibilidad de importar y exportar tanto materias primas como productos terminados por vía marítima y aérea, ello dependiendo de sus necesidades, además la ubicación del parque le constituye en paso obligatorio del transporte de carga que ingresa y sale de Cartagena.

**Figura 1.** Localización de GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA



Fuente: Página web PARQUIAMÉRICA, <<http://www.parquiamerica.net>>

<sup>3</sup> Información suministrada por GRACE COLOMBIA S.A.

## 1.4 DE LA ORGANIZACIÓN

Dado el carácter multinacional de la W.R. GRACE & CO. Se han establecido las siguientes bases estratégicas que guían a su familia empresarial a lo largo y ancho del mundo.

*“La visión, los propósitos y lo valores de GRACE sirven como modelo para la forma en que hacemos negocios. Estas creencias guían nuestras relaciones con nuestros colegas, nuestros clientes y nuestros accionistas.”<sup>4</sup>*

### 1.4.1 Nuestra visión

GRACE se esfuerza por ser una compañía de primer nivel especialista en químicos y materiales. Ofrecemos tecnologías innovadoras, productos con valor añadido y servicios alrededor del mundo para mejorar la calidad de vida.

Dado que la visión es la imagen que la organización tiene de sí misma y de su futuro<sup>5</sup>, para un empresa como la W.R. GRACE & CO. Se ha hecho necesario desarrollar a conciencia el ejercicio de verse en el tiempo y el espacio para lograr orientar todos sus esfuerzos hacia la consecución de lo que ha planteado quiere ser en el futuro. Así la visión se constituye la descripción de un claro sentido del futuro y de la comprensión de las acciones necesarias para alcanzar el éxito.

---

<sup>4</sup> Vision, purpose and values. {DOCUMENTO EN LÍNEA}. Disponible en la web: <http://www.grace.com/Careers/VisionAndValues.aspx> [01 de junio 2012]. Traducción: autores del trabajo.

<sup>5</sup> CHIAVENATO, Idalberto. Administración en los nuevos tiempos. Traducido de la primera edición en portugués. McGraw Hill Interamericana, S.A. 2002. P 254.

### 1.4.2 Nuestro Propósito

El propósito de una organización es la razón de su existencia. Es la finalidad o motivo de creación de la organización, y a la que debe servir. En el fondo, el propósito incluye los objetivos esenciales del negocio y se enfoca generalmente hacia afuera de la empresa, es decir, hacia la atención de las demandas de la sociedad, del mercado o del cliente<sup>6</sup>. Partiendo de la importancia de éste en su proceso de planificación estratégica, la empresa ha establecido el siguiente propósito:

En GRACE estamos dedicados a nuestros clientes. Ellos confían en nosotros para proporcionarles productos, conocimiento, tecnologías, servicios y a las personas para hacer que sus productos funcionen mejor.

Así el propósito de la W.R. GRACE & CO. traduce la filosofía de la organización representando sus principios básicos, su orientación a una conducta ética y su responsabilidad social.

### 1.4.3 Nuestros valores

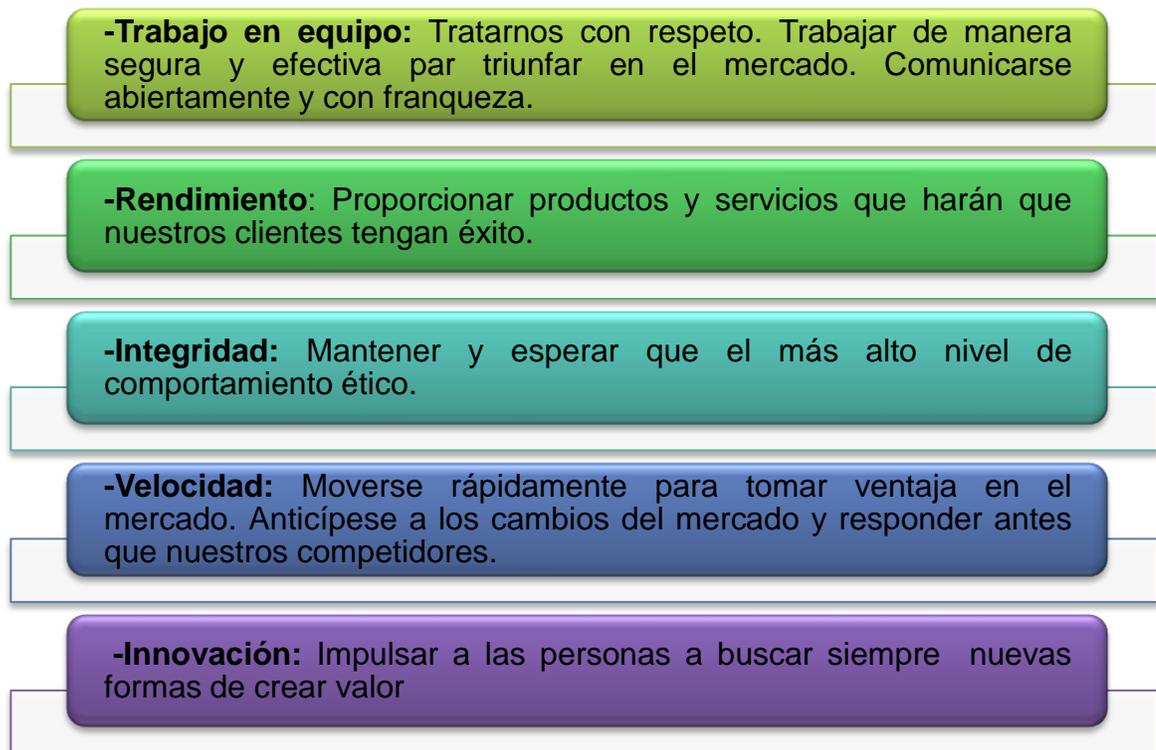
Los valores organizacionales son las creencias y actitudes básicas que ayudan a determinar el comportamiento individual<sup>7</sup>. La manera de cumplir el propósito de una organización es tan importante como el propósito en sí, por esto la empresa ha desarrollado los siguientes valores para sus empleados, ello como la forma o base para el cumplimiento de su propósito:

---

<sup>6</sup> CHIAVENATO, Idalberto. Administración en los nuevos tiempos. Traducido de la primera edición en portugués. McGraw Hill Interamericana, S.A. 2002. P 248.

<sup>7</sup> IBID., P. 205.

**Figura 2.** Valores organizacionales de la W.R. GRACE & CO



Fuente: Autores del trabajo.

#### 1.4.4 Medio ambiente, salud y seguridad

GRACE ha establecido que como empresa cuenta con una gran responsabilidad con la humanidad y la naturaleza, y que por lo tanto debe trabajar a favor de su protección y mantenimiento. A continuación se encuentra el manifiesto de su posición:

Estamos dedicados a los más altos estándares en prácticas de salud y seguridad y a direccionar de nuestra responsabilidad corporativa con el medio ambiente. Nuestro objetivo es establecer un récord sobresaliente de liderazgo y una fuerte ciudadanía corporativa. Venimos a trabajar cada día con un enfoque y dedicación para trabajar de manera inteligente, segura y cuidar el uno del otro.

Nuestros clientes y las comunidades vecinas pueden estar seguros de que hemos establecido los programas de medio ambiente, salud y seguridad (MSS<sup>8</sup>) y que estamos trabajando para reducir el impacto de nuestras instalaciones y productos sobre el medio ambiente mundial.

En los lugares de fabricación, se siguen buscando maneras de mejorar nuestros procesos a través de un mayor reciclaje, la reducción de residuos y ahorro de energía. También estamos trabajando para asegurar la certificación en varias de nuestras instalaciones con la Organización Internacional de Normalización (ISO) 14001. El proceso de certificación implica la identificación de aspectos e impactos ambientales asociados con las plantas y el establecimiento de objetivos para la mejora continua. Hemos certificado nuestras locaciones en España, Emiratos Árabes Unidos, Alemania y Reino Unido, adicionalmente tenemos otras que están actualmente en el proceso.

Nuestras actividades son coordinadas a través de un Sistema de Gestión de MSS que ha sido auditado y certificado por un registrador para el cumplimiento de los requisitos del Concilio Americano de Química, el estándar principal para la industria. El sistema de gestión sirve de marco para las actividades globales del programa MSS de Grace.

Nuestro objetivo principal es tener el trabajo de todos, pensar y estar seguros. Hemos logrado alcanzar tasas globales de lesiones muy por debajo de la media de la industria química. Lo que muestran las cifras es que los empleados de GRACE en todo el mundo hacen de la seguridad una prioridad cada día.

---

<sup>8</sup> MSS: Medio ambiente, salud y seguridad. Traducción al español de EHS (Environment, Health and Security).

## 1.5 ESTRUCTURA ORGANIZACIONAL

La estructura organizacional es la manera de dividir, organizar y coordinar las actividades de la organización. Constituye la arquitectura o formato organizacional que asegura la división y disposición de las actividades de los miembros de la empresa; es la espina dorsal de la organización, el esqueleto que sustenta y articula sus partes integrantes.<sup>9</sup> Por lo anterior para una empresa se hace necesario el establecimiento de una estructura organizacional coherente y consecuente con los objetivos estratégicos, a continuación se evidencia por medio del organigrama de GRACE COLOMBIA S.A. el esquema que han desarrollado como representación de la estructura de la empresa en el país.<sup>10</sup>

### 1.5.1 Organigrama de la empresa

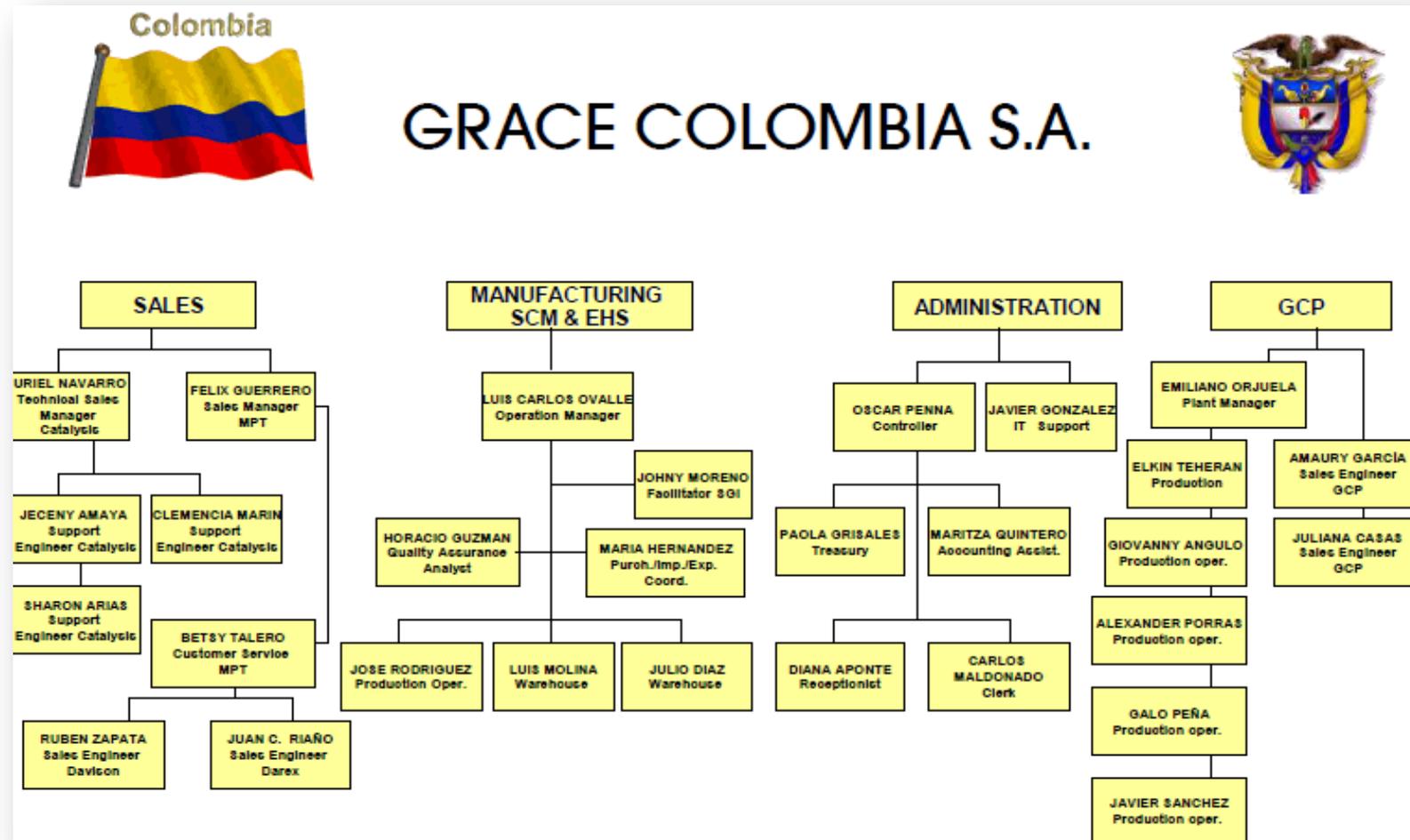
Una empresa organizada permite dirigir las acciones del personal hacia el desarrollo de las metas que han sido planificadas, en GRACE COLOMBIA S.A. se ha creado una estructura organizativa que ubica a cada empleado en un cargo específico, logrando así que cada persona sea consciente de sus funciones y de las características con las que debe contar para el desarrollo eficiente y eficaz de las actividades propias de su cargo. Para GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA como parte de la gran familia GRACE se ha constituido un organigrama tal como se puede observar al costado derecho de la figura 3.

---

<sup>9</sup> CHIAVENATO, Idalberto. Administración en los nuevos tiempos. Traducido de la primera edición en portugués. McGraw Hill Interamericana, S.A. 2002. P 367.

<sup>10</sup> Environment, Health and Safety . {DOCUMENTO EN LÍNEA}. Disponible en la web: <http://www.grace.com/About/EHS/default.aspx> [04 de junio 2012]. Traducción: autores del trabajo.

Figura 3. Organigrama GRACE COLOMBIA S.A.



Fuente: Información suministrada por gerencia de GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.

El conjunto de relaciones jerárquicas y funcionales entre cada cargo de la empresa se constituye en la base para la toma de decisiones de carácter gerencial para la planificación, GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA promueve el establecimiento y coordinación de las actividades y funciones propias de cada empleado con miras al desarrollo de una estructura organizacional dinámica, que sea capaz de ajustarse al crecimiento y constante cambio de un entorno empresarial globalizado.

## 1.6 PORTAFOLIO DE PRODUCTOS

GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA se dedica a la producción y comercialización de los productos de la línea GRACE Construction Products, la cual ofrece a sus clientes una gran variedad de productos químicos innovadores dentro de los cuales se pueden encontrar: aditivos y fibras para concreto, productos para concreto arquitectónico, pigmentos líquidos para dar color al concreto y aditivos para procesamiento del cemento.

Las principales funciones de los productos pertenecientes a la línea Construction son las de proporcionar fuerza, estructura y rendimiento a los materiales como cemento y concreto para la construcción.

*“En el desarrollo de nuevos productos, nos esforzamos por ofrecer beneficios significativos para nuestros clientes mientras minimizamos el impacto sobre el medio ambiente”<sup>11</sup>.*

Según la notación establecida por la organización, los productos han sido nombrados con una codificación para cada uno según su funcionalidad, GRACE

---

<sup>11</sup> Products & Businesses. {DOCUMENTO EN LÍNEA}. Disponible en la web: <http://www.grace.com/Products/default.aspx> [7 de junio 2012]. Traducción: autores del trabajo.

COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA provee a sus clientes según sus requerimientos los siguientes productos:

**Figura 4.** Productos ofrecidos por GRACE COLOMBIA S.A. planta Cartagena



Fuente: Información suministrada por la empresa, elaborado por autores del trabajo.

## 1.7 CLIENTES

Para GRACE sus clientes son lo más importante y la satisfacción de sus necesidades da el impulso para el desarrollo de la compañía. Para la organización el ofrecer servicios técnicos globales, ayuda a sus clientes a resolver problemas complejos y les permite reconocer las necesidades cambiantes de los usuarios finales. Partiendo del propósito anteriormente descrito la organización establece dos bases para el cumplimiento del mismo:

- **Servicio al cliente:** Un equipo global de soporte técnico con amplios conocimiento y experiencia está disponible para ayudar y asesorar a sus clientes.

- Investigación y desarrollo:** Sus investigadores han introducido un flujo continuo de productos dirigidos a la solución de problemáticas que van desde lo cotidiano hasta lo extremo.<sup>12</sup>

GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA cuenta en la actualidad con dos clientes principales los cuales cuentan con varias plantas en el país que constituyen el nicho de mercado de la empresa. Ver ANEXO A mapa clientes GRACE COLOMBIA S.A.<sup>13</sup>.

**Figura 5.** Clientes GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA



Fuente: Autores del trabajo.

<sup>12</sup> Customer resources. {DOCUMENTO EN LÍNEA}. Disponible en la web: <http://www.grace.com/Customer/default.aspx> [7 de junio 2012]. Traducción: autores del trabajo.

<sup>13</sup> Mapa- Ubicación de clientes GRACE COLOMBIA S.A. Disponible en la web: <http://maps.google.com/maps/ms?hl=en&ie=UTF8&oe=UTF8&msa=0&msid=210818920871834740799.0004a384e7618e2959121&ll=6.031311,-70.708008&spsn=14.102,19.753418&z=6> [7 de junio 2012].

## 1.8 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Grace Colombia S.A. lleva 23 años de operación en el país y cuenta con dos sedes ubicadas en Bogotá y Cartagena, en esta última la planta cumple aproximadamente 1 año y 8 meses de funcionamiento.

En la ciudad, la planta está dedicada a fabricar diversos aditivos químicos para el área de la construcción y cuenta con clientes en varios departamentos del país. Hoy por hoy la empresa ha presentado algunos inconvenientes relacionados con la planificación y programación de la producción. Estos inconvenientes se manifiestan en diferentes áreas: Uno de los problemas principales que se pudieron presenciar, es la falta de comunicación verás con los clientes, lo que no permite tener información confiable acerca de lo que éstos demandan y por ende una buena programación de la producción. Además, fabrican varias familias de productos y no se cuenta con una planificación adecuada de la producción para minimizar los tiempos de alistamiento de las máquinas.

En Grace Cartagena, se trabaja actualmente con la información suministrada por el área de ventas, estos datos son proporcionados a partir de los pedidos fijos programados mensualmente. Con base a la información obtenida, los resultados son entregados al jefe de producción el cual genera la programación de la producción del mes de manera empírica, este tipo de programación produce un uso ineficiente de los recursos y la maquinaria puede llegar a evitar satisfacer adecuadamente la demanda de sus clientes.

En planta se cuenta con dos reactores encargados de mezclar los componentes que conforman cada uno de los productos fabricados por la empresa, Los reactores son idénticos y deben ser limpiados entre la elaboración de un producto y otro, en ese sentido los tiempos de alistamientos de las máquinas dependen de la secuencia de producción. En el presente la empresa no ha establecido una

secuenciación óptima para el uso de dicha maquinaria y se manifiesta que ello se vería representado en el uso eficiente de diferentes recursos de producción. Con el propósito de ser una empresa productiva y que genere valor a sus clientes, Grace promueve el desarrollo de procesos seguros, eficientes, organizados y amigables con el medio ambiente, por ello como parte fundamental del desarrollo de sus actividades, requiere establecer mejoras en el proceso de planificación de la producción partiendo desde los procesos en el área de ventas que generan resultados para ello.

Por medio de visitas y entrevistas realizadas en la planta se logró determinar cuáles son los principales problemas con los que cuenta actualmente la empresa como fue enunciado anteriormente, a continuación se enumera algunos factores que contribuyen o constituyen dicha problemática:

**Figura 6.** Factores que contribuyen en los principales problemas de la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA

Los pronósticos suministrados a producción no son muy confiables.

No se establecen fechas de entrega para la producción.

Existen dos tanques de producción con la misma función y no se ha determinado una secuencia óptima para los mismos.

La planificación de la producción se hace experimentalmente, no hay un procedimiento o modelo específico.

Fuente Autores del trabajo.

## 1.9 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo realizar la planificación y programación de la producción de los distintos productos ofrecidos por la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA, y desarrollar una secuencia para la maquinaria productiva dirigida a optimizar los tiempos de alistamiento durante la fabricación?

### 1.10 JUSTIFICACIÓN

La finalidad de realizar éste proyecto es la creación y validación de un modelo matemático para la programación y planificación de la producción de la empresa, proponiendo la metodología más adecuada para el establecimiento la secuenciación óptima de producción.

La planificación de la producción implica traducir los planes empresariales de periodos de tiempo determinados en planes de trabajo y producción que permitan el cumplimiento de las metas establecidas, su objetivo es minimizar el costo de los recursos requeridos para satisfacer la demanda de los productos durante ese período, allí radica su importancia para una organización productiva; por su parte la programación de la producción está dirigida al establecimiento de las cantidades de los recursos requeridos para cada pedido y de organización cronológica de las actividades de fabricación, con miras a tener disponibles dichos recursos en el momento que se necesiten.

Teniendo en cuenta los inconvenientes que presenta la empresa con relación a las áreas mencionadas anteriormente, en determinados casos, es evidente la aparición de sobreproducción, desorganización y retaso en los procesos, lo cual se traduce en insatisfacción de clientes internos y externos. De ésta manera se pretende establecer mejoras en el área productiva de la empresa, partiendo de

una buena relación entre los departamentos de la misma que están directamente involucrados en el desarrollo final de la producción, estableciendo una comunicación constante y con información certera acerca de los requerimientos y deseos de los clientes, que pueda verse reflejada en una producción más eficiente.

Debido a lo anterior, se estima que los principales beneficiarios de la realización del presente proyecto, así como la empresa misma, han de ser los clientes de GRACE COLOMBIA S.A. seccional Cartagena, quienes podrán obtener mejoras en respuesta a sus pedidos, además de los departamentos de ventas y producción quienes podrán trabajar en conjunto con datos y registros más precisos de lo requerido para la elaboración de los productos que la empresa ofrece.

## **1.11 OBJETIVOS**

### **1.11.1 Objetivo general**

Diseñar un modelo de programación matemática que permita la optimización de los tiempos de fabricación de los productos ofrecidos por la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA, enfocándose en la planificación y la programación de la producción para lograr la disminución de los tiempos de alistamiento de los reactores y la secuenciación de los productos a fabricar.

### **1.11.2 Objetivos específicos**

- Establecer y analizar cómo se realiza el proceso de planificación y programación de la producción en la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.

- Caracterizar los parámetros y variables que influyen en la fabricación de los distintos productos y que serán utilizados para la construcción del modelo.
- Diseñar un modelo de programación matemática para la planificación y programación de la producción, que permita minimizar los tiempos de alistamiento durante la fabricación.
- Validar el modelo de programación matemática para asegurar que la solución será relevante para el problema real.

### 1.12 DISEÑO METODOLÓGICO

El diseño metodológico es la manera específica como cada investigador establece su propuesta de trabajo para un determinado proyecto. Al desarrollar propuestas investigativas se hace necesario plantear previamente una metodología que determine el curso de acción a seguir. Ello conlleva a crear estrategias específicas encaminadas hacia la consecución de los objetivos, lo cual ayuda a determinar cuáles son las fuentes de información de real importancia e impacto en la investigación y que otras simplemente se desvían de lo planeado. Es preciso que se determine el diseño metodológico del proyecto basándose en la naturaleza del fenómeno estudiado, los objetivos, el tipo de investigación escogido y la perspectiva de análisis que tengan los investigadores.

Dado que cada trabajo investigativo está dirigido a la consecución de un objetivo o meta específica, encaminado a la búsqueda de conocimiento, y que se desarrolla con base a una estrategia, así de la misma manera los autores han determinado una metodología para la ejecución del presente trabajo.

Para lograr el desarrollo de un modelo de programación matemática para la planificación y programación de la producción de la empresa GRACE COLOMBIA S.A. en su planta de la ciudad de Cartagena se requiere de la determinación y el

análisis de la situación actual de la empresa en referencia a esta temática, se integra el reconocimiento de la actividad productiva de la empresa y los procedimientos que se llevan a cabo en su interior, la determinación de la herramientas de ingeniería empleadas en los procesos de diagnóstico iniciales hasta el establecimiento de la propuesta de mejora para el sistema productivo, y la posterior determinación del impacto que genera la propuesta realizada en el panorama de la empresa considerado.

Se han establecido una serie de fases que sirven de guía para la investigación con el propósito de alcanzar el objetivo propuesto de una manera eficaz:

- **Fase I:** Reconocimiento del proceso productivo de la empresa, establecimiento de los parámetros y las variables que intervienen en el tema de estudio
- **Fase II:** Determinación de los datos de recolección requeridos, agrupación e Interpretación de los datos para la creación y evaluación del modelo. Verificación de los datos de entrada.
- **Fase III:** Determinación de la problemática actual para el diagnóstico de las prácticas de planificación y programación en GRACE Cartagena.
- **Fase IV:** Establecimiento de las variables y la función objetivo asociadas al el modelo matemático. Construcción y caracterización del modelo matemático. Programación del modelo. Puesto que no es posible el emplear sólo en modelo diseñado inicialmente se desarrolla un modelo heurístico compuesto por dos secciones, cada una con un modelo matemático que permita la consecución del objetivo general del estudio.
- **Fase V:** Validación de modelo del modelo heurístico, diagnóstico de las operaciones con la implementación de modelo. Evaluación de la mejora: comparación entre las condiciones actuales y las condiciones propuestas.

Al desarrollar cada una de las fases propuestas empleando los procedimientos, conocimientos y herramientas adecuadas se pretende llegar a la creación de un modelo que permita ofrecer a GRACE S.A. PLANTA CARTAGENA una propuesta fundamentada para la mejora de sus procesos de planificación y programación de la fabricación de los productos de la línea Construction.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Los orígenes de la planificación de la producción se remontan al Lejano Oriente, donde hacia 1100 a.C. tenían un sistema de gobierno muy desarrollado, en el cual se practicaban la especialización del trabajo y la planificación, organizando y controlando la producción. Pasado un tiempo, en el Renacimiento el Arsenal de Venecia fue un claro ejemplo de la administración y control de la producción, al lograr gestionar y organizar la fabricación de embarcaciones, armas y equipos, además de la reconstrucción de las naves existentes.

En el camino de las teorías administrativas, hacia 1911 Frederick Taylor, plantea en su libro *Principios de la administración científica* que la disminución de los desperdicios e ineficiencias en los sistemas productivos, no estaban determinados por los trabajadores sino por una mejor administración. Por su parte en Francia Henry Fayol, viendo los problemas desde un nivel más alto y no desde la planta, manifiesta que una empresa cuenta con seis funciones: técnica, comercial, una financiera, de seguridad y la propiedad, contable. Así las contribuciones de Taylor y Fayol como pioneros de la administración abrió el camino al análisis orientado a las operaciones. Por otra parte su contemporáneo Gantt agrega otra dimensión al trabajo de Taylor al reconocer que un proceso es una combinación de operaciones, así desarrolla un método rudimentario para programarlas, aún en la actualidad se emplea para manejar problemas de programación y ambiente de proyectos. Para la misma época los Gilbreth sientan las bases para los estándares de tiempo predeterminados empleados en la estimación de los tiempos de operación, los cuales se constituyen en una base importante para la PCP<sup>14</sup>. Pero fue Shewhart quien propuso los primeros enfoques cuantitativos para la PCP,

---

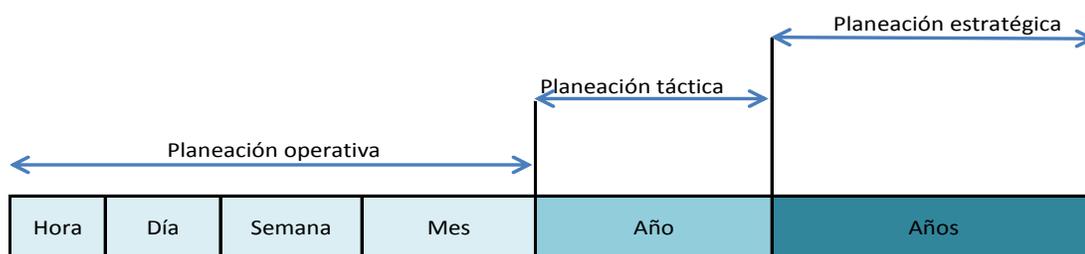
<sup>14</sup> PCP: Planeación y control de la producción.

desarrollando una teoría organizada del control de calidad estadístico aplicado a las operaciones de manufactura.

Con la Segunda Guerra mundial vino otro avance para la PCP cuantitativa, con la creación de la IO<sup>15</sup>. Desde sus inicios en Gran Bretaña la IO se perfilaba como un método poderoso para manejar problemas de operación complejos, luego de la guerra continuó su desarrollo hacia su aplicación en medios no militares como los sistemas de producción. La creación de la computadora impulsó adicionalmente dicha aplicación y aún en la actualidad ambas son herramientas de gran importancia para la PCP.<sup>16</sup>

Conceptualmente se puede decir que: *“La planeación de la producción implica traducir los planes empresariales en diferentes horizontes de tiempo en planes de trabajo y operación que guíen a la organización, ver figura 7. Así su objetivo está dirigido a minimizar costo de los recursos para satisfacer la demanda de determinado período”*.<sup>17</sup>

**Figura 7.** Horizontes de planeación



Fuente: SIPPER. Bulfin. Planeación y control de la producción. Traducido de la primera edición en inglés. McGraw Hill Interamericana, S.A. p. 21.

<sup>15</sup> IO: investigación de operaciones.

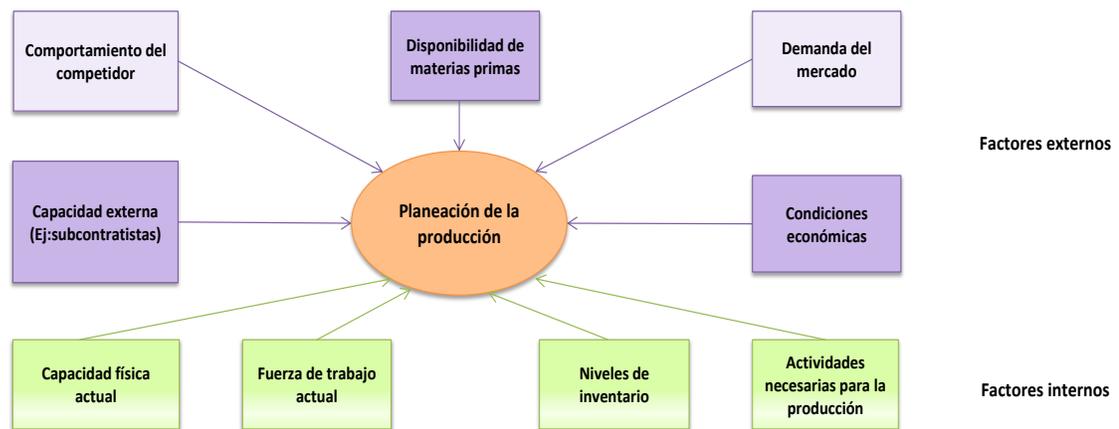
<sup>16</sup> SIPPER. Bulfin. Planeación y control de la producción. Editorial Mc Graw Hill, traducido de la primera edición en inglés.

<sup>17</sup> CHASE, Richard.Jacobs. Aquilano. Administración de producción y operaciones. 8ª ed. Editorial Mc Graw Hill. 2000, p. 885.

### 2.1.1 Entorno de la planificación de la producción

El medio de la planificación de la producción está constituido por factores internos y externos, los cuales direccionan las acciones de planificación, cómo ilustra la figura 8. El entorno externo se encuentra fuera del control de los planeadores, por esto se hace necesaria la administración de la demanda. Por otra parte los factores internos dependerán de las acciones específicas de cada empresa.

**Figura 8.** Información requerida para el sistema de planeación de la producción



Fuente: CHASE, Richard.Jacobs. Aquilano. Administración de producción y operaciones. 8ª ed. Editorial Mc Graw Hill. 2000, p. 554.

Así, dependiendo del cambiante entorno externo, se puede decir que cuando se presenta una variación en la demanda los niveles de producción deseados no son obvios. La meta ha de ser hacer coincidir la tasa de producción y la tasa de demanda, para fabricar productos cuando sea necesario. En la consecución de éste objetivo surge una herramienta clave para la toma de decisiones basadas en comportamiento de la demanda, los pronósticos.

### 2.1.2 Planeación agregada de la producción

La planeación agregada (PA) o a también denominada como planeación macro de la producción<sup>18</sup>, puede ser definida como un plan de producción a mediano plazo, el cual es factible desde el punto de vista de la capacidad ya que permite lograr un plan estratégico de la forma más eficaz posible. Ésta hace referencia a la determinación de la fuerza laboral, la cantidad de producción y los niveles de inventario necesarios dirigidos a satisfacer la demanda para un horizonte de planeación del mediano plazo.

La PA es un proceso que ayuda a ofrecer un mejor servicio al cliente, manejar un inventario más bajo, ofrecer al tiempos de entrega más breves, estabilizar los índices de producción y facilitar a la gerencia el manejo del negocio. El proceso se basa en el trabajo en equipo entre los departamentos de ventas, operaciones, finanzas y desarrollo de productos. Este proceso está diseñado para ayudar a la compañía a equilibrar la oferta y la demanda, y mantenerlas así a través del tiempo.<sup>19</sup> El término -agregada- se refiere a que este tipo de planeación toma en cuenta los principales grupos de productos desarrollados por la empresa. Así, también se consideran los recursos de producción y el tiempo de planificación. Posteriormente a la determinación de la producción, los recursos y el tiempo agregados será necesario el desagregarles para establecer requerimientos específicos de cada uno de ellos generando así un **plan maestro de producción** en el cual se describa los niveles de producción por producto por período, ver figura 9.

---

<sup>18</sup> NAHAMIAS, Steven. Análisis de la producción y las operaciones. Editorial Mc Graw Hill, quinta edición p 404.

<sup>19</sup> CHASE, Richard.Jacobs. Aquilano. Administración de producción y operaciones. 12ª ed. Editorial Mc Graw Hill. 2000, p. 516.

**Figura 9.** Jerarquía de decisiones de planeación de la producción



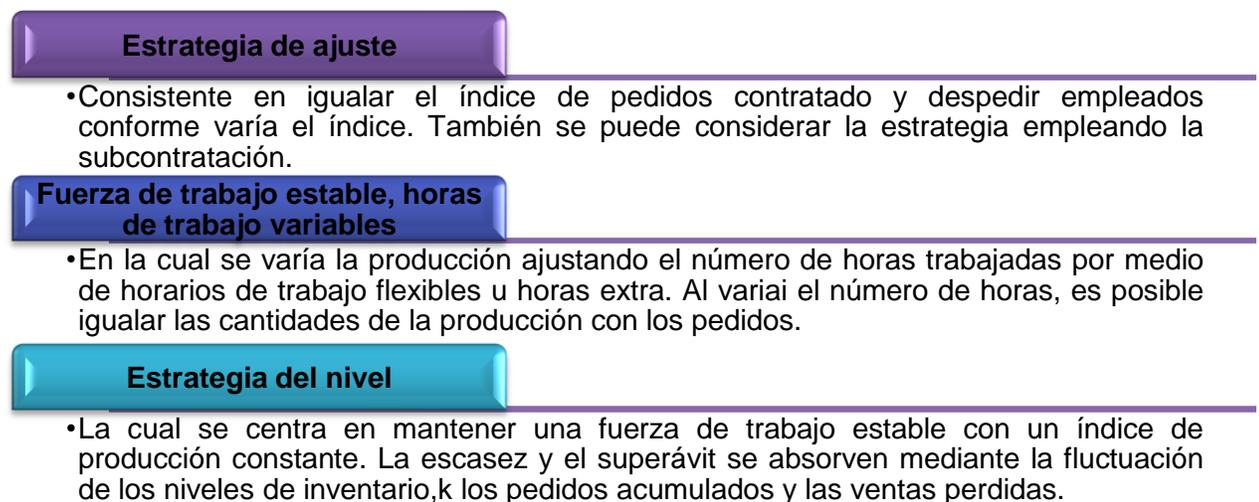
Fuente: NAHAMIAS, Steven. Análisis de la producción y las operaciones. Editorial Mc Graw Hill, quinta edición p. 112.

Nahamias [1997] establece que el método de planeación agregada basado en la existencia de una **unidad agregada** de producción. En el proceso de desarrollo del plan agregado de producción se debe considerar una serie de variables fundamentales que influyen en el mismo modificando las posibles decisiones a tomar, estas variables pueden ser:

- **Variables de oferta:** son aquellas que pueden modificar la capacidad de producción a través de la programación de horas extras, contratación de trabajadores eventuales, subcontratación de unidades y acuerdos de cooperación.
- **Variables de demanda:** son aquellas que pueden influir en el comportamiento del mercado mediante la publicidad, el manejo de precios, promociones, etc.

Con ánimos de manejar los diferentes factores intervienen en la PA los responsables de planear la producción pueden implementar una de las **estrategias de planificación de la producción**, o la combinación más adecuada de las mismas. Esencialmente se pueden encontrar tres estrategias, que comprenden cambios en el tamaño de la fuerza de trabajo, las horas de trabajo, el inventario y la acumulación de pedidos, éstas son enunciadas a continuación:

**Figura 10.** Estrategias de planificación de la producción



Fuente: Autores del trabajo.

Cuándo sólo se emplea una de estas estrategias para absorber las fluctuaciones de la demanda, se conoce cómo una **estrategia pura**; dos o más estrategias utilizadas en combinación constituyen una **estrategia mixta**, estas últimas son las más empleadas en la industria.

Finalmente se puede decir que la PA se convierte en una estrategia corporativa y los planes de capacidad en las amplias categorías de tamaño de la fuerza de trabajo, cantidad del inventario y niveles de producción. El sistema de planificación

debe incluir la flexibilidad suficiente para manejar las variaciones de la demanda. Por otra parte es preciso apegarse a las reglas de decisión para la planificación de la producción una vez que se han seleccionado, sin embargo, se requiere analizarlas con detenimiento antes de su implementación con métodos como la simulación de la información histórica para determinar lo que realmente podría haber sucedido si las reglas de decisión hubiesen operado en el pasado.<sup>20</sup>

### 2.1.3 Planificación de la capacidad

“La capacidad es la -salida- o número de unidades que puede tener, recibir, almacenar o producir una instalación en un período de tiempo determinado.”<sup>21</sup> El objetivo de planificación estratégica de la capacidad es ofrecer un enfoque para determinar el nivel general de la capacidad de los recursos de capital intensivo (las instalaciones, el equipamiento y la fuerza de trabajo completa) que apoye mejor la estrategia competitiva de la compañía a largo plazo. El nivel de capacidad que se elija tiene repercusiones críticas en el nivel de respuesta de la empresa la estructura de costos, sus políticas de inventario y los administradores y personal de apoyo que requieren.

La planificación de la capacidad se visualiza en tres horizontes de tiempo, tal como se puede observar en la siguiente figura:

---

<sup>20</sup>CHASE, Richard. Jacobs. Aquilano. Administración de producción y operaciones. 12ª ed. Editorial Mc Graw Hill. 2000, p. 516.

<sup>21</sup> HEIZER, Jay . Render, Barry. Principios de administración de operaciones. 5ª Ed. Editorial Prentice Hall. 2004. p. 276

**Figura 11.** Tipos de planeación en un horizonte de tiempo

Planeación a largo plazo	Agregar instalaciones.	Existen opciones limitadas.
	Agregar equipo con tiempo de entrega largo.	
Planeación a mediano plazo	Subcontratar.	Agregar personal.
	Agregar equipo.	Almacenar o utilizar el inventario.
	Agregar turnos.	
Planeación a corto plazo	Existen opciones limitadas.	Programar trabajos.
		Programar personal.
		Asignar maquinaria.
	Utilizar la capacidad	Modificar la capacidad

Fuente: HEIZER, Jay. Render, Barry. Principios de administración de operaciones. 5ª Ed.p. 276.

Al hablar de planeación de la capacidad se puede notar que ésta tiene como objetivo el ajustar de manera permanente la capacidad de una planta, ello de acuerdo a las necesidades de variación que la demanda pueda tener. Así el conocimiento de los factores descritos a continuación se constituye para los planeadores en una guía para la toma de decisiones dentro de los horizontes de planeación considerados y en la medida más adecuada:

- **Capacidad diseñada:** Definida como la salida teórica máxima de un sistema en un período determinado.
- **Capacidad efectiva:** Representa la capacidad que espera lograr una empresa dada su mezcla de productos, métodos de programación, mantenimiento y estándares de calidad.
- **Utilización:** Medida de desempeño definida como la salida real del sistema productivo como porcentaje de la capacidad diseñada.

- **Eficiencia:** Medida de desempeño que representa la salida real del sistema como porcentaje de la capacidad efectiva.<sup>22</sup>

La evaluación realizada por quien efectúa el estudio de la capacidad tiene como base la eficiencia, así la clave para mejorar la eficiencia a menudo se encuentra en los problemas de calidad, programación, capacitación y mantenimiento efectivos. Por otra parte La planeación estratégica de la capacidad implica una decisión de invertir en la cual la calidad de los pronósticos de la demanda es de importancia.

#### 2.1.4 Inventarios

Según el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española, el inventario es: un asiento de los bienes y demás cosas pertenecientes a una persona o comunidad, hecho con orden y precisión. Así, de manera específica se puede decir que un inventario es el conjunto de mercancías o artículos que tiene la empresa para comerciar con aquellos, permitiendo la compra y venta o la fabricación primero antes de venderlos, en un periodo económico determinado.<sup>23</sup> Según la utilización de lo que se va almacenar se puede identificar cuatro tipos de inventarios fundamentales:

- Inventarios de materia prima.
- Inventarios de producción en proceso.
- Inventarios de productos terminados.
- Inventarios de materiales y suministros.

---

<sup>22</sup> HEIZER, Jay . Render, Barry. Principios de administración de operaciones. 5ª Ed. Editorial Prentice Hall. 2004. p. 276.

<sup>23</sup> RAMÍREZ, José. INVENTARIOS. Maracaibo 2006. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en web: <http://www.monografias.com/trabajos42/inventarios/inventarios.shtml/> [08 de junio 2012].

- Inventario de seguridad.

Es necesario tener en cuenta que las consideraciones anteriores para que la empresa se beneficie plenamente de sus inversiones. De esta manera uno de los aspectos críticos a tener en cuenta para la administración de las Compañías es el responder a la siguiente pregunta: ¿Cómo controlar apropiadamente los niveles de inventario?

## 2.2 PRONÓSTICOS

En una organización productiva los pronósticos se constituyen en herramientas de gran importancia para la toma de decisiones de carácter gerencial, convirtiéndose así en base fundamental de la planeación corporativa a largo plazo.

Según el Diccionario de la Real Academia Española: la palabra pronóstico proviene del latín *prognosticum*, que hace referencia a una señal por medio de la cual se conjetura o adivina algo del futuro. De esta manera los pronósticos estudian el comportamiento de la demanda de algún producto o material, basados en datos o registros de ventas o compras pasados y juicios de eventos a futuro. A pesar de que los pronósticos no son proyecciones exactas del futuro, representan una herramienta poderosa utilizada como apoyo para la toma de decisiones.

Entre las características más representativas de los pronósticos se puede encontrar lo siguiente:

- Los pronósticos normalmente están equivocados.
- Un buen pronóstico es más que un simple número, se debe tener en cuenta cierta medida de error ya que como se mencionó anteriormente, normalmente están equivocados.

- Los pronósticos agregados son más exactos. Se sabe, a partir de las estadísticas, que la variación poblacional es mayor que la variación de la muestra media, este mismo fenómeno ocurre con los pronósticos.
- Entre más lejano sea el horizonte de pronóstico, menos exacta será la predicción.
- Los pronósticos no deben usarse para excluir información conocida. Antes de emplear un pronóstico, es preferible utilizar la información real.

Es indispensable contar una serie de elementos para que el pronóstico pueda ser lo más acertado posible, entre estos se puede encontrar la variable que se va a pronosticar, el periodo a pronosticar, los datos históricos (en una cantidad *representativa*), *el periodo* de división temporal y la frecuencia de revisión.<sup>24</sup>

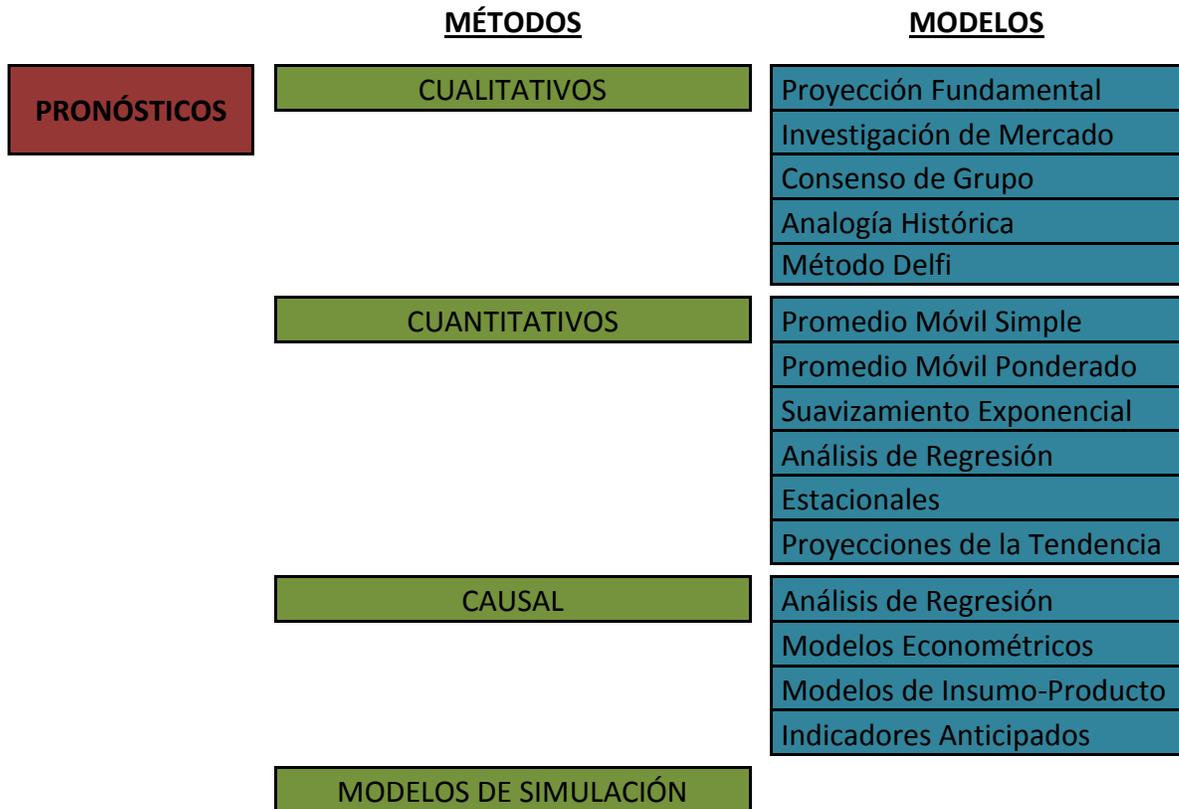
### 2.2.1 Métodos de pronóstico

Existen básicamente cuatro métodos de pronóstico o proyección, enunciados a continuación en el siguiente gráfico:

---

<sup>24</sup>CORONADO, Jairo. ECONOMÍA DE LA PRODUCCIÓN. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en web: <https://sites.google.com/site/jaracohe/home/docencia/produccion>[08 de junio 2012].

**Figura 12.** Métodos de pronóstico



Fuente: Autores del trabajo.

Existen cuatro criterios que permiten inferir valores futuros de las series de tiempo, a través del patrón de observaciones pasadas. Estos son, **tendencia**: Se presenta cuando los valores observados en una serie de tiempo, exhiben un movimiento gradual, ascendente o descendente; **estacionalidad**: Es aquel cuyo comportamiento se repite a intervalos fijos de tiempo; **ciclos**: Es aquel cuyo comportamiento se repite a intervalos de tiempo que son variables, y la **aleatoriedad**: Se presenta cuando los valores observados a lo largo del tiempo, son causados por el azar y por ende, no existe patrón reconocible.

## 2.3 PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

*“Programar detalladamente los diferentes aspectos de la función de producción es crucial para controlar las operaciones de producción. Se puede considerar a la función de producción de una compañía como un proceso jerárquico.”<sup>25</sup>*

Programar es el proceso de organizar, elegir y dar tiempos al uso de recursos asignados para la realización de cierto número de actividades necesarias para cumplir con los objetivos deseados en los tiempos deseados, satisfaciendo las restricciones implícitas en el ejercicio, tanto de tiempo como de relaciones entre actividades y recursos. La programación de la producción permite identificar el que se va a producir, como, cuando, con qué, donde y quien lo va a hacer. Establece la comparación entre la teoría y la realidad, apoyándose netamente en la capacidad y en las materias primas que se poseen.

### 2.3.1 Conceptos claves de programación

Al hablar de programación de la producción surgen en el contexto uno términos que la caracterizan, como aquellos que a continuación se relacionan:

- **Trabajos:** Los trabajos son actividades a realizar.<sup>26</sup>
- **Máquina:** Las máquinas son aquellos equipos que procesan los trabajos.<sup>27</sup>
- **La medición:** El programar implica el establecimiento de medidas de desempeño. Generalmente se busca maximizar la ganancia o minimizar los costos lo cual llega a hacerse obvio, por ello se pueden emplear objetivos

---

<sup>25</sup> NAHMIAS.Steven. Análisis de la producción y las operaciones. Editorial Mc Graw Hill, quinta edición p. 404.

<sup>26</sup> SIPPEN. Bulfin. Planeación y control de la producción. Editorial Mc Graw Hill, traducido de la primera edición en inglés p. 401.

<sup>27</sup> IBID p. 401.

sustitutos para aproximar algunos costos relevantes, uno de ellos puede ser el tiempo de terminación.<sup>28</sup>

### **2.3.2 Etapas de la programación de operaciones**

La programación de operaciones tiene dos etapas fundamentales para su desarrollo:

#### **2.3.2.1 La asignación**

Esta etapa pretende cargar tareas a los diversos puestos de trabajo que se tiene, cada tarea está asociada a la capacidad efectiva<sup>29</sup>.

Al momento de realizar la asignación de las tareas a las unidades de trabajo es necesario el tener en cuenta la forma como se lleva a cabo la producción en la empresa, ello puede ser de manera lineal o continua, o si por otra parte se hace por lotes. La capacidad es un elemento determinante en la asignación dado que ésta se constituye en una restricción natural para el proceso de determinación de la actividad o producto a asignar a determinado puesto o fábrica.

#### **2.3.2.2 La secuenciación**

En esta etapa se pretende determinar el “mejor” orden de realización de actividades y el uso de recursos, que permiten optimizar los procesos y alguna medida de desempeño. Identificar cómo se desarrolla el proceso productivo para

---

<sup>28</sup> SIPPER. Bulfin. Planeación y control de la producción. Editorial Mc Graw Hill, traducido de la primera edición en inglés p. 402.

<sup>29</sup> Capacidad efectiva: tiene en cuenta la capacidad real del sistema.

la elaboración del producto permite determinar cuál es el flujo lógico de actividades de producción, mostrando si determinada asignación debe ser procesada en una o varias máquinas lo que conlleva al problema de la secuenciación de la maquinaria.

Cuando un pedido requiere de una sola máquina o instalación, su secuenciación puede efectuarse teniendo en cuenta los tiempos de producción para determinar la mejor organización de las tareas que implica. De la misma manera si existen diferentes pedidos en una sola línea productiva se deben considerar las reglas de priorización para lograr la secuenciación de cada uno de los pedidos de manera óptima. Así, también si se efectúa una operación en más de una sola máquina que tienen una secuencia entre sí, se emplean reglas tales como la **regla de Johnson** norma que busca minimizar el tiempo del flujo total. Estas son técnicas heurísticas consistentes en el establecimiento de una regla basada en un indicador numérico con el objetivo fundamental de lograr la secuenciación.

Una herramienta gráfica muy importante relacionada con la secuenciación en el **diagrama Gantt** o **carta Gantt**, cuya función es la de mostrar el tiempo de dedicación previsto para diferentes tareas o actividades a lo largo de un tiempo total determinado, éste permite identificar las relaciones e interdependencias entre las actividades.<sup>30</sup>

La secuenciación permite minimizar el tiempo total en el proceso de todas las tareas, los costos, los retrasos, los adelantos, los set ups, y el tiempo ocioso. Lo cual es de suma importancia para obtener un mejor desempeño en las labores productivas de la organización.

---

<sup>30</sup> Diagrama de Gantt. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en la web: [http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama\\_de\\_Gantt](http://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Gantt) .[11 de junio 2012].

### 2.3.3 Reglas de despacho

Dado que sobre el tiempo total requerido para la elaboración de un pedido realizado por el cliente influye el orden de procesamiento del mismo, se hace necesario el determinar de la mejor ordenación para el cumplimiento de las fechas establecidas para su entrega, en atención a ello se han desarrollado una serie de reglas con éste objetivo, ver Tabla 1.

**Tabla 1** Reglas de despacho

REGLA		FUNCIONAMIENTO
<b>SPT</b>	Shortest Process time	Esta regla organiza las actividades de acuerdo a los tiempos de fabricación más cortos.
	Tiempo de procesamiento más corto.	
<b>LPT</b>	Longest Process time	Esta regla organiza las actividades de acuerdo a los tiempos de fabricación más cortos.
	Tiempo de procesamiento más largo.	
<b>FIFO</b>	First In, First Out	La regla establece producir los pedidos de acuerdo al orden en el que vayan llegando.
	Primero en entrar, primero en salir.	
<b>LIFO</b>	Last In, First Out	La regla determina se deben producir primero los últimos pedido que llegan.
	Último en entrar, primero en salir.	
<b>EDD</b>	Earliest Due Date	Regla que establece se debe iniciar a producir con aquellos pedidos con fecha de entrega más próxima.
	Primera fecha en vencer.	
<b>LDD</b>	Latest Due Date	Regla determina se debe iniciar a producir con aquellos pedidos con fecha de entrega más lejana.
	Última fecha en vencer.	

Fuente: Autores del trabajo.

### 2.3.4 Formas de programación de la producción

Cuando la empresa ha logrado establecer las que políticas de programación adoptará es necesario que determine la manera cómo desarrollarla. La ubicación de la programación en el tiempo puede ser efectuada bajo diferentes formas o métodos, dentro de las cuales se pueden encontrar:

- **Programación hacia adelante:** Esta forma de programación se refiere a la instancia en la cual al recibir un pedido y se programan todas las operaciones que deben ser realizadas más adelante en el tiempo.
- **Programación hacia atrás:** El modelo propone iniciar la programación partiendo de una fecha futura, generalmente se emplea la fecha de entrega, para así partiendo de allí, se desarrolle la secuenciación de las actividades.
- **Programación basada en Teoría de restricciones (TOC):** Según este modelo los centros de producción se programan para mantener al cuello de botella, o al recurso restrictivo ocupado el mayor tiempo posible. La secuenciación se realiza regulando la velocidad de la línea a la del tambor. Recurso que restringe la velocidad del flujo del producto.<sup>31</sup>
- **Otras formas de programación:** Existen otros tipos de programación que no tienen como objeto que el modelo a aplicar represente una serie de beneficios para la empresa. De esta manera, hay modelos de programación que optimizan las asignaciones por medio de modelos matemáticos. Ellos son la Programación lineal y la Programación Estocástica:
  - **Programación lineal:** Para realizar la programación de la producción utilizando la técnica de programación lineal.

---

<sup>31</sup> OSORIO, Oscar. La capacidad de producción y los costos. 1991, 2ª Edición. Ediciones Macchi, Mac. Graw Hill. p. 34.

- **Programación estocástica:** La programación estocástica trata con situaciones donde algunos o todos los parámetros del problema se describen mediante variables aleatorias.

## 2.4 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Un modelo es la representación de cualquier cosa, utilizado para probar una alternativa, para predecir el comportamiento de un sistema, para determinar la mejor entre muchas alternativas o para explorar preguntas de “qué pasa si”. Los modelos pueden ser formales o informales, cualitativos o cuantitativos.

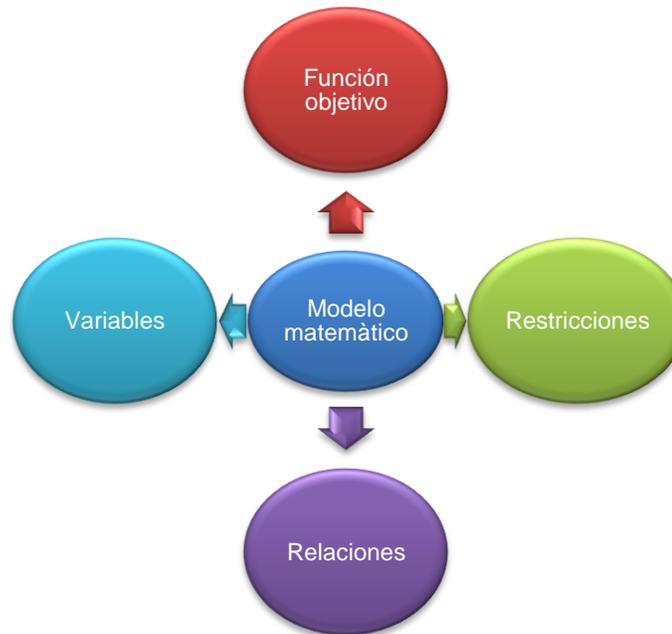
La modelación matemática brinda una alternativa confiable para el estudio de un sistema. Al modelar se deben determinar una serie de variables o incógnitas del problema que ayudaran en la construcción de un modelo matemático para la resolución de un problema determinado. Para la construcción de un modelo se deben tener claro las fronteras del ejercicio o problema que se está planteando, para no realizar actividades que no aporten a la solución. Se deben establecer objetivos claros, una meta medible para poder evaluar un progreso. Luego, determinar una serie de restricciones, que permiten que el modelo se comporte lo más parecido a la realidad. Estos límites pueden ser sobre personas, tiempo, conocimiento, datos, capacidad, tecnología, dinero u otros recursos<sup>32</sup>.

Los modelos matemáticos son aquellos que emplean algún tipo de lenguaje matemático para representar relaciones o proposiciones acerca de variables, parámetros, operaciones o entidades. Como se puede observar en la figura 15 un modelo matemático involucra diferentes componentes que constituyen la base de un modelo robusto para la toma de decisiones en un sistema operativo.

---

<sup>32</sup> SIPPER, Daniel; BULFIN, Robert. Planeación y Control de la Producción. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. p. 75-80.

**Figura 13.** Componentes de un modelo matemático.



Fuente: Autores del trabajo.

### 2.4.1 Teoría de Restricciones

La Teoría de Restricciones es una serie de análisis que conllevan a la utilización de la lógica de la causa y efecto para entender lo que sucede y así encontrar maneras de mejorar el proceso que está siendo intervenido. Esta reconoce que los sistemas contienen una serie de restricciones que limitan su desempeño. Estos análisis son formulados en un modelo matemático.

“La teoría de restricciones, conocida como TOC. (The Theory of Constraints), es una teoría administrativa creada por Eli Goldratt en 1979 y desde entonces ha evolucionado hasta convertirse en una de las formas de administrar cualquier tipo de empresa. Por diseño, esta teoría está preparada para evolucionar y actualizarse en forma continua de acuerdo con los cambios de realidad, que

permite enfocar las soluciones a los problemas críticos de las para que éstas se acerquen a su meta mediante un proceso de mejora continua.”<sup>33</sup>

### 2.4.1.1 Programación entera

Una forma de establecer el análisis que se realiza sobre un sistema es a través de la programación entera, el cual se constituye en una técnica de formulación de modelos matemáticos, que permite la asignación de recursos escasos entre actividades. Este tipo de programación lineal presenta una restricción adicional la cual es que alguno o todos los valores de las variables de decisión sean enteros. La programación entera puede ser de tres tipos:

- Programación entera pura.
- Programación entera mixta.
- Programación entera binaria.

**Figura 14.** Formulación de un modelo de programación entera.

*Función objetivo:*  $M\acute{a}x Z = aX_1 + cX_2 + fX_3 + dX_4$

*Restricciones:*

$$X_3 + X_4 \leq 1$$

$$-X_1 + X_3 \leq 0$$

$$-X_2 + X_4 \leq 0$$

$$dX_1 + hX_2 + jX_3 + bX_4 \leq g$$

$$X_i \in [0,1] \text{ para } i = 1,2,3,4$$

Fuente: Autores del trabajo.

<sup>33</sup> GARCÍA, Olga. La compensación financiera: una medida del valor del trabajador. Disponible en: [http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/pensamiento\\_gestion/21/la\\_compensacion\\_financiera.pdf](http://ciruelo.uninorte.edu.co/pdf/pensamiento_gestion/21/la_compensacion_financiera.pdf) [En línea] (18/08/09)

## 2.4.2 Gusek

Al crear programas matemáticos, se hace posible traducirlos en lenguajes de programación que permitan la solución de los mismos a través de la interfaz con un software que permita la interpretación del código programado. Uno de estos programas es Gusek<sup>34</sup> el cual se establece como software de uso libre, éste permite al investigador la resolución de infinidad de problemas modelados matemáticamente empleando el lenguaje MathProg la cual es una variante del software comercial AMPL.

### 2.4.2.1 Obtener GUSEK

Puesto que Gusek es un software libre que puede ser modificado bajo los términos de licencia pública general del lenguaje de programación GNU, en la web puede ser descargado en: <http://gusek.sourceforge.net/gusek.html#2> como GUSEK 0.2.13. para Windows de 32 bits y 64 bits.

## 2.5 MODELOS MATEMÁTICOS PROBLEMA DE LOS TAMAÑOS DE LOTE

### 2.5.1 Problema del tamaño de lote: CLSP

El CLSP<sup>35</sup> es el más básico de los modelos estudiados en el contexto de la lotificación multi-producto. Este modelo está basado en los siguientes supuestos: varios productos son producidos en un recurso compartido. El recurso tiene una capacidad limitada. El horizonte de planeación es finito y está dividido en períodos. Todos los productos enfrentan una demanda dinámica determinística. Si un

---

<sup>34</sup>Gusek. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en web:  
<http://gusek.sourceforge.net/gusek.html#3>. [02 de mayo 2012].

<sup>35</sup> CLSP: Capacitated Lot-Sizing Problem.

producto es producido en un período determinado, el recurso debe ser alistado para ese producto en ese período. Los alistamientos consumen capacidad e incurren en un costo. El objetivo es el minimizar la sumatoria de los costos de mantener y los costos de alistamiento. En este modelo entre cada grupo no se da una secuencia de lote, ningún tipo de información pasa de un período a otro exceptuando los inventarios y los estados de alistamiento no son mantenidos a través de los períodos.

Muchas versiones y extensiones diferentes del problema básico de tamaño de lote han sido estudiadas extensamente a través de los años, cada variación del modelo inicial de lotificación incluye características de ajuste a las diferentes situaciones que se pueden considerar al estudiar un sistema productivo, de esta manera se pueden encontrar los modelos descritos a continuación:

- **Problema de programación y tamaño de lote discreto:** El DLSP<sup>36</sup> es el modelo formulado que presenta el menor grado de libertad de los modelos del problema de tamaño de lote. Las variaciones que presenta con respecto a los supuestos principales del CLSP son:
  - Sólo un producto puede ser producido en cada período.
  - Si un producto es producido en un período, será fabricado a la capacidad completa durante este, (supuesto de todo o nada).
  - Las operaciones de alistamiento reflejan el cambio de un estado alistamiento de un recurso.
  
- **Problema del tamaño de lote con alistamiento continuo:** El CLSP<sup>37</sup> abandona el supuesto de todo o nada del DLSP, partiendo de esto sus supuestos principales son los mismos de anterior modelo.

---

<sup>36</sup> Discrete Lot-Sizing and Scheduling Problem.

<sup>37</sup> Continuous Setup Lot-Sizing Problem.

- **Problema de programación y tamaño de lote proporcional:** El PLSP<sup>38</sup> es el modelo más versátil. Comparte los mismos supuestos básicos con el DLSP y el CSLP, pero, además incluye la asunción de todo o nada y la restricción de producir sólo un producto por período, éste último se revoca permitiendo una operación de alistamiento por periodo. De esta manera, dos productos se pueden producir cada período: una operación de alistamiento se da una antes y la otra después. Además, la secuencia de lotes está determinada por el modelo, pero la capacidad de un período, que se pierde en el CSLP cuando no hay producción a plena capacidad, se puede utilizar para alistar y producir otro producto.

Aparte de los modelos descritos anteriormente existen otros tres modelos con una estructura que permite producir múltiple productos por período, pero dan una información parcial acerca de la secuencia de los productos permitiendo mantener los estados de mantenimiento a través de los períodos. Éstos son:

- Problema de tamaño de lote con lotes vinculados (CLSP<sup>39</sup>).
- Problema de tamaño de lote con secuencia dependiente de los costos de alistamiento (CLSD<sup>40</sup>).
- Problema general de programación y tamaño de lote (GLSP<sup>41</sup>)

## 2.6 MODELOS HEURÍSTICOS

Los modelos heurísticos son procedimientos que permite encontrar una solución y que suelen diseñarse de modo específico para cada problema. En métodos

---

<sup>38</sup> Porcional Lot-Sizing and Scheduling Problem.

<sup>39</sup> Capacited Lot-Sizing Problem with Linked Lot Sizes.

<sup>40</sup> Capacited Lot-Sizing Problem with Sequence Dependent Setup Costs.

<sup>41</sup> General Lot-Sizing and Scheduling Problem.

matemáticos, la palabra “heurística” suele hacer referencia a un procedimiento que busca una solución aunque no garantiza encontrar la solución óptima.

Un buen modelo heurístico debe ser eficiente, bueno y robusto, es decir, debe requerir un esfuerzo computacional realista, su resultado debe estar suficientemente cerca del óptimo, y la probabilidad de obtener una mala solución debe ser baja.<sup>42</sup>

Cuando se piensa trabajar con un modelo heurístico se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Para diseñar un modelo heurístico, es necesario conocer a fondo el problema y poderlo plantear en forma tradicional; hecho esto se pueden visualizar con más facilidad los procedimientos lógicos del modelo. Lo más importante es la identificación de los objetivos y la definición del problema, esto parte del proceso y responsabilidad a cargo de quien realiza el estudio.
- Los procedimientos o modelos heurísticos no son reglas caprichosas ni arbitrarias, deben tener fundamentos, ser sistemáticos y lógicos.
- Los modelos heurísticos requieren de intuición y buen criterio. Estas cualidades no son naturales y se requiere una cierta formación intelectual, que no se logra sino con el rigor del estudio formal y con la experiencia que requiere algún tiempo.<sup>43</sup>

Los modelos heurísticos pueden ser:

- Constructivos
  - Voraces

---

<sup>42</sup> GARCÍA, José. Maheut, Julien. MODELOS Y MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES. Procedimientos para pensar. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en web: <http://personales.upv.es/jpgarcia/LinkedDocuments/modeladomatematico.pdf> [10 de agosto 2012].

<sup>43</sup> VÉLEZ, Ignacio. TEORÍA DE LA DECISIÓN. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en web: <http://es.scribd.com/doc/59071419/9/Modelo-heuristico> [10 de agosto 2012].

- Con Back-Tracking.
- Heurísticas No-Constructivas.
  - Exploración de entornos.
- Métodos Combinados.

## 2.7 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Muchas versiones y extensiones diferentes del problema básico de tamaño de lote han sido estudiadas extensamente en la literatura. En 1996 Knut Haase<sup>44</sup> considero un sistema de un solo periodo, en la cual un número de productos diferentes tienen que ser fabricados en una sola maquina, con costos de alistamiento dependientes de la secuencia. Para este problema llamado “*Problema de tamaño de lote con costo de alistamiento dependiente de la secuencia*” (CLSD) Haase formuló un nuevo modelo diferenciándolo del modelo de tamaño de lote discreto de Fleischmann, permitiendo tamaños de lotes continuos y que el estado de alistamiento de la maquina sea preservado a través de tiempos ociosos.

A comienzos de 1997 A. Drexl y A. Kimms<sup>45</sup>, explicaron la diferencia entre los modelos formales y ofrecieron unas lecturas iniciales para el desarrollo de modelos basados en casos de capacidad, dinámicos y determinísticos. Explicaron modelos de programación matemática, donde el horizonte de planeación se encuentra subdividido en varios periodos discretos. Esta explicación se da para enfoques que se encuentran bien establecidos y para aquellos que el día de mañana puede convertirse en estados del arte.

---

<sup>44</sup> HAASE, Knut. Capacitated lot-sizing with sequence dependent setup costs, En: Operations-Research-Spektrum. 1996, vol. 18, Issue 1. p. 51-59.

<sup>45</sup> DREXL, Andreas y KIMMS, Alf .Lot sizing and scheduling - Survey and extensions. En: European Journal of Operational Research. vol. 99, Diciembre 1997. p. 221 - 235

En 1999 Sungmin Kang, Kavindra Malik y L. Joseph Thomas<sup>46</sup> formularon un modelo sobre secuenciación dividida, el cual separa el total de la programación en sub secuencias, generando un enfoque de optimización basado en la generación de columnas, utilizando la metodología branch and bound<sup>47</sup> y adaptado heurísticamente para probar problemas, incluyendo cinco casos de problemas del mundo real recogidos de la industria.

Andrew J. Miller y Laurence A. Wolsey<sup>48</sup> en 2003 realizaron una publicación donde discutían la formulación de la programación entera mixta de la variante de problemas de tamaños de lotes discretos. Su enfoque se basó en la identificación de conjuntos enteros mixtos dentro de estos modelos y aplicar formulación cerrada a estos conjuntos. Lo que les permitió definir formulaciones de programación entera lineal para los problemas de tamaños de lotes discretos en los cuales se presentan inventarios de seguridad.

A comienzos de 2005, Diwakar Gupta y Thorkell Magnusson<sup>49</sup>, consideraron el problema de tamaño de lote con una sola máquina (CLSP), con la secuenciación dependiente de los costos de alistamiento, con la condición adicional que los estados de alistamiento pueden trasladarse de un periodo a otro y este se mantiene en los periodos ociosos. Desarrollaron una heurística para solucionar los casos de mayor magnitud y consideraron que el método heurístico es más efectivo cuando se tiene un sistema productivo cuyo número de productos a fabricar son mayores a la cantidad de periodos disponibles para su fabricación.

---

<sup>46</sup> KANG, Sungmin; MALIK, Kavindra y THOMAS, Joseph. Lotsizing and Scheduling on Parallel Machines with Sequence-Dependent Setup Costs. En: Management Science. Febrero, 1999, vol. 45, no. 2, p. 273-289.

<sup>47</sup> En español Ramificación y Acotamiento, aborda la resolución de modelos de programación entera a través de la resolución de una secuencia de modelos de programación lineal que constituirán los nodos o subproblemas del problema entero.

<sup>48</sup> MILLER, Andrew y WOLSEY, Laurence. Tight Mip Formulation for Multi-Item Discrete Lot-Sizing Problems, En: Operations Research. Julio-Agosto, 2003, vol. 51. no. 4. p. 557-565.

<sup>49</sup> GUPTA, Diwakar y MAGNUSSON, Thorkell. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times, En: Computers & Operations Research. Vol. 32, Issue 4, Abril 2005. p. 727-747.

Ese mismo año, Satyaki Ghosh Dastidar y Rakesh Nagi<sup>50</sup> abordaron un problema de programación de la producción en una instalación de moldeo por inyección. Su objetivo planteado fue satisfacer la demanda de los clientes y reducir al mínimo los costos de mantener en inventario, los costos tardíos y los costos de alistamientos. Presentaron una formulación matemática del problema, la cual dividieron en dos fases debido a la complejidad computacional que acarrearaba, ya que debido a la formulación, la búsqueda de la solución óptima se presentaba en dimensiones de tiempo mayores a los razonables.

A mediados de 2005, Christopher Suerie<sup>51</sup>, abordó los problemas de la planificación de la producción que contienen características especiales en los procesos industriales. Su tema principal fue el desarrollo de modelos de programación matemática que permitieran modelar los planes de producción que no se ven afectados por la discretización del tiempo. Utilizó como base modelos con tiempo discreto y posteriormente los adaptó para incluir aspectos de continuidad del tiempo. Su integración la logró con diferentes bloques de construcción, los cuales son combinados libremente dependiendo de la situación de planificación que se pueda presentar. El área principal de aplicación de este tipo de modelos son industrias de procesos.

---

<sup>50</sup> DASTIDAR Satyaki, NAGI Rakesh. Scheduling injection molding operations with multiple resource constraints and sequence dependent setup times and costs. *En: Computers & Operations Research*. 2005, Vol. 32(11), p. 2987-3005

<sup>51</sup> SUERIE, Christopher. Time Continuity in Discrete Time Models: New Approaches for Production Planning in Process Industries, Springer, 1/06/2005 - 229 pág.

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO PRODUCTIVO Y SU PLANIFICACIÓN

#### 3.1 ELEMENTOS DEL PROCESO PRODUCTIVO

Dado que todos los procesos están compuestos por una serie de elementos que los caracterizan, GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA ha establecido los siguientes elementos para su proceso productivo, los cuales en interacción con las actividades transforman elementos de entrada en resultados, mediante la generación de valor y van encaminadas al cumplimiento de un objetivo<sup>52</sup>:

##### 3.1.1 Insumos

Para el desarrollo de los productos de la línea Construction se requiere una serie de insumos químicos, cuya presentación puede ser en polvo o líquido. Estos cuentan con características específicas que les permiten reaccionar entre sí al ser mezclado bajo las condiciones requeridas.

La planta maneja los insumos almacenados en sacos y bidones para su conservación y los dispone en la zona de almacenamiento de acuerdo a algunos criterios tales como: compatibilidad, peligrosidad, recepción, entre otros. Por efectos de protección a la formulación de los productos, el nombre de estos insumos no será develado en este trabajo.<sup>53</sup>

---

<sup>52</sup> Orientación acerca del enfoque basado en procesos para los sistemas de gestión de calidad. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en la web: [http://www.iram.com.ar/Documentos/Certificacion/Sistemas/ISO9000\\_2000/procesos.pdf](http://www.iram.com.ar/Documentos/Certificacion/Sistemas/ISO9000_2000/procesos.pdf) [10 de junio 2012].

<sup>53</sup> Definición de Insumo. {DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en la web: <http://definicion.de/insumo/> . [10 de junio 2012].

Otros insumos que se emplean en el proceso de fabricación de los productos que desarrolla GRACE son: el agua empleada para el mezclado al producir y en la limpieza de los reactores al ser alistados, y la energía eléctrica que impulsa toda la planta

### **3.1.2 Maquinaria**

En el proceso productivo de la empresa se emplea un sistema integrado -planta modular- que consta de dos reactores idénticos con su respectivo control de mando, cada uno tiene una capacidad real de 4 toneladas, un sistema de tuberías para el transporte de líquidos, dos básculas para el pesado de los insumos, un mecanismo de elevación para insumos sólidos y un mecanismo de succión para los sacos.

Por otra parte se puede encontrar la maquinaria auxiliar al proceso productivo como lo son los equipos de montacargas que se emplean para el almacenamiento y transporte de los insumos dentro de las instalaciones en la zona de producción.

### **3.1.3 Recursos**

Al caracterizar el proceso productivo de GRACE como punto de partida para su desarrollo potencial, se hace necesario el cualificar, en la medida de lo posible, los recursos de los que dispone su proceso productivo. Así, en función de la calidad de estos recursos productivos y su correcto aprovechamiento se alcanzará un mayor o menor grado de eficiencia en el sistema productivo. A continuación se presentan los diferentes recursos que hacen parte del proceso productivo de la empresa:

### **3.1.3.1 Recursos físicos**

GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA cuenta con unas instalaciones constituidas por el área productiva, donde se encuentra la sección de almacenamiento y la planta, el área administrativa en la cual se hallan las oficinas, la recepción y el comedor, ver Anexo B Plano distribución de planta Grace Cartagena

La estantería en el área de almacenamiento permite una mejor distribución y organización de materias primas y productos terminados. Finalmente se consideran de gran importancia los equipos de protección personal con los cuales debe contar cada empleado.

### **3.1.3.2 Talento humano**

La empresa cuenta con personal altamente calificado: profesionales y técnicos prestos a satisfacer las más exigentes necesidades. De manera específica en el área productiva se encuentre el Jefe de producción y cuatro operarios que desempeñan diversas labores para el desarrollo del proceso de fabricación y despacho de los productos terminados.

## **3.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO**

El proceso de producción de los productos Construction en GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA se desarrolla como se describe en la figura 15:

**Figura 15.** Descripción del proceso productivo de aditivos para cemento y concreto.



Fuente: Autores del trabajo.

Un operario recibe la orden de producción con la cantidad de producto a fabricar y las cantidades determinadas a emplear por insumo o material específico (1), este se dirige a la zona de materias primas para retirar los insumos que serán utilizados (2), aquellos con presentación en polvo son pesados por la báscula e ingresados al reactor al ser aspirados por un mecanismo de absorción y vaciados por la tolva de admisión, los líquidos son succionados por ductos hacia el reactor previa programación del reactor para este proceso (3). Al cargar los insumos requeridos en el reactor en el cual se va a fabricar, se establece en el control de mando los datos solicitados para iniciar el proceso, dentro de los cuales se puede encontrar: el tiempo de procesamiento, ver tabla 7, la velocidad de agitación, cantidad de agua a emplear, entre otros; y se procede a accionar el mecanismo para producción, mezclando los insumos al interior de los reactores (4). Al finalizar la fabricación, el producto terminado puede ser llevado directamente al carro-tanque

o es almacenado en bidones para que puedan ser manipulados con facilidad (5), los productos terminados que no son entregados durante el periodo, son transportados hacia la zona de almacenamiento (6), donde permanecerá hasta que sea entregado al cliente como el producto final (7).

**Tabla 2.** Tiempos de fabricación productos de línea Construction.

Producto	Tiempo de fabricación (h) / Tonelada
DARACEM19	1,00
DARACEM100	1,20
HEA211	0,80
MIRA94	1,10
RECOVER	0,80
TDA1100	0,80
TDA7350	0,70
TDAJ	0,93
WRDA60	1,20

Fuente: Jefe de producción Grace Cartagena.

### 3.2.1 Análisis del proceso productivo

Al realizar cualquier estudio acerca de una organización productiva, se hace de gran importancia el conocer y analizar con detalle el proceso mediante el cual se fabrican sus productos y por consiguiente los diferentes recursos, áreas y procedimientos que interviene en él, así como el recorrido de la materia prima hasta su transformación en el producto dirigido a la satisfacción de las necesidades de sus clientes, en atención a ello existe una serie de diagramas o herramientas gráficas que permiten recopilar toda la información necesaria para la

caracterización y análisis de los procesos productivos, dentro de los diagramas de análisis se encuentran:

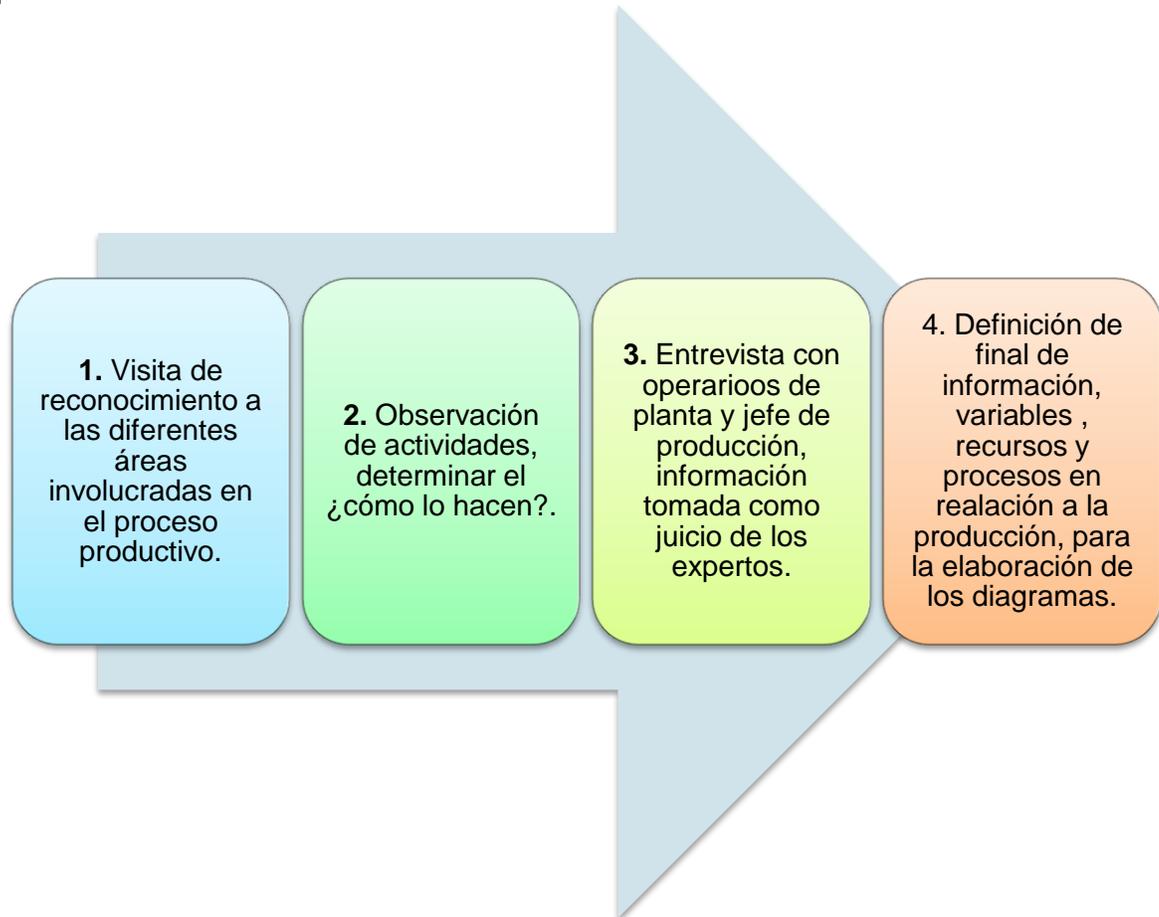
- Los diagramas SIPOC.<sup>54</sup>
- Los diagramas Macro:
  - Cursograma Sinóptico.
  - Cursograma Analítico.
  - Diagrama de Recorrido.
  - Diagrama de Flujo.
- Los diagrama Micro , los cuales son :
  - Diagrama de Actividades Múltiples.
  - Diagrama Bimanual.
  - Diagrama de Hilos.

Para el desarrollo del presente estudio se determinó que el emplear diagramas SIPOC y Macro permitirían mostrar clara y detalladamente el proceso de fabricación de los productos de las línea Construction manejados por GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA. El procedimiento para la obtención de la información requerida para la elaboración de estos diagramas fue desarrollado como figura a continuación:

---

<sup>54</sup> El nombre del diagrama está constituido por las siglas en ingles de: SUPPLIERS, IMPUTS, PROCESS, OUTPUTS, CUSTOMERS (Proveedores, Entradas, Proceso, Salidas, Clientes).

**Figura 16.** Proceso de recolección de información para el análisis del proceso productivo.



Fuente: Autores del texto.

### 3.2.1.1 Diagrama SIPOC

Se ha determinado que para el análisis del proceso de fabricación de los productos de la línea Construction que desarrolla GRACE en la ciudad, se requiere de la identificación de cada uno de los elementos involucrados en él, ello puede ser logrado mediante un esquema que represente la interacción entre los diferentes entes que intervienen en el mismo.

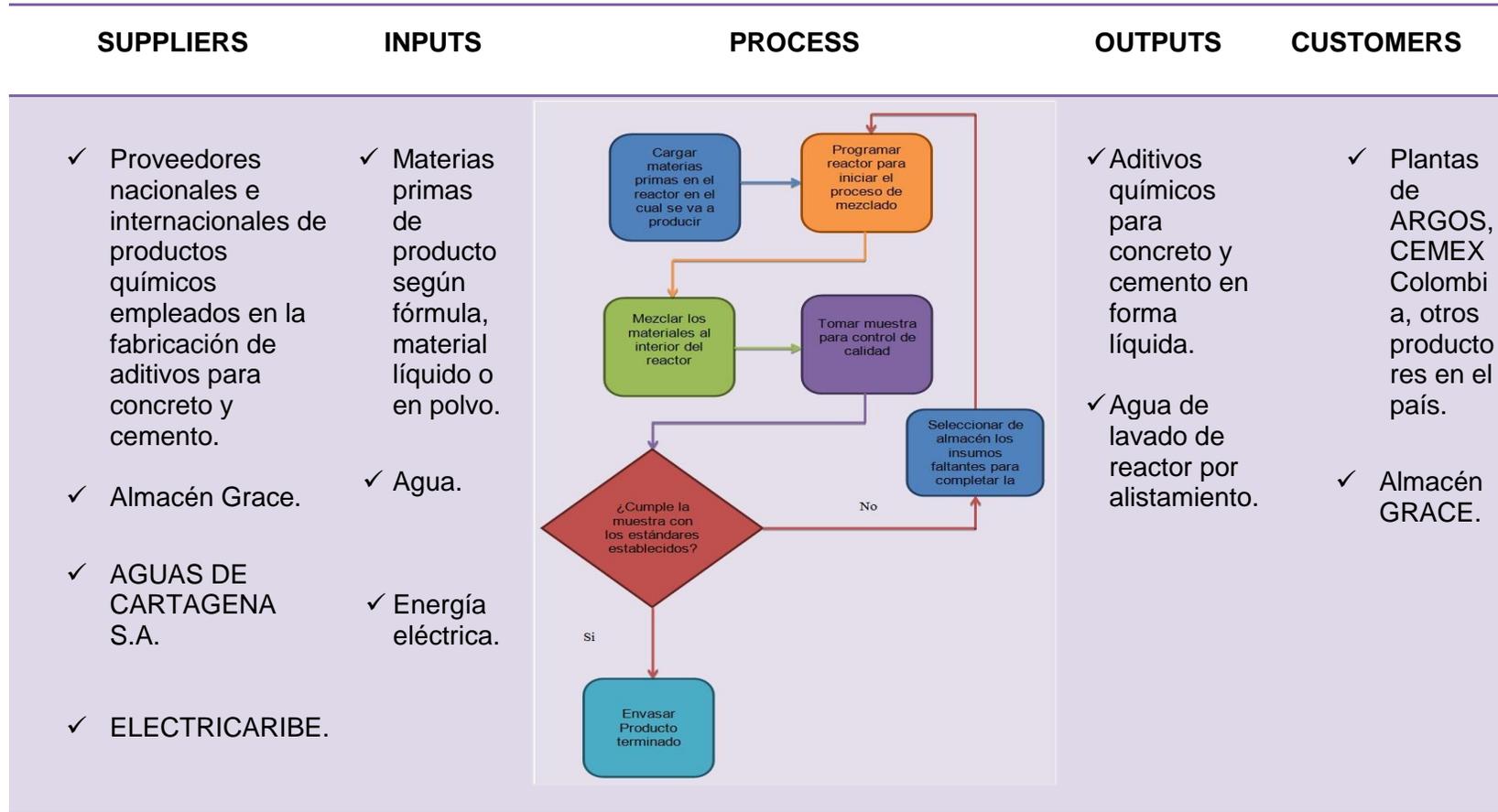
El SIPOC se constituye en una herramienta con éste propósito, es empleada para identificar todos los elementos relevantes de un proyecto de mejora de proceso, esta involucra cada uno de los actores principales en el proceso de fabricación como son: los proveedores, las entradas, los procesos, las salidas y los clientes.

El proceso de fabricación de los productos es descrito en la figura 17, en este se pueden observar los insumos empleados para la fabricación de los productos que provienen de proveedores nacionales e internacionales para los cuales la empresa emite pedidos según los lead times que éstos le ofrecen.

El almacén contiene los insumos de fabricación y los productos terminados que no serán enviados al cliente durante ese período. Así también la energía eléctrica y el agua potable son actores de gran importancia suministrados por las empresas de servicios públicos de la ciudad. Por otra parte se establece como una salida del proceso a aparte del producto final, el agua empleada para el lavado de los reactores al alistar para pasar de la fabricación de un producto a otro, esto dio a lugar durante el período.

También es posible evidenciar que se desarrolla una serie de procesos lógicos para la obtención de los productos para el cliente que siguen una secuencia de acción establecida.

**Figura 17.** SIPOC Proceso de fabricación de aditivos químicos para cemento y concreto.



Fuente: Autores del trabajo.

### 3.2.1.2 Diagramas Macro

Los diagramas Macro son empleados para analizar la totalidad del proceso productivo de una empresa de acuerdo a un determinado producto, representan características generales de las distintas actividades que agregan valor al producto final como: tipo de operaciones, número de operarios, materiales, tiempo, recorrido, entre otras. Para la descripción del sistema operativo de GRACE COLOMBIA S.A. en su planta en Cartagena fueron empleados los siguientes diagramas macro:

- **Cursograma sinóptico**

El cursograma sinóptico es un diagrama que presenta un cuadro general de cómo se suceden las principales operaciones e inspecciones.<sup>55</sup> Para la elaboración de este diagrama sólo se utilizan dos símbolos:

**Tabla 3.** Simbología del cursograma sinóptico.

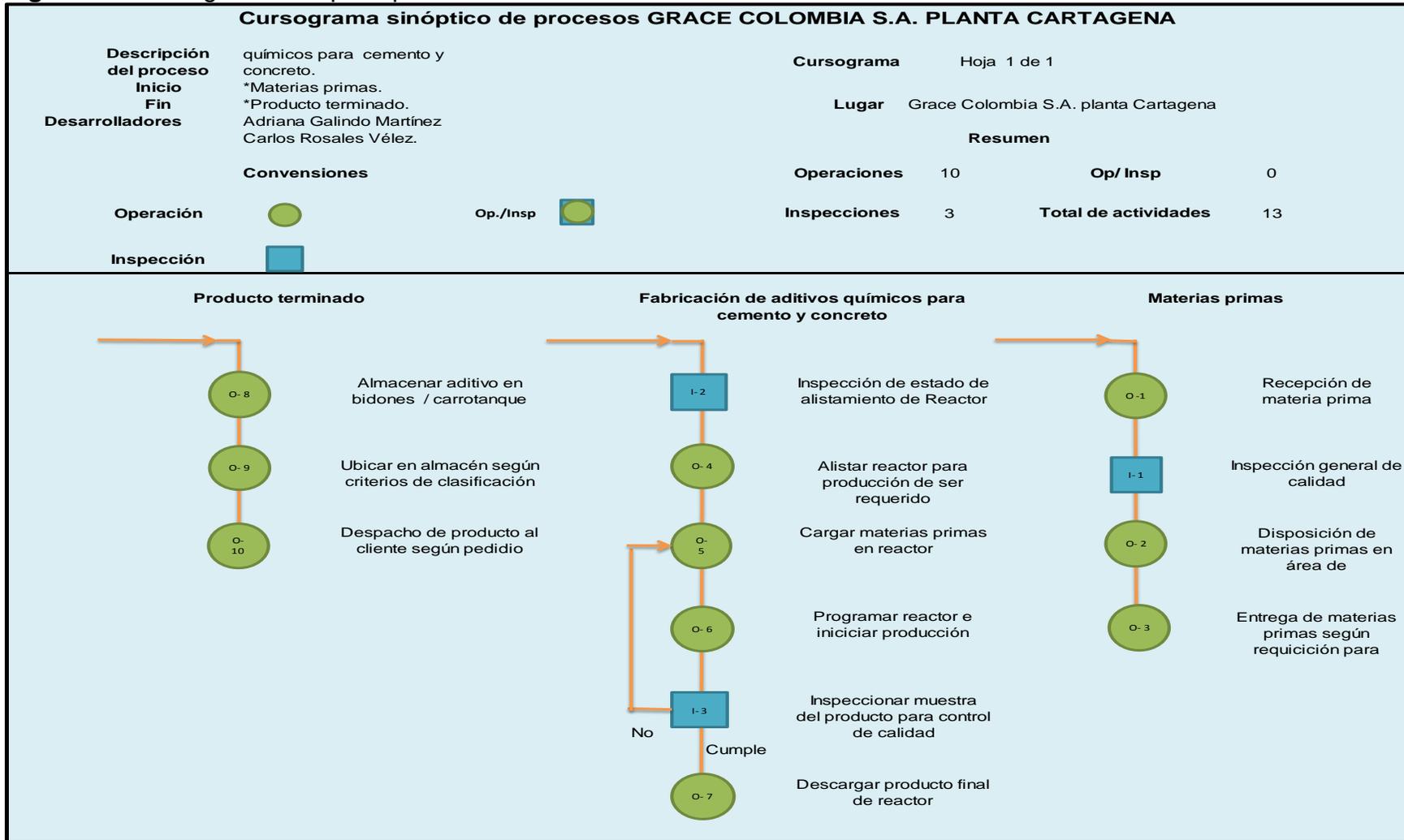
Símbolo	Descripción
	<b>Operación:</b> Son las principales fases del proceso, método o procedimiento; generalmente la pieza, material o producto es modificada o cambia durante la operación.
	<b>Inspección:</b> Se refiere a la verificación de la calidad y cantidad conforme a especificaciones establecidas con anticipación.

Fuente: Autores del trabajo.

Para la empresa se ha establecido el siguiente cursograma analítico para los procesos que intervienen en la fabricación de sus productos:

<sup>55</sup> ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, Introducción al estudio del trabajo. Editorial Limusa. 2005, p86

**Figura 18.** Cursograma sinóptico procesos GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.



Fuente: Autores del trabajo.

Para el desarrollo del cursograma sinóptico se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- **El propósito de las operaciones al interior del sistema productivo:** Se determina que cada actividad desarrollada persigue un objetivo. De manera general se puede observar que: El proceso de cargado de materiales en los reactores permite que el proceso productivo sea alimentado con lo necesario para seguir su curso normal. El proceso de mezclado tiene como meta el desarrollo del producto final. Así también las operaciones de almacenamiento se ocupan de la organización de insumos y productos dentro de las instalaciones y en los vehículos contenedores, para su posterior despacho al cliente.
- **Las características del producto:** Los productos que ofrece Grace en su planta en la ciudad, cuentan con las siguientes características: son aditivos químicos producidos por un proceso de mezclado, se presentan en estado líquido, algunos son compatibles entre sí, es decir, que pueden ser producidos consecutivamente sin que los reactores requieran de un proceso de alistamiento, son dispuestos en carro-tanques o en bidones según se requiera.
- **Las operaciones de control de calidad:** Las inspecciones de control de calidad velan por el cumplimiento de las especificaciones establecidas para los insumos empleados en la fabricación de un producto de calificado para el cliente y del producto como tal.
- **Los procesos de alistamiento:** Las operaciones de alistamiento al fabricar los productos de la línea, toman lugar al iniciar el período productivo o cuando se producen dos o más productos en un mismo período y los mismos no son compatibles entre sí. Involucran el consumo de insumos y capacidades.

- **La maquinaria empleada:** Tal como se describe en los elementos del proceso, la maquinaria empleada es básicamente la planta integral, el montacargas y el sistema de succión.
- **El manejo de los materiales:** Los materiales son manipulados según se ha establecido en la descripción del proceso productivo.
- **Los procedimientos:** Tal como se ilustra en el diagrama cada operación cuenta con un procedimiento a seguir para ser desarrollada adecuadamente en pro de la consecución de un producto terminado de calidad.

Como se puede observar en la figura 17 se establecieron tres procesos fundamentales para la obtención del producto final según los estándares establecidos en atención a la satisfacción del cliente, según su orden son: materias primas, fabricación de aditivos para cemento y concreto, y producto final.

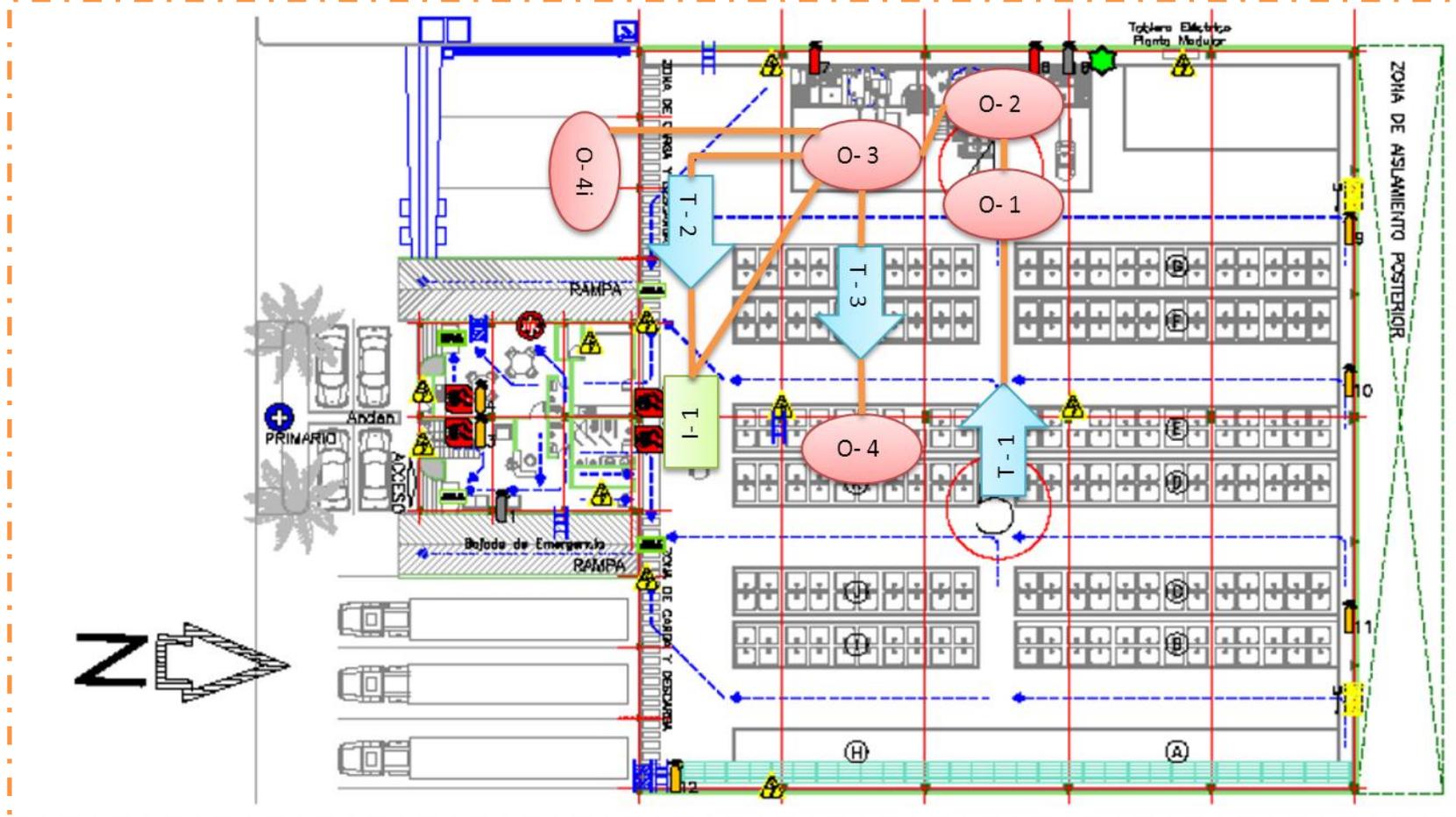
- **Diagrama de recorrido**

El diagrama de recorrido es la representación del proceso en un plano, donde se indica el recorrido y el descongestionamiento (si existe) durante el proceso productivo, permitiendo revisar la distribución del equipo en la planta.<sup>56</sup> Ver figura 18 en esta se puede observar como es el recorrido que tienen las materias primas para la fabricación de los productos de la línea Construction, desde que salen de su almacenamiento hasta que son convertidos en el producto final mediante el proceso de mezclado.

---

<sup>56</sup> BUSTAMATE, Yelitza. Ramírez, Cheril. Universidad Experimental del Táchira, Cátedra: Laboratorio de producción I. Diagramas generales.{DOCUMENTO EN LINEA}. Disponible en la web: <http://www.monografias.com/trabajos37/diagramas-generales/diagramas-generales2.shtml> . [11 de junio 2012].

Figura 19. Diagrama de recorrido productos línea Construction.



Fuente: Autores del trabajo.

A continuación se describen las actividades consideradas en el diagrama de recorrido:

**Tabla 4.** Descripción de actividades.

ACTIVIDAD	DESCRIPCIÓN
T-1	Transporte de materias primas desde área de almacenamiento hacia la planta.
O-1	Cuantificar materias primas.
O-2	Cargar materias primas en reactor.
O-3	Programar reactor e iniciar procesamiento.
T-2	Transporte de muestra a laboratorio.
I-1	Inspección por control de calidad.
T-3	Transporte de producto final hacia área de almacenamiento.
O-4	Almacenar producto terminado en área de almacenamiento.
O-4 i	Almacenar producto terminado en carro tanque por sistema de succión.

Fuente: autores del trabajo.

- **Diagrama de flujo**

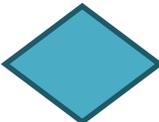
El diagrama de flujo es una representación gráfica de la secuencia de todas las operaciones, los transportes, las inspecciones, las esperas y los almacenamientos que ocurren durante un proceso. Su objetivo es realizar una representación de la trayectoria de la materia prima por cada una de las áreas de trabajo o encargados de los procesos dentro de la empresa.

En este diagrama se puede apreciar el número de procesos por cada área, lo que ayuda a identificar si en determinada área hay un exceso o sobrecarga de actividades, por lo tanto es una herramienta importante para la distribución de las actividades durante el proceso productivo. Además se puede ver la secuencia en que se realizan las operaciones durante el proceso, lo cual permite identificar

fallas durante el desarrollo del mismo y posibles acciones para implementar mejoras.

Los símbolos empleados en la elaboración de un diagrama de flujo son:

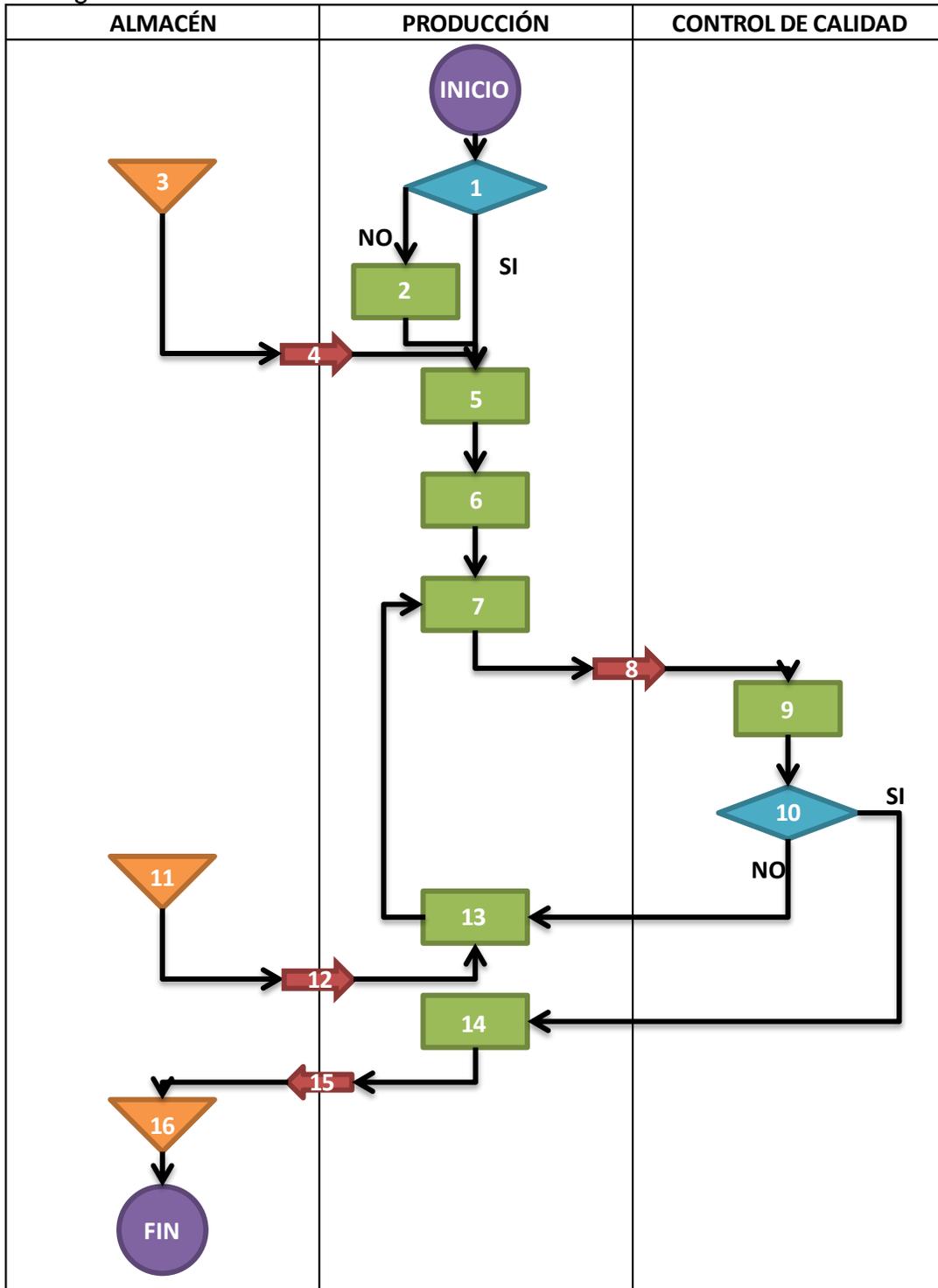
**Tabla 5.** Simbología del diagrama de flujo.

Actividad	Símbolo	Operación
	Operación	Se produce o se realiza algo.
	Almacenamiento	Se guarda o se protege el producto o los materiales.
	Transporte	Se produce o se realiza algo.
	Decisión	Se verifica la calidad, cantidad o características del producto.
	Conector	Enlaza.
	Demora	Se interfiere o se retrasa el paso siguiente.

Fuente: Autores del trabajo.

A continuación se presenta el diagrama de flujo que ilustra el proceso de fabricación de los aditivos para concreto y cemento de GRACE COLOMBIA S.A. en su planta ubicada en Cartagena, figura 20.

**Figura 20.** Diagrama de flujo para la empresa Grace Colombia S.A. planta Cartagena.



Fuente: Autores del trabajo.

A continuación se describe el diagrama, la descripción permite seguir la secuencia lógica de desarrollo del proceso de fabricación, ello de manera general para la fabricación en determinado reactor según la orden de producción establecida,

**Tabla 6.** Descripción de diagrama de flujo para la empresa Grace Colombia S.A. planta Cartagena.

Símbolo	Descripción
	Inicio
	¿El reactor que se va a utilizar se encuentra listo?
	Si "1" es NO, se alista el reactor
	Del Almacén se toman los insumos a utilizar en la fabricación
	Los insumos son transportados hacia la zona de producción
	Los insumos son cargados en el reactor
	Se programa el reactor para la operación
	Los insumos son mezclados hasta alcanzar el estado deseado
	Se transporta una muestra hacia la zona de Control de Calidad
	Se realizan pruebas para determinar la calidad del producto
	¿El bache pasa la prueba de calidad?
	Si "10" es NO, se selecciona de almacén los insumos faltantes
	Se transportan los insumos a la zona de producción
	Se cargan los insumos en el reactor y repite los puntos "7" al "10"
	Si "10" es SI, se envasa el producto terminado
	Se transporta el producto terminado a almacén
	Se almacena el Producto terminado
	Fin

Fuente: Autores del trabajo.

Al analizar el proceso productivo de la empresa Grace Colombia S.A. planta Cartagena, mediante los diferentes diagramas, se puede observar que en el proceso de fabricación existen múltiples productos, múltiples recursos y múltiples periodos, éstos interactúan entre sí en un proceso de fabricación relativamente sencillo, pero que se vuelve complejo a la hora de realizar la planificación y la programación de la producción.

Por otra parte, se logró identificar que también se incurre en tiempos de alistamiento debido a las características químicas de los productos, la compatibilidad entre ellos genera dificultades a la hora de programar la producción de cierto periodo de tiempo, ya que al tener tantas opciones, se debe velar por optimizar el proceso. Al inicio de cada periodo se incurre también en tiempos de alistamiento de los reactores, ya que éstos deben encontrarse libres de toda sustancia que pueda alterar la composición química del producto final.

Las operaciones de control de calidad del producto terminado permiten que Grace garantice a sus clientes la entrega de excelentes productos que cumplen con los estándares establecidos y que buscan la satisfacción de sus necesidades.

De manera general se logró observar que cada uno de los elementos del proceso productivo tienen una labor o importancia para el mismo y que las interacciones de estos constituye el motor del proceso de fabricación.

### **3.3 PROCESO DE PLANIFICACIÓN Y PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN EN LA EMPRESA GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA**

#### **3.3.1 PLANIFICACIÓN DE LA PRODUCCIÓN**

En la actualidad GRACE S.A. PLANTA CARTAGENA traza su horizonte planificación basándose en los pronósticos de la demanda que les brinda el departamento de ventas, partiendo de ello se establece el plan con las necesidades mensuales, el cual es traducido a un plan semanal, esto es determinado principalmente por la cantidad y la clase de producto dado que las materias primas pueden ser locales e internacionales.

El método empleado para la elaboración de las proyecciones no ha sido develado por políticas de confidencialidad. Ventas realiza una proyección de la demanda a 3 meses, la cual se ve ajustada dentro de este período mensualmente, por factores como:

- La información que es suministrada por los clientes acerca de los consumos esperados de sus productos.
- Los datos históricos de la demanda, esto cuando se encuentren disponibles puesto que pueden presentarse nuevos clientes en un período dado.
- La presentación de variaciones en la producción de los clientes, tales como: paradas por mantenimiento, fallas en equipos, días no laborables, entre otros.

La planta de la empresa Grace Colombia S.A. en Cartagena es relativamente nueva en el mercado, ésta inició sus operaciones en Enero del año 2011, pero fue hasta inicios del año 2012 cuando se empiezan a estructurar las actividades generales de la empresa y se comienza a trabajar a una capacidad relevante para su objetivos, ya que es en este período cuando comienza con la producción de la

mayoría de los productos ofrecidos por la empresa a nivel nacional y en un mayor volumen.

Hoy por hoy la empresa cuenta con pocos datos históricos de la demanda para cada producto, adicionalmente determinados productos han dejado de producirse entre un período y otro, lo cual limita y disminuye en mayor medida la información existente, ello, no hace conveniente o relevante para efectos de planificación el desarrollo de pronósticos para los planes operacionales, pues la magnitud de la información no permite evidenciar los patrones comportamiento de la demanda durante un tiempo determinado, así los pronósticos generados no serían confiables, ni capaces de ofrecer información acertada para la toma de decisiones basadas en ellos. Ver en el Anexo C. la información recopilada por la empresa a partir del presente año acerca de las ventas y proyecciones.

En la siguiente tabla se pueden observar los datos históricos existentes de la demanda por mes para el grupo de productos más representativos de la empresa:

**Tabla 7.** Demanda en Kilogramos para productos representativos ofrecidos por Grace Colombia S.A. planta Cartagena en 2012.

Producto	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO
<b>DARACEM 100</b>	0	6.000	6.000	0	7.200	10.800	4.800	5.950
<b>DARACEM 19</b>	3.026	4.800	6.000	2.400	2.400	3.600	9.600	0
<b>HEA 211</b>	15.000	15.000	24.000	9.000	24.000	9.000	15.000	9.800
<b>MIRA 94</b>	37.949	27.600	43.200	39.600	34.800	18.000	38.400	31.590
<b>RECOVER</b>	2.280	2.280	2.280	1.140	1.140	2.280	2.241	1.100
<b>TDA 1100</b>	67.000	26.000	67.000	41.000	26.000	45.000	41.000	26.000
<b>TDA 7350</b>	0	18.000	18.000	18.000	18.000	20.000	20.000	0
<b>TDA J</b>	162.100	268.440	251.680	248.280	233.820	319.190	240.000	155.000
<b>WRDA 60</b>	20.400	12.000	26.400	22.800	19.200	24.000	18.000	0
<b>Total</b>	<b>307.755</b>	<b>380.120</b>	<b>444.560</b>	<b>382.220</b>	<b>366.560</b>	<b>451.870</b>	<b>389.041</b>	<b>229.440</b>

Fuente: Información suministrada por la empresa.

Dado que en la actualidad no existe un procedimiento concreto en el cual la empresa establezca para los niveles estratégico, táctico y operativo el curso de acción, los recursos y medios para alcanzar de las metas propuestas, las acciones que se adelantan para efectos de planificación se realizan de manera general, partiendo de los objetivos que se establecen y generando sobre la marcha tareas que buscan en el corto plazo avanzar en la consecución del estado deseado.

### 3.3.2 PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

La programación de la producción en la empresa se realiza semanalmente basada en la necesidades determinadas para el mes, así también teniendo en cuenta la información otorgada por ventas como la recepción de las órdenes de compra de los clientes, donde se especifica finalmente los requerimientos de productos para ése mes. En la actualidad para la empresa no representa restricción alguna la disponibilidad del inventario de materias primas dado que las existencias son siempre suficientes, así los productos nacionales son pedidos dentro del mes, mientras que los de importación según el lead time<sup>57</sup> del proveedor se requieren con aproximadamente 3 meses de anticipación.

Una vez dadas las cantidades a fabricar de cada producto para el período, se inicia la programación de las actividades. Se procede al establecimiento de las necesidades de recursos y capacidad. Uno de los criterios básicos para la programación de las actividades es la duración de la fabricación de cada producto.

Partiendo de la premisa que establece que la secuenciación de las actividades es una etapa de importancia para la programación de la producción, en la empresa se tiene en cuenta la compatibilidad que presentan entre sí los productos que se han de fabricar, buscando así disminuir las operaciones de lavados entre un

---

<sup>57</sup> **Lead time:** tiempo de entrega.

producto y otro, según su compatibilidad para pasar de un producto a otro se incurre en un tiempo de alistamiento, estos tiempos han sido determinados por la empresa tal como se describen a continuación, los tiempos se interpretados como: pasar de fabricar del producto en la fila al producto correspondiente en la columna tiene una duración de cierta cantidad de tiempo en horas (ver tabla 8).

**Tabla 8.** Tiempos de alistamiento

Alistar (horas)	DARACEM 19	DARACEM 100	HEA 211	MIRA 94	RECOVER	TDA 1100	TDA 7350	TDA J	WRDA 60
DARACEM 19		0	0,5	0,35	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
DARACEM 100	0,5		0,5	0,35	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
HEA 211	0,25	0,25		0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
MIRA 94	0,5	0	0,5		0,5	0,5	0,5	0,5	0
RECOVER	0,35	0	0,35	0		0,35	0,35	0,35	0
TDA 1100	0,25	0	0,25	0	0,25		0	0	0
TDA 7350	0,25	0	0,25	0	0,25	0		0	0
TDA J	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25		0,25
WRDA 60	0,5	0,35	0,5	0	0,5	0,5	0,5	0,5	

Fuente: Autores del trabajo.

Los costos asociados a las operaciones de alistamiento, fueron de igual manera suministrados por la empresa. Representan el valor monetario que representa alistar el reactor para la fabricación de cierto producto:

**Tabla 9.** Costos de alistamiento

Alistar (\$)	DARACEM 19	DARACEM 100	HEA 211	MIRA 94	RECOVER	TDA 1100	TDA 7350	TDA J	WRDA 60
DARACEM 19	0	0	100000	70000	100000	100000	100000	100000	100000
DARACEM 100	100000	0	100000	70000	100000	100000	100000	100000	100000
HEA 211	50000	50000	0	50000	50000	50000	50000	50000	50000
MIRA 94	100000	0	100000	0	100000	100000	100000	100000	0
RECOVER	70000	0	70000	0	0	70000	70000	70000	0
TDA 1100	50000	0	50000	0	50000	0	0	0	0
TDA 7350	50000	0	50000	0	50000	0	0	0	0
TDA J	50000	50000	50000	50000	50000	50000	50000	0	50000
WRDA 60	100000	70000	100000	0	100000	100000	100000	100000	0

Fuente: Autores del trabajo.

En general el proceso de programación se realiza de manera empírica mediante un consenso general entre el plant manager<sup>58</sup> y el jefe de producción, durante el período se establece dentro de qué fechas y en qué cantidades deberán fabricarse los productos de la línea. El jefe de producción quien brinda la aproximación inicial de la programación, determina que operario según los turnos de trabajo se encargará de la fabricación diaria y entrega la información referente a las cantidades de materias primas según sus proporciones en fórmula y el tiempo a emplear durante en proceso, esta información es consignada dentro del formato en anexo D específicamente para cada producto.

### 3.4 CARACTERIZACIÓN DE ATRIBUTOS

Uno de los objetivos fundamentales para los profesionales desde los inicios de la industrialización ha sido la obtención de un plan de producción con optimización de los costos, mediante el balance entre los costos de alistamiento y los costos de mantener en inventario – tamaño de lote.

<sup>58</sup> Gerente de planta, actualmente el nombre del cargo ha sido modificado a Gerente de operaciones.

Los problemas de tamaño de lote tienen múltiples aplicaciones y variaciones, lo que permite la formulación de diferentes atributos para representar una gran variedad de sistemas productivos. Estos atributos se pueden clasificar, de acuerdo a su relación principal en: tiempo, recursos y producto.

### 3.4.1 Tiempo

Esta primera clasificación contiene todos aquellos atributos que contemplan una relación con la estructura del tiempo del modelo y de los datos utilizados:

- **Horizonte de planificación:** Puede ser finito o infinito. Los modelos con horizonte de planificación infinito suelen asumir una demanda constante a través del tiempo. En Grace, el horizonte de planificación es finito ya que la demanda es conocida con anterioridad.
- **Escala del tiempo:** La escala del tiempo puede ser continua o discreta. Es aquí donde se decide cada cuanto tiempo es culminado un periodo, es indispensable para saber con cuanto tiempo se cuenta en cada periodo para realizar la producción y determinar el plan adecuado. En Grace, la escala de tiempo es continua, tienen 2 turnos de 8 horas cada uno, por periodo.
- **Desarrollo temporal de parámetros/datos:** Los parámetros pueden variar a través del tiempo o ser estáticos. Dependiendo del sistema productivo se pueden declarar los parámetros pero normalmente estos tienen un comportamiento variable a lo largo del tiempo, como lo son la capacidad de la producción, los costos de los parámetros, entre otros. Se puede decir que en Grace, el desarrollo temporal de los datos es mixto, algunos datos tienen un comportamiento estático, como lo son los tiempos de fabricación, los costos de mantener en inventario y los alistamientos; por otro lado, se tiene la demanda y la capacidad disponible que puede variar según criterios de la empresa.

- **Disponibilidad y conocimiento de los parámetros/datos:** Se debe distinguir si los datos del problema pertenecen a modelos estocásticos o determinísticos. En este último, todos los parámetros y datos se deben conocer a priori para realizar la planificación. Los modelos estocásticos por otro lado, tratan de incorporar la no certeza de los datos futuros dentro del modelo de planificación. En Grace, los datos pertenecen a modelos determinísticos.
- **Función objetivo:** El objetivo más común en los problemas de tamaño de lotes es la minimización de la suma de varios componentes de costos, pero también se pueden declarar otros objetivos como la maximización de las utilidades u otros objetivos no monetarios como la minimización de las entregas tardías. El objetivo principal para Grace es la optimización de la planificación y la programación de la producción, minimizando los tiempos de alistamiento de los reactores.
- **Componentes de los costos:** Estos comprenden normalmente los costos de mantener en inventario y los costos de alistamiento, como es el caso de Grace.

El costo de mantener en inventario es considerado como un costo lineal, está ligado a la cantidad de productos que se tienen en inventario en algún momento. Económicamente representa el capital monetario que simbolizan los productos que se poseen en inventario y que pudo ser invertido de otra manera.

Los costos de alistamiento influyen en los costos de producción, siempre que se vaya a producir cualquier producto, los recursos que ahí intervienen deben estar listos para hacer frente a esa producción. Económicamente representan la capacidad de los recursos que se deja de utilizar para que estos puedan estar listos al momento de la fabricación de cierto producto.

### 3.4.2 Recursos

Esta clasificación contiene aquellos atributos que intervienen directamente en los problemas de planificación de la producción:

- **Capacidades:** Las capacidades de los recursos se pueden asumir como finitas o infinitas. Al ser finitas se asume que los recursos pueden extenderse en tiempos extras con algunos costos asociados, como es el caso de Grace.
- **Asignaciones producto-recurso:** Para la fabricación de cada producto puede ser asignado solo un recurso o no, dependiendo de las políticas de fabricación y de las características del sistema productivo. En Grace, los criterios de asignación son empíricos.
- **Número de recursos:** En el problema de planificación pueden ser utilizados uno o más recursos. Si una operación se puede realizar en más de un recurso, entonces los recursos son llamados paralelos y si esta operación es realizada por uno o más recursos en paralelo, entonces se trata de un problema con múltiples recursos. Grace posee dos reactores que son los encargados de la fabricación de los productos, trabajan en paralelo y poseen iguales características técnicas.
- **Estructura producto/operación:** Muestra el flujo de materiales a través del sistema productivo, puede ser cíclico o no. La estructura se considera cíclica si por lo menos un producto requiere dos operaciones del mismo recurso. Para Grace, la estructura es no cíclica, los productos son procesados solo una vez en el reactor.
- **Tasa mínima de utilización:** Representa el mínimo de utilización que se le debe dar a un recurso para evitar usos insignificantes en los planes de producción. En el caso de ser necesario, se debe evaluar si es más económico no utilizar ese recurso y cargarle esa producción a otro recurso o realizarlo en algún otro periodo.

- **Operaciones de alistamiento:** Una operación de alistamiento cambia el estado de alistamiento en el cual se encuentra un recurso, es decir, esta operación permite que el recurso se encuentre listo para la producción de cierto producto en un tiempo determinado. Estas operaciones pueden ser dependientes de la secuencia o no y se pueden presentar entre productos de la misma familia o entre familias de productos. Para el caso de Grace, el tiempo y costo de alistamiento es dependiente de la secuencia de producción. Las operaciones de alistamiento consumen parte de la capacidad disponible y dado que el recurso no se encuentra productivo durante ese periodo, lo que se busca es su reducción a la mínima cantidad.

### 3.4.3 Productos

Esta última clasificación está dedicada a los atributos de salida del proceso productivo:

- **Número de productos:** Es importante determinar si el problema se establece sobre un sistema productivo con un solo producto o con múltiples productos.
- **Lead times:** Es el tiempo que transcurre desde que se inicia un proceso de producción hasta que es terminado.
- **Restricciones de inventario:** Algunas veces, restricciones sobre el nivel de inventario son impuestas de acuerdo a las políticas de la organización. Pueden ser restricciones sobre el límite superior, cuando se trata de la capacidad de almacenamiento, o restricciones sobre el límite inferior cuando se trata de la cantidad mínima de producción.
- **Políticas de servicio:** Se refieren al cumplimiento de la demanda.
- **Reglas adicionales de tamaños de lotes:** Acorde a las políticas de cada empresa, pueden existir distintas restricciones adicionales sobre los tamaños de lotes, como por ejemplo los tamaños de los lotes deben ser superiores a determinado tamaño.

## 4. MODELO DE PROGRAMACIÓN MATEMÁTICA PARA LA PLANIFICACIÓN Y LA PROGRAMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE DOS REACTORES CON TIEMPOS DE ALISTAMIENTO DEPENDIENTES DE LA SECUENCIA

### 4.1. FORMULACIÓN DEL MODELO

Teniendo como base la caracterización del sistema productivo de la empresa GRACE, se determinó que el problema de planificación y programación de la producción en Grace, básicamente consiste en un modelo multi producto, multi recurso, multi periodo y con secuenciación dependiente de los tiempos de alistamiento. En la revisión de la literatura, un modelo que se asocia a esta características es el trabajo “Time continuity in Discrete time models”, donde realiza una adaptación del modelo CLSD (*“Capacited Lot-Sizing Problem with Sequence Dependent Setup Cost”*) el cual permite que el modelo realice la secuenciación de la producción dependiendo de los costos y tiempos de alistamiento para una sola máquina.

Dado que el problema en Grace tiene dos reactores, se tomo como base este modelo para tratarlo como multi-máquina con capacidades idénticas. Para lograr esta adaptación se realizó una modificación de ese modelo a sistemas productivos donde puedan intervenir más de un reactor, con la fabricación de varios productos y con un horizonte de planificación de una semana, obteniendo como resultado un modelo Multi-Producto, Multi-Periodo, Multi-Recurso, Linkeado<sup>59</sup> (permite que el estado de alistamiento de un reactor sea llevado desde un periodo  $t$  a un periodo  $t+1$  y a través de tiempos ociosos) y tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia de producción. A continuación se procede con la descripción de dicho modelo:

---

<sup>59</sup> Linkeado: con uniones, conexiones.

Los conjuntos son una colección o grupo de entidades que cumplen una determinada condición. En el modelo tomado como base para representar el sistema productivo de Grace Colombia S.A., fueron implementados los siguientes conjuntos:

$J$ : Son todos los productos que son fabricados en Grace Colombia S.A. planta Cartagena.

$T$ : Son todos los periodos que se van a planificar (Horizonte de planificación)

$R$ : Son todos los reactores que pueden intervenir en la fabricación de determinado producto

$i, j, k$  Son contadores utilizados para la selección de los productos, los cuales pertenecen al conjunto  $J$

$t$  Es un contador utilizado para la selección del periodo, el cual pertenece a  $T$

$r$  Es un contador utilizado para la selección del reactor, el cual pertenece a  $R$

Los parámetros son los valores de entrada que recibe una función, los cuales influyen en el comportamiento o el resultado de la ejecución de ésta. Son los datos suministrados por el usuario y de los cuales el modelo tomará valores para realizar el análisis y arrojar un resultado:

$a_j$ : Capacidad o tiempo consumido para producir una unidad del producto  $j$ .

$c_t$ : Capacidad disponible en el periodo  $t$

$d_{jt}$ : Demanda del producto  $j$  en periodo  $t$

$h_j$ : Costo mantener en inventario una unidad del producto  $j$  en periodo  $t$

$sc_{ij}$ : Costo de alistamiento dependiente de la secuenciación, si una operación de alistamiento es ejecutada desde producto  $i$  al producto  $j$

$st_{ij}$  : Tiempo de alistamiento dependiente de la secuenciación, si una operación de alistamiento es ejecutada desde producto  $i$  al producto  $j$

$IIN_j$  : Cantidad inicial del producto  $j$  al inicio de la ejecución del modelo

Las variables son los elementos sobre los cuales se pueden tomar decisiones y darles un nombre en el problema, son espacios en los cuales se almacenan los valores resultados, que luego serán mostrados al usuario:

$I_{jt}$  : Inventario del producto  $j$  en el periodo  $t$

$X_{jrt}$  : Tamaño de lote de producción, cantidad producida de  $j$  en el reactor  $r$ , en el periodo  $t$

$Y_{ijrt}$  : Variable de alistamiento dependiente de la secuenciación (=1 si una operación de alistamiento desde el producto  $i$  al producto  $j$  es ejecutada en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$ ,=0 de otra manera)

$Z_{jrt}$  : Variable de estado de alistamiento (=1 si el producto  $j$  se alista al final del periodo  $t$  en el reactor  $r$ ; =0 de otro modo)

$F_{jrt}$  : Variable de posicionamiento (toma solo valores enteros), mientras mayor sea  $F_{jrt}$ , más tardío será programado  $j$  en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$

El modelo detallado a continuación fue codificado en Mathprog en Gusek, mediante el lenguaje GMPL, el cual se encuentra en el anexo F.

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{i \in J} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq i}} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} sc_{ij} Y_{ijrt} \quad (1)$$

$$I_{jt} = I_{jt-1} + \sum_{r \in R} X_{jrt} - d_{jt} \quad \forall j \in J, t \in T \quad (2)$$

$$\sum_{j \in J} a_j \cdot X_{jrt} + \sum_{i \in J} \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq i}} st_{ij} \cdot Y_{ijrt} \leq c_t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (3)$$

$$X_{jrt} \leq b \cdot \left( \sum_{\substack{i \in J \\ i \neq j}} Y_{ijrt} + Z_{jrt-1} \right) \quad \forall j \in J, r \in R, t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{j \in J} Z_{jrt} = 1 \quad \forall r \in R, t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{i \in J \\ i \neq k}} Y_{ikrt} + Z_{krt-1} = \sum_{\substack{j \in J \\ j \neq k}} Y_{kjrt} + Z_{krt} \quad \forall k \in J, r \in R, t \in T \quad (6)$$

$$F_{jrt} \geq F_{irt} + 1 - J \cdot (1 - Y_{ijrt}) \quad \forall i \in J, j \in J \setminus \{i\}, r \in R, t \in T \quad (7)$$

$$X_{jrt} \geq 0, F_{jrt} \geq 0, I_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, r \in R, t \in T \quad (8)$$

$$Y_{ijrt} \in \{0,1\}, Z_{jrt} \in \{0,1\} \quad \forall i \in J, j \in J, r \in R, t \in T \quad (9)$$

La función objetivo del modelo es minimizar los costos de mantener en inventario y los costos asociados al alistamiento dependiente de la secuenciación (1). La restricción (2) es la restricción estándar de inventario, en donde el inventario del producto  $j$  en un periodo  $t$  será igual a al inventario de este en el periodo anterior, sumado a la cantidad de  $j$  producido durante el periodo  $t$  y restándole la demanda de ese producto durante ese mismo periodo. La restricción de capacidad (3) toma en cuenta los tiempos de alistamiento dependientes de la secuencia y la capacidad consumida para la producción del producto  $j$  en el periodo. (4) Permite la producción del producto  $j$  en el periodo  $t$  en el reactor  $r$  solo si una operación de alistamiento desde cualquier producto  $i$  al producto  $j$  es ejecutada ( $\sum_{i \in J} Y_{ijrt} = 1$ ) o si el estado de alistamiento del reactor  $r$  es traído al periodo  $t$  desde el periodo  $t-1$  ( $Z_{jrt-1} = 1$ ). Al final de cada periodo y para cada reactor, solo un estado de alistamiento debe existir (5). La restricción (6) muestra el flujo de alistamientos indica que si el producto  $k$  es producido después de cualquier producto  $i$  en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$ , o si el reactor  $r$  se encuentra en estado de alistamiento para producir  $k$  desde el periodo  $t-1$ ; entonces éste podrá preceder la producción de cualquier producto  $j$  en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$ , o el reactor  $r$

podrá mantener su estado de alistamiento. La restricción (7) elimina las posibles sub-rutas, dándole un turno a la fabricación de los productos  $j$  en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$ . Finalmente las restricciones (8) y (9) establecen la no negatividad y las condiciones binarias.

Este modelo es considerado un modelo LP-Hard, debido a la complejidad computacional en la resolución del código, el modelo fue ejecutado en el solver GLPK y en la búsqueda del resultado tomo tiempos fuera de los razonables, el modelo fue ejecutado en el salón de producción de la Universidad Tecnológica de Bolívar, en el activo 54260, ordenador Dell, modelo T3500, con sistema operativo Windows 7 de 32 bits, memoria instalada RAM de 4 GB y procesador Intel® Xeon®. Dado el inconveniente anteriormente descrito se propone una solución heurística, basado en la programación lineal, como lo hicieron Satyaki Ghosh Dastidar y Rakesh Nagi en el 2005.

Se propone una heurística basada en dos etapas. La primera etapa permite determinar los tamaños de lote óptimo para los productos a través de la implementación de un modelo CLSPMM<sup>60</sup> y una segunda etapa en la cual se establezca la secuenciación de la producción en cada reactor utilizando reglas de despacho. A continuación se procede con la descripción del primer modelo:

Los conjuntos utilizados en la primera etapa son iguales a los utilizados en el modelo expuesto anteriormente, exceptuando los contadores utilizados para la selección de los productos, donde solo se utilizará  $j$ . La variación se establece sobre los parámetros y las variables que influyen en los datos de entrada y salida del modelo. En el caso de los parámetros  $a_j, c_t, d_{jt}, h_j$  y  $IN_j$  se comportan de igual manera al modelo anterior, el cambio es realizado sobre los valores que tienen relación con los alistamientos:

---

<sup>60</sup> Capacitated Lot Sizing Problem Multi-Machine, variación del modelo de CLSP.

$sc_j$ : Costo de alistamiento, si una operación de alistamiento es ejecutada hacia el producto  $j$ , independiente de la secuenciación

$st_j$ : Tiempo de alistamiento, si una operación de alistamiento es ejecutada hacia el producto  $j$ , independiente de la secuenciación. Para el desarrollo de este modelo el este tiempo no depende de la secuencia y fueron tomados como un estimativo del promedio de los tiempos asociados a pasar de cualquier producto  $i$  a este producto  $j$ .

Las variables utilizadas para la formulación del nuevo modelo son las siguientes:

$I_{jt}$ : Inventario del producto  $j$  en el periodo  $t$

$X_{jrt}$ : Tamaño de lote de producción, cantidad producida de  $j$  en el reactor  $r$ , en el periodo  $t$

$Y_{jrt}$ : Variable de alistamiento dependiente de la secuenciación (=1 si una operación de alistamiento hacia el producto  $j$  es ejecutada en el reactor  $r$  durante el periodo  $t$ ,=0 de otra manera)

La restricción (2), permanece igual para el modelo heurístico planteado, la función objetivo (1), las restricciones (3) y (4) son modificadas eliminando las variables de secuenciación y los subconjuntos que hacían de estas pertenecientes a este grupo son modificadas junto con las restricciones de no negatividad y binaria, de la siguiente manera:

El modelo detallado a continuación fue codificado en Mathprog en Gusek, mediante el lenguaje GMPL, el cual se encuentra en el anexo G.

$$\min \sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} sc_j \cdot Y_{jrt} \quad (10)$$

$$\sum_{j \in J} a_j \cdot X_{jrt} + \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} st_j \cdot Y_{jrt} \leq c_t \quad \forall r \in R, t \in T \quad (11)$$

$$X_{jrt} \leq b \cdot \left( \sum_{i \in J} Y_{jrt} \right) \quad \forall j \in J, r \in R, t \in T \quad (12)$$

$$X_{jrt} \geq 0, I_{jt} \geq 0 \quad \forall j \in J, r \in R, t \in T \quad (13)$$

$$Y_{jrt} \in \{0;1\} \quad \forall j \in J, r \in R, t \in T \quad (14)$$

De esta primera etapa sale la información que será utilizada para la ejecución de la segunda etapa, en donde se secuenciara la producción en cada reactor, dependiendo de las rutas previamente determinadas y en función de la optimización de los tiempos de alistamiento.

En la segunda etapa, es utilizado un modelo de programación para la secuenciación de la producción en un sistema con una sola maquina y varios productos, donde se presentan tiempos de liberación de la orden y tiempo de entrega del pedido dentro de cada periodo. El conjunto asociado al modelo es  $J$ , que representa el total de productos a fabricar durante el periodo en un reactor,  $i$  y  $j$  son contadores para la selección de los productos.

Los parámetros utilizados para el suministro de los datos al modelo son los siguientes:

$P_i$ : Tiempo de procesamiento por trabajo  $i$ , es el tiempo estimado de fabricación, calculado multiplicando la cantidad de material a producir, por el tiempo de producción de una unidad del ese producto.

$R_i$ : Tiempo de liberación de la orden de producción del trabajo  $i$ , está dado por las políticas de despacho que pueda tener la empresa en determinado momento.

$F_i$ : Tiempo de entrega del trabajo  $i$ , es el tiempo en el cual debe ser entregado el trabajo al cliente.

$ST_{ij}$ : Tiempo de alistamiento para pasar del trabajo  $i$  al trabajo  $j$

Las variables utilizadas en la formulación de este modelo son las siguientes:

$TI_i$ : Tiempo de inicio del trabajo  $i$ , es el momento en el cual se libera la orden

$t_i$ : Es la tardanza generada en la producción del trabajo  $i$

$TF_i$ : Tiempo de finalización del trabajo  $i$

$Y_{ij}$ : Variable de alistamiento dependiente de la secuenciación (=1 si una operación de alistamiento del producto  $i$  al producto  $j$  es ejecutada, =0 de otra manera)

El modelo detallado a continuación fue codificado en Mathprog en Gusek, mediante el lenguaje GMPL, el cual se encuentra en el anexo I.

$$\min \sum_{i \in J} \sum_{j \in J} (ST_{ij} \cdot Y_{ij}) \quad (15)$$

$$TI_i \geq TI_j + P_j + ST_{ji} - M \cdot Y_{ij} \quad \forall i \in J, j \in J, i \neq j \quad (16)$$

$$TI_j \geq TI_i + P_i + ST_{ij} - M \cdot (1 - Y_{ij}) \quad \forall i \in J, j \in J, i \neq j \quad (17)$$

$$TF_i \geq TI_i + P_i \quad \forall i \in J \quad (18)$$

$$t_i \geq TF_i - F_i \quad \forall i \in J \quad (19)$$

$$TI_i \geq R_i \quad \forall i \in J \quad (20)$$

$$Y_{ij} + Y_{ji} \leq 1 \quad \forall i \in J, j \in J, i \neq j \quad (21)$$

$$TI_i \geq 0, TF_i \geq 0 \quad (22)$$

$$Y_{ij} \in \{0,1\} \quad (23)$$

La función objetivo (15), está enfocada a la optimización de los tiempos de alistamiento, ya que lo que se busca es minimizar la utilización de la capacidad en operaciones que no generan valor al producto. La restricción (16) y (17) permiten al modelo realizar la secuenciación de la producción de los trabajos, realizando una comparación entre las diferentes rutas que puedan ser llevadas a cabo para su cumplimiento. La restricción (18) permite al modelo identificar el tiempo de finalización del trabajo, sumándole el tiempo de proceso del trabajo al momento en el cual se inicia la fabricación de ese trabajo. En la restricción (19), se genera el valor de los trabajos tardíos, es decir, aquellos trabajos que son terminados después de cumplida la fecha de entrega de este. En la restricción (20) se obliga al modelo a iniciar la producción de cierto trabajo, solo después de haberse cumplido la liberación de la orden de fabricación. La restricción (21) elimina los sub-rutas, determinando una única ruta para la fabricación de los trabajos. Por último, las restricciones (22) y (23) establecen la no negatividad y las condiciones binarias.

#### 4.2. IMPLEMENTACIÓN EN GUSEK

Para la resolución de modelo de programación matemática, fue necesaria la creación de una red como se muestra en la figura 21, que permitiera facilitar la interacción entre el usuario y el modelo. Debido a las características del modelo de ser multi-producto, multi-periodo y multi-recurso es de gran utilidad implementar una herramienta informática que facilite el suministro de los datos necesarios para la ejecución del modelo y que proporcione los resultados al usuario de la manera más sencilla y clara posible.

Para ambas fases del programa, los datos del modelo son ingresados en un archivo .xls, en el cual el usuario encontrará tablas en las que suministrar la información necesaria de los datos de entrada del modelo, este archivo es convertido a formato .csv mediante una macro y junto con el código escrito en lenguaje Mathprog<sup>61</sup> ingresan al entorno de desarrollo integrado (IDE)<sup>62</sup> (en este caso GUSEK), el cual mediante el solver GLPK ejecuta el modelo, analiza la información y arroja un resultado. Esta información es devuelta al IDE y se evidencia para el usuario mediante un archivo .out y al mismo tiempo en un archivo .csv. Luego, se genera una macro para compilar esa información en un archivo con formato .xls, lo que facilita la interpretación y el análisis de las variables resultantes.

En la primera fase se ejecutará el modelo para la planificación de la producción, se debe iniciar por el ingreso de los valores en las distintas tablas que alimentan el modelo en un archivo .xls (ver cap. 4.3.1) y mediante una macro (ver anexo E), el archivo es guardado con formato .csv, lo que permite que el modelo desarrollado (ver anexo G) sea ejecutado y pueda leer la información suministrada por el usuario, realizar los respectivos análisis y arrojar los resultados en un formato .csv, estos son transferidos hacia un archivo .xls a través de la macro expuesta en el anexo H, luego deben ser analizados por el usuario y con estos alimentar las tablas que serán utilizadas para ejecutar la segunda fase del trabajo, referente a la secuenciación de la producción dependiente de los tiempos de alistamiento.

Para la segunda fase, el usuario debe identificar en la tabla producción (ver tabla 16) arrojada por el sistema, para cada reactor aquellos periodos en los cuales se fabriquen dos o más productos diferentes, al identificar los periodos debe alimentar las tablas alistamiento y productfab únicamente con los productos que serán producidos, estos datos son los que el modelo utilizará para la

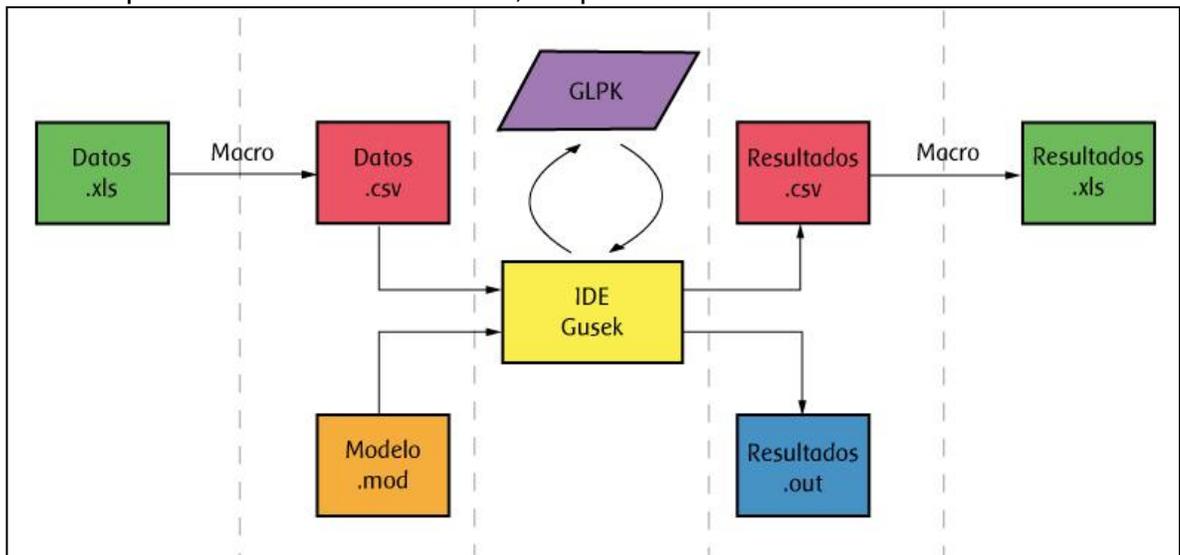
---

<sup>61</sup> Variación del lenguaje AMPL

<sup>62</sup> Entorno de programación que ha sido empaquetado como un programa de aplicación, es decir, consiste en un editor de código, un compilador, un depurador y un constructor de interfaz gráfica.

secuenciación de la producción tomará para realizar los respectivos análisis (ver anexo I). Los resultados del modelo serán puestos a disposición del usuario en archivos formatos .csv, es entonces cuando el usuario debe abrir la tabla SecuenciaProd y ejecutar la macro que convertirá estos archivos en formatos .xls (ver anexo J) para facilitar su interpretación.

**Figura 21.** Proceso de ejecución de modelo para la planificación de la producción en la empresa Grace Colombia S.A., Etapa 1 del modelo heurístico



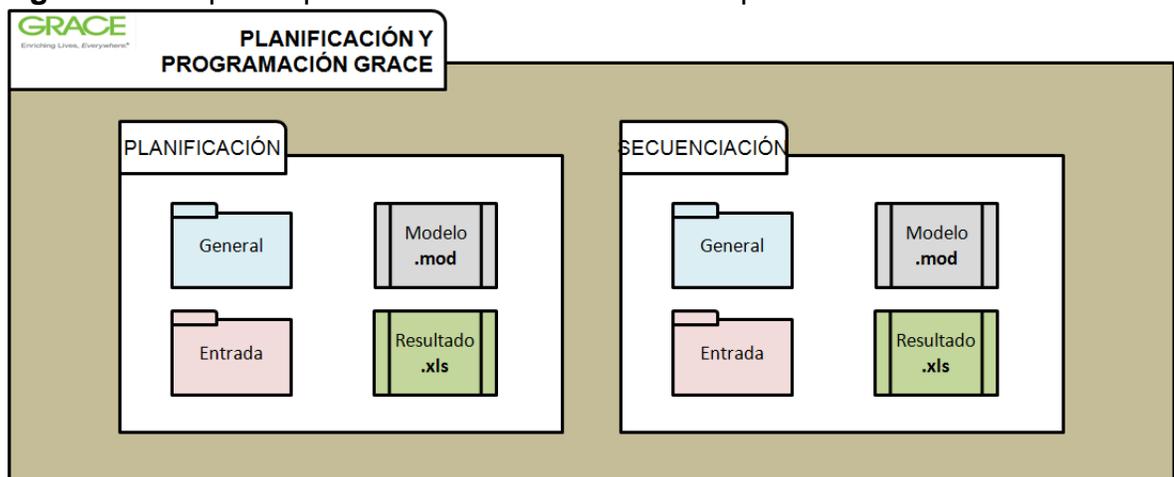
Fuente: Autores del trabajo.

La ventaja de este sistema es que el usuario no necesita tener conocimientos previos acerca de programación computacional, ni verse involucrado en la generación de un nuevo código que permita identificar nuevos recursos, o productos o periodos, simplemente ingresando las variaciones en el archivo .xls de datos de entrada, el modelo es capaz de asumir los cambios.

### 4.3. ORGANIZACIÓN, DESCRIPCIÓN Y VISUALIZACIÓN DE TABLAS

Para una mejor organización de los datos y tener una clara idea del comportamiento y de qué manera influyen los datos dentro del modelo, cada fase del desarrollo del trabajo tendrá una carpeta individual, la cual tendrá en un archivo el respectivo acceso directo del modelo .mod, un archivo .xls para compilar los resultados generados por el modelo y dos subcarpetas: general y entrada. En la subcarpeta de Entrada se encuentran accesos directos de los archivos que se constituyen como datos y que el modelo toma como información para su análisis; En la subcarpeta General es donde se encuentran todos los archivos originales.

**Figura 22.** Esquema presentación de modelo en carpetas



Fuente: Autores del trabajo

Los nombres de los productos son nombrados como letra para que puedan ser variados con facilidad por el usuario según cada caso específico.

### 4.3.1. Primera Fase

#### 4.3.1.1. Tablas de entrada

Las tablas mostradas a continuación, son las utilizadas para alimentar el modelo que generara la planificación de la producción. Estas se encuentran en formato .CVS:

- **Periodos:** En esta tabla el usuario deberá ingresar el horizonte de planificación, colocando la capacidad en **horas** que se tiene por periodo.

**Tabla 10.** Tabla periodo, ejemplo de ingreso de datos

periodo	capacidad
1	16
2	16
3	16
4	16
5	16

Fuente: Autores del trabajo

- **Productos:** En esta tabla el usuario deberá colocar la totalidad de los productos a fabricar, junto con la capacidad en **horas** consumida durante la fabricación de éste, el costo de mantener en inventario una unidad de cada producto en **pesos** sin puntos o comas, el inventario inicial del producto en **toneladas**, por último, el tiempo (horas) y el costo de alistar (pesos) desde cualquier producto hacia ese (ver tabla 8 y 9), la capacidad consumida y el tiempo de alistamiento está dado en horas.

**Tabla 11.** Tabla productos, ejemplo de ingreso de datos

producto	cap_consumida	costo_inv	inv_inicial	SupT	SupC
A	1.0	5000	0	0.8	160000
B	1.2	5000	0	0.4	80000
C	0.8	5000	12	0.0	0
D	1.1	5000	0	0.5	100000
E	0.8	5000	0	1.0	200000
F	0.8	5000	0	0.0	0
G	0.7	5000	8	0.8	160000
H	0.93	5000	0	0.0	0
I	1.2	5000	0	1.2	240000

Fuente: Autores del trabajo

- **Reactores:** En esta tabla, el usuario colocará los recursos (reactores) que tiene disponible para la fabricación de los productos, junto con la capacidad máxima de producción en toneladas de cada uno, si en determinado caso la organización adquiere un tercer reactor, lo ingresa en la lista y el modelo asumirá los cambios debido a su constitución.

**Tabla 12.** Tabla reactores, ejemplo de ingreso de datos

reactor	máximo
reactor1	5
reactor2	5

Fuente: Autores del trabajo

- **Demanda:** El usuario deberá colocar una relación entre los distintos productos fabricados, los periodos planificados y la fecha (período) en la cual se debe entregar el pedido, la demanda está dada en **toneladas**.

**Tabla 13.** Tabla demanda, ejemplo de ingreso de datos

producto	periodo	demanda
A	1	0
A	2	0
B	1	0
B	2	8
C	1	0
C	2	0
D	1	0
D	2	0
E	1	4
E	2	0

Fuente: Autores del trabajo

#### 4.3.1.2. Tablas de salida

Las tablas nombradas a continuación, son las tablas resultantes de la ejecución del modelo, después de haber analizado los datos suministrados anteriormente. Estos son mostrados al usuario a través de un archivo .xls previa ejecución de la macro para convertir los resultados desde el archivo .csv generado por el modelo. Las tablas son las siguientes:

- **Alista:** En esta tabla, el usuario podrá identificar en que reactor y en cual periodo se va a fabricar determinado producto.

**Tabla 14.** Tabla alistamiento, ejemplo de salida de datos

Producto	period	reactor	alista
H	3	reactor1	Producir
H	4	reactor1	Producir
C	5	reactor1	Producir
F	5	reactor1	Producir
H	2	reactor2	Producir
H	3	reactor2	Producir
H	4	reactor2	Producir
G	5	reactor2	Producir
A	1	reactor1	No producir

Fuente: Autores del trabajo

- **Inventario:** El usuario encontrará en esta tabla, la cantidad de material en toneladas por periodo que el modelo calcula, se tendrá en inventario por producto. Mostrando inventario total por periodo y por producto.

**Tabla 15.** Tabla inventario, ejemplo de salida de datos

Suma de invent										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	23	0	0	0	0	0	0	45	0	68
3	0	0	0	0	0	0	0	95	0	95
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total general</b>	23	0	0	0	0	0	0	140	0	163

Fuente: Autores del trabajo

- **Producción:** Esta tabla le dice al usuario en que reactor se va a realizar la fabricación de determinado producto, en que periodo debe realizarse y el número de ciclos o veces que el reactor debe ser utilizado al máximo de su capacidad para cumplir con la demanda, se debe tomar la parte entera como

el número de ciclos que se realizarán con la capacidad completa de los reactores y la parte decimal será el porcentaje de utilización de la capacidad para realizar el último ciclo de producción. La tabla muestra también el total de ciclos que se van a realizar en cada reactor, en cada periodo y por cada producto.

**Tabla 16.** Tabla producción, ejemplo de salida de datos

Suma de lote										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
<b>reactor1</b>	0	0	0,5	0	0,275	3,75	0	11,5	0	16,025
<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	2,8	0	2,8
<b>2</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,2	0	4,2
<b>3</b>	0	0	0,5	0	0,275	3,75	0	0	0	4,525
<b>reactor2</b>	0	0	0	0	0	0	5	12,55	0	17,55
<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,18	0	4,18
<b>2</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,18	0	4,18
<b>3</b>	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5
<b>Total general</b>	0	0	0,5	0	0,275	3,75	5	24,05	0	33,575

Fuente: Autores del trabajo

### 4.3.2. Segunda Fase

Esta fase del trabajo es utilizada únicamente cuando en la tabla de producción generada en la primera fase, muestra que en determinado periodo se va a fabricar dos o más productos de diferentes referencias y es ejecutada por periodo.

#### 4.3.2.1. Tablas de entrada

Las tablas mostradas a continuación, son las utilizadas para alimentar el modelo que generará la secuenciación de la producción. Éstas se encuentran en formato .cvs:

- **Alistamiento:** Acorde a la información de los productos que se van a secuenciar durante el periodo, en esta tabla el usuario debe ingresar las distintas combinaciones de un producto a otro que se pueden generar, con su respectivo tiempo de alistamiento. La primera columna se encuentra el producto del que se parte y en la segunda hacia el que se pasa y en la tercera el tiempo promedio de duración del ese alistamiento. Para esta información, el usuario puede apoyarse de la tabla utilizada en la primera fase.

**Tabla 17.** Tabla alistamiento, ejemplo de ingreso de datos

delProd	alProd	tiempo_alist
A	C	0.5
B	D	0.35
A	E	0.5
F	F	0

Fuente: Autores del trabajo

- **Productfab:** En esta tabla el usuario debe ingresar la información de la producción de cada uno de los productos que serán secuenciados en determinado periodo para determinado reactor. La información proTime, es el tiempo de procesamiento del trabajo o tiempo de fabricación del producto, es calculado al multiplicar el número de ciclos que se van a ejecutar por la capacidad del reactor utilizado para la fabricación y este resultado es multiplicado por el tiempo de fabricación de una unidad de ese producto.

**Tabla 18.** Tabla productfab, ejemplo de ingreso de datos

productos	proTime	releaseTime	delivTime
D	6,16	0	16
H	9,11	0	16

Fuente: Autores del trabajo.

#### 4.3.2.2. Tablas de salida

A continuación se muestra un ejemplo de la tabla resultante de la ejecución del modelo, después de haber analizado los datos suministrados anteriormente. Los resultados son mostrados mediante un archivo con formato .csv y a través de una macro son convertidos a un archivo .xls.

- **SecuenciaProd:** Esta tabla muestra al usuario la secuencia en la cual deben ser fabricados los productos en el periodo estudiado durante la fase II, para optimizar los tiempos de alistamiento. Además, muestra un estimado del tiempo de inicio y finalización en la fabricación de los distintos productos.

**Tabla 19.** Tabla SecuenciaProd, ejemplo de salida de datos

producto	initialTime	finalTime
H	0	9.11
D	9.36	15.52

Fuente: Autores del trabajo

## 5. APLICACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

### 5.1. INDICADORES DE DESEMPEÑO

En cada uno de los casos se realizará la comparación entre el método actual y la aplicación del modelo heurístico, empleando los siguientes indicadores de desempeño (KPI's)<sup>63</sup>:

- **COT:** Este indicador es la evaluación de la función objetivo, es el resultado de sumar los productos del costo de mantener en inventario por el total de unidades que permanecen en inventarios, más la sumatoria de los costos de alistamiento si la operación es desarrollada. Permite evaluar si se obtiene una reducción financiera respecto a los alistamientos o al tamaño del lote, mientras menor sea el indicador, es mejor para la organización. Esto se evidencia mediante la siguiente formulación matemática:

$$\sum_{j \in J} \sum_{t \in T} h_{jt} \cdot I_{jt} + \sum_{j \in J} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} sc_j Y_{jrt}$$

- **PUR:** Este indicador permite evaluar la fracción del tiempo en la que los recursos están siendo utilizados, sea produciendo o realizando una operación de alistamiento. Relaciona la sumatoria de las unidades a producir por la capacidad consumida para la producción de esas unidades, dividido entre la capacidad en tiempo total disponible durante el desarrollo de la producción. Puede ser visualizado matemáticamente a través de la siguiente fórmula:

$$\frac{\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} X_{jrt} \cdot a_j + st_j \cdot Y_{jrt}}{\sum_{t \in T} C_t}$$

<sup>63</sup> Key Performance Indicator: Métricas financieras o no financieras, utilizadas para cuantificar objetivos que reflejan el rendimiento de la organización.

- **PCA:** Con este indicador es posible identificar la fracción de tiempo empleado en operaciones de alistamiento, es calculado mediante la relación entre la sumatoria del tiempo de alistamiento sobre la capacidad en tiempo total disponible durante el desarrollo de la producción, Mientras menor sea el indicador es mejor para organización. La siguiente fórmula matemática permite observar lo expuesto:

$$\sum_{t \in T} \frac{\sum_{j \in J} \sum_{r \in R} st_j \cdot Y_{jrt}}{C_t}$$

## 5.2. CASOS COMPARATIVOS

Para el estudio de los casos, las variables utilizadas para la construcción del modelo, el análisis de los resultados y la comparación entre la metodología actual y la metodología propuesta en este trabajo, se tomarán en consideración los siguientes supuestos:

- La entrega del pedido se hace al final del horizonte de planificación, en el periodo 5
- Al comienzo del ejercicio, los reactores se encuentran disponibles para la fabricación de cualquier producto, sin necesidad de realizar alistamiento de éste
- Los reactores pueden trabajar en paralelo o no.
- Los costos de mantener en inventario son fijos y fueron suministrados por la empresa, según cálculos realizados por la gerencia
- Los costos de alistamiento de los reactores para pasar de un producto  $i$  a un producto  $j$ , son distintos a pasar de un producto  $j$  a un producto  $i$ , y estos fueron suministrados por la empresa, según cálculos realizados por la gerencia

### 5.3. PRIMER CASO

En el primer caso de estudio, se presentó la fabricación de cuatro productos, haciendo uso de los recursos en paralelo, durante cinco periodos. Los datos fueron escogidos mediante la selección de una de las semanas en la cual según su criterio, los datos obedecían a una producción representativa.

La demanda en toneladas definida por producto para este caso se muestra a continuación, para efectos de procesamiento de datos, los nombres de los productos serán remplazados por letras para una comparación más sencilla:

**Tabla 20.** Demanda de productos, Caso 1

PRODUCTO	LETRA ASIGNADA	DEMANDA (MT)
DARACEM 19	A	7,2
MIRA 94	D	19,2
TDA 1100	F	32
TDA J	H	60

Fuente: Información suministrada por la empresa.

En la tabla mostrada a continuación se puede apreciar la secuenciación de la producción y los tamaños de lote utilizados por la empresa para el cumplimiento de la demanda. Los datos ingresados en esta tabla fueron suministrados por la empresa,

**Tabla 21.** Semana de producción método actual, Caso 1

PERIODO	ORDEN	MATERIAL	TOTAL (MT)	OBSERVACIONES
1	1	A	3,6	Reactor 1
2	1	H	15	Reactor 1
2	2	D	4,8	Reactor 1
3	1	D	4,8	Reactor 1
4	1	H	15	Reactor 1
5	1	F	16	Reactor 1
1	1	A	3,6	Reactor 2
2	1	H	15	Reactor 2
2	2	D	4,8	Reactor 2
3	1	D	4,8	Reactor 2
4	1	H	15	Reactor 2
5	1	F	16	Reactor 2

Fuente: Información suministrada por la empresa.

A partir de esta información, se genera la siguiente tabla, que contiene la cantidad de producto en tonelada que permanece en inventario durante un periodo determinado.

**Tabla 22.** Inventario de productos método actual, Caso 1

Suma de invent	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
1	7,2	0	0	0	0	0	0	0	0	7,2
2	7,2	0	0	9,6	0	0	0	30	0	46,8
3	7,2	0	0	19,2	0	0	0	30	0	56,4
4	7,2	0	0	19,2	0	0	0	60	0	86,4
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total general</b>	<b>28,8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>48</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>120</b>	<b>0</b>	<b>196,8</b>

Fuente: Autores del trabajo

Partiendo de la información observada en las tablas anteriores, se realizan los cálculos de los KPI's:

**COT:** Los costos incurridos por operaciones de alistamiento y por mantener unidades en inventario por determinado tiempo ascienden a \$ 1.584.000.

**PUR (reactor 1):** El reactor 1 está siendo utilizado el 75,14% del tiempo disponible para la producción de los aditivos químicos, este tiempo es empleado tanto en el proceso de mezclado como en las operaciones de alistamiento.

**PUR (reactor 2):** Al igual que el reactor 1, el reactor 2 es utilizado del 75,14% del tiempo.

Así se puede decir que ambos reactores están siendo utilizados en la misma proporción para la fabricación de los productos.

**PCA (reactor 1):** Del total del tiempo disponible para la producción, un 1,87% es dedicado al alistamiento para la fabricación de algún producto en el reactor 1.

**PCA (reactor 2):** Así de la misma manera el 1,87% del tiempo disponible para la producción está siendo empleado en el alistamiento del reactor 2 para la producción de un producto determinado.

### 5.3.1. Aplicación del modelo de programación matemática

#### 5.3.1.1. Fase I

- **Estadísticas:**

Restricciones: 146

Variables: 225 (90 enteras, 90 binarias)

Estado: INTEGER OPTIMAL

En la siguiente tabla se puede observar que los productos serán fabricados a partir del segundo periodo para disminuir la cantidad de materiales que se mantienen en inventario por periodo y por consiguiente los costos asociados a éste. Para el reactor 1, fueron realizadas cinco operaciones de alistamiento, mientras que para el reactor 2 se generaron cuatro operaciones.

**Tabla 23.** Productos a fabricar, Caso 1

Producto	period	reactor	alista
A	2	reactor1	1
D	3	reactor1	1
H	3	reactor1	1
H	4	reactor1	1
H	5	reactor1	1
F	2	reactor2	1
D	3	reactor2	1
H	4	reactor2	1
F	5	reactor2	1

Fuente: Ejecución del modelo

Los datos sobre la cantidad de unidades en toneladas que permanecen en inventario durante cierto periodo, se muestran en la siguiente tabla que es generada al ejecutar el solver.

**Tabla 24.** Inventario de productos aplicación de modelo, Caso 1

Suma de invent	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	7,2	0	0	0	0	12,5089	0	0	0	19,7089
3	7,2	0	0	19,2	0	12,5089	0	9,7849	0	48,6938
4	7,2	0	0	19,2	0	12,5089	0	43,2616	0	82,1705
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total general</b>	<b>21,6</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>38,4</b>	<b>0</b>	<b>37,5267</b>	<b>0</b>	<b>53,0465</b>	<b>0</b>	<b>150,573</b>

Fuente: Ejecución del modelo

En la siguiente tabla se puede observar según la producción por período, cuantos ciclos debe usarse cada reactor para cumplir con la demanda establecida. Tal como se muestra en general el reactor 1 debe cumplir con 14 ciclos completos y uno parcial, mientras que en el reactor 2 se llevan a cabo 15 ciclos y uno parcial.

**Tabla 25.** Ciclos de fabricación, Caso 1

Suma de lote										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
<b>reactor1</b>	1,8	0	0	1,4015	0	0	0	10,8154	0	14,0169
<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2</b>	1,8	0	0	0	0	0	0	0	0	1,8
<b>3</b>	0	0	0	1,4015	0	0	0	2,4462	0	3,8478
<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
<b>5</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
<b>reactor2</b>	0	0	0	3,3985	0	8	0	4,1846	0	15,5831
<b>1</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>2</b>	0	0	0	0	0	3,1272	0	0	0	3,1272
<b>3</b>	0	0	0	3,3985	0	0	0	0	0	3,3985
<b>4</b>	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
<b>5</b>	0	0	0	0	0	4,8728	0	0	0	4,8728
<b>Total general</b>	<b>1,8</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>4,8</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>15</b>	<b>0</b>	<b>29,6</b>

Fuente: Ejecución del modelo

### 5.3.1.2. Fase II

Al observar la Tabla 25. Ciclos de fabricación, Caso 1, se puede apreciar que en el reactor 1, durante el periodo 3 son fabricados dos o más productos, lo que conlleva a utilizar el modelo de programación matemática para realizar la secuenciación de la producción.

Los resultados obtenidos de la ejecución del modelo son los siguientes:

Restricciones: 13

Variables: 8 (2 enteros, 2 binarios)

Estado: INTEGER OPTIMAL

Objetivo: FO = 0.25 (MINimum)

**Tabla 26.** Secuenciación de la producción, Reactor 1, Periodo 3, Caso 1

producto	initialTime	finalTime
H	0	9,09
D	9,34	15,5

Fuente: Ejecución del modelo

Dada la información contenida en la tabla 25 acerca de los ciclos de fabricación y el establecimiento de las secuenciaciones requeridas para la fabricación de determinados productos y de la fecha de inicio y fin de dicho proceso, tal como se observa en la tabla 26. Se genera la siguiente tabla donde se realiza la secuenciación de la producción dependiendo de los tiempos de alistamiento:

**Tabla 27.** Semana de producción implementación de modelo, Caso 1  
**PERIODO ORDEN MATERIAL TOTAL (MT) OBSERVACIONES**

2	1	A	7,2	Reactor 1
3	1	H	9,9	Reactor 1
3	2	D	5,6	Reactor 1
4	1	H	16,7	Reactor 1
5	1	H	16,7	Reactor 1
2	1	F	12,5	Reactor 2
3	1	D	13,6	Reactor 2
4	1	H	16,7	Reactor 2
5	1	F	19,5	Reactor 2

Fuente: Ejecución del modelo

Tomando como base la información presentada en las tablas anteriores, se realizan los cálculos de los KPI's:

**COT:** En los costos incurridos por operaciones de alistamiento y por mantener unidades en inventario por determinado tiempo, son iguales a \$ 1.152.865.

**PUR (reactor 1):** El 73,89% del tiempo disponible para la producción en el reactor 1, está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación.

**PUR (reactor 2):** En este caso, el 75,44% del tiempo disponible para la producción en el reactor 2, está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación.

**PCA (reactor 1):** El 1,56% del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 1.

**PCA (reactor 2):** Del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, un 0,9%, está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 2

### 5.3.2. Comparación de métodos

La comparación de la información obtenida en el caso de estudio y la implementación del modelo brinda la oportunidad de analizar la manera en que se diferencian ambas prácticas proporcionando un panorama del desempeño de las metodologías empleada. A continuación se realiza la comparación entre el caso de estudio 1 según se desarrolló en la empresa y la simulación del caso generada por el modelo.

**Tabla 28.** Comparación de métodos, Caso 1

KPI	MÉTODO ACTUAL	APLICACIÓN MODELO
COT	\$ 1.584.000	\$ 1.152.865
PUR (REACTOR 1)	75,14%	73,89%
PUR (REACTOR 2)	75,14%	75,44%
PCA (REACTOR 1)	1,87%	1,56%
PCA (REACTOR 2)	1,87%	0,90%

Fuente: Autores del trabajo

Como se puede observar en la tabla 28 el valor de la función objetivo según la metodología que emplea la empresa actualmente se ve disminuido en \$ 431.135 al aplicar el modelo de programación, lo cual demuestra el cumplimiento del objetivo de la minimización de tiempos y costos que influyen en el proceso productivo. Así también se puede evidenciar que del tiempo disponible para la producción en el reactor 1 en el cual está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación disminuyó en un 1,66%. Por otra parte el porcentaje del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace en que los reactores están siendo utilizados para operaciones de alistamiento tiene un valor superior en la metodología actual, mostrando así la reducción del tiempo empleado en alistamientos al utilizar el modelo heurístico.

#### 5.4. SEGUNDO CASO

En el segundo caso de estudio, se presentó la fabricación de cinco productos, haciendo uso de ambos recursos, durante cinco periodos, la estrategia utilizada por la empresa fue parecida a la expuesta en el caso anterior, es decir, se utilizaron ambos reactores durante cada periodo para la fabricación de un solo producto y el cambio entre producto y producto lo realizaban de un periodo a otro.

La demanda en toneladas definida por producto para este caso se muestra a continuación, para efectos de procesamiento de datos, los nombres de los productos serán remplazados por letras para una comparación más sencilla:

**Tabla 29.** Demanda de productos, Caso 2

PRODUCTO	LETRA ASIGNADA	DEMANDA (MT)
HEA 211	C	2
RECOVER	E	1,1
TDA 1100	F	15
TDA 7350	G	20
TDA J	H	95

Fuente: Información suministrada por la empresa

La secuenciación de la producción y los tamaños de lote utilizados por la empresa para el cumplimiento de la demanda, pueden ser observados en la siguiente tabla. La información ingresada en esta tabla fue suministrada por la empresa.

**Tabla 30.** Semana de producción método actual, Caso 2

PERIODO	ORDEN	MATERIAL	TOTAL (MT)	OBSERVACIONES
1	1	F	7,5	Reactor 1
1	2	H	7,5	Reactor 1
2	1	H	15	Reactor 1
2	2	C	2	Reactor 1
3	1	G	10	Reactor 1
4	1	H	15	Reactor 1
5	1	H	10	Reactor 1
1	1	F	7,5	Reactor 2
1	2	H	7,5	Reactor 2
2	1	H	15	Reactor 2
2	2	E	1,1	Reactor 2
3	1	G	10	Reactor 2
4	1	H	15	Reactor 2
5	1	H	10	Reactor 2

Fuente: Información suministrada por la empresa.

A continuación se puede apreciar las unidades que permanecieron en inventario por periodo, tras ejecutar el plan de producción generado por la empresa durante esta semana de producción.

**Tabla 31.** Inventario de productos método actual, Caso 2

Suma de invent										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
1	0	0	0	0	0	15	0	15	0	30
2	0	0	2	0	1,1	0	0	45	0	48,1
3	0	0	2	0	1,1	0	20	45	0	68,1
4	0	0	2	0	1,1	0	20	75	0	98,1
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total general</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>0</b>	<b>3,3</b>	<b>15</b>	<b>40</b>	<b>180</b>	<b>0</b>	<b>244</b>

Fuente: Autores del trabajo

Tomando en cuenta la información presente en las tablas anteriores, se procede con el cálculo de los KPI:

**COT:** En los costos incurridos por operaciones de alistamiento y por mantener unidades en inventario por determinado tiempo, ascendieron a \$ 1.441.500.

**PUR (reactor 1):** De la capacidad en tiempo disponible para la fabricación en el reactor 1, el 74,09% es utilizado en operaciones de fabricación y alistamiento.

**PUR (reactor 2):** En el caso del reactor 2, el 73,31% del tiempo disponible para la producción, está siendo utilizado en operaciones de fabricación y alistamiento.

**PCA (reactor 1):** EL 0,6% del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 1.

**PCA (reactor 2):** Del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, un 0,75% está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 2

#### 5.4.1. Aplicación del modelo de programación matemática

##### 5.4.1.1. Fase I

- **Estadísticas:**

Restricciones: 146

Variables: 225 (90 enteras, 90 binarias)

Estado: INTEGER OPTIMAL

Al igual que en el primer caso, el modelo de programación sugiere que la fabricación de los distintos productos programados para cumplir con la demanda, se inicie en el segundo periodo como se muestra en la siguiente tabla. Para el reactor 1, fueron realizadas seis operaciones de alistamiento, mientras que para el reactor 2 se generaron cuatro operaciones.

**Tabla 32.** Productos a fabricar, Caso 2

Producto	period	reactor	alista
H	2	reactor1	1
H	3	reactor1	1
H	4	reactor1	1
C	5	reactor1	1
E	5	reactor1	1
F	5	reactor1	1
H	2	reactor2	1
H	3	reactor2	1
H	4	reactor2	1
G	5	reactor2	1

Fuente: Ejecución del modelo

Los datos sobre la cantidad de unidades en toneladas que permanecen en inventario durante cierto periodo, es mostrado en la siguiente tabla y se obtiene de la ejecución del modelo en el solver.

**Tabla 33.** Inventario de productos aplicación de modelo, Caso 1

Suma de invent										
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	28,0465	0	28,0465
3	0	0	0	0	0	0	0	61,5232	0	61,5232
4	0	0	0	0	0	0	0	95	0	95
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total general</b>	<b>0</b>	<b>184,5698</b>	<b>0</b>	<b>184,5698</b>						

Fuente: Ejecución del modelo

En la siguiente tabla se puede observar según la producción por periodo, cuantos ciclos debe ser usado cada reactor para cumplir con la demanda establecida. Tal como se muestra en general el reactor 1 debe cumplir con 15 ciclos completos y uno parcial, mientras que en el reactor 2 se llevan a cabo 17 ciclos y uno parcial.

**Tabla 34.** Ciclos de fabricación, Caso 2

Suma de lote	A	B	C	D	E	F	G	H	I	Total general
<b>reactor1</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>0,275</b>	<b>3,75</b>	<b>0</b>	<b>11,1962</b>	<b>0</b>	<b>15,7212</b>
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	2,8271	0	2,8271
3	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
4	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
5	0	0	0,5	0	0,275	3,75	0	0	0	4,525
<b>reactor2</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>12,5538</b>	<b>0</b>	<b>17,5538</b>
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
3	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
4	0	0	0	0	0	0	0	4,1846	0	4,1846
5	0	0	0	0	0	0	5	0	0	5
<b>Total general</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0,5</b>	<b>0</b>	<b>0,275</b>	<b>3,75</b>	<b>5</b>	<b>23,75</b>	<b>0</b>	<b>33,275</b>

Fuente: Ejecución del modelo

#### 5.4.1.2. Fase II

Al observar la tabla 34Tabla 34. **Ciclos de fabricación, Caso 2** se puede apreciar que en el reactor 1, durante el periodo 5 son fabricados dos o más productos, lo que conlleva a utilizar el modelo de programación matemática para realizar la secuenciación de la producción.

Los resultados obtenidos de la ejecución del modelo son los siguientes:

Restricciones: 28

Variables: 15 (6 enteras, 6 binarias)

Estado: INTEGER OPTIMAL

Objective: FO = 0.75 (MINimum)

**Tabla 35.** Secuenciación de la producción, Reactor 1, Periodo 3, Caso 2

producto	initialTime	finalTime
C	0	1,6
F	1,85	13,85
E	15,12	16

Fuente: Ejecución del modelo

Dada la información contenida en la tabla 34 acerca de los ciclos de fabricación y el establecimiento de las secuenciaciones requeridas para la fabricación de determinados productos, de la fecha de inicio y la fecha de finalización de dicho proceso, tal como se observa en la tabla 35. Se genera la siguiente tabla donde se realiza la secuenciación de la producción dependiendo de los tiempos de alistamiento:

**Tabla 36.** Semana de producción implementación de modelo, Caso 2

PERIODO	ORDEN	MATERIAL	TOTAL (MT)	OBSERVACIONES
2	1	H	11,5	Reactor 1
3	1	H	16,7	Reactor 1
4	1	H	16,7	Reactor 1
5	1	C	2	Reactor 1
5	2	F	15	Reactor 1
5	3	E	1,1	Reactor 1
2	1	H	16,7	Reactor 2
3	1	H	16,7	Reactor 2
4	1	H	16,7	Reactor 2
5	1	G	20	Reactor 2

Fuente: Ejecución del modelo

Tomando como base la información presentada en las tablas anteriores, se realizan los cálculos de los KPI

**COT:** En los costos incurridos por operaciones de alistamiento y por mantener unidades en inventario por determinado tiempo, es igual a \$ 1.122.849

**PUR (reactor 1):** El 71,23% del tiempo disponible para la producción en el reactor 1, está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación.

**PUR (reactor 2):** En este caso, el 76,05% del tiempo disponible para la producción en el reactor 2, está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación.

**PCA (reactor 1):** El 0,93% del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 1.

**PCA (reactor 2):** Del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace, un 0,31%, está siendo utilizado para operaciones de alistamiento en el reactor 2.

#### 5.4.2. Comparación de métodos

A continuación se realiza la comparación entre el caso de estudio 2 según se desarrolló en la empresa y la simulación del caso generada por el modelo. En la tabla se proporciona la información necesaria para realizar la comparación entre el desempeño obtenido al emplear una metodología y otra.

**Tabla 37.** Comparación de métodos, Caso 2

KPI	MÉTODO ACTUAL	APLICACIÓN MODELO
COT	\$ 1.441.500	\$ 1.122.849
PUR (REACTOR 1)	74,09%	71,23%
PUR (REACTOR 2)	73,31%	76,05%
PCA (REACTOR 1)	0,6%	0,93%
PCA (REACTOR 2)	0,75%	0,31%

Fuente: Autores del trabajo

Como se puede observar en la tabla 37 el valor de la función objetivo según la metodología que emplea la empresa actualmente se ve disminuido en \$ 318.651 aplicar el modelo de programación, lo cual demuestra el cumplimiento del objetivo de la minimización de tiempos y costos que influyen en el proceso productivo. Así también se puede evidenciar que del tiempo disponible para la producción en el reactor 1 en el cual está siendo utilizado en operaciones de alistamiento y de fabricación disminuyó en un 3.86%. Por otra parte el porcentaje del tiempo disponible para la producción de los distintos aditivos fabricados por Grace en que el reactor 2 está siendo utilizado para operaciones de alistamiento tiene un valor superior en la metodología actual, mostrando así la reducción del tiempo empleado en alistamientos al utilizar el modelo heurístico.

## 6. CONCLUSIONES

A través de desarrollo del trabajo realizado en la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA. se logró establecer y analizar cómo se realiza el proceso de planificación y programación de la producción en la empresa, identificando distintas problemáticas que se presentaban a la hora de realizar estos procesos.

Para dar solución a dichos problemas, fue propuesto un modelo heurístico de programación matemática. Donde se dividió el proceso en dos fases, una primera fase que permitiera generar la planificación de la producción y una segunda fase para concebir la secuenciación en aquellos periodos donde se fabrican dos o más productos de diferentes características químicas por reactor.

En cuanto a la caracterización de los parámetros y variables que influyen en la fabricación de los distintos productos y que fueron utilizados para la construcción del modelo. Se logró identificar con la ayuda de diagramas utilizados para el estudio del método, que en el proceso de producción existen múltiples productos, múltiples recursos y múltiples periodos, que éstos interactúan entre sí en un proceso de fabricación relativamente sencillo, pero que se vuelve complejo a la hora de realizar la planificación y la programación de la producción. Incurriendo en distintos tiempos y costos que determinan el comportamiento de las variables y la solución del problema.

Mediante la comparación de la implementación del modelo con el método que se estaba utilizando, se observó una mejora significativa en los costos asociados al proceso de fabricación, como lo son los costos de alistamiento y los costos de mantener en inventario unidades de los distintos productos. También se observó

una optimización de los tiempos de alistamiento y por ende, el tiempo total de fabricación de los distintos productos. Validando así que el modelo propuesto representa una herramienta útil a la hora de realizar la planificación y la programación de la producción en la empresa.

## 7. RECOMENDACIONES

Luego de realizado el presente estudio, los autores se permiten recomendar a la empresa:

- Ejecutar el modelo desarrollado para los períodos del horizonte de planeación que se quieran evaluar, ello con el fin de emplearlo como una herramienta de importancia para los procesos de planificación y programación de las operaciones, que disminuir los costos asociados a la producción.
- Cambiar el horizonte de planeación establecido según los criterios de conveniencia de la empresa y de sus procedimientos.
- Emplear letras en asignación a los productos de la empresa en los datos de ingreso al modelo, dado que esto reduce el tiempo de procesamiento o depuración del solver.
- Adquirir un software solucionador de mayor capacidad para el procesamiento de los datos y emplear un ordenador con características similares a las del empleado para la corrida de los modelos.
- Al recopilar los suficientes datos representativos de la demanda de sus productos, la empresa puede realizar un estudio del su comportamiento para determinar el modelo que mejor se adapte a ella y le permita generar pronósticos confiables que logren constituirse en información relevante para la toma de decisiones gerenciales.

- Para futuros estudios se recomienda realizar un estudio de los costos asociados a la producción, esto de acuerdo a los cambios en las prácticas, la infraestructura y el aumento de la experiencia del talento humano.
- Por otra parte se recomiendan estudios referentes a la gestión de la cadena de suministros, productividad y marketing para complementar lo estudiado en este proyecto.

## BIBLIOGRAFÍA

- CHASE, Richard; AQUILANO, Nicholas; JACOBS, Robert. Administración de Producción y Operaciones: Manufactura y Servicios. 8 ed. McGraw Hill Interamericana Editores S.A. 885 p. ISBN 958-41-0071-8.
- GAITHER Norman; FRAZIER Grey. Administración de Producción y Operaciones. Cuarta Edición. Thompson Editorial Soluciones empresariales. México 2000.
- GUPTA, Diwakar y MAGNUSSON, Thorkell. The capacitated lot-sizing and scheduling problem with sequence-dependent setup costs and setup times, En: Computers & Operations Research. Vol. 32, Issue 4, Abril 2005. p. 727–747.
- HEIZER, Jay; RENDER, Barry. Dirección de la producción y de operaciones: Decisiones estratégicas. 8 ed. Madrid: Pearson Education S.A, 2007. 616 p. ISBN 978-84-8322-360-4.
- HERNÁNDEZ, Roberto. Metodología de la investigación. 3 ed. México: McGraw Hill, 2003.
- Información suministrada por la empresa GRACE COLOMBIA S.A. PLANTA CARTAGENA.
- INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN, Trabajos escritos: presentación y referencias bibliográficas. Bogotá: ICONTEC, 2008. 23 p.:il (NTC 1486).
- NAHMNIAS, Steven. Análisis de la producción y las operaciones. 5 ed. México: McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V, 2007. 736 p. ISBN 007-286538-5.
- ORGANIZACIÓN INTERNACIONAL DEL TRABAJO, Introducción al estudio del trabajo. Editorial Limusa. 2005.
- REAL ACADEMIA DE LA LENGUA ESPAÑOLA. Diccionario de la lengua española. [En línea] <<http://buscon.rae.es/drae/>>.

- SIPPER, Daniel; BULFIN, Robert. y Control de la Producción. McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V. 657 p. ISBN 970-101944-X.
- SUERIE, Christopher. Time Continuity in Discrete Time Models: New Approaches for Production Planning in Process Industries, Springer, 1/06/2005 - 229 pág.

# ANEXOS

## Anexo A. Clientes Grace Construction S.A. planta Cartagena



GRACE CONSTRUCTION PRODUCTS  
GCP CARTAGENA PLANT



Cementos Argos Columbus  
Cementos Argos Plant in Cartagena  
Cementos Argos Planta Caribe



Cementos Argos Plant in Barranquilla



Cemex Barranquilla  
Cemex Concrete Plant in Barranquilla



Cementos Argos Tolviejo  
Cementos Argos Plant in Tolviejo



GRACE BOGOTA  
Grace Davison Bogotá



Cementos Argos Cairo  
Cementos Argos Plant in El Cairo Antioquia



Cementos Argos Rio Claro  
Cementos Argos Plant in Rio Claro Antioquia



Cementos Argos Yumbo  
Cementos Argos Plant in Yumbo Valle



Cementos Argos Sogamoso  
Cementos Argos Plant in Sogamoso Boyacá



Cementos Argos Sabanagrande  
Cementos Argos Plant in Sabanagrande Atlántico



Comercializadora Polamcom  
Planta concretera Comercializadora Ocaima



Cemex Caracolito  
Planta de Cemento Cemex Colombia S.A. (Caracolito)



Cemex Bucaramanga  
Planta de Cemento Cemex Colombia S.A. Planta Bucaramanga



Tremix S.A.  
Planta de Concreto Tremix Milenio



Tremix S.A.  
Planta de Concretos Tremix Tocancipá



Cemex Santa Rosa  
Planta de Cemento Cemex Colombia S.A - (Santa Rosa)

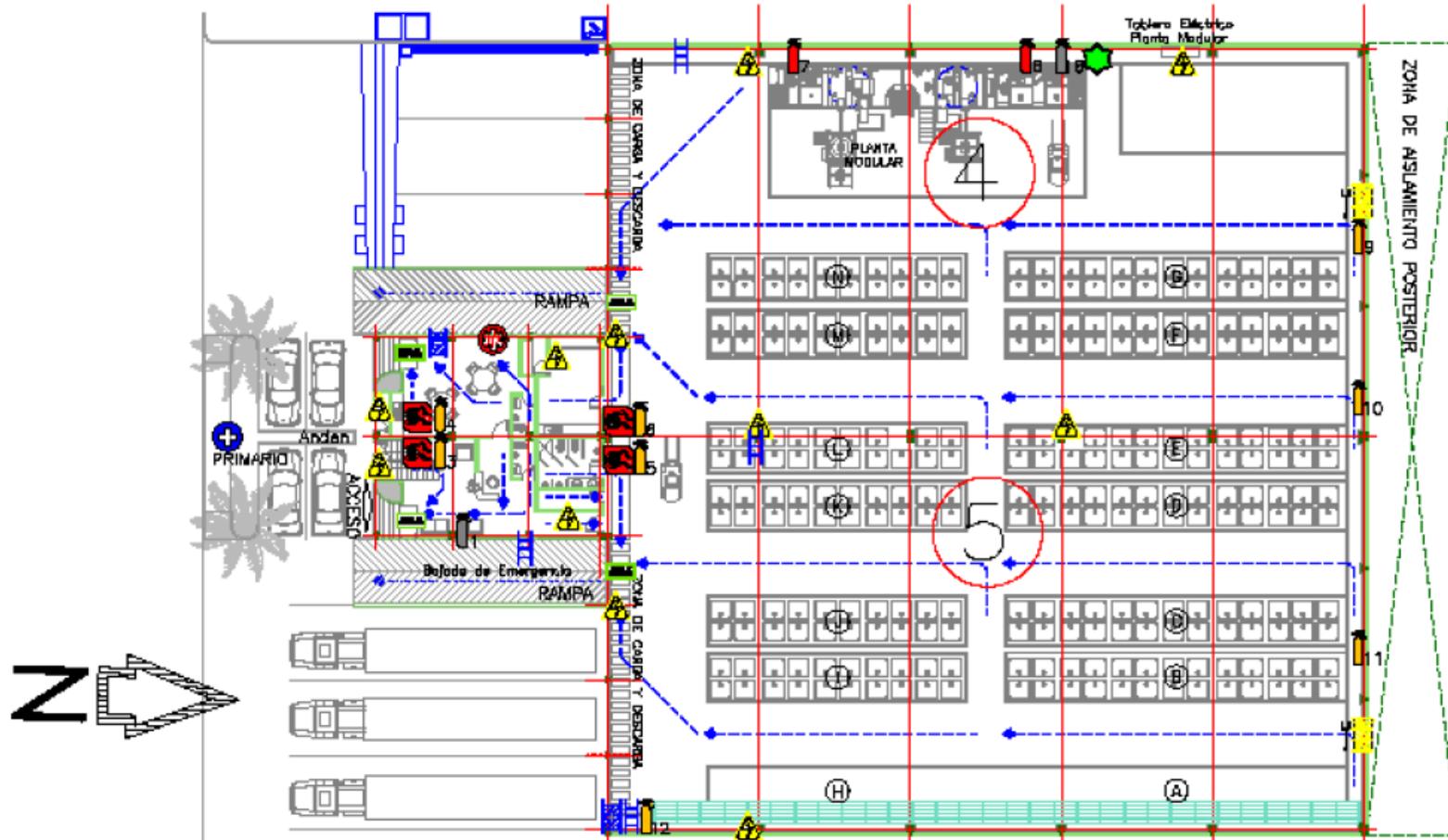


Josef's Concrete - San Adres  
Planta de concreto de Josef's Concrete Obra San Andres



-  Josefs Concrete - Campo Rubiales  
Planta de concreto Josef's Concrete - Obra Campo Rubiales
-  Tremix S.A. - Nereidas  
Planta de Concreto de Tremix - Nereidas
-  Tremix S.A. - Gaia  
Planta de concreto Tremix - Gaia
-  HV Ingenieria- Santa Marta  
HV Ingenieria - Planta de Concretos Argos Santa Marta
-  HV ing
-  HV Ingenieria-Soledad  
HV Ingenieria - Planta de Concretos Argos Soledad
-  HV Ingenieria  
HV Ingenieria - Planta de Cementos Argos Cartagena

Anexo B. Plano distribución de planta Grace Cartagena





Anexo C. Tabla de pronósticos y ventas, Enero – Septiembre 2012

Mes	Línea	Material	Código	Venta Proyectada	Venta realizada
Enero	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	3.123	4.164
	Concreto	DARACEM 100	86959	2.017	-
	Concreto	DARACEM 19	23629	11.500	3.025
	Concreto	DAREX AEA	941	1.041	3.123
	Concreto	DCI S TOTE	1075	15.000	11.450
	Cemento	HEA 211	85152	20.000	15.000
	Concreto	MIRA 94	86977	26.000	37.949
	Concreto	RECOVER	86960	4.560	2.280
	Cemento	TDA 1100	81652	52.000	67.000
	Cemento	TDA 7350	85930	20.000	-
	Cemento	TDA J	87445	413.000	162.100
	Concreto	WRDA 60	87767	11.800	20.400
<b>TOTAL</b>				580.040	326.490
Mes	Línea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Febrero	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	3.241	1.080
	Concreto	DARACEM 100	86959	2.400	6.000
	Concreto	DARACEM 19	23629	13.685	4.800,00
	Concreto	DAREX AEA	941	2.109	-
	Concreto	DCI S TOTE	1075	19.200	-
	Cemento	HEA 211	85152	22.000	15.000
	Concreto	MIRA 94	86977	32.760	27.600
	Concreto	RECOVER	86960	4.560	2.280
	Cemento	TDA 1100	81652	67.000	26.000
	Cemento	TDA 7350	85930	20.000	18.000
	Cemento	TDA J	87445	413.000	268.440
	Concreto	WRDA 60	87767	21.240	12.000
<b>TOTAL</b>				621.195	381.200
Mes	Línea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Marzo	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	3.120	6.495
	Concreto	DARACEM 100	86959	2.380	6.000
	Concreto	DARACEM 19	23629	13.685	6.000
	Concreto	DAREX AEA	941	2.020	2.103
	Concreto	DCI S TOTE	1075	19.200	14.656
	Cemento	HEA 211	72750	24000	24.000
	Concreto	MIRA 94	86977	33.040	43.200
	Concreto	RECOVER	86960	4.060	2.280
	Cemento	TDA 1100	81652	67.000	67.000
	Cemento	TDA 7350	85930	18.000	18.000
	Cemento	TDA J	87445	353.000	251.680
	Concreto	WRDA 60	87767	21.240	26.400
<b>TOTAL</b>				560.745	467.813



Mes	Linea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Abril	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	5.000	4.288
	Concreto	DARACEM 100	86959	-	-
	Concreto	DARACEM 19	23629	7.000	2.400
	Concreto	DAREX AEA	941	1.500	1.054
	Concreto	DCI S TOTE	1075	12.000	14.656
	Cemento	HEA 211	72705	24.000	9.000
	Concreto	MIRA 94	86977	40.000	39.600
	Concreto	RECOVER	86960	1.500	1.140
	Cemento	TDA 1100	81652	67.000	41.000
	Cemento	TDA 7350	85930	18.000	18.000
	Cemento	TDA J	87445	225.000	248.280
	Concreto	WRDA 60	87767	20.000	22.800
<b>TOTAL</b>				421.000	402.218
Mes	Linea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Mayo	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	7.000	4.288
	Concreto	DARACEM 100	86959	12.000	7.200
	Concreto	DARACEM 19	23629	7.000	2.400
	Concreto	DAREX AEA	941	1.500	2.109
	Concreto	DCI S TOTE	1075	12.000	5.329
	Cemento	HEA 211	72705	20.000	24.000
	Concreto	MIRA 94	86977	40.000	34.800
	Concreto	RECOVER	86960	4.500	1.140
	Cemento	TDA 1100	81652	142.000	26.000
	Cemento	TDA 7350	85930	18.000	18.000
	Cemento	TDA J	87445	135.000	233.820
	Concreto	WRDA 60	87767	25.000	19.200
<b>TOTAL</b>				424.000	378.286
Mes	Linea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Junio	Concreto	DARACEM 100	86959	6.000	10.800
	Concreto	RECOVER	86960	2.000	2.280
	Cemento	TDA 7350	85930	18.000	20.000
	Cemento	TDA J	87445	305.000	319.190
	Cemento	HEA 2 21	91875	12.000	12.000
	Concreto	DCI S TOTE	1075	13.000	11.991
	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	7.000	5.361
	Concreto	DARACEM 19	23629	5.000	3.600
	Concreto	WRDA 60	87767	34.000	24.000
	Cemento	TDA 1100	81652	67.000	45.000
	Concreto	DAREX AEA	941	2.000	1.054
	Cemento	HEA 211	72705	20.000	9.000
	Concreto	MIRA 94	86977	40.000	18.000
	Cemento	EXP 3(M)	91656	60.000	26.751
	Cemento	EXP 45	-	15.000	-
	Concreto	DARACEM 52	91905	3.000	-
<b>TOTAL</b>				609.000	509.027

Mes	Linea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Julio	Cemento	EXP 45	-	-	-
	Concreto	RECOVER	86960	1.000	2.241
	Concreto	DCI S TOTE	1075	13.000	23.982
	Concreto	DARACEM 19	23629	6.200	9.600
	Cemento	EXP 3(M)	91656	40.000	46.000
	Concreto	DARACEM 52	91905	2.000	2.240
	Cemento	TDA 7350	85930	20.000	20.000
	Cemento	TDA 1100	81652	41.000	41.000
	Concreto	WRDA 60	87767	20.000	18.000
	Concreto	MIRA 94	86977	45.000	38.400
	Cemento	TDA J	87445	285.000	240.000
	Cemento	HEA 211	72705	20.000	15.000
	Concreto	DARACEM 100	86959	8.000	4.800
	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	7.000	3.216
	Concreto	DAREX AEA	941	2.000	3
	Cemento	HEA 2 21	91875	12.000	-
<b>TOTAL</b>				522.200	464.482
Mes	Linea	Material	Código	Venta Proyectada (Kg)	Venta realizada (Kg)
Agosto	Cemento	EXP 45	-	-	-
	Concreto	DCI S TOTE	1075	18.000	22.649
	Concreto	DARACEM 100	86959	6.000	5.950
	Cemento	HEA 211	72705	10.000	9.800
	Cemento	EXP 3(M)	91656	45.000	35.000
	Concreto	MIRA 94	86977	35.000	31.590
	Cemento	TDA J	87445	230.000	155.000
	Cemento	TDA 1100	81652	41.000	26.000
	Concreto	RECOVER	86960	2.000	1.100
	Concreto	DARACEM 19	23629	6.200	-
	Concreto	DARACEM 52	91905	2.500	-
	Concreto	WRDA 60	87767	10.000	-
	Concreto	ADVA 140 (M)	57109	2.500	-
	Concreto	DAREX AEA	941	-	-
	Cemento	TDA 7350	85930	20.000	-
	Cemento	HEA 2 21	91875	-	-
<b>TOTAL</b>				428.200	287.089



### Anexo D. Tarjeta de control – TDAJ

	<b>CONTROL DE PRODUCCIÓN</b>	VERSION
		1

Código SAP	Producto	Lote	Batch	Mezclador	
87445	TDA J	YB09-05	1 de 1	T 200	
				T 201	

Fecha	Hora de Inicio	Hora Finalización	Tiempo de Parada	Tiempo de Manufactura
FORMULA			Cantidad Kg	Ajustes Kg
Cód.SAP	Lote	Matéria Prima	100,0	
30575		MPW1	28,0	
91155		MPH1	6,0	
30579		MPT1	1,0	
30576		MPR1	30,0	
88036		MPSFT1	33,0	
47187		MPB2	1,0	
42160		MPB3	1,0	
<b>TOTAL (KG)</b>			100,0	
Total	Batches		Número de Totes	Peso Unitario 1250 Kg
Total Producción (KG)			Firma Operario	

#### RESULTADOS DE ANÁLISIS

Parámetro	Especificación de Manufactura	Resultado	APROBADO	Resultado despues de Ajustes
Apariencia				
Densidad @ 25°C (g/ml)				
pH @ 25°C				
Color Gardner				

Observaciones:

			Firma Analista
Consecutivo de Producto Terminado		No. de Tarjeta de Producción	Fecha Tarjeta de Producción



## Anexo E. Macro creación archivos .csv desde .xls VBA

```

Módulo1 - 1
Sub Conversion()
'
' Conversion Macro
' convertir tablas .xls a .csv
'
' Acceso directo: CTRL+l
'
    Workbooks.Add
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
        "=CONCATENATE([DatosEntrada.xlsm]Periodo!RC,[DatosEntrada.xlsm]Periodo!RC[1])"
    Range("A1").Select
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
        "=CONCATENATE([DatosEntrada.xlsm]Periodo!RC,\"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Periodo!RC[1])"
    Range("A1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A1:A7"), Type:=xlFillDefault
    Range("A1:A7").Select
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    ChDir "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)"
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=
        "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)\periodo.csv", FileFormat:= _
        xlCSV, CreateBackup:=False
    ActiveWindow.Close
    Sheets("Productos").Select
    Workbooks.Add
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
        "=CONCATENATE([DatosEntrada.xlsm]Productos!RC,\"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Productos!RC[1], \"\", \"
\", [DatosEntrada.xlsm]Productos!RC[2], \"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Productos!RC[3], \"\", \"\", [DatosEntrada.x
lsm]Productos!RC[5], \"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Productos!RC[5])"
    Range("A1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A1:A10"), Type:=xlFillDefault
    Range("A1:A10").Select
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    ChDir "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)\GENERAL"
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=
        "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)\GENERAL\productos.csv", _
        FileFormat:=xlCSV, CreateBackup:=False
    ActiveWindow.Close
    Sheets("Reactores").Select
    Workbooks.Add
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
        "=CONCATENATE([DatosEntrada.xlsm]Reactores!RC,\"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Reactores!RC[1])"
    Range("A1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A1:A3"), Type:=xlFillDefault
    Range("A1:A3").Select
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=
        "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)\reactores.csv", FileFormat _
        :=xlCSV, CreateBackup:=False
    ActiveWindow.Close
    Sheets("Demanda").Select
    Workbooks.Add
    ActiveCell.FormulaR1C1 = _
        "=CONCATENATE([DatosEntrada.xlsm]Demanda!RC,\"\", \"\", [DatosEntrada.xlsm]Demanda!RC[1], \"\", \"\", [D
atosEntrada.xlsm]Demanda!RC[2])"
    Range("A1").Select
    Selection.AutoFill Destination:=Range("A1:A55"), Type:=xlFillDefault
    Range("A1:A55").Select
    Selection.Copy
    Selection.PasteSpecial Paste:=xlPasteValues, Operation:=xlNone, SkipBlanks _
        :=False, Transpose:=False
    Application.CutCopyMode = False
    ActiveWorkbook.SaveAs Filename:=
        "C:\Users\Usuario\Desktop\PRUEBA\Nueva carpeta (2)\demanda.csv", FileFormat:= _
        xlCSV, CreateBackup:=False
    ActiveWindow.Close
End Sub

```

## Anexo F. Código primer modelo de programación y planificación de la producción en Gusek

```

1  set J;
2  /*Número de Productos*/
3  set T;
4  /*Número de periodos*/
5  set R;
6  /*Maquinas*/
7  set PRO dimen 2;
8  /*Relacion producto a producto*/
9  set REL dimen 2;
10 /*Relacion producto por periodo*/
11
12
13 #PARÁMETROS
14 param a{j in J};
15 /*Capacidad consumida para producir un producto j*/
16 param c{t in T};
17 /*Capacidad disponible en el periodo t*/
18 param d{j in J,t in T};
19 /*Demanda del producto j en periodo t*/
20 param b:=1000000000000;
21 param h{j in J};
22 /*Costo mantener una unidad del producto j en periodo t*/
23 param SC{i in J,j in J};
24 /*Costo de alistamiento desde producto i al producto j*/
25 param IIN{j in J};
26 /*Cantidad inicial del producto j en cada periodo*/
27 param ST{i in J,j in J};
28 /*Tiempo de alistamiento desde producto i al producto j*/
29 param reac{r in R};
30 /*capacidad de los reactores*/
31
32 table tab_plant IN "CSV" "productos.csv" :
33   J <- [producto], a ~ cap_consumida, h ~ costo_inv, IIN ~ inv_inicial;
34
35 table tab_period IN "CSV" "periodo.csv" :
36   T <- [periodo], c ~ capacidad;
37
38 table tab_prod IN "CSV" "alistamiento.csv" :
39   PRO <- [delProd, alProd], SC ~ costo_alist, ST ~ tiempo_alist;
40
41 table tab_relacion IN "CSV" "demanda.csv" :
42   REL <- [producto, periodo], d ~ demanda;
43
44 table tab_reactores IN "CSV" "reactores.csv" :
45   R <- [reactor], reac ~ maximo;
46
47 #VARIABLES
48 var F{j in J,r in R, t in T},>=0;
49 /*Variable de posicionamiento*/
50 var I{j in J,t in T} >= 0;
51 /*Inventario del producto j en el periodo t*/
52 var X{j in J,r in R,t in T} >= 0;
53 /*Tamaño de lote de producción, cantidad producida de j en el periodo t*/
54 var Y{i in J,j in J,r in R,t in T},binary;
55 /*Variable de alistamiento, 0=no alista, 1=alista*/
56 var Z{j in J,r in R, t in T},binary;
57 /*Variable =1 si se alista al final del periodo t; sino =0*/
58

```



```

59 #MODELO DE PROGRAMACIÓN
60 minimize costo:sum{j in J,t in T} (h[j]*I[j,t])+sum{i in J,j in J,r in R,t in T:i!=j} ((SC[i,j]*Y[i,j,r,t]
    + d[j,t]));
61 /*(1)*/
62 s.t. balance1{j in J, t in T:t=1}:I[j,t]=IIN[j]+sum{r in R}X[j,r,t]-d[j,t];
63 /*(2)*/
64 s.t. balance2{j in J, t in T:t>1}:I[j,t]=I[j,t-1]+sum{r in R}X[j,r,t]-d[j,t];
65 /*(2)*/
66 s.t. capacidad{r in R,t in T}:((sum{j in J}(a[j])*X[j,r,t]))+((sum{i in J,j in J:i!=j}(ST[i,j])*Y[i,j,r,t]
    + d[j,t])) <= c[t];
67 /*(3)*/
68 s.t. prod1{j in J,r in R,t in T:t=1}:X[j,r,t]<=b*sum{i in J:i!=j}(Y[i,j,r,t]);
69 /*(4)*/
70 s.t. prod2{j in J,r in R,t in T:t>1}:X[j,r,t],<=b*(sum{i in J:i!=j}(Y[i,j,r,t])+Z[j,r,t-1]);
71 /*(4)*/
72 s.t. alistar{r in R,t in T:t>1}:sum{j in J}Z[j,r,t]=1;
73 /*(5)*/
74 s.t. flujo{k in J,r in R,t in T:t>1}:sum{i in J:i!=k}(Y[i,k,r,t])+Z[k,r,t-1],=(sum{j in J:j!=k}(Y[k,j,r,t]
    + Z[k,r,t]));
75 /*(6)*/
76 s.t. secuencia{i in J, j in J,r in R, t in T: i!=j}:F[j,r,t],>=F[i,r,t]+1-(2*card(J)*(1-Y[i,j,r,t]));
77 /*(7)*/
78
79
80 solve;
81
82 table tab_posicion{j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "posicion.csv" :
83 ...j ~ produc, t ~ period, r~reactor, F[j,r,t] ~ turno;
84 ...
85 table tab_inventario{j in J,t in T} OUT "CSV" "inventario.csv" :
86 ...j ~ produc, t ~ period, I[j,t] ~ invent;
87
88 table tab_lote{j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "tamaño.csv" :
89 ...j ~ produc, t ~ period, r~reactor, (X[j,r,t]/reac[r]) ~ lote;
90
91 table tab_alista{i in J,j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "alista.csv" :
92 ...i ~ delProd, j~alProd, t ~ period,r~reactor, Y[i,j,r,t] ~ alista;
93
94 table tab_estado{j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "estado.csv" :
95 ...j ~ produc, t ~ period,r~reactor, Z[j,r,t] ~ estado;
96 ...
97
98 end;

```

## Anexo G. Código primera fase, planificación de la producción

```

1  set J;
2  /*Número de Productos*/
3  set T;
4  /*Número de periodos*/
5  set R;
6  /*Maquinas*/
7  set REL dimen 2;
8  /*Relacion producto por periodo*/
9
10
11 #PARÁMETROS
12 param a{j in J};
13 /*Capacidad consumida para producir un producto j*/
14 param c{t in T};
15 /*Capacidad disponible en el periodo t*/
16 param d{j in J,t in T};
17 /*Demanda del producto j en periodo t*/
18 param b:=1000000000000;
19 /*BigM*/
20
21 param h{j in J};
22 /*Costo mantener una unidad del producto j en periodo t*/
23 param SC{j in J};
24 /*Costo de alistamiento desde producto i al producto j*/
25 param IIN{j in J};
26 /*Cantidad inicial del producto j en cada periodo*/
27 param ST{j in J};
28 /*Tiempo de alistamiento desde producto i al producto j*/
29 param reac{r in R};
30 /*capacidad de los reactores*/
31
32 table tab_plant IN "CSV" "productos.csv" :
33   ...J <- [producto], a ~ cap_consumida, h ~ costo_inv, IIN ~ inv_inicial, ST ~ SupT, SC ~ SupC;
34
35 table tab_period IN "CSV" "periodo.csv" :
36   ...T <- [periodo], c ~ capacidad;
37
38 table tab_relacion IN "CSV" "demanda.csv" :
39   ...REL <- [producto, periodo], d ~ demanda;
40
41 table tab_reactores IN "CSV" "reactores.csv" :
42   ...R <- [reactor], reac ~ maximo;
43
44 #VARIABLES
45 var F{j in J,r in R, t in T} >= 0;
46 /*Variable de posicionamiento*/
47 var I{j in J,t in T} >= 0;
48 /*Inventario del producto j en el periodo t*/
49 var X{j in J,r in R,t in T} >= 0;
50 /*Tamaño de lote de producción, cantidad producida de j en el periodo t*/
51 var Y{j in J,r in R,t in T},binary;
52 /*Variable de alistamiento, 0=no alista, 1-alista*/
53
54 #MODELO DE PROGRAMACIÓN
55 minimize costo:sum{j in J,t in T} (h[j]*I[j,t])+sum{j in J,r in R,t in T} ((SC[j]*Y[j,r,t]));
56 /*(1)*/
57 s.t. balance1{j in J, t in T:t=1}:I[j,t]=IIN[j]+sum{r in R}X[j,r,t]-d[j,t];
58 /*(2)*/
59 s.t. balance2{j in J, t in T:t>1}:I[j,t]=I[j,t-1]+sum{r in R}X[j,r,t]-d[j,t];
60 /*(2)*/
61 s.t. capacidad{r in R,t in T}:((sum{j in J} (a[j])*X[j,r,t]))+((sum{j in J} (ST[j])*Y[j,r,t])) <= c[t];
62 /*(3)*/
63 s.t. prod1{j in J,r in R,t in T}:X[j,r,t]<=b*(Y[j,r,t]);
64 /*(4)*/
65
66

```



```
67
68 solve;
69
70
71 ..
72 table tab_inventario{j in J,t in T} OUT "CSV" "inventario.csv" :
73   ..j~produc, t~period, I[j,t]~invent;
74
75 table tab_lote{j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "tamaño.csv" :
76   ..j~produc, t~period, r~reactor, (X[j,r,t]/reac[r])~lote;
77
78 table tab_alista{j in J,r in R,t in T} OUT "CSV" "alista.csv" :
79   ..j~Producto, t~period, r~reactor, Y[j,r,t]~alista;
80
81 ..
82
83
84 end;
```

## Anexo H. Macro combinación de valores resultado, primera fase

```
Módulo2 - 1

Sub CombInfo()
'
' CombInfo Macro
' Combinación de la información en un solo documento
'
' Acceso directo: CTRL+i
'
    With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:= _
        "TEXT;C:\Users\Usuario\Desktop\Dropbox\Carlos&Adriana\MODELACION EN GUSEK\FINAL\PLANIFICACI
ON\General\alista.csv" _
        , Destination:=Range("$A$1"))
        .Name = "alista"
        .FieldNames = True
        .RowNumbers = False
        .FillAdjacentFormulas = False
        .PreserveFormatting = True
        .RefreshOnFileOpen = False
        .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
        .SavePassword = False
        .SaveData = True
        .AdjustColumnWidth = True
        .RefreshPeriod = 0
        .TextFilePromptOnRefresh = False
        .TextFilePlatform = 850
        .TextFileStartRow = 1
        .TextFileParseType = xlDelimited
        .TextFileTextQualifier = xlTextQualifierDoubleQuote
        .TextFileConsecutiveDelimiter = False
        .TextFileTabDelimiter = True
        .TextFileSemicolonDelimiter = False
        .TextFileCommaDelimiter = True
        .TextFileSpaceDelimiter = False
        .TextFileColumnDataTypes = Array(1, 1, 1, 1)
        .TextFileTrailingMinusNumbers = True
        .Refresh BackgroundQuery:=False
    End With
    Selection.CurrentRegion.Select
    ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort.SortFields.Clear
    ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort.SortFields.Add Key:=Range( _
        "D2:D91"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlDescending, DataOption:= _
        xlSortNormal
    ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort.SortFields.Add Key:=Range( _
        "C2:C91"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
        xlSortNormal
    ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort.SortFields.Add Key:=Range( _
        "B2:B91"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
        xlSortNormal
    ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort.SortFields.Add Key:=Range( _
        "A2:A91"), SortOn:=xlSortOnValues, Order:=xlAscending, DataOption:= _
        xlSortNormal
    With ActiveWorkbook.Worksheets("Alistamiento").Sort
        .SetRange Range("A1:D91")
        .Header = xlYes
        .MatchCase = False
        .Orientation = xlTopToBottom
        .SortMethod = xlPinYin
        .Apply
    End With
    Range("A1").Select
    ActiveCell.SpecialCells(xlLastCell).Select
    Range("A1").Select
    ActiveSheet.Next.Select
    Range("A1").Select
    With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:= _
        "TEXT;C:\Users\Usuario\Desktop\Dropbox\Carlos&Adriana\MODELACION EN GUSEK\FINAL\PLANIFICACI
ON\General\inventario.csv" _
        , Destination:=Range("$A$1"))
        .Name = "inventario"
        .FieldNames = True
        .RowNumbers = False
        .FillAdjacentFormulas = False
        .PreserveFormatting = True
        .RefreshOnFileOpen = False
        .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
        .SavePassword = False
        .SaveData = True
        .AdjustColumnWidth = True
    End With
End Sub
```

## Anexo I. Código segunda fase, secuenciación de la producción

```

1  set J;
2  /*Productos a fabricar en el periodo*/
3  set REL dimen 2;
4
5  param ST{i in J,j in J};
6  #tiempo de alistamiento por trabajo i
7  param P{i in J};
8  #tiempo de procesamiento por trabajo i
9  param R{i in J};
10 #tiempo de release por trabajo i
11 param F{i in J};
12 #tiempo de entrega del trabajo i
13 param M:= (sum{i in J} F[i])*100;
14
15 table Product_a_fab IN "CSV" "productfab.csv":
16   J<-[productos], P~proTime, R~releaseTime, F~delivTime;
17
18 table Alistamiento IN "CSV" "alistamiento.csv":
19   REL<-[delProd,alProd], ST~alisTime;
20
21
22 var TI{i in J},>=0;
23 #tiempo de inicio del trabajo i o release
24 var t{i in J},>=0;
25 #tiempo de tardanza
26 var TF{i in J},>=0;
27 #tiempo de terminacion del trabajo i
28 var y{i in J,j in J},binary;
29 #0 si pasa del trabajo j al i, 1 si pasa del trabajo i al j
30
31 minimize FO:sum{i in J,j in J}(ST[i,j]*y[i,j]);
32
33 s.t. r1 {i in J,j in J:i!=j}: (TI[i]+(M*y[i,j])) >= (TI[j]+P[j]+ST[j,i]);
34 s.t. r2 {i in J,j in J:i!=j}: (TI[j]+(M*(1-y[i,j])))>=(TI[i]+P[i]+ST[i,j]);
35 s.t. r3 {i in J}: TF[i]>= (TI[i]+P[i]);
36 s.t. r4 {i in J}: t[i]>= (TF[i]-F[i]);
37 s.t. r5 {i in J}: TI[i]>= R[i];
38 s.t. r6 {i in J,j in J: i != j}: (y[i,j]+y[j,i])<=1;
39
40 solve;
41
42 table tiempos {i in J} OUT "CSV" "tiempos.csv":
43   i~ producto, TI[i]~ initialTime,TF[i]~finalTime;
44
45
46 end;
47

```



## Anexo J. Macro combinación de valores resultado, segunda fase

```
Módulo1 - 1

Sub Tiempos()
'
' Tiempos Macro
' Producir tabla y gráfico
'
' Acceso directo: CTRL+f
'
    With ActiveSheet.QueryTables.Add(Connection:= _
        "TEXT;C:\Users\Usuario\Desktop\Dropbox\Carlos&Adriana\MODELACION EN GUSEK\FINAL\SECUENCIACI
ON\General\tiempos.csv" _
        , Destination:=Range("$A$1"))
        .Name = "tiempos"
        .FieldNames = True
        .RowNumbers = False
        .FillAdjacentFormulas = False
        .PreserveFormatting = True
        .RefreshOnFileOpen = False
        .RefreshStyle = xlInsertDeleteCells
        .SavePassword = False
        .SaveData = True
        .AdjustColumnWidth = True
        .RefreshPeriod = 0
        .TextFilePromptOnRefresh = False
        .TextFilePlatform = 850
        .TextFileStartRow = 1
        .TextFileParseType = xlDelimited
        .TextFileTextQualifier = xlTextQualifierDoubleQuote
        .TextFileConsecutiveDelimiter = False
        .TextFileTabDelimiter = True
        .TextFileSemicolonDelimiter = False
        .TextFileCommaDelimiter = True
        .TextFileSpaceDelimiter = False
        .TextFileColumnDataTypes = Array(1, 1, 1)
        .TextFileTrailingMinusNumbers = True
        .Refresh BackgroundQuery:=False
    End With
    Selection.CurrentRegion.Select
    ActiveSheet.Shapes.AddChart.Select
    ActiveChart.SetSourceData Source:=Range("'Hojal'!$A$1:$C$1")
    ActiveChart.ChartType = xlLineMarkers
End Sub
```