# "ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE PLANTA DE UNA EMPRESA FABRICANTE DE PRODUCTOS LÁCTEOS APLICANDO EL MÉTODO MONTE CARLO"

Sustentante:

Ing. Isaías Simón Marmolejo

Director de tesis:

Dr. Joselito Medina Marín

Diciembre de 2009

"Todo hombre que conozco es superior a mí en algún sentido. En ese sentido, aprendo de él.".

Emerson

# Agradecimientos.

La vida está llena de escalones y cada uno representa metas hacia los sueños, son tantas personas a las cuales debo parte de este triunfo que me enorgullece agradecerles.

A Dios por la vida que me otorgó al haberme puesto en un hogar maravilloso al nacer, y por la dicha de mantenerme con vida y con tantas ganas de seguir adelante.

A mis padres, Mario y Cristina quienes me infundieron amor, ética, trabajo y esperanza, gracias por su apoyo incondicional.

A mi abuelita, Sofía una persona verdaderamente importante en mi vida, porque me enseño que el trabajo constante y el esfuerzo tiene recompensas.

A mis hermanos, Adán e Israel por confiar en mí, gracias por su paciencia y cariño.

Sin lugar a duda muchos de los sabios consejos, sugerencias y contribuciones se los debo a mis amigos, gracias por su amistad de verdad serán inolvidables.

La ponencia que aquí se reproduce ha sido elaborada con apoyo del Director de tesis Dr. Joselito Medina Marín y bajo las sugerencias y comentarios del Dr. Gilberto Pérez Lechuga a quienes debo agradecer el generoso esfuerzo realizado y el buen desempeño de su labor. A pesar de los problemas por constantes movimientos en la información colectada de la empresa para elaborar esta ponencia, diversos y consecutivos borradores de la misma fueron consultados con un número importante de colegas, que contribuyeron también de manera muy acertada a la mejora del documento. A todos ellos muchas gracias.

# Índice general

Resu	men.	IX
$\mathbf{Abstr}$	eact.	X
Intro	ducción.	XI
Obj	etivos	XIII
Plar	nteamiento del problema	XIV
Esta	ado del arte	XVII
	odología utilizada.	XIX
_	anización del trabajo	XXI
Con	nentarios finales	XXIII
Capítul	o 1: Introducción a los modelos de simulación.	1
1.1	Generalidades	1
1.2	Ventajas y desventajas de la simulación.	2
1.3	Simulación por computadora	5
1.4	Sistemas, modelos y tipos de modelos de simulación	9
	1.4.1 Sistemas y ambiente de un sistema	9
1.5	Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experi-	
	mentación	12
1.6	Conceptos Fundamentales de Eventos Discretos	17
1.7	Conceptos Fundamentales de Simulación Monte Carlo	22
1.8	Conceptos Fundamentales de Planeación de la Capacidad	24
	1.8.1 El concepto de capacidad de planta	26
1.9	Comentarios finales	27
Capítul	o 2: Descripción del sistema de producción	29

ÍNDICE GENERAL

2.1	Formulación del problema	29
	2.1.1 Objetivos	30
2.2	Datos y características generales de la empresa	30
2.3	Aspectos generales sobre el control y flujo del proceso de producción	34
2.4	Comentarios finales	39
Capítul	o 3: Información estadística de las operaciones	40
3.1	Generalidades	40
3.2	Comportamiento general de las operaciones de producción de la Empresa Fabricante de Productos Lácteos	42
3.3	Distribuciones empíricas y pruebas de bondad de ajuste para las tasas de	14
0.0	llegada y salida de la Empresa	83
	3.3.1 Modelación del proceso	84
	3.3.2 Descripción general del flujo de operaciones	87
3.4	Comentarios finales.	98
5.1		
Capítul	o 4: Desarrollo del modelo en un programa	100
4.1	Selección del programa de simulación	100
	4.1.1 Simuladores de alto nivel	101
	4.1.2 ProModel	101
4.2	Construcción del modelo de simulación	103
	4.2.1 Partes que componen el modelo de simulación	103
	4.2.2 Sobre la modelación	106
4.3	Verificación y Validación del modelo de simulación	154
4.4	Comentarios finales	156
Capítul	o 5: Diseño de experimentos y pruebas de simulación	158
5.1	Consideraciones generales	158
5.2	Efectos de las operaciones de la Empresa, comportamiento general del	
	sistema con el fin interesado de estimar el desempeño real del modelo	159
5.3	Efectos del incremento de las operaciones de la Empresa, como una con-	
	secuencia natural del aumento de la demanda de los diferentes tipos de	
	productos	161
5.4	Efectos de la reducción de la capacidad de planta, debido a labores de	
	mantenimiento	166
5.5	Efectos del aumento de la capacidad de planta, a fin de evaluar cambios	
	observados en la Empresa productora de lácteos	169
5.6	Observaciones finales sobre los experimentos realizados	174

ÍNDICE GENERAL	III
Conclusiones y recomendaciones.	176
Anexos.	180
Referencias	181

# Índice de figuras

Fig. 1.	1 Caminos para la experimentación con un sistema	3
Fig. 1.	2 Pasos para la elaboración del modelo de simulación	13
Fig. 1.		19
Fig. 1.	4 Comportamiento Entrada/Salida de un modelo DEVS	19
Fig. 1.	5 Caja negra de la técnica Monte Calo	23
Fig. 2.		31
Fig. 2.	2 Imagen de algunos tanques contenedores	32
Fig. 2.	3 Vista parcial de las líneas de proceso	32
Fig. 2.	4 Plano general de la empresa	33
Fig. 2.	5 Acercamiento de las distintas líneas de producción	34
Fig. 2.	6 Imagen del recorrido de la materia prima en un panorama general	36
Fig. 2.	7 Imagen de flujo de la materia prima en las líneas de producción	37
Fig. 2.	8 Perspectiva gráfica referente a la moduralización del sistema	38
Fig. 3.	1 Comportamiento general de las operaciones en la Empresa	44
Fig. 3.	2 Proceso general de la planta de lácteos	47
Fig. 3.	3 Área de producción de lácteos (Descremado de leche)	48
Fig. 3.	4 Línea de leche pasteurizada (Homogeneizado y pasteurizado)	49
Fig. 3.	5 Línea de leche pasteurizada (Envasado)	50
Fig. 3.	6 Línea de leche ultrapasteurizado (Ultra pasteurización)	52
Fig. 3.	7 Línea de leche ultrapasteurizado (Envasado)	53
Fig. 3.	8 Línea de rehidratado (Aguas blancas)	55
Fig. 3.	9 Línea de rehidratado (Envasado)	56
Fig. 3.	10 Diagrama línea de crema (Recibo y Recepción)	59
Fig. 3.	11 Diagrama línea de crema (Estandarizado)	60
Fig. 3.	12 Diagrama línea de crema (Pasteurizado y Homogeneizado)	60
Fig. 3.	13 Diagrama línea de crema (Acidificación y Envasado)	61
Fig. 3.	14 Diagrama proceso de mantequilla (Recibo y Recepción)	62

ÍNDICE DE FIGURAS V

Fig. 3.15	Diagrama proceso de mantequilla (Estandarizado y Pasteurizado)	63
Fig. 3.16	Diagrama proceso de mantequilla (Batido, Moldeado y Envasado)	63
Fig. 3.17	Diagrama compartido de recibo de leche para Plantas de yogurt	65
Fig. 3.18	Diagrama compartido de recibo de leche(Descremado)	65
Fig. 3.19	Diagrama compartido de recibo de leche (Estandarizado)	66
Fig. 3.20	Diagrama Planta I yogurt (Pasteurizado y Maduración)	68
Fig. 3.21	Diagrama Planta I yogurt (Mezclado)	69
Fig. 3.22	Diagrama Planta I yogurt (Esterilizado, M8 y Envasado)	69
Fig. 3.23	Diagrama Planta II yogurt (Pasteurizado)	71
Fig. 3.24	Diagrama Planta II yogurt (Maduración)	72
Fig. 3.25	Diagrama Planta II yogurt (Cooler y Envasado)	72
Fig. 3.26	Diagrama Planta III yogurt (Pasteurizado)	74
Fig. 3.27	Diagrama Planta III yogurt (Maduración)	75
Fig. 3.28	Diagrama Planta III yogurt (Cooler y Envasado)	75
Fig. 3.29	Diagrama Planta III-A yogurt (Pasteurizado)	77
Fig. 3.30	Diagrama Planta III-A yogurt (Maduración)	78
Fig. 3.31	Diagrama Planta III-A yogurt (Mezclado y Envasado)	78
Fig. 3.32	Diagrama postres espumas y arroz con leche (Recibo)	80
Fig. 3.33	Diagrama postres espumas y arroz con leche (Dosificado y Envasado).	80
Fig. 3.34	Diagrama postres frutas con crema (Recibo)	82
Fig. 3.35	Diagrama postres frutas con crema (Dosificado y Envasado)	82
Fig. 3.36	Estadísticas comparativas de los volúmenes diarios	85
Fig. 3.37	Volúmenes de leche recibidos en planta, años 2006 y 2007	86
Fig. 3.38	Área de recibo	90
Fig. 3.39	Distribución (BestFit 4.5) Leche Clásica 1 lt	92
Fig. 3.40	Distribución (BestFit 4.5) Leche Light 1 lt	92
Fig. 3.41	Distribución (BestFit 4.5) Leche Sabor Fresa 1 lt	93
Fig. 3.42	Distribución (BestFit 4.5) YOG. P/BEBER 250 g. Fresa Coco	93
Fig. 3.43	Distribución (BestFit 4.5) YOG. P/BEBER 250 g. Piña Coco	94
Fig. 3.44	Distribución (BestFit 4.5) FRUTAL UHT 250 ml Fresa	94
Fig. 3.45	Distribución (BestFit 4.5) FRUTAL UHT 250 ml Mango	95
Fig. 3.46	Distribución (BestFit 4.5) YOGURT C-REAL 150 g. Fresa Nuez	95
Fig. 3.47	Distribución (BestFit 4.5) YOGURT C-REAL 150 g. Durazno Nuez.	96
Fig. 3.48	Distribución (BestFit 4.5) CREMA 200 g	96
Fig. 3.49	Distribución (BestFit 4.5) CREMA 450 g	97
Fig. 3.50	Distribución (BestFit 4.5) YOGURT 150 g. Fresa	97
Fig. 3.51	Distribución (BestFit 4.5) YOGURT 150 g. Durazno	98

ÍNDICE DE FIGURAS VI

Fig. 4.1	Líneas recibo o llaves recibo (Leche y Crema)	107
Fig. 4.2	Rutina correspondiente a las densidades usadas para modelar	108
Fig. 4.3	Recorrido de las entidades Leche por el Área recibo	110
Fig. 4.4	Condiciones de operación de salida para el Silo 29	112
Fig. 4.5	Recorrido de las entidades Leche por el Área recibo	112
Fig. 4.6	Línea de leche pasteurizada (etapa 1)	114
Fig. 4.7	Línea de leche pasteurizada (etapa 2)	115
Fig. 4.8	Línea de leche ultrapasteurizada (etapa 1)	117
Fig. 4.9	Línea de leche ultrapasteurizada (etapa 2)	118
Fig. 4.10	Línea de rehidratado (asignación de aguas blancas)	119
	Línea de rehidratado (proceso de rehidratado)	120
	Línea de cremas (estandarizado)	124
	Línea de cremas (pasteurizado)	125
	Línea de cremas (homogeneización)	126
Fig. 4.15	Línea de cremas (envasado)	127
Fig. 4.16	Línea de mantequilla (arribo crema)	129
Fig. 4.17	Línea de mantequilla (batido)	130
Fig. 4.18	Línea de mantequilla (corte)	131
Fig. 4.19	Línea de mantequilla (lógica de operaciones)	132
Fig. 4.20	Diagrama general de la Línea de cremas y mantequilas	133
Fig. 4.21	Línea de mantequilla (leche entera y/o descremada)	135
Fig. 4.22	Línea de mantequilla (tanques de estandarizado)	136
Fig. 4.23	Línea yogurt (Planta I, pasteurizador)	139
Fig. 4.24	Línea yogurt (Planta I, fermentación)	140
Fig. 4.25	Línea yogurt (Planta I, mezclado y estandarizado)	141
Fig. 4.26	Línea yogurt (Planta I, envasado)	142
Fig. 4.27	Línea yogurt (Planta I, pasteurizado y envasado)	143
Fig. 4.28	Diagrama general de Línea yogurt (planta I)	144
Fig. 4.29	Diagrama general de Línea yogurt (planta II)	145
Fig. 4.30	Diagrama general de Línea yogurt (planta III)	146
Fig. 4.31	Diagrama general de Línea yogurt (planta III-A)	147
Fig. 4.32	Línea postres (espumas y arroz con leche)	149
Fig. 4.33	Línea postres (espumas, envasado)	150
_	Línea postres (arroz con leche y frutas con crema, envasado)	151
Fig. 4.35	Línea postres (frutas con crema)	152
Fig. 4.36	Diagrama general línea postres	153
Fig. 5.1	Corrida 1	161

ÍNDICE DE FIGURAS VII

Fig. 5.2	Corrida 2 (Equipo H24)	165
Fig. 5.3	Corrida 2 (Localidad H24_a_Tanque28)	165
Fig. 5.4	Corrida 2 (Tanque28)	166
Fig. 5.5	Corrida 4 (Efectos del aumento de la capacidad de planta)	172
Fig. 5.6	Corridas observadas	173

# Índice de tablas

Tabla 3.1	Estadísticos básicos asociados a las densidades usadas por mes	85
Tabla 3.2	Densidades usadas para modelar	87
Tabla 3.3	Densidades usadas en el modelo para simular interarribos	88
Tabla 3.4	Medición de la capacidad del área de recibo	89
Tabla 3.5	Densidades usadas para modelar la elaboración de productos	91
Tabla 5.1	Desempeño real del modelo (Corrida normal)	162
Tabla 5.2	Desempeño real del modelo (Corrida aumento de la demanda)	163
Tabla 5.3	Labores de mantenimiento (Paros programados)	167
Tabla 5.4	Desempeño (Corrida paros programados)	168
Tabla 5.5	Desempeño (Corrida incremento de capacidad)	170
Tabla 5.6	Corridas observadas	173

# Resumen.

Esta tesis examina el papel de la programación del plan de la producción en la mejora de los resultados de la empresa y sugiere posibles consideraciones en la elaboración y aplicación de un planificador de capacidad finita. En él, se examinan las ventajas y limitaciones de la simulación de sistemas de eventos discretos mediante el método de Monte Carlo, como una técnica para la elaboración de modelos de programación, y sostiene la necesidad de una mayor investigación para desarrollar herramientas más versátiles. Se desarrolló una simulación basada en la programación del plan de producción que incorpora los principios de planificación de cuellos de botella para mantener el rendimiento con un bajo inventario; a través del estudio de diversos escenarios que muestren distintas alternativas de solución.

En este trabajo se desarrollaron diferentes modelos de simulación, de las operaciones de producción en las distintas líneas de la planta productora de lácteos, así como experimentos con ellos. Los modelos simulan las operaciones de la fabricación, diferenciando los principales tipos de flujos que sigue la leche y sus derivados, para los diferentes productos, frente a cambios de la demanda de servicio o de la capacidad de la planta, o para asumir la utilización de dicha instalación y equipos en servicio exclusivo, con el objeto de estimar los efectos en los tamaños mínimo, máximo y promedio de las colas de espera, tiempos promedio de espera de las diferentes líneas, utilización de los equipos, operaciones totales efectuadas por tipo de productos, entre otros.

En los capítulos de este trabajo se establecen: los pasos a seguir para realizar el estudio de simulación; el problema a resolver y la conceptualización del modelo; la manera de procesar la información estadística; el desarrollo del modelo en un programa de computadora y su validación y verificación; la planeación y realización de los experimentos y el análisis de los resultados.

# Abstract.

This thesis examines the programming paper of the production plan in the improvement of the results of the company and possible suggests, considerations in the elaboration and application of a planner of finite capacity. In it the advantages and limitations of the systems simulation of discreet events are examined by means of the method of Mount Carlo, like a technique for the elaboration of programming models, and it sustains the necessity of a bigger investigation to develop more versatile tools. A simulation was developed based on the programming of the production plan that incorporates the principles of planning of bottle necks to maintain the yield with a first floor inventory; through the study of diverse scenarios that show different alternatives solution.

In this work different models of simulation were developed, of the production operations in the different lines of the plant producer of dairy products, as well as experiments with them. The models simulate the operations of the production, the main types of flows that it follows the milk product differing and their derived, for the different products, in front of changes of the demand of service or of the capacity of the plant, or to assume the use of this installation and teams in exclusive service, in order to estimate the effects in the sizes minimum, maximum and average of the wait lines, times average of wait of the different lines, use of the teams, total operations made by type of products, among others.

In the chapters of this work they settle down: the steps to continue to carry out the study simulation; the problem to solve and the conceptualization of the pattern; the way to process the statistical information; the development of the pattern in a computer program and their validation and verification; the planning and realization of the experiments and the analysis of the results.

# Introducción.

Actualmente es necesario que la industria de la transformación analice y estudie la capacidad de sus sistemas de producción con el fin de hacer frente a la demanda optimizando sus utilidades y, con el tiempo, contemplar la posibilidad de expandirse, para aumentar su mercado y brindar un mejor servicio de calidad y satisfacción de necesidades a los clientes de la misma.

La importancia de conocer la capacidad del sistema de producción radica en que este conocimiento define los límites competitivos de la empresa. De manera específica, establece la tasa de respuesta de la empresa a un mercado, su estructura de costos, la composición de su personal, y la estrategia general de inventarios. Si la capacidad no es adecuada, una compañía puede perder clientes, si su servicio es lento o si permite que entre la competencia al mercado. Si la capacidad es excesiva, es probable que la compañía tendrá que reducir precios para estimular la demanda, subutilizar su personal, llevar un exceso de inventario o buscar productos adicionales, menos rentables, para seguir en actividad.

Algunos conceptos importantes de la capacidad tienen que ver con su efectividad de operación, por ejemplo, un mejor nivel operativo, definido como el punto de la capacidad donde es menor el costo promedio por unidad. De la misma forma, las economías de escala afectan su eficiencia, ya que, al aumentar el tamaño de una planta y su volumen, baja el costo promedio por unidad producida, puesto que cada unidad absorbe parte de los costos fijos. Esta reducción en el costo promedio por unidad continúa hasta que la planta es tan grande que aumenta el costo de coordinar el manejo de personal y flujo de materiales; entonces, se llega a un punto donde hay que encontrar nuevas fuentes de capacidad. Es posible encontrar relaciones de concepto con el mejor nivel operativo cuando se compara el promedio por unidad de planta de tamaño diferente.

Es aquí entonces cuando la simulación, que es la representación de la operación de algún

XII

proceso o sistema del mundo real a través del tiempo, se vuelve una herramienta importante, ya sea hecha manualmente o en una computadora, involucra la generación de una historia artificial de un sistema y su observación para obtener inferencias relacionadas con las características operativas del sistema real. Aquí los modelos de simulación serán utilizados como una herramienta de análisis para predecir los efectos de cambios en sistemas existentes, o como una herramienta de diseño para predecir el comportamiento del sistema.

## Objetivos.

El objetivo general de este trabajo es desarrollar el estudio de análisis de capacidad de planta desde una perspectiva aleatoria en una empresa fabricante de productos lácteos utilizando el método Monte Carlo. Los resultados que se obtengan serán validados y comparados para comprobar que la calidad teórica y experimental de nuestras investigaciones es una buena alternativa a la solución del problema, esto mediante la realización de experimentos dirigidos a obtener información en relación con el comportamiento del sistema.

# Para alcanzar el objetivo general planteado, se enlistan a continuación los respectivos objetivos específicos:

- Analizar la dinámica de operación de la planta, a fin de comprender las inter relaciones que se dan entre los departamentos de compra, manufactura y embarque.
- Determinar las cantidades, presentaciones, envases y contenedores de los productos fabricados en la empresa para establecer las variables de entrada del sistema que representa la producción de lácteos.
- Elaborar los modelos Estadístico-Matemáticos de la operación de planta y validarlos con el personal técnico de la misma con el objeto de asegurar su eficacia.
- Elaborar y validar el correspondiente modelo de simulación del proceso de producción.
- Evaluar la capacidad nominal de planta actual, y calcular la capacidad real instalada utilizando el modelo de simulación, desarrollado en el inciso anterior.
- Analizar los escenarios solicitados por la empresa sobre la operación de planta utilizando el modelo de simulación.
- Presentación de resultados.

## Planteamiento del problema.

En la actualidad, el diseño de un análisis que contribuya en grandes y constantes variaciones en el crecimiento esporádico de las industrias, representa un desafío al ingenio, la imaginación y la creatividad, en la búsqueda de nuevas ideas y razonamientos lógicos y matemáticos, los nuevos conceptos y teorías han generado una incansable lucha por lograr ser la causa de los grandes descubrimientos.

La predicción del comportamiento de los sistemas aparentemente bien estructurados se transforma en un complejo trabajo de investigación. Esto supone un compromiso para quien este dispuesto a abordar el tema y con ello la problemática del estudio en cuestión. La **capacidad disponible** de una empresa está en función de su planeación y control [Machuca et. al., 1995]. La capacidad de una empresa se define como, la cantidad de productos o servicios que pueden ser obtenidos por una determinada unidad productiva durante un cierto periodo de tiempo. Las organizaciones deberán adecuarse a la capacidad necesaria o carga en función de la demanda que la empresa desee satisfacer en el futuro.

Dadas estas causas una respuesta a la demanda de condiciones favorables se empeña en que el sector industrial requiere de aspectos de impacto en el análisis de los sistemas de producción, que hagan la diferencia al logro de una posición competitiva.

Con la revolución del computador digital y de programas apropiados, se han desarrollado esquemas que permiten obtener una primera aproximación del comportamiento de sistemas con base en su análisis dinámico. El resultado de estos programas se traduce en la presentación de series de parámetros numéricos (Probabilidades y Estadísticas), así como de diferentes apoyos visuales (gráficos y animaciones), ambos necesarios para la evaluación del mismo. Esta información da una buena idea del comportamiento de los sistemas, e inevitablemente, está ligada a las hipótesis y simplificaciones a las que se encuentra sujeto el modelo de simulación utilizado.

En este proyecto de tesis se aborda el problema del estudio de capacidad de planta desde una perspectiva aleatoria usando como herramienta fundamental el método Monte Carlo para simular la dinámica de una de las fábricas productoras de lácteos de mayor importancia en México, que observa problemas de saturación en sus líneas de proceso. Los problemas de congestión en la empresa de la Ciudad de México han planteado la posibilidad de construir o rediseñar la estructura de la empresa, cuyo costo será considerable, por lo que la solución de este tipo de problemas es innegablemente de gran importancia práctica. Cabe señalar que la empresa, ocupa el primer lugar en la producción de lácteos a nivel nacional pues opera una enorme planta la cual cuenta con más de 82,000 vacas en 180 establos y produce más de 2 millones de litros de leche al día en sus plantas pasteurizadoras así como la elaboración de sus derivados. Por otra parte, dado que la empresa seguirá operando, cuando menos durante los próximos cinco años en condiciones de saturación, es importante lograr un elevado nivel de eficiencia en su operación, independientemente de la decisión que se tome para construir o rediseñar la estructura de la empresa. La gran variedad y cantidad de variables que influyen directamente al proceso de producción determinan la capacidad de la planta, al momento de pretender analizar estas variables se contrae un problema de amplia magnitud que hacen casi imposible encontrar una alternativa que recaiga en un grado de eficiencia de mayor magnitud. Por lo anterior, es necesario tener herramientas que sirvan para evaluar el desempeño y dinámica de las líneas de producción abordando el problema desde un enfoque sistémico mediante la modularización de segmentos que contemplen la investigación desde que se reciben las materias primas, el flujo del proceso hasta que el producto terminado es mandado a su respectivo almacén, por lo que se plantea ahora la necesidad de desarrollar un modelo de simulación que permita hacer este tipo de evaluaciones.

Aquí se muestra el flujo de leche fluida hacia los diferentes procesos (y por ende, los diferentes productos) que se llevan a cabo en la planta.

- 1. Área de recibo
- 2. Área de producción de lácteos
  - a) Línea de leche pasteurizada
  - b) Línea de leche ultrapasteurizada
  - c) Línea de rehidratado
- 3. Área de producción de derivados
  - a) Línea de cremas
    - 1) Crema para batir
  - b) Mantequilla
  - c) Línea de yogurt
    - 1) Planta I

- 2) Planta II
- 3) Planta III
- 4) Planta III-A
- d) Línea de postres
  - 1) Espumas
  - 2) Arroz con leche
  - 3) Frutas con crema

#### Estado del arte.

El sistema que se está abordando en este trabajo de tesis incluye entradas de variables aleatorias, por lo que el modelo de simulación debe reflejarlas con la mayor precisión posible. Una forma de hacerlo es usando una técnica llamada simulación de Monte Carlo, en la cual el simulador se diseña para que los eventos simulados ocurran aleatoriamente y reflejen las frecuencias teóricas que se están modelando. El método fue llamado así por el principado de Mónaco por ser la "capital del juego de azar", al tomar una ruleta como un generador simple de números aleatorios. El nombre y el desarrollo sistemático de los métodos de Monte Carlo datan aproximadamente de 1944 con el desarrollo de la computadora electrónica. Sin embargo hay varias instancias (aisladas y no desarrolladas) en muchas ocasiones anteriores a 1944. La simulación de Monte Carlo fue creada para resolver integrales que no se pueden resolver por métodos analíticos; para resolver estas integrales se usaron números aleatorios. Posteriormente se utilizó para cualquier esquema que emplee números aleatorios, usando variables aleatorias con distribuciones de probabilidad conocidas [Neumann, 1992].

La palabra simulación, en su concepto actual, se remonta hacia fines de 1940 cuando Von Neumann y Ulam acuñaron el término "análisis de Monte Carlo" para aplicarlo a una técnica matemática que usaban entonces para resolver ciertos problemas de protección nuclear que eran, o demasiado costosos para resolverse experimentalmente o demasiado complicados para ser tratados analíticamente. Con el advenimiento de la computadora de gran velocidad, a principios de 1950, la simulación tomó otro significado, ya que surgió la posibilidad de experimentar con modelos matemáticos (que describen sistemas de interés) en una computadora. La necesidad de resultados cada vez más precisos y rápidos estimuló el desarrollo de cientos de nuevas técnicas de simulación en los últimos 40 años. Simultáneamente, la aparición de las computadoras modernas y su sorprendente evolución brindó la herramienta necesaria que permite la implementación de los métodos de simulación más complejos de una manera simple y eficiente. Debido a esto, la simulación por computadora constituye una disciplina en sí misma y como toda disciplina, está dividida en muchas subdisciplinas que tratan con diferentes problemas específicos. Para este caso el empleo de la simulación con Discrete Event System Specification o "Especificación de Sistema de Evento discreta" (DEVS) es ampliamente utilizado en ciencias de la computación donde ha recibido un muy importante desarrollo en sus aspectos teóricos y prácticos.

Entre los trabajos que tienen cierta relación con esta tesis, hay dos casos diferentes que

deben distinguirse. Por un lado, hay trabajos que utilizan una metodología similar intentando relacionar DEVS y ecuaciones diferenciales. Por otro lado, hay trabajos que, basados en métodos y herramientas diferentes, intentan brindar soluciones a problemas similares. Con respecto al primer grupo, no hay aún una importante cantidad de trabajos en la literatura.

Las primeras ideas y definiciones se deben a Bernard Zeigler [Bernard, 1976]. Tras definir DEVS en los setentas, el concepto de Sistemas Cuantificados tomó más de 20 años en ser definido formalmente. En el contexto de esta línea pueden encontrarse algunas aplicaciones interesantes en [Bernard et. al., 2000].

En lo que respecta al segundo grupo los trabajos relacionados que apuntan a los mismos problemas con diferentes herramientas. Encontramos aquí toda la literatura sobre integración numérica y el control digital. Sin embargo, los problemas para los cuales este trabajo intenta brindar mejoras están en realidad mucho más acotados. Es imposible de todas formas conocer y mencionar todo lo que se está realizando para resolver todos esos problemas. Por esto, los trabajos mencionados aquí son sólo los que están más relacionados con los resultados de mayor importancia de esta tesis.

- APPLICATION OF DISCRETE EVENT SYSTEM TO INSECT POPULATION DYNAMIC. Este trabajo describe una aplicación de red de esperas para modelar la población del insecto [Hongfei, 2004].
- BOLETIN. La optimización en el diseño de fabricación utilizando Sistemas de Eventos Discretos (SEDs) considerando las redes de Petri (RdP) [Quintana, 2004].
- DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN USANDO EL SOFTWARE PROMODEL AL PROCESO DE PRE-IMPRESIÓN Y TROQUELADO DE ETI-QUETAS NARANJO. Desarrollar el modelo de simulación al proceso de impresión y troquelado de la empresa ETIQUETAS NARANJO, a través del Software Pro-Model [Chávez et al., 2005].
- DISCRETE EVENT SIMULATION FOR BATCH PROCESSING. Se presenta uso de este método por simular el uso del agua para inyección en un proceso del biopharmaceutical [Craig, 2006].

## Metodología utilizada.

El objetivo del estudio es el de evaluar la capacidad nominal instalada, y determinar las capacidades reales de diseño y de operación, a fin de localizar las áreas críticas que representan los cuellos de botella de la línea de producción y determinar un factor probable de crecimiento de cada una de ellas a fin de procesar un mayor volumen de materia prima. La aleatoriedad del proceso consiste en que la mayoría de las operaciones no están estandarizadas, ni tampoco cuentan con procesos automáticos, razón por la cual las actividades desarrolladas son enfocadas por medio de distribuciones de probabilidad en vez de valores promedio.

Abordando el problema bajo la perspectiva de la simulación digital de eventos discretos se pretende dar a conocer los factores claves que afectan de forma directa la capacidad de la planta.

#### Materiales y métodos empleados

La ciencia se produce por una conexión entre ideas creativas bien estructuradas y por técnicas y métodos encausados con la finalidad de generar algo original e innovador donde los cambios y modificaciones sustanciales se trasforman en objetos tangibles o conceptos intangibles. Esta misma se cuestiona el ¿qué? y el ¿por qué? de las cosas y es un sistema de conocimientos demostrados, que se produce de acuerdo a un método, y que se utilizan por el ser humano para describir y explicar los fenómenos que observa de acuerdo a leyes y principios científicos. Por tanto si el resultado de un proceso metódico bien estructurado culmina en un trabajo tangible, la metodología a emplear para este proyecto está comprendida por las siguientes características:

- 1. Determinación de los objetivos y alcances del proyecto.
- 2. Mediante la observación directa y la realización de entrevistas al personal involucrado en el proyecto, se obtendrá el conocimiento que describe y analiza los métodos, se identificarán sus lineamientos y recursos, y por último se clarificarán sus supuestos y consecuencias.
- 3. Levantamiento y análisis de datos relacionados con el proceso que se estudiará en el proyecto.

- 4. Con lo anterior recopilaremos información que describe las condiciones actuales del sistema.
- 5. Se establecerán los recursos de apoyo bibliográficos y el tipo de software a emplear.
- 6. Por razón del método estadístico, se procede con la depuración e interpretación de datos.
- 7. Respecto al método experimental, se controlarán y medirán las variaciones ante nuevas causas para así considerar el potencial del sistema.
- 8. Síntesis e interpretación de resultados (Representación textual y gráfica).

# Organización del trabajo.

Las industrias empleadas a los sectores productivos tienen, más que en ningún otro sector, que adoptar una orientación clara hacia su sistema productivo, ya que los procesos forman parte inseparable del producto que está vendiendo la empresa. La forma en que se mantenga bajo estudio los cambios a la demanda, la nueva tecnología y la solución de sus problemas puede establecer la diferencia entre empresarios satisfechos e insatisfechos. La simulación guía la toma de decisiones al crea y ofrecer lo más eficientemente posible un valor superior y plena satisfacción al tomar decisiones basadas en representaciones a diferentes escenarios y lapsos de tiempo en diferentes situaciones donde los sistemas se tornan complejos por la gran cantidad de variables que en estos interactúan.

Cada capítulo de esta tesis ha sido pensado y elaborado cuidadosamente, utilizando conceptos de simulación sólidos que se ilustran con ejemplos provenientes de casos reales aplicados a la industria. El resultado es un texto rico en desarrollo y aplicación, y que explica las principales características del sistema en estudio y las decisiones para tomar medidas oportunas.

La sección de introducción contiene una breve descripción del problema que se abordó, los objetivos y alcances del proyecto, conceptos y antecedentes de proyectos y situaciones reales respaldadas por la investigación y las operaciones de las matemáticas aplicadas, el enfoque sistémico y de la moderna teoría de la simulación de eventos discretos, y que al mismo tiempo se encuentran en un enfoque eminentemente práctico. La metodología aquí descrita es una reestructuración de numerosos ejemplos de situaciones en las que compañías muy conocidas y menos conocidas entienden y revelan sus problemas industriales.

El primer capítulo titulado Introducción a los modelos de simulación, pretende ilustrar los conceptos claves que se tocan a lo largo de todo el proyecto, las generalidades, ventajas y planteamiento de un modelo de simulación así como los principales fundamentos teóricos de Teoría de Sistemas, Eventos discretos, Simulación Monte Carlo y Procesos de producción, que serán puestos en practica.

En el segundo capítulo Descripción del sistema de producción, definimos el planteamiento del problema en estudio y son plasmados los datos e información recolectada a lo largo de una investigación minuciosa de las características y aspectos generales del flujo y control del sistema desde la llegada de la materia prima hasta que se tiene el producto listo para

su envio. Aquí se muestran gráficos y bases de datos como apoyo visual y fundamentos que validen y sustenten lo descrito.

En el capítulo dos se abordó lo relacionado a los datos e información del sistema, en el capítulo tres, titulado *Información estadística de las operaciones de arribos y proceso de la empresa fabricante de productos lácteos* es donde los números e información se interpretan en términos lógicos, matemáticos y estadísticos para asimilar el comportamiento de las operaciones de producción como distribuciones empíricas para hacer pruebas de bondad de ajuste de toda la dinámica del sistema.

En el cuarto capítulo Desarrollo del modelo en un programa de computadora, validación y verificación, se discute el uso de la simulación por computadora en el diseño y operación de la empresa. Aquí se propone el programa de simulación a emplear, posteriormente se construye y da forma al modelado del sistema para estudiarlo mediante la experimentación y así poder validar y verificar las operaciones reales.

El Diseño de experimentos y pruebas de simulación con el modelo, comprendido en el capítulo quinto discute y muestra diferentes tipos de efectos ocurridos al alterar sobre el programa de simulación las operaciones de la empresa. Aquí se hacen comentarios sobre los acontecimientos ocurridos y se registran las observaciones importantes consideradas dentro del sistema en estudio.

Una simulación en estudio es conducida por una variedad de propósitos, incluyendo la solución de problemas. Las *conclusiones* presentan los principios y técnicas de la valoración de exactitud a lo largo del ciclo de vida de diferentes estudios de escenarios en la simulación. Es decir mostrar las características de distintos panoramas del modelo de simulación donde la calidad de exactitud se evalúa con la aprobación, y comprobación de los involucrados en el proyecto.

#### Comentarios finales.

La simulación ha tenido un papel relevante en la evolución de los sistemas industriales y de servicios, pero su contribución en este aspecto será aún más importante conforme se conozcan y utilicen sus técnicas y su filosofía.

En este trabajo se establece un modelo de simulación para las operaciones de la planta productora de lácteos de la Ciudad de México, dentro del intervalo de mayor actividad. Mediante este modelo de simulación es posible estimar en forma cuantitativa los efectos o impactos esperados de cambios en la operación de la planta. De esta manera el modelo de simulación es una herramienta para evaluar el rendimiento de la actividad productiva de la planta bajo estudio, e incluso para evaluar mejoras potenciales en su operación.

Para lograr la evolución adecuada de las empresas es necesario un gran número de técnicas de excelencia, que permitan tomar decisiones correctas en situaciones difíciles. El logro de estos objetivos, en el caso de la empresa productora de lácteos, implica la participación del sector productivo como fuente de recurso, además de los que dirigen y toman decisiones para la ejecución de las actividades.

Así mismo, el propósito de esta tesis es difundir éstas actividades con el fin de enriquecer el conocimiento de esta herramienta y la importancia que representa para el desarrollo económico de la industria, ya que es aquí donde la capacidad de ésta rama de la ingeniería industrial debe intervenir a fondo para lograr competitividad productiva en los mercados interno y mundial, ya que únicamente las innovaciones son capaces de transformar las prácticas de la vida cotidiana.

Se concluye también que el enfoque de esta obra es un intento alentador y una propuesta más de notables profesionistas de ingeniería industrial donde se percibe la entrega y entusiasmo de los involucrados del proyecto en función de alcanzar algunos objetivos en los que la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo busca difundir la impartición del conocimiento.

## Capítulo 1

# Introducción a los modelos de simulación.

En este capítulo introductorio se abordan algunos conceptos elementales en relación con los sistemas, los modelos y la simulación. También se indican las principales ventajas y desventajas de los modelos de simulación y su clasificación. Uno de los puntos más importantes de este capítulo es el establecimiento de los pasos a seguir para realizar un estudio de simulación, estos pasos son la base para el desarrollo de los siguientes capítulos.

#### 1.1. Generalidades.

La simulación es la representación de la operación de algún proceso o sistema del mundo real a través del tiempo. Ya sea hecha manualmente o en una computadora, la simulación involucra la generación de una historia artificial de un sistema y su observación para obtener inferencias relacionadas con las características operativas del sistema real [Banks et. al., 2001]. El comportamiento de un sistema a través del tiempo es estudiado mediante el desarrollo de un modelo de simulación. Este modelo comúnmente toma la forma de un conjunto de supuestos respecto a la operación del sistema, estos supuestos son expresados en forma de relaciones matemáticas y lógicas entre los objetos de interés del sistema. Después que ha sido desarrollado, validado y verificado el modelo, puede ser utilizado para investigar una amplia variedad de preguntas del tipo "¿qué pasa si...?", acerca del mundo real. La simulación también puede ser utilizada para estudiar sistemas en su etapa de diseño, antes de que dichos sistemas sean construidos. De esta manera los modelos de simulación pueden ser utilizados tanto como una herramienta de análisis para predecir los efectos de cambios en sistemas existentes, así como una herramienta de

diseño para predecir el comportamiento de sistemas nuevos.

La técnica de simulación de sistemas es una herramienta de análisis, cuyo uso se ha extendido a diversas áreas recientemente. Su inicio se ubica en la década de los cuarentas cuando Von Neumann y Ulam la utilizaron para analizar y resolver problemas complejos en el campo de la física, en los que la solución analítica no siempre es factible o es demasiado costosa. El uso de la computadora, con las facilidades y ventajas que esto implica, hizo posible que la simulación de sistemas ampliara las áreas y objetivos de su aplicación [Rodriguez et. al., 1991].

Como una opinión particular se considera que un modelo es simulado con la finalidad de observar y describir su conducta en términos **holísticos**, esto es, en términos de entidades "todo" unido en jerarquía con el ambiente que lo rodea en propósito de identificar sus componentes y estructura para evaluar distintos panoramas o escenarios en términos de integridad, y dar una solución respecto a la mejor alternativa observada.

## 1.2. Ventajas y desventajas de la simulación.

La Figura 1.1. muestra las distintas alternativas que se pueden seguir para realizar experimentos con un sistema, desde luego, el mayor realismo es alcanzado al experimentar con el sistema real, lo cual constituye la principal ventaja de esta alternativa; sin embargo, esto tiene numerosas desventajas, entre ellas está el hecho de que el sistema real debe existir antes de que los experimentos puedan ser realizados en él, mientras que el objetivo podría ser el diseño de un sistema que aún no existe. Por otro lado, si el sistema ya existe y está en operación, por razones económicas y/o políticas podría no ser factible interrumpir su funcionamiento con el objeto de realizar la experimentación. Aún en el caso de que el sistema real pudiera ser utilizado para la experimentación, se requerirían generalmente grandes cantidades de tiempo para llevar a cabo los experimentos. Además, los resultados observados durante la experimentación con el sistema real no se pueden generalizar. Los resultados aplicarían sólo al sistema, en las condiciones bajo las cuales la experimentación fue realizada. No obstante, algunos sistemas son inherentemente complejos por lo que debe recurrirse a la experimentación directa con el sistema real, al menos eventualmente. Obsérvese en la Figura 1.1. cómo la experimentación con el modelo de una solución analítica, involucra el mayor grado de abstracción. El modelo de una solución analítica es el resultado de la abstracción de las propiedades de un sistema, mediante ecuaciones que expresan cuantitativa y lógicamente las relaciones entre los elementos que forman dicho sistema. Las soluciones analíticas mediante herramientas matemáticas (álgebra, cálculo diferencial e integral o teoría de probabilidades), obtienen soluciones exactas a los problemas de interés, sin embargo; la mayoría de los sistemas reales son muy complejos para permitir evaluaciones analíticas, por lo que estos sistemas pueden ser estudiados mediante la simulación.

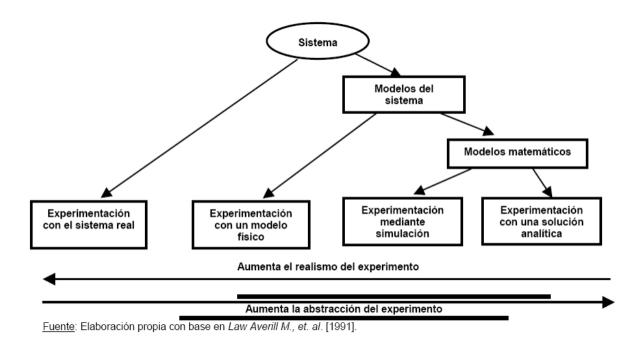


Figura 1.1: Caminos para la experimentación con un sistema.

La principal ventaja de los modelos analíticos es que, dado que están sujetos a sus propias consideraciones, expresan mediante ecuaciones la forma exacta en la cual los valores de las variables dependientes de interés cambian con los valores alternativos de las variables de decisión. Los modelos analíticos también pueden ser usados para determinar la solución óptima de un problema, si la hay. Una desventaja potencial del modelo analítico es que puede requerir, relativamente, un alto nivel de sofisticación para resolver el problema.

Puesto que la experimentación mediante modelos de simulación, está ubicada entre los extremos antes mencionados (véase Figura 1.1.), tendrá las siguientes ventajas:

- No es necesaria la interrupción de la operación del sistema real. De esta forma
  pueden ser exploradas nuevas políticas, reglas de decisión, flujos de información,
  procedimientos organizacionales y operacionales, sin alterar el curso del sistema
  que se desea evaluar.
- 2. Realismo. Los modelos de simulación pueden ser realistas en el sentido de que capturan las características del sistema que está siendo modelado.
- 3. Aplicación para sistemas no existentes. Los sistemas para los que va a ser investigado su comportamiento no tienen que existir previamente. Sólo estarán presentes en las mentes de los diseñadores.
- 4. Acortamiento o alargamiento de la representación del tiempo real. La representación del tiempo real puede ser comprimida en los modelos de simulación. La operación equivalente del sistema real de días, semanas o meses a menudo puede ser simulada, en una computadora, en tan solo segundos, minutos u horas. Esto quiere decir que, comparativamente con el tiempo requerido para la experimentación de un sistema real, mediante la simulación se puede realizar un mayor número de experimentos, por lo que aumenta el número de alternativas que pueden ser investigadas. Por otro lado, si se requiere, la representación del tiempo real puede ser alargada para observar con más detalle el fenómeno bajo investigación.
- 5. Especificación diferida de objetivos. Algunos tipos de modelos analíticos requieren el especificar un objetivo a la salida de la actividad de modelado, el subsecuente desarrollo del modelo está condicionado a este objetivo. En cambio, en la simulación no es requerida esta formulación inicial de objetivos. Esto posibilita tener un conjunto de opciones con lo que se logra un diseño que eventualmente resulta ser satisfactorio para la toma de decisiones con criterios múltiples. La especificación diferida de uno o más objetivos también es una ventaja cuando, aquellos, para los cuales se está haciendo el diseño, no se ponen de acuerdo inicialmente en los objetivos o cuando la importancia de distintos objetivos no es evidente o está sujeta a debate.
- 6. Control de los experimentos. Dentro de la simulación cada variable puede ser mantenida constante, excepto aquellas cuya influencia está siendo estudiada. Por ello, el efecto de variables no controladas en el comportamiento del sistema no tiene que ser considerado durante la simulación. Sin embargo, durante la experimentación con un sistema real, a menudo es requerido este control.

- 7. Entrenamiento. La simulación no requiere un gran nivel de sofisticación matemática en comparación con la modelación utilizada en soluciones analíticas.
- 8. Menores costos. Algunos autores han estimado que los estudios diseñados para estimar las características de un sistema propuesto, mediante la simulación, pueden tener un costo de un dos por ciento o menos del capital requerido para la construcción de un sistema real [Henrisken, 1983]. De esta forma, pueden ser probados nuevos diseños de equipos o de distribución física de instalaciones o de sistemas de transporte, entre otros, sin la necesidad de utilizar recursos para su compra.
- 9. Se obtienen respuestas a preguntas del tipo "¿qué pasa si...?", Esto es particularmente útil para el diseño de nuevos sistemas.

Sin embargo, la simulación también está sujeta a importantes desventajas, entre ellas están las siguientes:

- 1. Falta de obtención de resultados exactos. La simulación sólo proporciona estimaciones, no resultados exactos.
- 2. No es una técnica de optimización. La simulación es una técnica de evaluación utilizada para responder a preguntas del tipo "¿qué pasa si...?", pero no para preguntas de "¿qué es lo mejor?" La simulación no genera soluciones, sino que evalúa aquellas que se han propuesto.

# 1.3. Simulación por computadora

La simulación por computadora se refiere a los métodos para estudiar una gran variedad de modelos de sistemas del mundo real mediante la evaluación numérica usando un software diseñado para imitar las operaciones o características del sistema, a menudo en el transcurso del tiempo. Desde un punto de vista práctico, la simulación es el proceso de diseñar y crear un modelo computarizado de un sistema real o propuesto con la finalidad de llevar a cabo experimentos numéricos que den un mejor entendimiento del comportamiento de dicho sistema en un conjunto dado de condiciones. Aunque se puede usar para estudiar sistemas sencillos, el poder real de esta técnica surge cuando se usa para estudiar sistemas complejos.

La simulación se refiere a un gran conjunto de métodos y aplicaciones que buscan imitar el comportamiento de sistemas reales, generalmente en una computadora con un software apropiado [Kelton et. al., 2008].

Como ya se mencionó, la simulación por computadora trata con modelos de sistemas. Un sistema es una instalación o un proceso real o planeado como:

- Una planta de manufactura con máquinas, personal, métodos de trasporte, bandas transportadoras y espacios de almacenamiento.
- Un banco con diferentes tipos de clientes, servidores e instalaciones como ventanillas de cajeros, cajeros automáticos, mesas de préstamos y cajas de seguridad para depósitos.
- Un aeropuerto, una red de distribución de plantas y almacenes, un hospital, un restaurante, una autopista, un supermercado, etcétera.

Las personas a menudo estudian un sistema para medir su desempeño, mejorar su operación, o diseñarlo si es que no existe. A los gerentes o controladores de un sistema también les gustaría tener ayuda disponible para las operaciones cotidianas, como decidir que hacer en una fábrica si una máquina importante se avería o simplemente simulan para entender cómo funciona el sistema.

#### A veces no se puede (o no se debe) jugar con el sistema

En muchos casos es simplemente muy difícil, costoso o casi imposible hacer estudios físicos del mismo sistema.

- No se puede experimentar con una planta que aun no se construye.
- En un hospital no se puede ver que pasaría con la capacidad en caso de una catástrofe.

En esta situación se debe construir un modelo que sirva como suplente para estudiar el sistema y hacer preguntas pertinentes acerca de qué es lo que pasaría en el sistema si se hiciera una u otra cosa o si se diera una situación que estuviera más allá de su control. Nadie resulta herido y su libertad para intentar ideas diversas con el modelo podría descubrir alternativas atractivas que de otra manera no podría probar con el sistema real.

Sin embargo, se deben construir modelos con cuidado y con el suficiente detalle, de tal manera que lo que se aprende del modelo nunca sea diferente de lo que se hubiera aprendido del sistema al jugar directamente con él. Esto se denomina validez del modelo.

#### Popularidad y ventajas

La simulación es la herramienta de investigación de operaciones más popular:

- Rasmussen y George (1978) cuestionaron a los graduados de ciencias del Departamento de investigación de operaciones de la Universidad Case Western Reserve acerca del valor de los métodos después de su graduación. Los primeros cuatro métodos fueron análisis estadístico, pronósticos, análisis de sistemas y sistemas de información, los cuales son categorías muy amplias y generales. La simulación fue el siguiente método y se clasificó más arriba que otras herramientas de investigación de operaciones más tradicionales como la programación lineal y la teoría de colas.
- Thomas y DaCosta (1979) les entregaron a analistas de 137 grades empresas una lista de herramientas y les pidieron usar las que usaban. El análisis estadístico ocupó el primer lugar con 93 % de las empresas que reportaron su uso (es difícil imaginar una gran empresa que no lo haga) seguido por la simulación (84 %). De nuevo, la simulación estuvo en una posición más alta que la programación lineal, PERT/CMP, teoría de inventarios y programación no lineal.
- Shannon, Long y Buckles (1980) encuestaron a miembros de la División de investigación de operaciones del Instituto Estadounidense de Ingeniería Industrial (ahora el Instituto de Ingenieros Industriales) y encontraron que entre las herramientas listadas, la simulación se posicionó en en primer lugar tanto en utilidad como en interés, y fue la segunda en cuanto a familiaridad, detrás de la programación lineal, lo cual puede indicar que la simulación debería recibir mayor énfasis en el currículo académico.
- Forgionne (1983); Harpell, Lane y Mansour (1989) y Lane, Mansour y Harpell (1993) reportaron que el análisis estadístico fue el primero y la simulación el segundo en términos de uso por profesionales en grandes empresas. Sin embargo, una vez más los currículos académicos parecían ir a la zaga dado que la programación lineal se enseñaba con mayor frecuencia que la simulación, aunque ésta era más usada por los profesionales.
- Morgan (1989) estudió muchos de los tipos de encuestas mencionadas y reportó que con frecuencia se encontraba el uso "pesado" de la simulación. Aun en una industria

con el uso más bajo de herramientas de investigación de operaciones (autotransportes), la simulación se posicionó en el primer lugar de uso.

La primera razón de la popularidad de la simulación es su capacidad para tratar con un modelo muy complicado de los sistemas complicados correspondientes. Esto la hace una herramienta versátil y poderosa. Otra razón de la creciente popularidad de la simulación es el mejoramiento obvio en la proporción desempeño-precio del hardware, al hacerla más rentable para lograr lo que hace pocos años era cómputo de costo prohibido. Por último, los avances en el poder, la flexibilidad y la facilidad de uso del software de simulación han trasladado en enfoque desde la espera de la programación tediosa, proclive a errores y de bajo nivel a un campo de toma de decisiones rápidas y válidas.

#### Las malas noticias

Con todo, la simulación tampoco es totalmente el paraíso.

Puesto que muchos sistemas reales están afectados por entradas aleatorias e incontrolables, muchos modelos de simulación involucran componentes de entrada aleatorios o estocásticos ocasionando que sus salidas también sean aleatorias. En muchas simulaciones, conforme el margen de tiempo se hace más largo (como meses en lugar de un día), la mayoría de los resultados promedios durante la ejecución tenderán a estabilizarse y hacerse menos variables, pero puede ser difícil determinar cuán lago es «suficiente mente largo» para que esto pase. Pero aun así preferimos una respuesta aproximada al problema correcto que una respuesta exacta al problema erróneo.

#### Programación en lenguaje con un propósito general

Cuando apareció la computadora digital en las décadas de 1950 y 1960, las personas comenzaron a escribir programas de computadoras en lenguaje de procesamiento de propósito general, como FOTTRAN, para hacer simulación de sistemas más complicados. Los paquetes de apoyo fueron escritos para ayudar con las tareas de rutina, como el procesamiento de listas, el mantenimiento de rastros de eventos simulados y la contabilidad de estadísticas. El enfoque fue muy adaptable y flexible (en términos de los tipos de modelos y manipulaciones posibles), pero también tedioso y propenso a errores, ya que los modelos debían ser codificados desde el principio cada vez.

Como un tipo de descendiente de simulación con lenguaje de programación de uso general, a veces las personas usan software de hojas de cálculo para algunos tipos de simulación. Ello ha sido popular en modelos estáticos, quizá con añadidura para facilitar las operaciones comunes y para proporcionar herramientas de mayor calidad (como generadores de números aleatorios) que es lo habitual en las hojas de calculo. Pero para todo, excepto para los modelos dinámicos más sencillos, las limitaciones inherentes a las hojas de cálculo las hacen difíciles (en el mejor de los casos) y, por lo general, prácticamente imposibles para usarlas en simulación de modelos grandes, reales y dinámicos.

#### Lenguajes de simulación

Los lenguajes de simulación de propósito especial como GPSS, Simscript, SLAM y SIMAN aparecieron en escena hace algún tiempo y proporcionaron un mejor marco para los tipos de simulación que las personas hacen. Los lenguajes de simulación se hicieron muy populares y todavía se usan.

# 1.4. Sistemas, modelos y tipos de modelos de simulación.

La Ingeniería de Sistemas es como cualquier otra ingeniería: arte y ciencia, sólo que su objetivo son los sistemas. Una característica que distingue a la Ingeniería de Sistemas es el uso de enfoque sistémico, a diferencia de otras ingenierías que usan básicamente el enfoque reduccionista.

Sin embargo, igual que lo hacen otras ingenierías, que proyectan, diseñan, dimensionan y construyen, la de sistemas también proyecta, diseña, implanta y controla lo que es su objeto: los sistemas.

### 1.4.1. Sistemas y ambiente de un sistema

Antes de poder realizar una modelación es necesario comprender el concepto de sistema y los limites del sistema. Un sistema se define como un conjunto de elementos (objetos,

entidades o transacciones) interrelacionados de algún modo, a fin de lograr un objetivo común. En la práctica el significado de "sistema" depende de los objetivos específicos del estudio. Los elementos que componen al sistema bajo estudio, pueden ser solamente un subconjunto de otro sistema mayor, por lo que a menudo es afectado por cambios que ocurren fuera del sistema. El modelado del sistema, es necesario para decidir sobre los límites entre el sistema y su ambiente. Esta decisión puede depender del propósito del estudio. Por ejemplo, si se requiere un estudio de las operaciones de despegue y aterrizaje de un aeropuerto, el sistema puede ser definido como una parte del conjunto de todas las operaciones que se realizan en dicho aeropuerto, por lo que se excluirán otros tipos de operaciones (ascenso y descenso de pasajeros, carga y descarga de equipaje, abastecimiento de combustible, etcétera).

En el caso de los sistemas de fábricas, por ejemplo, los factores que controlan el arribo de órdenes pueden considerarse que están fuera de la influencia de la fabrica y por consiguiente son parte del ambiente. Sin embargo, si el efecto de suministro en la demanda será considerado, habrá una relación entre el rendimiento de la fábrica y las llegadas de órdenes, y esta relación debe ser considerada en actividades del sistema [Gordon, 1978].

Como se ha expuesto, el sistema es un todo integrado. La definición es por demás general. La naturaleza del todo no se especifica, pero en nuestro caso es un sistema tecnológico empresarial. En todo ello lo mas importante es que el todo funcione con armonía y cumpla con objetivos prefijados, y no que una de sus partes funcione de forma óptima en detrimento de las restantes. De hecho, las funciones generales del sistema aquí presentado busca optimizar combinando en forma ponderada los diversos objetivos del mismo. Éstos pueden ser: simplicidad, beneficios a corto o a largo plazo, facilidad de conservación, costo, vida útil, eficiencia en el servicio, etcétera. Más que optimizar tomando en cuenta cada uno de ellos, la Ingeniería de Sistemas se plantea en óptimo general para determinar, como consecuencia, lo que para el sistema en análisis debe entenderse por óptimos parciales que satisfacen los objetivos particulares.

Para la solución de problemas simples y complejos, es necesario centrarse en las variables y relaciones esenciales que definen al problema y no en todos los detalles que se presentan en la realidad, a esta aproximación o abstracción se le llama generalmente modelo. El modelo debe ser tan simple para que resulte ventajoso trabajar con él y no directamente con el mundo real, y por otro lado, el modelo debe ser lo suficientemente detallado para que las conclusiones que se obtengan de él, sean tan confiables como las derivadas de una experimentación directa.

Los modelos pueden clasificarse como modelos físicos y como modelos matemáticos (véase Figura 1.1.).Un modelo físico es una réplica física o un modelo a escala del sistema, un modelo matemático utiliza una notación simbólica y ecuaciones matemáticas para representar a un sistema. Los modelos de simulación son un tipo particular del modelo matemático de los sistemas. Este tipo de modelos es sólo un conjunto de aproximaciones y suposiciones estructurales y cuantitativas, acerca de la forma en que funciona o funcionará el sistema. Estos son representados en programas por computadora, lo que lo hace fácil, barato y rápido de obtener respuestas a las cuestiones del modelo en estudio, mediante el simple manejo de las entradas y forma del programa.

Después de hacer aproximaciones y de señalar las suposiciones para un modelo lógico y válido del sistema objetivo hay que encontrar una manera de tratar con el modelo y analizar su comportamiento.

Si el modelo es bastante simple, se debe poder usar herramientas matemáticas tradicionales como la teoría de colas, métodos de ecuaciones diferenciales o algo como la programación lineal para obtener la respuesta que se necesita. Sin embargo, la mayoría de los sistemas que las personas modelan y estudian son bastante complicados, así que sus modelos válidos (Siempre se puede desarrollar un modelo simple de un sistema complicado, pero hay muchas probabilidades de que no sea válido. Si se va más allá y se analiza, puede ser que dicho modelo obtenga respuestas agradables, limpias y sencillas a las preguntas erróneas. A veces a esto se le llama error de tipo III) [Kelton et. al., 2008], también son bastante complicados. Es posible que para esos modelos no haya soluciones matemáticas exactas resueltas, y es ahí donde entra la simulación.

Los modelos de simulación pueden ser clasificados de acuerdo con ciertas características implícitas de ellos. Con respecto al tiempo se clasifican como **estáticos o dinámicos**; en función de la incertidumbre como **determinísticos o estocásticos**; y con respecto a las características de sus variables, como **discretos o continuos**.

Los modelos de simulación estáticos, o simulación Monte Carlo, representan sistemas en un instante particular de tiempo, o sistemas a los que el tiempo no los afecta. Los modelos de simulación dinámicos representan sistemas que cambian a través del tiempo. La simulación de las operaciones de despegue y aterrizaje en un aeropuerto a lo largo de un día, es un ejemplo de una simulación dinámica. El tiempo no desempeña un papel natural en los modelos estáticos pero sí en los dinámicos.

Los modelos de simulación que no tienen variables aleatorias están clasificados como

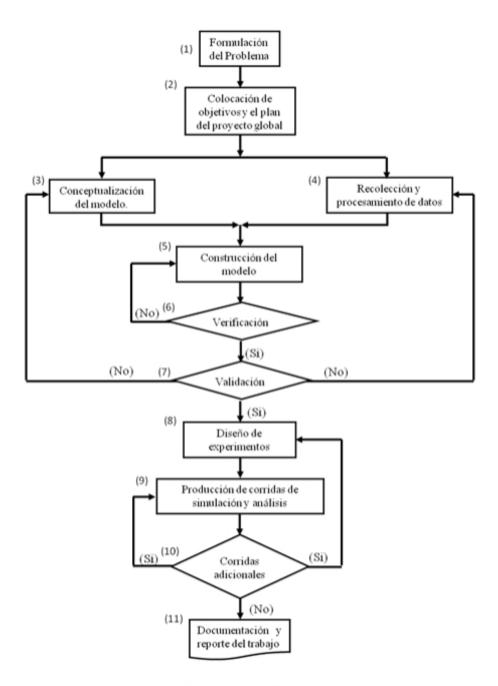
determinísticos. Por ejemplo, si en un consultorio médico todos los pacientes llegan a la hora programada de su cita, se presentan tiempos de llegadas determinísticos. Por el contrario, los modelos de simulación estocásticos tienen una o más variables de entrada aleatorias, cabe señalar que las variables de entrada aleatorias producen variables de salida aleatorias. Los modelos que no tiene entradas aleatorias son deterministas, los modelos estocásticos, operan con al menos alguna entrada aleatoria.

Un modelo de simulación discreto es aquel en el cual las variables de estado <sup>1</sup> cambian únicamente en instantes dados. En cambio, en un modelo de simulación continuo las variables de estado cambian continuamente a través del tiempo. En un modelo continuo el estado del sistema puede cambiar continuamente en el tiempo; un ejemplo es el nivel de una presa conforme entra y sale el agua, y conforme sucede la precipitación y la evaporación. Sin embargo, en un modelo discreto en cambio puede ocurrir sólo en puntos separados en el tiempo, tal como sistema de fabricación con partes que llegan y se van en tiempos específicos, máquinas que se encienden y se apagan en tiempos específicos, y descansos para los trabajadores. Se pueden tener cambios tanto continuos como discretos en el mismo modelo, el cual recibe el nombre de modelo combinado continuo-discreto.

### 1.5. Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación.

Para decribir cómo modela un sistema, se encontrará que los temas relacionados con el diseño, el análisis y la representación de modelos en el software son esenciales para un estudio de simulación exitoso, pero no son los únicos ingredientes, hay una secuencia de pasos que deben seguirse para la elaboración del modelo de simulación y para la realización de los experimentos con él. Los pasos que se siguieron en este trabajo se muestran en la Figura 1.2. Debe Observarse cómo cada uno de los pasos de dicha figura ha sido numerado, con el propósito de tener una referencia que servirá para los comentarios que se dan a continuación.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Las variables de estado son aquellas que describen alguna condición del sistema o de uno de sus componentes, por ejemplo, de una pista de aeropuerto, su condición de ocupada o desocupada.



Fuente Elaboración propia con base en Banks et. al., [2005].

Figura 1.2: Pasos para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación.

Según se puede observar, ningún estudio de simulación seguirá una "fórmula" preestablecida, pero hay varios aspectos que tienden a aparecer con frecuencia en diferentes literaturas, lo aquí descrito es una adaptación propia de los pasos a seguir en un estudio de simulación con base en [Banks et. al., 2005].

- 1. Formulación del problema. Cualquier estudio de simulación debe iniciar con el establecimiento del problema a resolver. El diseñador del modelo debe familiarizarse profundamente con las características y propósito del sistema que va a ser modelado, con las alternativas que deben ser consideradas y con los objetivos del estudio de simulación.
- 2. Colocación de objetivos y el plan del proyecto global. Los objetivos indicarán las preguntas que deben responderse mediante la simulación. Hay que entender lo que se puede aprender del estudio y no esperar más. Aquí se especifica acerca de lo que se observa, manipula, cambia, y entrega. Es necesario regresar a estos objetivos a través del estudio de simulación para mantener la atención enfocada a lo que es importante, a saber: al tomar decisiones acerca de la mejor manera de (o por lo menos mejorar) operar el sistema.
- 3. Conceptualización del modelo. La construcción de un modelo de simulación es tanto un arte como una ciencia [Banks et. al., 2005]. Es recomendable empezar con un modelo simple para después modificarlo hasta uno de mayor complejidad. Sin embargo, la complejidad del modelo final no debe exceder los requerimientos que cumplan con el propósito para el cual se está haciendo el diseño. No es necesaria una copia paso a paso, entre el modelo y el sistema real, sólo es necesaria la esencia de este último. En esta etapa debe definirse qué aspectos del sistema serán representados en el modelo y cuáles no, además, se deberá establecer con qué nivel de detalle se hará dicha representación.
- 4. Recolección y procesamiento de datos. Hay una constante interacción entre la construcción del modelo y la recolección de los datos necesarios para su funcionamiento [Shannon, 1975]. Los objetivos del estudio establecen, en gran medida, la clase de datos que deben ser obtenidos y cuántos detalles son adecuados. Los datos pueden ser obtenidos de observaciones de un sistema ya existente. En el caso de un sistema inexistente los datos deben ser estimados, en ambos casos es de importancia involucrar a los que en verdad saben lo qué está pasando en el sistema real. Mediante estos datos se obtendrán los valores de los parámetros, que serán utilizados durante la programación del modelo de simulación.

- 5. Construcción del modelo En esta etapa, el modelo conceptual especificado en el paso 3 debe ser codificado en un formato que sea reconocido por una computadora. La formulación de la codificación requiere definir dos aspectos importantes: (a) el programa de computación que será utilizado y (b) la información de entrada y condiciones iniciales. En la mayoría de los programas de simulación, antes de realizar la codificación, se requiere elaborar un diagrama de flujo que describa la secuencia lógica del movimiento de las transacciones del sistema que se está simulando. En cuanto a los programas de computación que se pueden utilizar para la codificación, existen en términos generales dos posibilidades, la primera es que se escriba el programa en un lenguaje general de programación como FORTRAN o ALGOL, la otra posibilidad es que se utilice un programa especial para fines de simulación como GPSS, SIMNET II o ProModel. En cuanto a los datos de entrada y las condiciones iniciales, es necesario determinar los valores que se van a asignar a las variables y parámetros del modelo en el momento del inicio, para lo cual es necesario recurrir a los supuestos del modelo conceptual y a métodos de ensayo y error. Ya construido el modelo aquí mismo se realizan pruebas piloto. Las pruebas piloto son simulaciones realizadas con el modelo, que tienen como finalidad incrementar la experiencia del modelador con la utilización del modelo diseñado y para observar en forma preliminar los resultados de salida del modelo, tanto cualitativa como cuantitativamente. Estos resultados también sirven para planear varios aspectos de las simulaciones que se harán posteriormente, durante la experimentación con el modelo final. Por último, estos resultados pueden ser utilizados para ayudar a la validación del modelo de un sistema ya existente.
- 6. Verificación El propósito de la verificación del modelo es asegurar que el modelo conceptual está reflejado con precisión en su representación computarizada, las regiones extremas de los parámetros, los sucesos correctos con acciones "obvias" y la lógica común del sistema.
- 7. Validación Se dice que un modelo es válido si representa adecuadamente al sistema que está siendo modelado. Si el modelo ha sido diseñado para un sistema ya existente, entonces la validación del modelo puede ser evaluada al comparar los resultados de las simulaciones del modelo contra los datos del comportamiento del sistema real. Si los comportamientos, entre el modelo y el sistema real, son consistentes, el modelo es válido. Aquí se pueden formular preguntas como, ¿Corresponde a la distribución de entrada con lo que se observó en el campo?, ¿Corresponden las medidas del desempeño del modelo con las de la realidad?. Mientras se realizan las

pruebas estadísticas, se valora mucho una buena dosis de sentido común <sup>2</sup>.

- 8. Diseño de experimentos En este paso se planean los experimentos que se harán mediante el modelo de simulación establecido (qué es lo que desea saber y cómo los experimentos de simulación lo llevarán a obtener las respuestas de forma precisa y eficaz). Algunos de los aspectos que se deben definir son las condiciones bajo las cuales se harán las simulaciones, la duración del tiempo que se desea simular y el número de simulaciones requeridas. Muchas veces los principios de diseño experimental estadísticos clásicos pueden ser de gran ayuda.
- 9. Producción de corridas de simulación y análisis En este punto se realizan los experimentos establecidos en el paso anterior, con el propósito de obtener datos que midan el comportamiento del sistema simulado, considerando las distintas condiciones de interés. El Análisis de los resultados <sup>3</sup> de las simulaciones implica el análisis estadístico de los resultados provenientes del paso anterior, con el objeto de estimar los valores de las medidas de desempeño que son de interés.
- 10. Simulaciones adicionales. Con base en el análisis del paso anterior, se debe determinar si son necesarias simulaciones adicionales. En caso afirmativo podría requerirse un nuevo diseño del experimento.
- 11. Reporte del trabajo. Los resultados del trabajo deben ser redactados en forma clara y concisa en un reporte final. Esto tiene el propósito de describir todos los aspectos importantes del estudio, incluyendo objetivos, consideraciones para elaborar el modelo conceptual y su transformación en el modelo computacional, criterios utilizados, resultados de los experimentos, recomendaciones establecidas, conclusiones y otros datos pertinentes.

Aunque en la Figura 1.2. el último paso señalado es el relacionado con la elaboración del reporte, en muchos casos existe otro paso adicional, la implementación de los resultados del estudio de simulación. Lo anterior puede implicar la construcción de un sistema nuevo o la aplicación de cambios en un sistema existente. Sin embargo, también puede resultar como conclusión del estudio de simulación que el nuevo sistema propuesto no sea económicamente atractivo o que por razones económicas sea mejor dejar al sistema existente como está, sin aplicarle cambio alguno.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Verificar es construir correctamente el modelo, mientras que validar es construir el modelo correcto.

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Llevar a cabo las formulas correctas de análisis estadísticos para ser capaz de hacer declaraciones acertadas y precisas.

La secuencia de pasos señalados en la Figura 1.2. ha sido tomada como guía para el desarrollo de los capítulos siguientes. Así, en la Introducción se abordan los pasos (1) y (2); en el Capítulo 2 se contempla el paso (3); el Capítulo 4 considera el paso (4); en el capítulo 4 se contemplan los pasos (5), (6) y (7); el Capítulo 5 considera los pasos (8), (9) y (10); y el ultimo paso (11) se exhibe con la elaboración propia de este documento en general.

Con estos puntos mencionados, el intento por un buen proyecto de simulación exitoso habrá logrado una mejora considerable pero para conocer y ahondar más en los puntos tratados en esta sección se pueden consultar las referencias citadas al final de este documento.

#### 1.6. Conceptos Fundamentales de Eventos Discretos.

Simulación de Eventos-Discretos contempla la modelación de sistemas a medida que evolucionan con el tiempo por una representación en la que la variable de estado cambia instantáneamente en puntos separados en el tiempo. (En términos matemáticos, podríamos decir que el sistema puede cambiar en sólo un contable número de puntos en el tiempo) Estos puntos en el tiempo son en los que ocurra un suceso, cuando un evento es definido como una ocurrencia instantánea que puede cambiar el estado del sistema. Aunque la simulación de eventos-discretos conceptualmente podría ser hecha con cálculos manuales, pero la cantidad de datos que pueden ser almacenados y manipulados para la mayoría de los sistemas del mundo real exige que las simulaciones de eventos discretos se lleve a cabo en una computadora digital.

La simulación de una ecuación diferencial utilizando cualquier método existente puede expresarse mediante una ecuación en diferencias de la forma:

$$x(t_{k+1}) = f(x(t_{k+1}), x(t_k))$$
(1.1)

donde la diferencia  $t_{k+1} - t_k$  puede ser constante o variable y la función f puede ser explícita o implícita. En consecuencia, el programa de simulación tendrá un código iterativo que avanza el tiempo de acuerdo al tamaño del siguiente paso. En virtud de esto se dice que tales métodos de simulación producen modelos de simulación de tiempo discreto.

Evidentemente, se está frente a un sistema que es discreto en algún sentido pero pertenece a una categoría que no encaja en los sistemas de tiempo discreto. Como se verá más ade-

lante, este sistema puede ser representado por un Sistema de Eventos Discretos.

La frase Eventos Discretos está generalmente asociada con algunos formalismos muy populares como Autómatas de Estado, Redes de Petri, *Grafos de Eventos (Event Graphs)*, Statecharts, etc. Desafortunadamente, ninguno de ellos puede representar esta clase de sistemas *extraños* en una situación general. Estos lenguajes gráficos se limitan a sistemas con un número finito de estados posibles (con excepción de las Redes de Petri las cuales si pueden representar una cantidad infinita de estados) mientras que en este caso se requiere una herramienta más general. De todas formas, tal formalismo general existe y se conoce como DEVS (Discrete Event System Specification).

El formalismo DEVS [Bernard et. al., 2000, 1976], fue desarrollado por Bernard Zeigler a mediados de los setentas. El uso de DEVS en relación con sistemas continuos no está aún muy difundido y es prácticamente desconocido en las comunidades de métodos numéricos y control. Sin embargo, DEVS es ampliamente utilizado en ciencias de la computación donde ha recibido un muy importante desarrollo en sus aspectos teóricos y prácticos.

DEVS permite representar todos los sistemas cuyo comportamiento entrada/salida puede ser descrito por secuencias de eventos sujeto a que el estado tenga un número finito de cambios en cualquier intervalo finito de tiempo.

Un evento es la representación de un cambio instantáneo en alguna parte de un sistema. El mismo puede caracterizarse por un valor y un instante en el que ocurre. El valor puede ser un número, un vector, una palabra o, en general, un elemento cualquiera de un conjunto determinado. La trayectoria definida por una secuencia de eventos adopta el valor  $\phi$  (o No Evento) para todo valor de tiempo, excepto en los instantes en los que hay eventos. En estos instantes, la trayectoria toma el valor correspondiente al del evento en cuestión. La Figura 1.3., muestra una trayectoria de eventos que toma valores  $x_1$  en el tiempo  $t_1$ ,  $x_2$  en el tiempo  $t_2$ , etc.

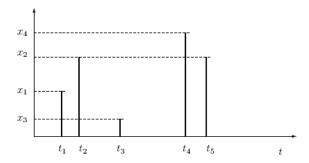


Figura 1.3: Trayectoria de eventos.

Un modelo DEVS procesa una trayectoria de eventos de entrada y, según esta trayectoria y sus propias condiciones iniciales, produce una trayectoria de eventos de salida. Este comportamiento entrada/salida se representa en la Figura 1.4.



Figura 1.4: Comportamiento Entrada/Salida de un modelo DEVS.

El comportamiento de un modelo DEVS se expresa luego mediante una forma que es muy común en la teoría de autómatas. Un modelo DEVS *atómico* queda entonces definido por la siguiente estructura:

$$M = (X, Y, S, \delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta)$$

donde:

- lacktriangle X es el conjunto de valores de eventos de entrada, es decir el conjunto de todos los valores que un evento de entrada puede adoptar.
- Y es el conjunto de valores de eventos de salida.
- ullet S es el conjunto de valores de estado.

•  $\delta_{int}, \delta_{ext}, \lambda, ta$  son funciones que definen la dinámica del sistema.

Cada posible estado  $s(s \in S)$  tiene asociado un Avance de Tiempo calculado por la Función de Avance de Tiempo (Time Advance Function)  $ta(s)(ta(s) : S \to \mathbb{R}_0^+)$ . El Avance de Tiempo es un número real no negativo que indica cuanto tiempo el sistema permanecerá en un estado determinado en ausencia de eventos de entrada.

Luego, si el estado toma el valor  $s_1$  en el tiempo  $t_1$ , tras  $ta(s_1)$  unidades de tiempo (o sea, en tiempo  $ta(s_1) + t_1$ ) el sistema realiza una transición interna cambiando a un nuevo estado  $s_2$ . El nuevo estado se calcula como  $s_2 = \delta_{int}(s_1)$ . La función  $\delta_{int}(\delta_{int} : S \to S)$  se llama Función de Transición Interna (Internal Transition Function).

Cuando el estado va de  $s_1$  a  $s_2$  se produce también un evento de salida con valor  $y_1 = \lambda(s_1)$ . La función  $\lambda$  ( $\lambda$  :  $S \to Y$ ) se llama Función de Salida (Output Function). Así., las funciones  $ta, \delta_{int}$  y  $\lambda$  definen el comportamiento autónomo de un modelo DEVS.

Cuando llega un evento de entrada el estado cambia instantáneamente. El nuevo valor del estado depende no sólo del valor del evento de entrada sino también del valor anterior de estado y del tiempo transcurrido desde la última transición. Si el sistema llega al estado  $s_3$  en el instante  $t_3$  y luego llega un evento de entrada en el instante  $t_3 + e$  con un valor  $x_1$ , el nuevo estado se calcula como:

 $s_4 = \delta_{ext}(s_3, e, x_1)$  (notar que  $ta(s_3) > e$ ). En este caso se dice que el sistema realiza una transición externa. La función  $\delta_{ext}$  ( $\delta_{ext} : S \times \mathbb{R}_0^+ \times X \to S$ ) se llama Función de Transición Externa (External Transition Function). Durante una transición externa no se produce ningún evento de salida.

En general, el evento discreto es algo que ocurre en un momento en el tiempo. Por ejemplo, empujar un botón del ascensor, encender un motor, apagar un motor, y encender una luz, son todos eventos discretos, porque hay un momento en el tiempo en que cada uno ocurre. Actividades como mover un tren del punto A al punto B no son eventos discretos porque éstas tienen una duración de tiempo; sin embargo, un evento de este tipo, puede ser modelado como dos eventos discretos separados: el evento del tren que deja el punto A, y el evento del tren que llega al punto B. Si se asocia un valor de tiempo con cada evento discreto, entonces pueden modelarse las actividades de duración como la

diferencia entre las veces asociadas con los eventos que marcan el principio y el extremo de cada actividad. Por ejemplo, puede especificarse que la llegada al punto B ocurre 3 horas y 37 minutos después de dejar A. Por consiguiente en este punto, se puede ver que si el tren deja el punto A a las 7:53 pm, entonces el cargamento del tren llega al punto B a las 11:30 pm.

El propósito de una simulación de evento discreta es estudiar un sistema complejo calculando las veces que se asociarían con los eventos reales en una situación de la vida real. En el ejemplo del tren, se supone que cuando el tren llega al punto B, una carga se transfiere a un segundo tren que llega al punto C después de 45 minutos. Es decir, la salida del segundo tren del punto B se activa por la llegada del primer tren, y la llegada al punto C ocurre con un retraso de 45 minutos después de la salida del punto B, así se observa como el segundo tren llegará al punto C a las 12:15 am. En este ejemplo simple, podría entonces simularse como un sistema de eventos discretos.

Una manera de llevar a cabo una simulación es usar el reloj en tiempo real para cronometrar los retrasos, y leer el valor en el reloj en cada ocurrencia de los eventos; sin embargo, esto tomaría innecesariamente mucho tiempo. Es decir, sería completamente inútil esperar 3 horas y 37 minutos para determinar el tiempo de la llegada del primer tren cuando un simple cálculo es suficiente. El objetivo de la simulación de eventos discretos es calcular, tan rápidamente como sea posible, los tiempos físicos que ocurren en el sistema real, pero sin esperar realmente los retrasos entre los eventos a ocurrir en el tiempo real.

Para lograr esto en un programa secuencial, se usa una cola de eventos que están listos para ser generados. Esta cola de eventos se guarda y ordena en el orden de tiempo creciente, y el programa procesa los eventos en este mismo orden. El programa inicia con uno o más eventos en la cola, y tiene que construir el conocimiento sobre cómo otros eventos pueden ser agregados a la cola de eventos. (Por ejemplo, si se sabe que un evento e1 ocurre en un instante t, y un evento e2 (relacionado con e1) debe ocurrir 5 unidades de tiempo después, entonces al instante t+5 se coloca e2 en la cola de eventos).

Bajo este esquema, se utilizará la simulación de DEVS en el desarrollo del presente trabajo de Tesis, dado que es adecuada para representar la ocurrencia de eventos en el sistema de estudio.

### 1.7. Conceptos Fundamentales de Simulación Monte Carlo.

El método Monte Carlo (MC) es una forma genérica de nombrar procedimientos matemáticos cuya característica común es la utilización de números generados aleatoriamente y distribuciones de probabilidad. Se hace uso de variables aleatorias definidas en un espacio dimensional finito y se calcula su valor esperado para llegar a la solución aproximada de un problema.

Su uso está cada vez más extendido por que MC es, en muchos casos, una buena opción para resolver problemas de índole estocástica, o que puedan plantearse en términos estocásticos <sup>4</sup>. Sin embargo, para utilizar el método en la mayoría de las aplicaciones, es primordial contar con computadoras que tengan suficiente capacidad de procesamiento, para realizar los cálculos necesarios y obtener resultados en tiempo satisfactorio.

A veces también se utiliza como medio de comprobación de cálculos teóricos o validación de soluciones obtenidas por otros métodos.

Se tienen datos históricos de que está técnica, fue utilizada aún antes del siglo XVIII. Se sabe que ese nombre fue tomado por el casino del mismo nombre, y que fue introducido por Von Neumann y sus colaboradores como contraseña para su trabajo secreto realizado en Los Alamos, Estados Unidos, para el desarrollo de la bomba atómica. Su trabajo incluía un estudio del comportamiento estocástico de la difusión de neutrones.

El uso del método fue extendido, primero en la mecánica estadística y después en otras ramas de la física. En la actualidad se aplica en áreas muy diversas, como por ejemplo el transporte de radiación, evaluación de integrales definidas, crecimiento de bosques, estudios de contaminación, comportamiento de las acciones en la Bolsa de Valores, crecimientos de PIB, interacciones de las moléculas del ADN, así como en una gran diversidad de ciencias y disciplinas donde no se pensaba que fuera aplicable.

La operación básica en Monte Carlo es, utilizar una secuencia de números aleatorios para escoger (muestrear) una variable de alguna distribución de probabilidad. Los números aleatorios utilizados en cálculos MC se generan mediante algoritmos, lo cual lleva a una

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Estocástica: Teoría estadística de los procesos cuya evolución en el tiempo es aleatoria. Tal como la secuencia de las tiradas de un dado. Definición: Real Academia Española de la Lengua.

contradicción, puesto que, si son generados por algoritmos, en realidad no son aleatorios. En la práctica, estas cadenas de números pseudoaleatorios generados así, tienen un periodo tan largo, que se pueden considerar como aleatorios para casi cualquier aplicación de MC [Nahum, 1992].

Morin [Morin, 1988] ilustra con cajas negras la técnica Monte Carlo como se observa en la Figura 1.5.

Un buen generador de números aleatorios es el punto inicial para una simulación Monte Carlo. Por un buen generador se entiende que se tiene una gran cantidad de números cuya ocurrencia es impredecible y que este río de números para ciertas pruebas diseñadas para detectar si la cadena de números se ésta alejando de la aleatoriedad.

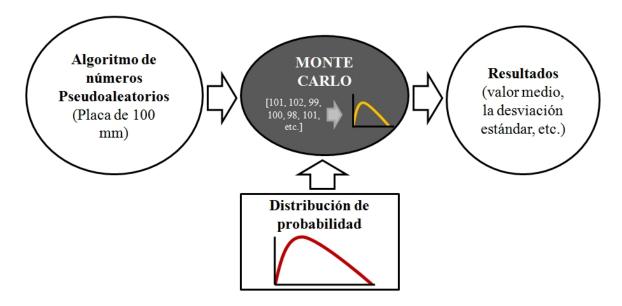


Figura 1.5: Caja negra de la técnica Monte Calo.

Los números aleatorios pueden generarse según una distribución de probabilidad uniforme en algún intervalo cualquiera. Unitario o no, o de acuerdo a otras funciones de probabilidad como la normal o gaussiana, la de Poisson, la exponencial o la beta.

Una vez que se van generando lo números aleatorios, se muestrea la distribución de probabilidad, o distribuciones de probabilidad que se tienen en el problema, lo cual nos

dará como resultado algunos parámetros estadísticos como el valor medio y la desviación estándar, los cuales se tienen que interpretar en el marco del problema.

La precisión de los resultados es, en ocasiones, un obstáculo para utilizar el método Monte Carlo. Esto se debe a que entre más exactitud se requiere, más eventos o muestreos deben hacerse y esto, lleva a ocupar tiempos de computadora tan largos, que es impráctico o imposible. Para eliminar este obstáculo, se introducen métodos de reducción de varianza, teniendo el mismo número de eventos se puede tener mayor precisión de los resultados.

Por la naturaleza del método, este ha sido aplicado con éxito, por ejemplo, a la simulación de sistemas con comportamiento estocástico, como es el peso de la radiación por la materia, la solución de ecuaciones diferenciales o sistemas de producción, como el caso de estudio de esta tesis.

El método MC es muy utilizado en nuestros días en trabajos de alto impacto. Esto puede ser constatado en la gran cantidad de publicaciones que se tienen en la base de datos de Science Direct, donde se encuentran artículos que aplican el método MC en diversas áreas del conocimiento.

Resumiendo, La simulación MC representa un híbrido entre experimentación pura y teórica. La simulación por computadora es una forma de "realizar" un experimento en el cual la realidad es representada por un modelo. Si el sistema que se está simulando incluye entradas que son variables aleatorias, el modelo de simulación debería reflejarlas con la mayor precisión posible. Una forma de hacerlo es usando una técnica llamada simulación de Monte Carlo, en la cual el simulador se diseña para que los eventos simulados ocurran aleatoriamente y reflejen las frecuencias teóricas que se están modelando.

### 1.8. Conceptos Fundamentales de Planeación de la Capacidad.

Las estrategias empresariales utilizadas para competir en los mercados mundiales implican tomar decisiones correctas sobre planeación de las instalaciones. La **planeación** de las instalaciones incluye determinar cuánta capacidad de producción a largo plazo se requiere, cuándo se necesita la capacidad adicional, dónde debe ubicarse la instalación de producción y la disposición física y características de dichas instalaciones

[Gaither et. al., 2003]. La planeación de las instalaciones está basada en el plan estratégico a largo plazo de la empresa, mismo que traza cuáles serán las líneas de productos en cada uno de los periodos dentro del plan. Para muchas empresas, los planes para determinar la capacidad a largo plazo y ubicación de las instalaciones son las decisiones estratégicas más importantes.

Estas decisiones son vitales ya que, en primer lugar, la inversión de capital en maquinaria, tecnología, terrenos y edificios para la manufactura es enorme. Una vez que una empresa invierte millones de dólares en una instalación, tendrá que vivir con esta decisión durante mucho tiempo. Estas decisiones, por lo tanto son motivo de intenso estudio y se toman al más elevado nivel de la empresa. En segundo lugar, las estrategias a largo plazo forman parte de los planes para las instalaciones de una empresa. Temas como qué línea de productos se va a hacer, dónde se venderá y qué tecnología se empleará, reflejan los planes estratégicos de la firma, y estos problemas también se resuelven en los niveles más elevados de la empresa. En tercer lugar y uno de los más importantes en esta tesis descrita, es la eficiencia operativa de las instalaciones que depende de la capacidad de las instalaciones. Entre los factores que se ven afectados por la capacidad de instalaciones están, los costos de mantenimiento, la facilidad de programación y la economía de escala. Cuarto, la capacidad de instalaciones es una restricción para muchas otras decisiones de administración de la producción y de las operaciones. Qué cantidad de un producto puede producirse económicamente en un periodo específico es un factor limitate para la planeación de la producción a corto plazo.

#### Importancia de las razones con respecto a la capacidad

La capacidad del sistema de producción define los límites competitivos de la empresa. De manera específica, establece la tasa de respuesta de la empresa a un mercado, su estructura de costos, la composición de su personal, y la estrategia general de inventarios. Si la capacidad de una compañía no es adecuada, y su servicio es lento se esta permitiendo que la competencia entre al mercado, lo que recaerá en la perdida de clientes. Si la capacidad es excesiva, es probable que la compañía tenga que reducir precios para estimular la demanda, subutilizar su personal, llevar un exceso de inventario o buscar productos adicionales, menos rentables, para seguir en actividad.

#### Factores que afectan la capacidad

Hay factores externos e internos que afectan la capacidad. Entre los primeros están los reglamentos gubernamentales (horas de trabajo, seguridad, contaminación), los acuerdos con los sindicatos y la capacidad de suministros de los proveedores. Los factores internos más importantes son el diseño de productos y servicios, el personal y las tareas (capacitación de trabajadores, motivación, aprendizaje, métodos y contenido del trabajo), la distribución física de la planta y el flujo de procesos, las capacidades y el mantenimiento de equipo, la administración de materiales, un sistema de control de calidad y la capacidad de dirección.

#### Conceptos importantes de la capacidad

Mejor nivel operativo: se entiende el punto de la capacidad donde es menor el costo promedio por unidad.

Economías de escala: se trata del concepto conocido; al aumentar el tamaño de una planta y su volumen, baja el costo promedio por unidad producida, puesto que cada unidad absorbe parte de los costos fijos. Esta reducción en el costo promedio por unidad continúa hasta que la planta es tan grande que aumenta el costo de coordinar el manejo de personal y flujo de materiales; entonces se llega a un punto donde hay que encontrar nuevas fuentes de capacidad. Es posible la relación del concepto con el mejor nivel operativo que si se compara el costo promedio por unidad de planta de tamaño diferente. Se obtienen economías de escala si la producción se aproxima al mejor nivel operativo de la instalación: si rebasa este nivel, no habrá tal.

#### 1.8.1. El concepto de capacidad de planta

Dado el interés de este análisis, centrado en la determinación de la capacidad de planta, a continuación se definen los conceptos usados a lo largo de este informe.

- 1. Capacidad de diseño (CD): Es la máxima tasa posible de producción para un proceso, dados los diseños actuales de productos, mezclas, políticas de operación, fuerza laboral, instalaciones y equipo.
- 2. Capacidad efectiva (CE): Es la mayor tasa de producción que se puede obtener en forma razonable (considerando tiempos de mantenimiento preventivo y cambios de

serie) dadas las limitaciones del sistema.

3. Capacidad real (CR): Es la tasa de producción efectiva lograda por el proceso y, normalmente, es una función del tiempo ya que cambia constantemente. Se ve afectada por el uso y desgaste del equipo, desperdicios y retrabajo, montaje limitado de maquinaria, ausentismo de empleados, programación deficiente y otros factores similares que contribuyen a disminuir las tasas reales de capacidad.

Matemáticamente se verifica que:

$$CD > CE > CR,$$
 (1.2)

Además, con base en las definiciones dadas, se pueden obtener indicadores de uso tales como el factor de utilización de la capacidad y la eficiencia de uso definidos como:

Factor de utilización = 
$$\frac{\text{Capacidad real}}{\text{Capacidad de diseño}} = \frac{CR}{CD}$$
, (1.3)

Eficiencia = 
$$\frac{\text{Capacidad real}}{\text{Capacidad efectiva}} = \frac{CR}{CE},$$
 (1.4)

En términos generales, la capacidad práctica sustentable, se define como: el nivel más elevado de volumen de producción que puede mantener una planta, dentro del marco de un programa realista de trabajo, tomando en cuenta el tiempo muerto normal y suponiendo una disponibilidad de insumos suficiente para operar la maquinaria y el equipo instalado [Blackstone et. al., 1989].

#### 1.9. Comentarios finales.

En la actualidad, la mayor parte de las organizaciones, empresas de procesos productivos han visto incrementada la presión para adaptarse a los constantes cambios provocados por una elevada competitividad en los mercados internacionales. Posiblemente influenciados por la nueva tendencia en el sector, muchas empresas se han visto involucradas en un proceso de reingeniería de sus procesos.

La falta de herramientas analíticas que ayuden y faciliten la toma de decisiones es uno de los principales problemas con los que se encuentran los responsables de mejorar el rendimiento de aquellos sistemas cuyo comportamiento depende de un número elevado de variables de decisión (sistemas logísticos complejos). Determinar cambios en los procedimientos, en las reglas que utilizan los distintos departamentos en la toma de decisiones, en los flujos de información, así como cambios en la organización y en las políticas de funcionamiento tradicionales de la empresa en cuestión son algunos ejemplos de tareas que deben ser realizadas para reaccionar de modo eficiente ante perturbaciones y adaptarse a los continuos cambios del mercado.

La dificultad que comparten los procesos lógicos en general, se hace evidente en una gran diversidad de campos, en los que prácticamente se desconoce la influencia que puede tener sobre el rendimiento global de la empresa, cambios en algunas variables de decisión. El problema es todavía más complicado cuando se pretende optimizar (o en su caso mejorar) el rendimiento de un sistema cuyo comportamiento es poco previsible ante cambios en la logística del sistema, debido no tan sólo a las fluctuaciones estadísticas, sino también a las distintas situaciones que se derivan de la dependencia entre sucesos.

La herramienta de simulación orientada a eventos discretos ofrece una plataforma, que permite abordar con éxito un proceso de mejora continua de sistemas complejos, para los cuales, las técnicas analíticas clásicas basadas en el uso de cálculo diferencial, teoría de probabilidad y métodos algebraicos, no pueden ser utilizados para analizar de modo sencillo la complejidad de los procesos.

Antes de dar inicio con la conceptualización del modelo, en el capítulo II se da una breve descripción del sistema de producción en estudio y se describe la formulación del problema.

#### Capítulo 2

## Descripción del sistema de producción.

En este capítulo se define el problema a resolver y los objetivos que se persiguen, se muestran algunos datos generales de la Empresa (sistema bajo estudio) y generalidades del control de flujo de proceso, con el propósito de familiarizarse con la operación de la fábrica. Finalmente, se determina el modelo conceptual a utilizar, en donde se indican los aspectos que serán representados en el modelo y su nivel de detalle.

#### 2.1. Formulación del problema.

Una de las fábricas productoras de lácteos de mayor importancia de México, observa problemas de saturación en líneas de proceso. Los problemas de congestión en la planta de producción han planteado la posibilidad de construir o rediseñar las estructura de la empresa, cuyo costo será considerable, por lo que la solución de este tipo de problemas es innegablemente de gran importancia práctica. Cabe señalar que la empresa, ocupa el primer lugar en la producción de lácteos a nivel nacional, ya que a más de 30 años la empresa ha logrado posicionarse como una marca sólidamente establecida, asociada a una empresa líder en la venta de productos lácteos y sus derivados, que se ha ganado la preferencia y la confianza del consumidor. Por otra parte, dado que la empresa seguirá operando, cuando menos durante los próximos cinco años en condiciones de saturación, es importante lograr un elevado nivel de eficiencia en su operación, independientemente de la decisión que se tome para construir o rediseñar las estructura de la empresa. Por lo anterior, es necesario tener herramientas que sirvan para poder evaluar el comportamiento de la empresa, en cuanto a su eficiencia. Como se estableció en el capítulo anterior, los modelos de simulación, son una de estas herramientas, por lo que se

plantea ahora la necesidad de desarrollar un modelo de simulación que permita hacer este tipo de evaluaciones, las ventajas que esto implica ya han sido mencionadas previamente.

#### 2.1.1. Objetivos.

El objetivo de este trabajo de tesis es el de desarrollar el estudio de análisis de capacidad de planta desde una perspectiva aleatoria en una empresa fabricante de productos lácteos utilizando el método Monte Carlo, para posteriormente realizar experimentos dirigidos a obtener información en relación con el comportamiento del sistema (flujo del proceso); por ejemplo, al aumentar o disminuir el número de operaciones efectuadas o al hacer cambios en su capacidad para atender las operaciones del sistema. Para ello, los modelos propuestos deberán simular las operaciones de entrada o recepción, producción y almacén de la empresa, diferenciando los principales tipos de productos y/o derivados, las características de las colas en espera y cuellos de botella, (tamaños mínimo, máximo y promedio, así como tiempos de espera) y la utilización y capacidad de las de instalaciones y los equipos de la empresa. Los resultados que se obtengan serán validados y comparados para comprobar que la calidad teórica y experimental de la investigación es una buena alternativa a la solución del problema.

#### 2.2. Datos y características generales de la empresa.

Clasificacion: Internacional.

**Tipo:** Alimenticia.

Horario de operacion: Las 24 horas del dia.

**Número de áreas de operación:** Tres; Área recibo, Área producción de Lácteos y Área producción de derivados.

Número de líneas de producción: Seis; Línea de leche pasteurizada, Línea de leche ultrapasteurizada, Línea de rehidratado, Línea de cremas, Linea mantequillas y Línea yogurt.

Capacidad de las líneas en conjunto: 2,320,000 litros de leche al día.

En esta planta se producen la mayoría de los productos: leches pasteurizadas, leches ultrapasteurizadas, yogurt líquido y bebible, postres, crema y mantequilla, asimismo concentra gran cantidad de actividades administrativas, como son el área de producción, logística, ventas, servicios al socio, desarrollo de nuevos productos y control de calidad, entre otras. Con el propósito de cubrir las demandas existentes en ese tiempo y con la visión de ser la empresa número uno, en calidad e innovación de productos lácteos, a través del tiempo ha sido adaptada para cubrir las nuevas demandas operacionales, derivadas del incremento en el flujo de proceso y de la evolución de las características de la estructura. Dado que desde su inicio la fábrica no fue construida de acuerdo con un plan maestro de la producción definido, su desarrollo y crecimiento no han sido ordenados, lo cual ha originado una disminución en su eficiencia, según cifras nombradas por personal de desarrollo y planeación.

En las Figuras 2.1. y 2.2., se observan parcialmente algunos detalles de la empresa, y en la Figura 3.3., se presenta una vista parcial de las líneas de proceso.



Figura 2.1: Imagen de un pasillo de operaciones.



Figura 2.2: Imagen de algunos tanques contenedores.



Figura 2.3: Vista parcial de las líneas de proceso.

En la Figura 2.4., se muestra un plano general de la empresa y por último en la Figura 2.5.,

se observa un acercamiento de ese mismo plano pero hacia la ubicación de las distintas líneas de producción.



Figura 2.4: Plano general de la empresa.

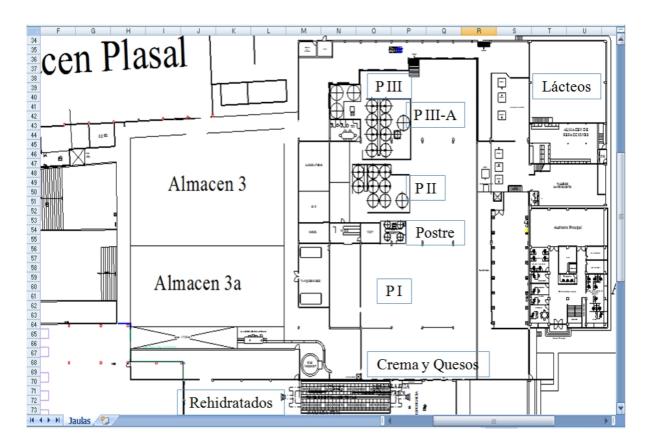


Figura 2.5: Acercamiento de las distintas líneas de producción.

## 2.3. Aspectos generales sobre el control y flujo del proceso de producción.

Antes de dar inicio con la descripción a detalle de las características cualitativa y cuantitativa sobre el control y flujo del proceso para posteriormente plantear un modelo de simulación de las operaciones de la fabricación, se da un panorama general diferenciando el recibo de la materia prima, los principales tipos de flujos que sigue la leche y sus derivados, para los diferentes productos hasta que el producto terminado es mandado a su respectivo almacén, en las Figuras 2.6. y 2.7., se muestra de manera esquemática el flujo del proceso de producción.

• Los silos ubicados en el Área recibo almacenan la leche fluida que es trasladada hacia la planta por medio de pipas, desde los distintos ranchos donde se recolecta

la leche cruda.

- El Área de producción de lácteos y Áreas de derivados se inician a partir de la toma de leche fluida de los distintos silos de almacenamiento con el único fin de cubrir los programas de producción.
- El Área de envasado constituye la dosificación y colocación del producto procesado en sus diferentes presentaciones y respectivos empaques según se requiera.
- Por último, el Área de almacén es la etapa final, donde el producto terminado toma un lugar especifico en espera de ser enviado a los diferentes centros de distribución y agencias de la empresa.

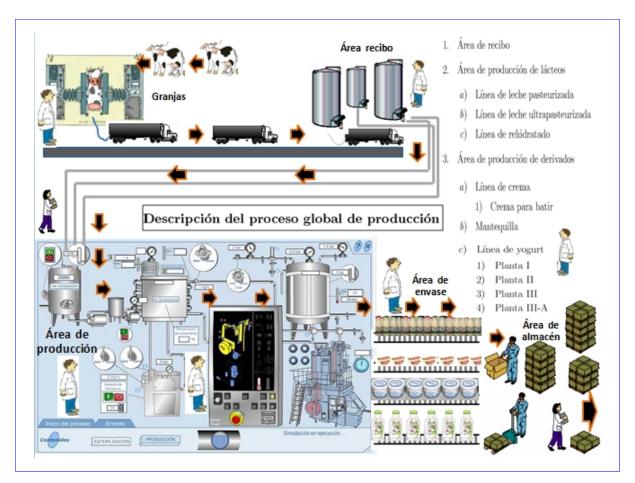


Figura 2.6: Imagen del recorrido de la materia prima en un panorama general.

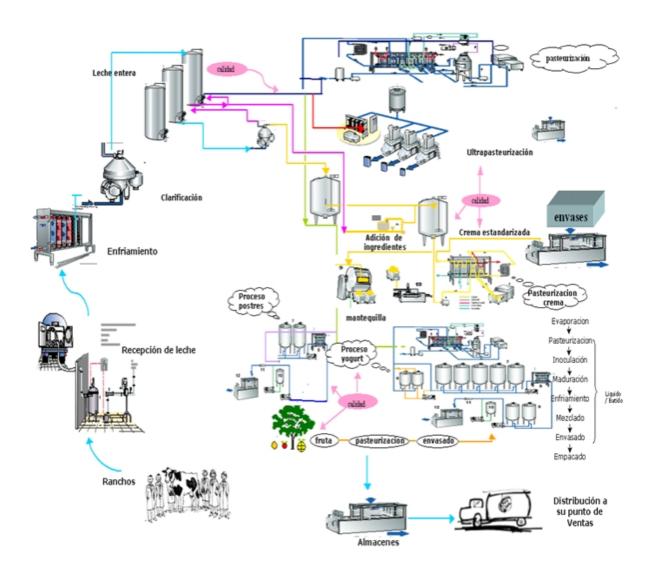


Figura 2.7: Imagen de flujo de la materia prima en las líneas de producción.

Para el estudio del proceso de producción, conviene dividir los sistemas en subsistemas. Aún más, los objetos que representan a un subsistema son considerados como parte del ámbito de otro subsistema; ésta es la idea utilizada por [Bertalanffy, 1969] al enunciar la propiedad de orden jerárquico de los sistemas. De manera alternativa, puede decirse que los elementos de un sistema pueden a su vez ser sistemas de menor orden [Hall, 1962].

La Figura 2.8., ilustra simplemente el análisis del sistema un acercamiento gráfico, respecto al enfoque sistémico de la planta productora de lácteos.

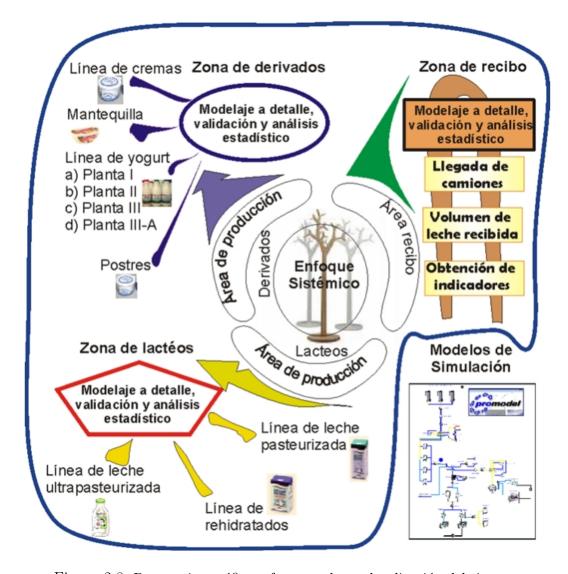


Figura 2.8: Perspectiva gráfica referente a la moduralización del sistema.

Las ideas anteriores constituyen la base del modelo conceptual del sistema bajo estudio. Nótese, que aunque el modelo conceptual anterior está referido a esta planta de estudio en específico, dicho modelo puede servir para cualquier empresa en la que apliquen las suposiciones y condiciones antes mencionadas.

#### 2.4. Comentarios finales.

Se puede asumir que el sistema de interés está formado por un conjunto de etapas subdividido en áreas, de las cuales el área recibo, el área de producción de lácteos y el área de producción de derivados son las principales instancias sobre la cual esta tesis desarrolla toda una metodología para lograr identificar los factores claves que logren los objetivos esperados.

En su obra The Goal, Eliyahu Goldratt [Machuca et. al., 1995] afirma que la única meta de una organización con ánimo de lucro es hacer dinero. Si la planta no hace dinero para la empresa, dejará de existir. De acuerdo con ello, el autor indica que será «productivo» para la empresa todo aquello que contribuya a conseguir el objetivo planteado.

En el siguiente capitulo se describe el sistema de producción que es el foco de estudio de esta tesis, como un conjunto de campos en los cuales se aborda el arribo y flujo de materiales, los recursos y cómo los sistemas de manipulación de materiales están gobernados por sistemas de control especializados. El modelado correcto de estos sistemas de control es uno de los retos principales para obtener un buen modelado del proceso productivo.

Capítulo 3

### Información estadística de las operaciones de arribos y proceso de la Empresa Fabricante de Productos Lácteos.

En esta sección, con base en datos tomados de la realidad, se establecen las distribuciones empíricas de los tiempos de llegada y los procesos de producción de los principales tipos de productos que operan en la fábrica productora de lácteos de la Ciudad de México. Posteriormente, mediante pruebas estadísticas, se verifica que las distribuciones empíricas se comporten como alguna distribución teórica conocida.

#### 3.1. Generalidades.

En algunos casos, un modelo puede ser desarrollado cuando es bastante simple para ser "resuelto" por los métodos matemáticos. Esa solución se puede encontrar mediante el uso de cálculo diferencial, la teoría de probabilidades, métodos algebraicos, o técnicas matemáticas. La solución consiste generalmente en uno o más parámetros numéricos que se denominan medidas de rendimiento del sistema. Sin embargo muchos sistemas del mundo real son tan complejos que el modelado de estos sistemas es virtualmente imposible resolver matemáticamente. En estos casos, el apoyo tecnológico basado en el uso de computadoras para la simulación de sistemas, pueden ser usadas para imitar el comportamiento del sistema en el tiempo. De la simulación se recopilan datos como si se hubiese observado al sistema real. Los datos obtenidos en la simulación, se utilizan para calcular

las medidas de rendimiento del sistema.

Para tener éxito al calcular las medidas de rendimiento del sistema, es necesario entender la dinámica del sistema real, el cual su principal objetivo consiste en determinar las causas reales de los problemas. Para lo cual, se define el problema, se conceptualiza el sistema, se formula un modelo y se valida. El modelo validado se procesa para determinar los puntos neurálgicos, aquellos que ocasionan cambios dramáticos en el comportamiento del sistema. En algunos de éstos, se encuentran las causas que originan los problemas detectados.

La parte de interés para este capítulo, es precisamente abordar la conceptualización del sistema. Es importante notar que para resolver un problema existen diferentes alternativas, cada una de ellas con ventajas y desventajas sobre las restantes. Por lo tanto no es suficiente que en el análisis se construya un modelo elegante y sin tachas desde un punto de vista puramente teórico, sino que debe analizarse bajo distintas condiciones, evaluar su comportamiento, encontrar las relaciones funcionales entre las variables de decisión, determinar márgenes de factibilidad entre las variables involucradas por los objetivos, y en general, suministrar el mayor conocimiento posible acerca de la naturaleza del problema para apoyar su solución y alcanzar los objetivos buscados.

Se puede asumir que el sistema de interés está formado por un conjunto de camiones contenedores de leche, que solicitan permiso para entrar y descargar leche en los distintos servidores. Aunque el conjunto de camiones se ubican en lugares distintos, utilizan los mismos servidores, por lo que están ordenados en una secuencia definida, formando una sola cola imaginaria, de acuerdo con el momento en que arriban a la planta solicitan su servicio. A este tipo de secuencia para atender a los camiones se le conoce como el principio de "la primera que llega es la primera que se atiende" (primeras entradas primeras salidas, PEPS; o por sus siglas en inglés FIFO). Por otro lado, ya contenida la leche descargada de los camiones se deposita en los silos principales, los que dan auge al flujo del proceso desglosado en distintas áreas hasta que el producto terminado es mandado a sus respectivos almacenes. Dado que la capacidad de una empresa se define como, la cantidad de productos o servicios que pueden ser obtenidos por una determinada unidad productiva durante un cierto periodo de tiempo, la organización deberá adecuarse a la capacidad necesaria o carga en función de la demanda que la empresa desee satisfacer en el futuro.

Dadas estas causas, una respuesta a la demanda de condiciones favorables se empeña en que el sector industrial requiere de aspectos de impacto, en el análisis de los sistemas de

producción, que hagan la diferencia al logro de una posición competitiva.

Se aborda primero la cuestión general de la información estadística de las operaciones de arribo y el flujo de proceso de la empresa, se examinan las condiciones para que este tipo de sistema sea controlable y observable, y se presentan y exponen diferentes tablas y bases de datos para probar y validar las características del sistema.

Por último, bajo las condiciones dadas con anterioridad se ilustran las distribuciones empíricas y pruebas de bondad de ajuste para la dinámica del sistema.

# 3.2. Comportamiento general de las operaciones de producción de la Empresa Fabricante de Productos Lácteos.

En este apartado se describen las operaciones unitarias que forman al proceso de producción de lácteos y derivados mediate bosquejos físicos del sistema de manejo de materiales, modelados posteriormente en ProModel. Se hace una revisión de los datos estadísticos tanto históricos como de colectas durante visitas consecutivas a la planta durante el año 2008 y parte del 2009 de las operaciones de recepción y fabricación. Se ilustra de manera global en la Figura 3.1., el comportamiento general de las operaciones de producción de la Empresa Fabricante de Productos Lácteos. Este diagrama junto con los que sucesivamente se muestran, observan el flujo de leche y ciclo de proceso de izquierda a derecha es decir en forma horizontal, estos diagramas son elaborados en libros de Excel y su finalidad es ilustrar a manera de imagen lo que se describe en cada sección.

Para el análisis del proceso global se identifican las siguientes áreas de importancia.

- 1. Área de recibo
- 2. Área de producción de lácteos
  - a) Línea de leche pasteurizada
  - b) Línea de leche ultrapasteurizada
  - c) Línea de rehidratado

- 3. Área de producción de derivados
  - a) Línea de cremas
    - 1) Crema para batir
  - b) Mantequilla
  - c) Línea de yogurt
    - 1) Planta I
    - 2) Planta II
    - 3) Planta III
    - 4) Planta III-A
  - d) Línea de postres
    - 1) Espumas
    - 2) Arroz con leche
    - 3) Frutas con crema

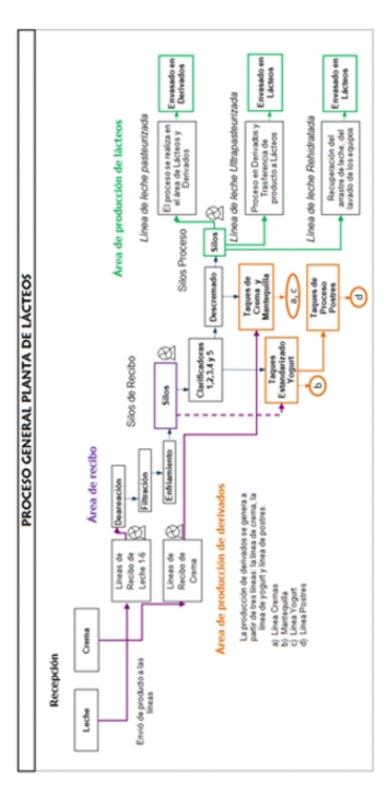


Figura 3.1: Comportamiento general de las operaciones en la Empresa.

A continuación se describe a detalle la función de cada área mencionada anteriormente

#### 1. Área de recibo

La compañía recibe leche fluida<sup>5</sup> desde los ranchos proveedores. La leche fluida es trasladada hacia la planta por medio de pipas con capacidad normal de 25,000 litros. Cuando el transporte arrastra dos carros tanque, el volumen posible es de 50,000 litros. A esta clase de transporte se le llama "dolly". A su arribo a la planta, el contenido de las pipas pasa por un estricto proceso de control de calidad consistente en tomar muestras aleatorias del material de los carros tanque por medio de diales. El proceso busca localizar contaminantes de la leche como sangre, excremento, y microorganismos vivos que puedan afectar su proceso.

Si la leche transportada cumple con los estándares de calidad entonces se procede a realizar la descarga. La leche es descargada por medio de 6 líneas de recibo, donde son conectadas las pipas, y éstas a su vez, alimentan a los silos contenedores (llamados silos recibo) 29, 30, 31, con capacidades de 150,000 litros cada uno. La leche descargada en los silos 29, 30 y 31 es utilizada para el procesamiento de leche líquida; sin embargo, se cuenta con un silo más de descarga, el silo 40, en el cual se descarga leche para ser utilizada en el procesamiento de productos derivadas. La descarga en el silo 40 se hace solamente a través de la línea de descarga número 3.

Cada una de las seis líneas de recepción tiene capacidad para admitir un caudal de hasta 40,000 litros de leche por hora. El equipo instalado para el área de descarga se compone de los siguientes elementos:

- 1. Seis válvulas de recepción con aforo de 40,000 litros por hora.
- 2. Seis deareadores con capacidad de 1,000 litros. Estos elementos se utilizan para eliminar algunas impurezas y burbujas de aire y no son usados como almacenes, son simplemente elementos de paso.
- 3. Seis bombas con capacidad de bombeo de 40,000 litros por hora.
- 4. Seis filtros.

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup>Se aplica el nombre de fluida a la leche en estado líquido para diferenciarla de la leche en forma de polvo (deshidratada).

#### 5. Tres enfriadores con aforo de 40,000 litros por hora.

Una característica importante para la consideración de las eficiencias del proceso es que diariamente se realiza una limpieza rápida a cada una de las seis líneas. Esta actividad consume un promedio de aproximadamente 120 minutos. Además, cada día sábado se efectúa una limpieza más profunda a las seis líneas; en este caso, la actividad tiene una duración de 4 horas. Es conveniente mencionar que no se hace la limpieza de las seis líneas al mismo tiempo, sino que se van alternando para dejar líneas habilitadas para la descarga de la leche.

La leche que es descargada en los silos de recibo, es utilizada para alimentar los silos proceso donde se lleva a cabo la distribución correspondiente para cada uno de los diferentes tipos de leche que se producen. En su traslado hacia los silos proceso, el producto pasa por cuatro clarificadoras, dos de ellas con un aforo de 25,000 litros por hora, y las otras dos, tienen una capacidad de procesamiento de 30,000 litros por hora.

Como se mencionó previamente, otro silo considerado como de recibo es el silo 40, el cual cuenta con una capacidad de 150,000 litros, sin embargo, la leche descargada en este silo solamente se utiliza para el procesamiento de producto derivado.

En esta área, también se cuenta con una línea de recepción de crema. Este producto también es trasladado en pipas y se recibe a través de una válvula con capacidad de descarga de 15,000 litros de crema por hora. Aquí, se cuenta con una bomba para extraer la crema, pasa por un enfriador y finalmente se le envía hacia los tanques 46 y 47, con capacidad de almacenamiento de 40,000 litros cada uno.

La crema también se recibe en el tanque número 20, donde se descarga el producto proveniente de Tizayuca. Como esta crema es transportada en tambos, éstos son vaciados manualmente en el tanque 20, sin la intervención de una bomba para su descarga.

La Figura 3.2., muestra la sección descrita del proceso general planta de lácteos para dar un panorama más amplio.

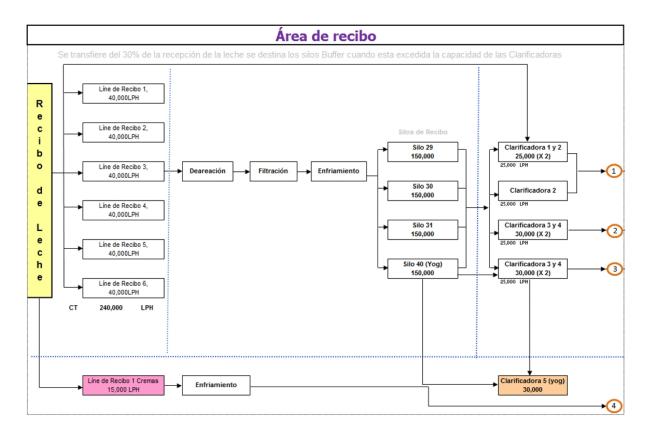


Figura 3.2: Proceso general de la planta de lácteos.

# 2. Área de producción de lácteos

El área de producción de lácteos tiene como entrada la leche que es recibida en los silos de recibo (29, 30 y 31), y cuando la leche fluida no es suficiente para cubrir los programas de producción, se procesa leche rehidratada, para fabricar los siguientes productos: leche saborizada, kids blanca, fortileche, UP ligh y UP 28, así como aquellos productos que soliciten los clientes y que estén formulados con leche rehidratada.

Para descremar la leche entera, ésta se envía desde los silos recibo hacia el silo 1 con capacidad de 100,000 litros; del silo 1 se envía hacia las descremadoras 1, 2 y 3 con capacidades de de 50,000,30,000 y 15,000 litros por hora, respectivamente. La leche entera llega con un porcentaje de grasa de  $3.5\,\%$  en promedio. La crema que se obtiene en este proceso se envía hacia los tanques de almacenamiento de crema numerados como 46 y 47 con capacidades respectivas de 40,000 litros. La leche descremada se envía hacia el silo 5. La leche descremada del silo 5 es utilizada para ser combinada con leche entera y

estandarizar los niveles de grasa en sus diversas presentaciones.

Los silos que se utilizan para estandarizar la leche son el 2 y 3 con capacidades de 100,000 litros cada uno. Así mismo, se usan los silos 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 con capacidades de 150,000 litros cada uno para el mismo fin. El silo 11 (con capacidad de 30,000 litros) sólo se utiliza para el proceso de crema UHT.

La Figura 3.3., muestra la sección descrita del proceso para el área de producción de lácteos.

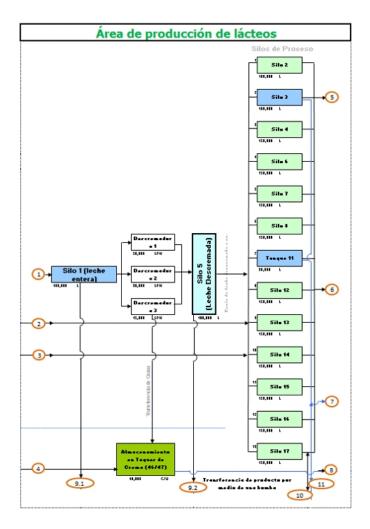


Figura 3.3: Área de producción de lácteos (Descremado de leche).

## a) Línea de leche pasteurizada

Si control de calidad acepta la leche que va a ser pasteurizada, entonces es enviada hacia el proceso de homogeneización. Aquí, se distribuye hacia los pasteurizadores I y II, que a su vez, alimentan a los tanques 13 y 22, respectivamente; los tanques 13 y 22 cuentan con una capacidad de 18,000 y 10,000 litros cada uno respectivamente. A continuación, se procede a hacer un control de calidad a dichos tanques (13 y 22), y de ahí la leche se envía hacia su envasado en las máquinas TR8-1, TR8-2, y TR8-3 con capacidades de envasado de 12,000 litros por hora cada una. En esta secuencia, también interviene la máquina llamada Ttop con una capacidad de envasado de 9,000 litros por hora. Esta capacidad es variable de acuerdo al producto envasado, esto se muestra en las Figuras 3.4. y 3.5.

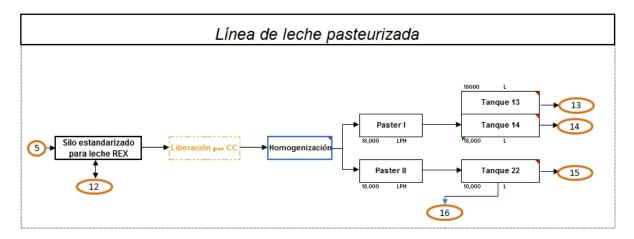


Figura 3.4: Línea de leche pasteurizada (Homogeneizado y pasteurizado).

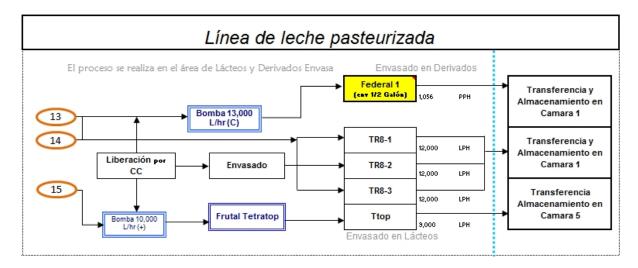


Figura 3.5: Línea de leche pasteurizada (Envasado).

## b) Línea de leche Ultrapasteurizada

El proceso en esta parte es como sigue. Primero, se estandariza la leche, posteriormente, se libera por control de calidad, se homogeneiza, se ultrapasteuriza y finalmente, se le envasa y empaqueta. En las Figuras 3.6. y 3.7., se muestra este proceso.

En esta serie, el equipo M24, con una capacidad de ultrapasteurizado de 24,000 litros por hora, procesa leche deslactosada, deslactosada light, 40 y tantos y sin colesterol, así como leches especiales. Este equipo envía leche hacia el tanque 25, que tiene capacidad de almacenamiento de 30,000 litros, y posteriormente se envía la leche hacia las máquinas A03-04 y A03-03, las cuales cuentan con una capacidad de envasado de 12,000 litros por hora cada una.

Desde estas máquinas, el producto se envía primero hacia un equipo Helix, donde se detiene momentáneamente el producto (con capacidad de 12,000 litros por hora), y se coloca el abre fácil en la máquina Caper con capacidad de procesamiento de 12,000 litros por hora. Finalmente, el producto arriba a la máquina A+F con una capacidad nominal de 12,000 litros por hora.

La máquina H24 procesa leche UP 28 y UP 20, y tiene una aforo de 24,000 litros por hora. Este equipo envía leche hacia el tanque 28, que tiene capacidad de almacenamiento de 30,000 litros, y posteriormente, se envía la leche hacia las máquinas TBA8-25, TBA8-35,

TBA8-29 y TBA8-26, con capacidades de envasado de 6,000 piezas de un litro por hora cada una. De aquí, el producto viaja hacia las máquinas WA con capacidad de proceso de 6,000 piezas de un litro por hora, en cajas de 12 piezas.

A su vez, el equipo B24 procesa leche Fortileche y UP 28 a una tasa de 24,000 litros por hora. Este equipo envía leche hacia las máquinas TBA8-27, TBA8-37, TBA8-28 y TBA8-38, con capacidad de envasado de 6000 piezas de un litro por hora cada una. De aquí el producto es transportado hacia sus respectivas máquinas WA con capacidad de empacado de 6,000 piezas de un litro por hora en cajas de 12 piezas.

Por su parte el equipo Flex 30 procesa leche UP 28 a una velocidad de 30,000 litros por hora. Este equipo envía leche hacia el tanque 24, que tiene una capacidad de almacenamiento de 30,000 litros, y posteriormente, se envía la leche hacia las máquinas A03-01, A03-02 y TBA8-42. Las máquinas A03 tienen capacidad de envasado de 12,000 piezas de un litro por hora cada una, mientras que la máquina TBA8 tiene una capacidad de envasado de 6,000 piezas de un litro por hora. Las máquinas A03 envían su producto envasado hacia sus correspondientes máquinas Helix y A+F, teniendo ésta última una velocidad de proceso de 12,000 piezas de un litro por hora. Finalmente, la máquina TBA8 envía su producto envasado hacia su máquina WA, con capacidad de proceso de 6,000 piezas de un litro por hora, en cajas de 12 piezas.

El equipo B7 se utiliza para procesar la leche saborizada y UP 28 en su presentación de 250 ml. Su capacidad de procesamiento es de 10,000 litros por hora. Este equipo envía leche hacia las máquinas TBA9-20, TBA9-21 y TBA9-23, las que cuentan con una capacidad de envasado de 1,500 litros por hora cada una (que equivalen a 6,000 piezas de 250 ml/hr. cada una). Asimismo, envía producto hacia el equipo TBA19-22 con capacidad de procesamiento de 1,875 litros por hora. Cada una de estas máquinas envía el producto hacia sus respectivas popoteras y posteriormente, hacia las máquinas WA con capacidad de proceso de 1,500 y 1,875 litros por hora respectivamente (que equivalen a 6,000 piezas de 250 ml/hr. cada una).

El equipo Flex 10-1 procesa leche saborizada y leche UP 28 con una capacidad de 10,000 litros por hora. De aquí, el producto se envía hacia el tanque 23, que tiene capacidad de almacenamiento de 20,000 litros. Posteriormente se envía la leche hacia las máquinas TBA22-34 y TBA22-36, con una capacidad de envasado de 5,000 litros por hora (equivalentes a 20,000 piezas de un cuarto de litro cada una). Las máquinas TBA22 envían su producto ya envasado hacia sus correspondientes máquinas Helix, y después, hacia popoteras con capacidad de 5,000 litros por hora (que equivalen a 20,000 piezas de un

cuarto de litro por hora) y WA, teniendo ésta última una velocidad de proceso de 5,000 litros por hora (las que también equivalen a 20,000 piezas por hora).

El equipo Flex 10-2 procesa leche saborizada y leche UP 28 con una capacidad de 10,000 litros por hora. Posteriormente, se envía la leche hacia las máquinas TBA22-34 y TBA22-36, con una capacidad de envase de 5,000 litros por hora (equivalentes a 20,000 piezas de un cuarto de litro cada una). Las máquinas TBA22 envían su producto ya envasado hacia sus correspondientes máquinas Helix, y después, hacia popoteras con capacidad de 5,000 litros por hora (que equivalen a 20,000 piezas de un cuarto de litro por hora) y WA, teniendo ésta última una velocidad de proceso de 5,000 litros por hora (las que también equivalen a 20,000 piezas por hora).

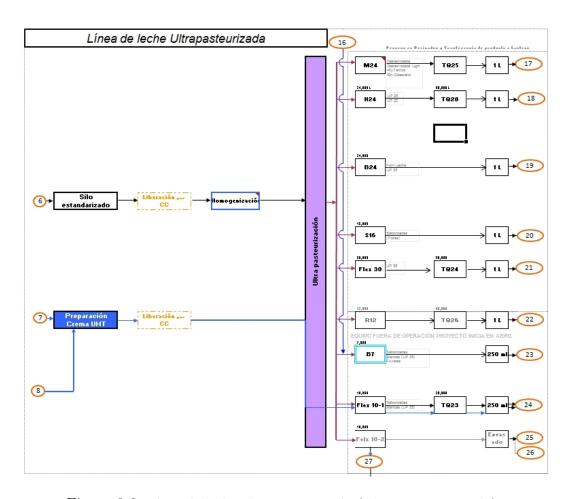


Figura 3.6: Línea de leche ultrapasteurizado (Ultra pasteurización).

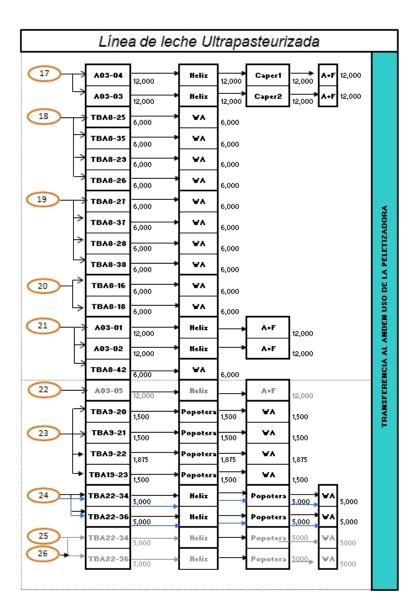


Figura 3.7: Línea de leche ultrapasteurizado (Envasado).

## c) Línea de rehidratado

La línea o planta de Rehidratado toma como elemento base las aguas blancas que se obtienen del lavado de los equipos ultrapasteurizadores (cluster), nombrada esta actividad también como recuperación de leche. Este proceso se realiza mediante empuje de aire des-

de los cluster, enviando la recuperación de agua blanca hacia los tanques 32-03 y 32-05, con capacidades de 22,000 litros y 15,000 litros respectivamente. De forma consecuente, el producto es enviado a las Plantas de rehidratado I y II, las cuales tienen la capacidad de rehidratar 25,000 litros en el caso de la Planta I y 40,000 litros en el caso de la Planta II.

#### Planta I

Para el caso de la Planta I, el agua que es recibida de los tanques 32-03 y 32-05 es depositada en los tanques 30-01, 30-02 y 30-03, los cuales tienen una capacidad de 12,000 litros, para el mismo proceso estos mismos tanques reciben aceite de coco de cualquiera de los siguientes tanques: 40-01, 40-02, 41-01 y 41-02, con capacidad similar de 1,500 litros; además, reciben leche en polvo del Bredo Leche\_en\_polvo, el cual tiene una capacidad de 2,800 kilogramos, azúcar de Bredo de Azúcar 1 con capacidad de 2,000 litros, cocoa del Bredo Cocoa con capacidad de 200 kilogramos y finalmente microingredientes del Bredo de Micro\_ingredientes.

Una vez mezclados los ingredientes mencionados anteriormente, el producto compuesto pasa a la deodorización, y posteriormente, el compuesto pasa a las marmitas 1 y 2 con capacidad de 500 kilogramos cada una, de la misma planta. El compuesto es enviado al homogeneizador y finalmente el compuesto pasa a pasteurizado en el equipo APV, con capacidad de 25,000 litros por hora, para ser enviado a los silos de proceso después de ser enfriada.

#### Planta II

Para el caso de la Planta II, el agua que es recibida de los tanques 32-03 y 32-05 es depositada en los tanques 31-01, 31-02 y 31-03, los cuales tienen una capacidad de 33,000 litros, para el mismo proceso estos mismos tanques reciben aceite de coco de cualquiera de los siguientes tanques: 40-01, 40-02, 41-01 y 41-02, de igual forma reciben leche en polvo del Bredo P2Leche\_en\_polvo el cual tiene una capacidad de 2,800 kilogramos, azúcar de Bredo de P2Azúcar 2 con capacidad de 2,000 litros, cocoa del Bredo P2Cocoa 1 con capacidad de 200 kilogramos y finalmente microingredientes del Bredo de P2micro\_ingredientes. Una vez mezclados los ingredientes mencionados anteriormente en estos tanques el producto compuesto pasa a las marmitas 1 y 2 de la planta II, con capacidad de 1,500 kilogramos cada una, de forma siguiente el producto pasa a la deodorización, el com-

puesto es enviado al homogeneizador y, finalmente, el compuesto pasa a ser pasteurizado en el equipo LACTA, con capacidad de 40,000 litros por hora. Posteriormente, la leche rehidratada es enviada a los silos de proceso donde será requerida después de ser enfriada.

Tanto la planta I como la planta II envasan por la línea de rehidratados. En las Figuras 3.8. y 3.9., se presentan las ventanas con el despliegue del flujo que siguen las aguas blancas, la adición de ingredientes y sus diferentes procesos hasta llegar a los silos de proceso para posteriormente envasar el producto.

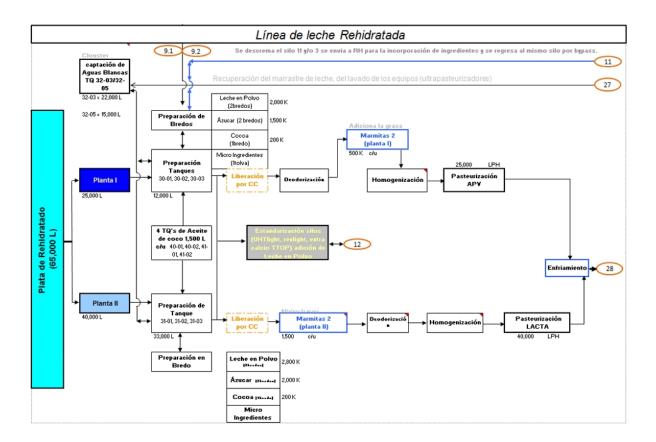


Figura 3.8: Línea de rehidratado (Aguas blancas).

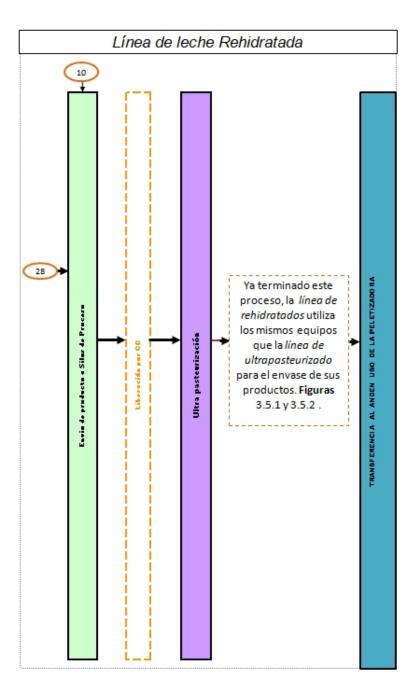


Figura 3.9: Línea de rehidratado (Envasado).

## 3. Área de producción de derivados

La producción de derivados se genera a partir de cuatro líneas: la línea de crema, Mantequillas, la línea de yogurt y línea de postres.

## a) Línea de crema

Para la producción de crema, se toma como entrada del proceso la crema almacenada en los tanques 46 y 47 con capacidades de 40,000 litros cada uno, que se encuentran en la zona de recibo. Además de los tanques mencionados, se encuentra el tanque 15:12 con capacidad de 150 litros, donde se recibe el producto proveniente de Tizayuca. Desde aquí, el producto se bombea por medio de la bomba P15-12-03-002 con capacidad de 30,000 litros por hora, hacia el tanque 20 con capacidad de 20,000 litros, donde se aloja la crema que se genera en el proceso de descremado del área de yogurt. Desde aquí, la bomba P01-45-03-001 con capacidad de 15,000 litros por hora bombea al producto desde los tanques 46 y 47 hacia los tanques 10, 12 y 18. Análogamente, desde la bomba P10-17-03-001 con capacidad de 15,000 litros por hora, el producto se envía desde el tanque 20 hacia los tanques 10, 12 y 18 con capacidades de 9,000 litros para los tanques 10 y 12, y de 14,000 litros para el tanque 18. La crema que se obtiene por el proceso de descremado en el área de lácteos, se almacena en el tanque 10:10 con capacidad de 5,000 litros, en el cual se le adicionan los ingredientes necesarios; se utilizará la bomba P10-10-03-001 con capacidad de 20,000 litros por hora cuando el porcentaje de grasa de la crema esté entre 15 y 30 por ciento. Si el porcentaje de grasa fuese de 35 por ciento se utilizará la bomba P10-10-03-002 con capacidad de 17,000 litros por hora. En ambos casos, el producto se dirige ahora hacia los tanques 10, 12 y 18, terminado con esto el proceso de estandarizado.

Posteriormente, el producto se envía hacia el área de pasteurizado, mediante las bombas P10-09-03-003, P10-09-03-002 y P10-09-03-001 con capacidades de 7,000, 4,000 y 7,000 litros por hora respectivamente, a los tanques de balance 1, 2 y 3 con capacidades de 150 litros cada uno; es importante mencionar que la bomba P10-09-03-003 se corresponde con el tanque de balance 1, la bomba P10-09-03-002 con el tanque 2 y la bomba P10-09-03-001 con el tanque 3. El pasteurizado da inicio cuando la bomba P10-13-03-001 con capacidad de 7,000 litros por hora toma al producto del tanque de balance 1 y lo envía al Paster 1, la bomba P10-12-03-001 con capacidad de 4,000 litros por hora toma al producto del tanque de balance 2 y lo envía al Paster 2. Finalmente, la bomba P10-11-03-001 con capacidad de 7,000 litros por hora toma al producto del tanque de balance 3 y lo envía al Paster 3; la capacidad de los pasteuizadores 1 y 3 es de 7,000 litros por hora, y de 4,000

litros por hora para el Paster 2.

De aquí, se envía la crema pasteurizada hacia el proceso de homogeneización; el pasteurizador 1 envía crema hacia el homogeneizador 1 con capacidad de 7,000 litros por hora, el pasteurizador 2 hacia el homogeneizador 2 con capacidad de 4,000 litros por hora, y el pasteurizador 3 hacia el homogeneizador 3 con capacidad de 7,000 litros por hora. Cualquier homogeneizador es capaz de alimentar a cualquiera de los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4 con capacidades de 5,000 litros cada uno. El proceso de acidificado se hace como sigue. En los tanques 14 y 15 con capacidad de 1,000 litros cada uno, se deposita agua y ácido cítrico, agitando la mezcla a través de las bombas P10-16-03-001 y P10-15-03-001 respectivamente, con capacidades de 16,000 litros por hora cada una. De estos contenedores se toman manualmente las cantidades necesarias de la mezcla para ajustar el proceso y se depositan en los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4.

Las bombas P10-05-03-004, P10-05-03-002 y P10-05-03-003 con capacidad de 10,000 litros por hora, toman al producto indistintamente de los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4. La bomba P10-05-03-004 alimenta a las envasadoras HOLMATIC 1 (L) y HOLMATIC 2 (M); ambas envasadoras tienen una capacidad de 2,700 litros por hora que equivalen a 3,000 piezas de 0.9 litros por hora, o bien, 6,000 piezas de 0.45 litros por hora. La bomba P10-05-03-002 envía el producto hacia la envasadora AUTOPROD 1 (I)con capacidad de 4,320 litros por hora que equivalen a 9,600 piezas de 0.45 litros por hora. La bomba P10-05-03-003 envía el producto hacia la envasadora GASTIC 4-A (J)con capacidad de 1,400 litros por hora que equivalen a 7,000 piezas de 0.2 litros por hora; esta misma bomba enviará producto hacia la envasadora AUTOPROD cuando sea instalada a futuro.

La crema acidificada en su presentacián de 4 litros, se envasa directamente y de forma manual del tanque 3 a una velocidad de 600 litros por hora<sup>6</sup>. En el caso de la crema para batir en su presentación de 17 litros, también se envasa directamente y de forma manual del tanque 4 a una velocidad de 2,550 litros por hora.

Las Figuras 3.10., 3.11., 3.12., y 3.13., representan el diagrama de flujo que compete a la línea de crema, estos diagramas al igual que los de la línea de mantequilla, yogurt y postres son parte de la descripción del proceso global de producción y por tanto son un despliegue de algunas secciones mostradas en la Figura 3.1. (Comportamiento general de las operaciones producción de la Empresa Fabricante de Productos Lácteos). Estos

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>Velocidad estimada.

diagramas están elaborados en libros de Microsoft Office Excel y su finalidad es ilustrar lo que se describe en cada línea.

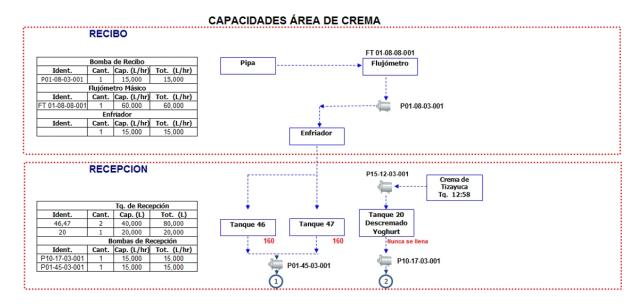


Figura 3.10: Diagrama línea de crema (Recibo y Recepción).

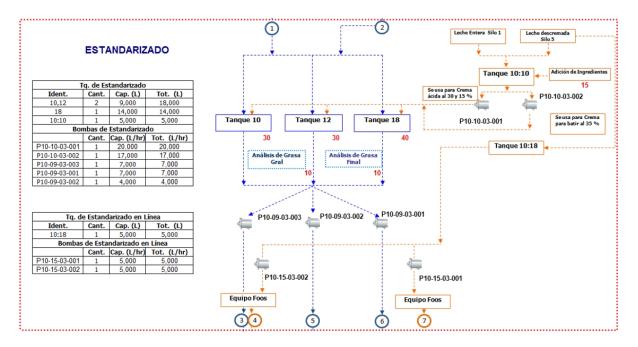


Figura 3.11: Diagrama línea de crema (Estandarizado).

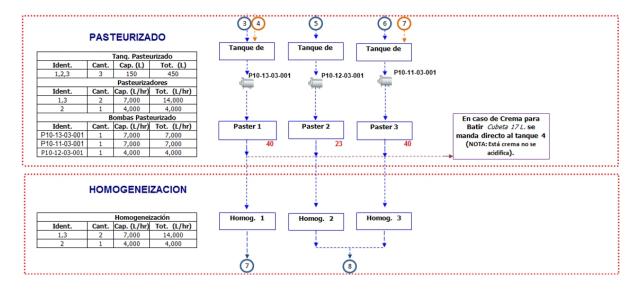


Figura 3.12: Diagrama línea de crema (Pasteurizado y Homogeneizado).

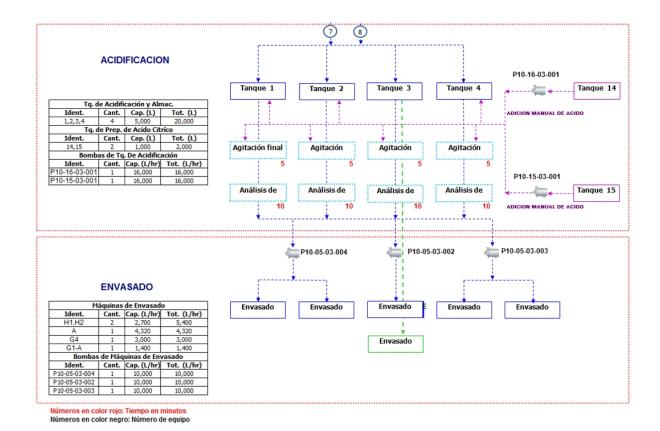


Figura 3.13: Diagrama línea de crema (Acidificación y Envasado).

### b) Mantequilla

El proceso de mantequilla inicia desde la recepción de cremas en el tanque 15:12, con producto proveniente de Tizayuca y crema de reproceso. En caso de ser crema de Tizayuca, el producto se envía usando la bomba P15-12-03-002 hacia el tanque 20, desde donde lo toma la bomba P10-17-03-001 y lo manda a los tanques de estandarizado 10, 12 y 18. Posteriormente, la bomba P10-09-03-002 conduce el producto hacia el tanque de balance 2, de donde es bombeado por la bomba P10-12-03-001 hacia el Pasteurizador 2 y luego, el producto es enviado al equipo de batido, el cual tiene una capacidad de 5,000 litros. Una vez concluido el proceso de batido, un operario vierte el producto manualmente en moldes con capacidad de 40 kilos; el mismo operario traslada los moldes, uno por uno, hacia la cámara fría, lugar donde permanece un tiempo aproximado de 480 minutos para lograr la consistencia adecuada. Subsecuentemente, el producto es enviado al área de corte donde se prepara de acuerdo a su presentación. Si la presentación fuese

de 5 kilogramos, el corte de piezas se hace manualmente a una velocidad de 30 piezas por hora; en el caso de las presentaciones de 90 y 250 gramos, el corte se hace utilizando el equipo Ben Hill a una velocidad de 4,500 y 3,000 piezas por hora respectivamente.

Cuando se trata de la crema reprocesada, el circuito es el siguiente: el producto se extrae del tanque 15:12 por medio de las bombas P15-12-03-002 y P15-12-03-001 con capacidad de 30,000 litros por hora, y se dirige hacia los tanques 58 y 59 con capacidades de 3,000 litros cada uno, a continuación, la crema sigue su recorrido hacia el tanque de balance 2 impulsado por la bomba P12-58-03-001 con capacidad de 7,000 litros por hora. A partir de este punto, el proceso se desarrolla de la misma manera que el descrito para la crema proveniente de Tizayuca, cabe mencionar que la crema procesada de esta forma sólo se prepara en presentación de 5 kilogramos.

Los productos terminados que se encuentran al final de las líneas de envasado se procesan para ser acomodadas en los contenedores, y de ahí, son llevados al área de cámara fría en en la sección de derivados. Las Figuras 3.14., 3.15. y 3.16. muestran el flujo.

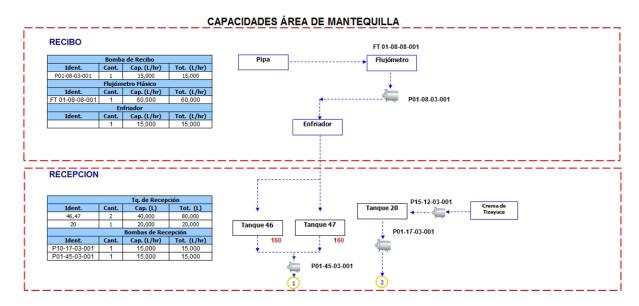


Figura 3.14: Diagrama proceso de mantequilla (Recibo y Recepción).

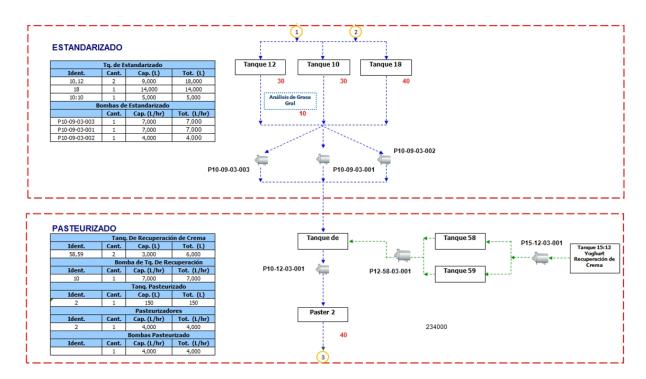


Figura 3.15: Diagrama proceso de mantequilla (Estandarizado y Pasteurizado).

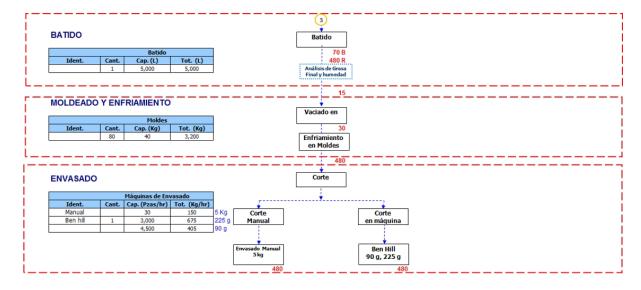


Figura 3.16: Diagrama proceso de mantequilla (Batido, Moldeado y Envasado).

## c) Línea de yogurt

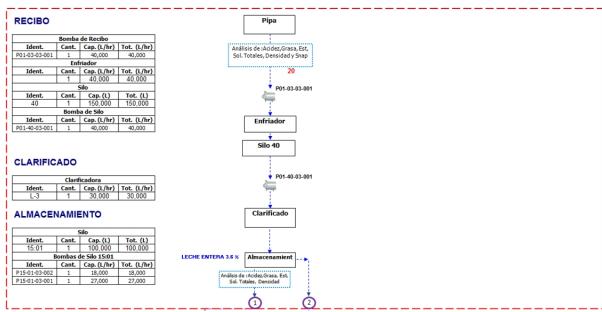
Las plantas que a continuación se mencionan comparten desde el equipo de recibo hasta los tanques de estandarizado, y a partir de ahí se bombea el producto hacia cada una de ellas, según se requiera.

El proceso del yogurt se divide de acuerdo a la presentación en la que se va a producir. Se cuentan con cuatro Plantas para este proceso. La Planta I se utiliza para producir el yogurt para beber y frutal; en la Planta II se procesa el yogurt batido en general, C-real, natural y cremoso; en la Planta III se procesa el yogurt batido, vivendi y yogurt para beber; finalmente, en la Planta III-A se procesa el frutal, solo por mencionar algunos productos.

#### Equipo compartido

El proceso para la línea de yogurt comienza en el silo 40 con una capacidad de 150,000 litros. Aquí, se descarga la leche utilizada para el procesamiento de este producto derivado. Después de almacenar la leche en el silo 40, ésta pasa por un proceso de clarificado. La clarificadora tiene una capacidad de procesamiento de 30,000 litros por hora. La leche clarificada se almacena en el silo 15:01 con capacidad para 100,000 litros. Por medio de la bomba P15-01-03-002 con capacidad de 18,000 litros por hora, se envía la leche entera hacia la descremadora 1, cuya capacidad es de 5,000 litros por hora, almacenando la leche descremada en el tanque surge 2 con capacidad de 15,000 litros. Por otro lado, la bomba P15-01-03-001 con capacidad de 27,000 litros por hora, envía la leche entera desde el Silo 15:01 hacia el tanque surge 4; en este contenedor la leche debe nivelarse a un porcentaje de grasa del 3.6, para lograrlo, se agrega leche en polvo a través de la tolva 15:08, y usando la bomba P15-04-03-001 con capacidad de 16,000 litros por hora, el producto se mezcla por medio de un proceso de recirculación. La capacidad del tanque de almacenamiento surge 4 es de 15,000 litros.

Los tanques de estandarizado 5, 6 y 7, con capacidad de 50,000 litros cada uno, son llenados a partir de los tanques surge 2 y 4, y del silo 15:01 y, dependiendo de los niveles de grasa requeridos, se envían ciertas cantidades de leche entera y de leche descremada para obtener el porcentaje de grasa deseado. Los tanques de estandarizado 5, 6 y 7 son los que proporcionan la leche hacia las Plantas I, II, III y III-A, esto se ilustra en las Figuras 3.17., 3.18. y 3.19.



#### Recibo de Leche para Planta de Yogurt

Figura 3.17: Diagrama compartido de recibo de leche para Plantas de yogurt (Recibo, Clarificado y Almacenamiento).

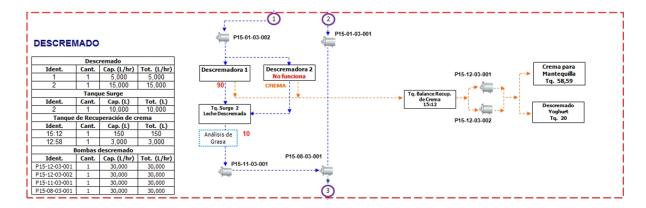


Figura 3.18: Diagrama compartido recibo de leche para Plantas de yogurt (Descremado).

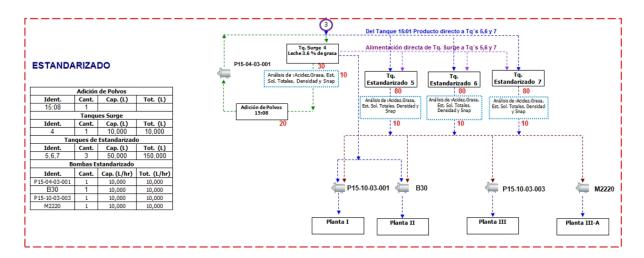


Figura 3.19: Diagrama compartido recibo de leche para Plantas de yogurt (Estandarizado).

#### 1) Planta I

Las Figuras 3.20., 3.21. y 3.22., ilustran el flujo de producto por la planta I la cual toma la leche del tanque surge 4, y de los tanques de estandarizado 5, 6 y 7 (Equipo compartido Figuras 3.17., 3.18., y 3.19.), utilizando la bomba P15-10-03-001 con capacidad de 10,000 litros por hora, posteriormente, el producto es enviado hacia su tanque de balance con capacidad de 150 litros, y luego, por medio de la bomba 2 con capacidad de 42,000 litros por hora, se manda la leche hacia el Pasteurizador M5, con capacidad de 5,000 litros por hora. Posteriormente, se pasa por el evaporador, a una velocidad de 5,000 litros por hora. A continuación, la bomba 3, con capacidad de 40,000 litros por hora, envía el producto al Homogeneizador, con capacidad de 5,000 litros por hora. Después del proceso de homogeneización, se regresa la leche al Pasteurizador M5, para, posteriormente, ser enviado al Serpentín de sostenimiento. Finalmente, el producto se regresa nuevamente al Pasteurizador M5, de donde es enviado a alguno de los tanques de maduración que se encuentre disponible.

Los tanque de maduración correspondientes a la Planta I son los tanques 1, 2, 3 y 4, con capacidad de almacenamiento de 10,000 litros cada uno. En estos tanques se agrega el inóculo para fermentar al producto, esperando después un tiempo de 15 horas para ser liberados.

Al finalizar el proceso de fermentado, se obtiene la base blanca utilizada en la elaboración del yogurt para beber. Este producto es bombeado por medio de la bomba 12,

con capacidad de 6,000 litros por hora, pasando por un filtro para eliminar grumos y partículas grandes. El caudal es medido por un flujómetro y se mezcla en línea con la fruta proveniente de los contenedores 1 y 2, éstos envían el producto por medio de la bomba P15-20-03-001. Después del mezclado en línea, el producto realiza un circuito pasando primero por el esterilizador, a una velocidad de 6,000 litros por hora, luego al homogeneizador manteniendo la misma velocidad, para regresar nuevamente al esterilizador. Al salir, el producto se dirige hacia el enfriador, con capacidad de 6,000 litros por hora; de aquí se reparte a los buffers 1 y 2, con capacidades de 5,000 y 10,000 litros respectivamente. La bomba 19, con capacidad de 9,000 litros por hora, impulsa al producto desde los buffers 1 y 2, hasta las máquinas de envasado Federal 1 y Federal 2, con capacidades de 3,750 litros por hora, que equivale a 15,000 piezas por hora de 0.25 litros; análogamente, la empacadora Federal 2, procesa a velocidad de 5,000 litros por hora, lo que equivale a 20,000 piezas por hora de 0.25 litros cada una.

Para el procesamiento de la leche frutal, se inicia con la base blanca originada en Planta III o Planta I. Al igual que en el proceso de fermentado del yogurt para beber, la leche frutal pasa por un flujómetro y, posteriormente, se mezcla en línea, enviando la mezcla hacia un tanque de balance de 150 litros. La bomba M2, con capacidad de 16,000 litros, se encarga de enviar al producto hacia el pasteurizador M8, con capacidad de 8,000 litros por hora. Nuevamente se inicia un circuito, al enviar el producto hacia el homogeneizador M8 con capacidad de 8,000 litros por hora, regresando de nueva cuenta al pasteurizador M8, después se envía el producto hacia el serpentín de sostenimiento, regresando luego al pasteurizador M8, y finalmente el producto es enviado hacia el tanque 22, con capacidad de 18,000 litros. Desde el tanque 22, la leche frutal es bombeada hacia las máquinas envasadoras de Brick UHT 1/4 B7 y Tetratop, con capacidades de 7,000 y 9,000 litros por hora respectivamente. El proceso termina al empacar respectivamente los productos de la envasadora Brick a tarimas y Tetratop a canastillas.

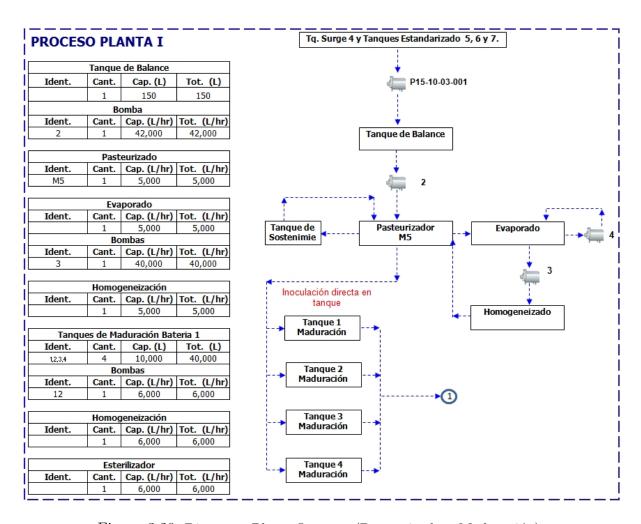


Figura 3.20: Diagrama Planta I yogurt (Pasteurizado y Maduración).

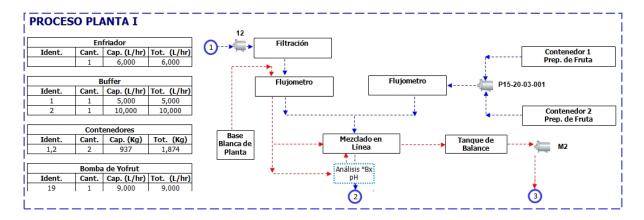


Figura 3.21: Diagrama Planta I yogurt (Mezclado).

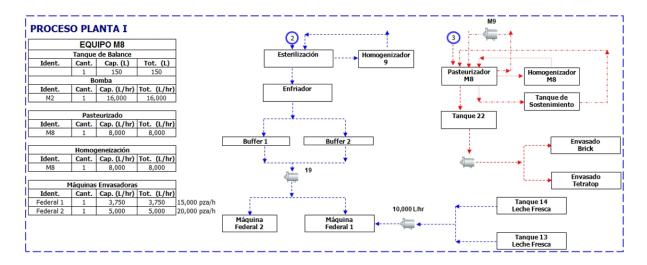


Figura 3.22: Diagrama Planta I yogurt (Esterilizado, M8 y Envasado).

## 2) Planta II

Al igual que la Planta I, la Planta II toma leche de los tanques de estandarizado 5, 6 y 7, y el tanque surge 4, pero, para la Planta II se utiliza la bomba B30 con capacidad de 10,000 litros por hora. La leche que se envía hacia la Planta II, pasa por su tanque de balance con capacidad de 150 litros. Posteriormente el producto es bombeado por la bomba 31, con capacidad de 34,000 litros por hora. De aquí se envía al pasteurizador con capacidad de 5,000 litros por hora. Después, la bomba 35 con capacidad de 46,000 litros

por hora, lo manda hacia el evaporador, cuya capacidad de proceso es de 5,000 litros por hora. El agua evaporada es drenada por medio de la bomba 36 con capacidad de 40,000 litros por hora; por otro lado, la leche evaporada se envía hacia el homogeneizador por presión natural a una tasa de 5,000 litros por hora. La leche homogeneizada se envía de nueva cuenta al pasteurizador, y luego al serpentín de sostenimiento. Finalmente, del serpentín de sostenimiento, se envía de regreso al pasteurizador, y luego se manda hacia los tanques de maduración correspondientes a la Planta II. Los tanques de maduración de la Planta II se agrupan en forma de batería, constituyendo los conjuntos de batería I y batería II. La batería I comprende los tanques 24, 13, 14 y 15, con capacidad de 10,000 litros cada uno; análogamente, la batería II comprende los tanques 25, 16, 17 y 18, de capacidad similar a los anteriores. La bomba 39, con capacidad de 7,000 litros por hora, envía la base blanca al cooler, pasando por un doble proceso de filtrado en línea. Los residuos del cooler son removidos por medio de la bomba B41. La base blanca que está almacenada en el cooler se envía hacia el tanque 19 con capacidad de 15,000 litros. De acuerdo al producto final envasado, se sigue cualquiera de los siguientes procesos:

- 1. Máquina FM1 (presentación de 0.150 kilogramos).- Obtiene el preparado de fruta del contenedor 1, jalado por la bomba B49; y la base blanca almacenada en el tanque 19 la obtiene mediante la bomba B44, combinándolas en una mezcladora, para su posterior envasado.
- 2. Máquina FM2 (presentación de 0.150 kilogramos).- Obtiene el preparado de fruta del contenedor 2, jalado por la bomba B48; y la base blanca almacenada en el tanque 19 la obtiene mediante la bomba B45, combinándolas en una mezcladora, para su posterior envasado.
- 3. Máquina FM3 (presentación de 0.150 kilogramos).- Obtiene el preparado de fruta del contenedor 3, jalado por la bomba B47; y la base blanca almacenada en el tanque 19 la obtiene mediante la bomba B46, combinándolas en una mezcladora, para su posterior envasado.
- 4. Máquina Autoprod (presentación de 1 kilogramo).- Obtiene el preparado de fruta del contenedor 4, jalado por la bomba B51; y la base blanca almacenada en el tanque 19 la obtiene mediante la bomba B50, combinándolas en una mezcladora, para su posterior envasado.

Las bombas B47, B48, B49 y B51, utilizadas en el envío de preparado de fruta, tienen capacidad de 1,000 litros por hora. Por otro lado, las bombas B44, B45, B46 y B50,

utilizadas en el envío de base blanca, tienen capacidad de 2,300 litros por hora.

Los contenedores 1, 2, 3 y 4, de preparado de fruta, tienen una capacidad de 1,200 kilogramos. Las máquinas de envasado FM1, FM2 y FM3 tienen capacidad de 2,250 litros por hora, lo que equivale a 15,000 piezas de 0.15 kilogramos por hora; y la máquina Autoprod tiene una capacidad de envasado de 2,500 litros por hora, equivalente a 2,500 piezas de 1 kilogramo por hora. La Figura 3.23., 3.24. y 3.25., muestran este proceso.

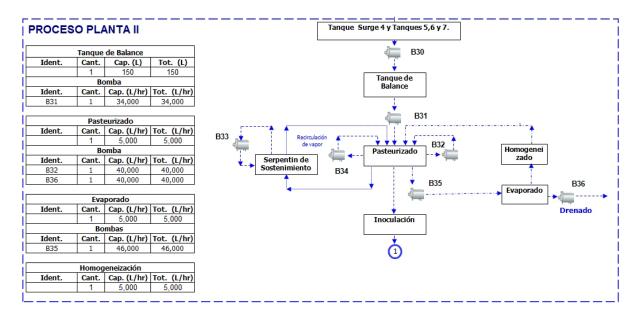


Figura 3.23: Diagrama Planta II yogurt (Pasteurizado).

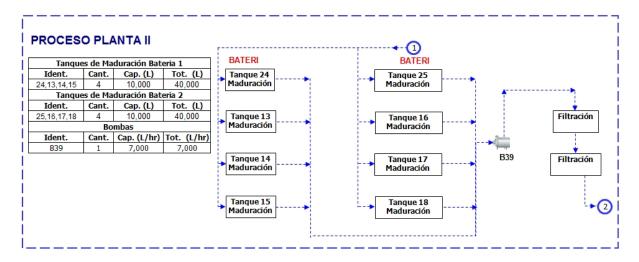


Figura 3.24: Diagrama Planta II yogurt (Maduración).

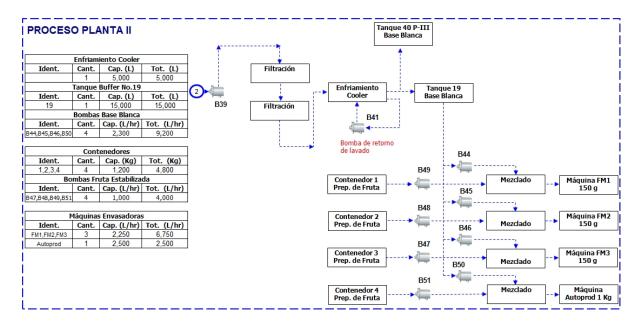


Figura 3.25: Diagrama Planta II yogurt (Cooler y Envasado).

## 3) Planta III

La planta III ilustrada en las Figuras 3.26., 3.27. y 3.28., toma leche de los tanques de esterilizado 5, 6 y 7, utilizando para este fin la bomba P15-10-03-003 con capaci-

dad de 10,000 litros por hora, la cual es enviada al tanque de balance con capacidad de 100 litros, posteriormente mediante la bomba B102 con capacidad de 24,000 litros por hora el producto es enviado al pasteurizador con capacidad de 5,000 litros por hora, donde primeramente la leche es conducida al evaporado a una velocidad de 5,000 litros por hora, para luego regresar al pasteurizador, subsecuentemente la leche es enviada al homogeneizador con capacidad de 5,000 litros por hora, la cual regresa nuevamente al pasteurizador, después la leche es enviada al serpentín manteniendo la misma velocidad para finalmente regresar al pasteurizador y salir a los tanques de maduración donde se realiza la inoculación de la leche.

Mediante la bomba B106 con capacidad de 28,000 litros por hora, se toma la leche para la batería 1 conformada por los tanques de maduración 31, 32, 33 y 34 con capacidades de 10,000 litros y para la batería 2 conformada por los tanques de maduración 35, 36, 37 y 38 con capacidad similar a los anteriores, estos tanques, son utilizados para realizar la inoculación de la leche. Los tanques de igual forma son lavados con sosa siguiendo la restricción de que solo se puede hacer esta actividad por batería, es decir los tanques que conforman la batería 1 solo se pueden lavar hasta que todos son desalojados de producto y el mismo caso aplica para la batería 2. Cabe mencionar que dichos tanques son compartidos con la planta III-A. Una vez terminado el proceso de inoculación de leche, se obtiene lo que es llamado yoghurt base (base blanca), el cual es enviado a dos diferentes circuitos; el primero, es enviado al cooler (dicho equipo da un proceso de enfriado a la base blanca), con capacidad de 5,000 litros, mediante la bomba B109 con capacidad de 5,000 litros por hora, pasando por un proceso de doble filtración y, el segundo, es enviado a la planta I donde será procesado como yogurt para beber o frutal según se requiera.

Siguiendo el circuito del cooler, el yogurt base, es enviado a dos distintos destinos, el primero hacia el tanque 40 con capacidad de 15,000 litros mediante el método ordinario y cuando se requiere desalojar por completo los residuos del cooler se emplea la bomba B117 con capacidad de 4,500 litros por hora. El segundo destino tiene dirección hacia el bufer 19 que se encuentra en la Planta II.

Para el envasado del producto de yogurt batido de 0.150 kilogramos, se hace por la máquina FM5 con capacidad de 2,250 litros por hora; se toma del producto mezclado, el cual es elaborado a partir de la mezcla de yogurt base, obtenida del tanque 40 a través de la bomba B113, y preparado de fruta, obtenida del contenedor 1, a través del uso de la bomba B114. Las unidades producidas por hora corresponden a un total de 15,000 piezas.

En caso de que el producto a envasar sea yogurt batido de 0.150 kilogramos se hace por la

máquina FM6 con capacidad de 2,250 litros por hora; Se toma producto del mezclado, el cual es realizado a base de extraer yogurt base del tanque 40 mediante la bomba B118 y frutal del contenedor 2 de preparado de fruta, por medio de la bomba B120. Las unidades producidas por hora corresponden a un total de 15,000 piezas.

Los contenedores 1 y 2 de fruta preparada, tienen capacidad de 1,200 kilogramos. Las bombas B113 y B118 tienen capacidad de 2,300 litros por hora y por último las bombas B114 y B120 tienen capacidad de 1,000 litros por hora.

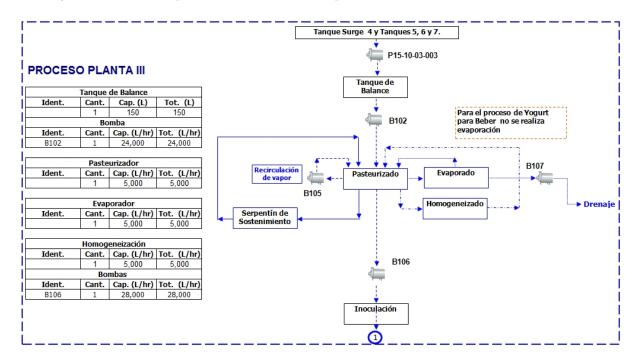


Figura 3.26: Diagrama Planta III vogurt (Pasteurizado).

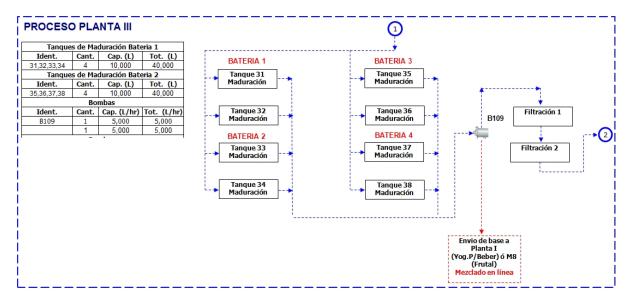


Figura 3.27: Diagrama Planta III yogurt (Maduración).

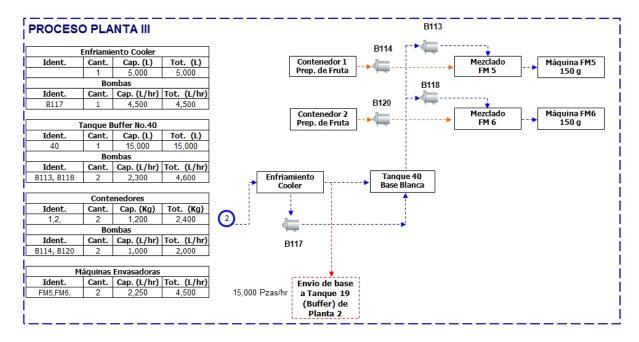


Figura 3.28: Diagrama Planta III yogurt (Cooler y Envasado).

## 4) Planta III-A

La planta III-A ilustrada en la Figura 3.29., 3.30. y 3.31., toma leche de los tanques de esterilizado 5, 6 y 7, de donde es enviado al tanque de balance con capacidad de 100 litros, mediante la bomba M2220 con capacidad de 10,000 litros por hora, del tanque de balance mediante la bomba M2 con capacidad de 45,000 litros por hora, se envía la leche al pasteurizado con capacidad de 11,500 litros por hora. El pasteurizado inicia su ciclo con la salida de leche hacia el homogeneizado con capacidad de 11,500 litros por hora regresando la leche al pasteurizador, posteriormente manteniendo la misma velocidad la leche es enviada al serpentín para luego regresar de igual forma al pasteurizador. Para el envío de la leche a los tanques de maduración se emplea la bomba M6, la cual tiene una capacidad de 13,000 litros por hora.

Como se mencionó anteriormente en la descripción de la Planta III, los tanques de maduración empleados en esta planta son compartidos con los de la Planta III, por lo que el proceso de inoculación y lavado es similar. Ya terminado el proceso de inoculación de leche, se tiene lo que es llamado yogurt base (base blanca) mismo que es enviado a dos circuitos diferentes; el primero, es enviado a un mezclado en línea, mediante la bomba MPCM con capacidad de 9,000 litros por hora, en espera del preparado de fruta; y el segundo destino del circuito implica el envío de producto a la Planta I, donde será procesado como yogurt para beber o frutal según se requiera.

El circuito de mezclado en línea se realiza de la siguiente manera: el yogurt base es enviado por la bomba MPCM y el preparado de fruta es extraído de los contenedores 1, 2 y 3, con capacidades de 937 kilogramos cada uno, por medio de la bomba M2300, cuya capacidad es de 9,000 litros por hora. Esta nueva mezcla se puede utilizar como frutal o yogurt para beber, según el proceso de mezclado que se realice.

Esta nueva mezcla regresa al tanque de balance mencionado previamente, manteniendo la misma velocidad generada por las bombas utilizadas en el mezclado. Si se va a procesar leche frutal, se utilizará la bomba M2 para enviar el producto hacia el pasteurizador; en cambio, si el producto a procesar es yogurt para beber, entonces se empleará la bomba CM300, con capacidad de 9,000 litros por hora, que de la misma manera enviará el producto hacia el pasteurizador. Una vez depositado el producto en el pasteurizador, se envía el producto al homogeneizador, después, regresa al pasteurizador, luego sale nuevamente hacia el serpentín de sostenimiento, para posteriormente regresar al pasteurizador y, finalmente, salir impulsado por la bomba M6, hacia los bufer de enfriamiento 41 y 42 con capacidad de 15,000 litros cada uno.

Si el producto que se está procesando es yogurt para beber, en presentación de 0.250 kilogramos, se emplea para su envasado la máquina FM2, con capacidad de 5,000 litros por hora; el producto es tomado de los bufers 41 y 42, mediante la bomba M3 con capacidad de 15,000 litros por hora. Las unidades producidas por hora corresponden a un total de 20,000 piezas.

En caso de que el producto que se esté procesando sea leche frutal, en presentación de 1 kilogramo, para su envasado se emplea la máquina Tetratop con capacidad de 9,000 litros por hora; el producto es tomado de los bufers 41 y 42, mediante la bomba M1 con capacidad de 15,000 litros por hora. Las unidades producidas por hora corresponden a un total de 9,000 piezas.

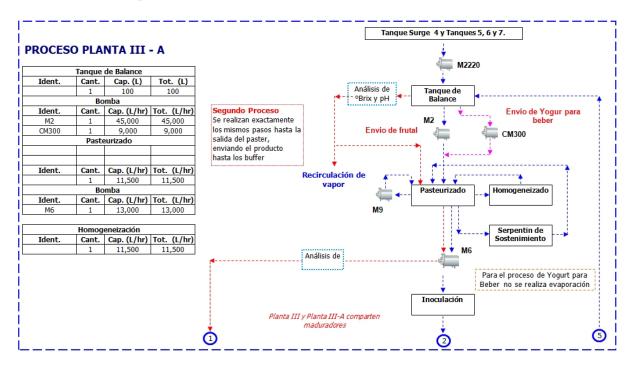


Figura 3.29: Diagrama Planta III-A yogurt (Pasteurizado).

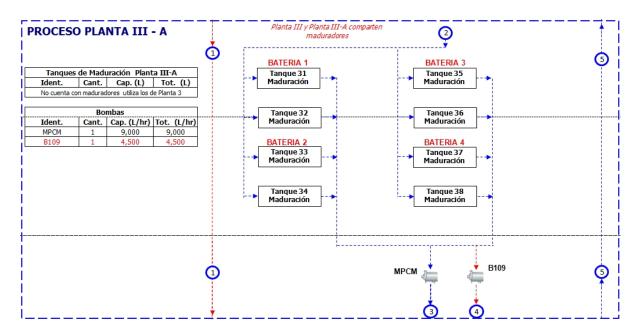


Figura 3.30: Diagrama Planta III-A yogurt (Maduración).

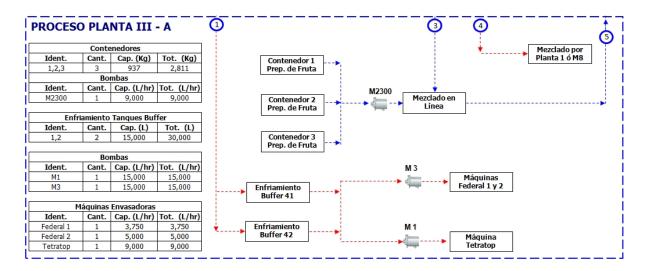


Figura 3.31: Diagrama Planta III-A yogurt (Mezclado y Envasado).

## d) Línea de postres

La línea de postres comprende la elaboración de los siguientes productos: espumas, arroz con leche (Figuras 3.32. y 3.33.) y frutas con crema (Figuras 3.34. y 3.35.). A continuación se describe el flujo del proceso para la producción de los productos catalogados como postres.

## 1) Espumas

El área de postres de espumas, toma leche pasteurizada de la Planta I o II de la línea yogurt, de donde es enviada a los tanques de proceso 1 y 2, con capacidades de 2,000 litros cada uno. De aquí la leche pasteurizada es enviada al shiller, con capacidad de 1,100 litros por hora, usando para este fin la bomba P01, con capacidad de 1,000 litros por hora. Posteriormente, la leche pasteurizada es enviada a la trefa, con capacidad de 1,600 litros por hora, mediante la bomba P04, cuya capacidad es de 1,000 litros por hora. Finalmente, la leche pasteurizada es vertida en las ollas 1 y 2 que se encuentran contenidas dentro de la máquina de envasado Gastic Dogaseptic, con capacidad de 1,375 litros por hora. De aquí, el producto es envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos.

### 2) Arroz con leche

La preparación de postres toma como entrada a dos insumos: por un lado utiliza leche pasteurizada, y por otro lado, toma el preparado de fruta estabilizada. La leche pasteurizada es tomada de la Planta I o II, de la línea yogurt, donde es enviada a los mismos tanques de proceso 1 y 2 del área de espumas, de aquí, la leche pasteurizada es enviada mediante la bomba P01 a la olla 2, que se encuentra contenida dentro de la máquina de envasado Bencko Pack, con capacidad de 375 litros por hora. El preparado de fruta estabilizada, enviado hacia la máquina Bencko Pack, es tomado del contenedor 1, con capacidad de 1,200 kilogramos, mediante la bomba P069-02-04, con capacidad de 1,000 litros por hora, y es enviado hacia la olla 1. Ya que se tiene en las ollas 1 y 2 de la máquina Bencko Pack tanto leche pasteurizada como el preparado de fruta, el producto es mezclado y envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos, es enviado a la máquina de etiquetado Clever, cuya capacidad es de 3,000 piezas por hora.

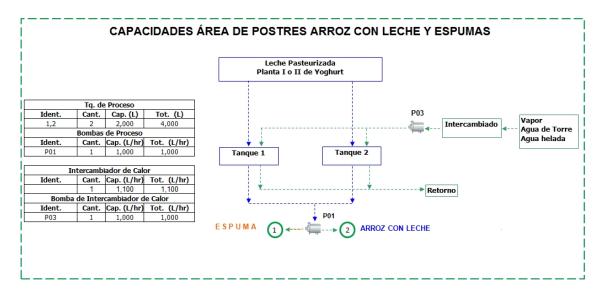


Figura 3.32: Diagrama postres espumas y arroz con leche (Recibo).

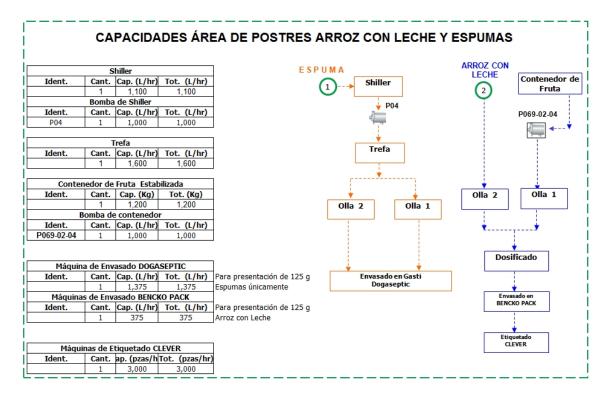


Figura 3.33: Diagrama postres espumas y arroz con leche (Dosificado y Envasado).

#### 3) Frutas con crema

El área de postres para frutas con crema, toma la crema ácida de la línea que alimenta a la máquina Autoprod 1(I) de la Planta I, donde es enviada a los tanque de proceso 1, 2, 3 y 4 del área de espumas y frutas con crema. Es importante hacer mención de que en la actualidad el área de frutas con crema sólo trabaja con los tanques 3 y 4, los cuales tienen capacidad de almacenamiento de 2,000 litros cada uno. De aquí, la crema ácida es enviada mediante la bomba P101, con capacidad de proceso de 1,000 litros por hora, a la olla 2, la cual se encuentra contenida dentro de la máquina de envasado Bencko Pack. Por otro lado, la fruta estabilizada utilizada en el proceso de frutas con crema, es tomada del contenedor 2, con capacidad de 1,200 kilogramos, y es enviada a la olla 1 mediante la bomba P623, cuya capacidad es de 2,200 litros por hora; este preparado de fruta es enviado directamente a la olla 1 si la presentación requerida a envasar es de 0.125 kilogramos, pero en caso de que se requiera envasar una presentación de 0.040 kilogramos, entre la olla 1 y la bomba P623 se realizará un mezclado para obtener la consistencia adecuada.

Ya que se tiene en las ollas 1 y 2 de la máquina Bencko Pack tanto crema ácida como fruta preparada, se realiza el proceso de envasado. Si el producto es envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos. Las cuales son enviada a la máquina de etiquetado Clever. En caso de que la presentación fuese de 0.040 kilogramos las unidades producidas se envasan por la máquina Bencko Pack, para luego ser enviados a la máquina de etiquetado Clever.

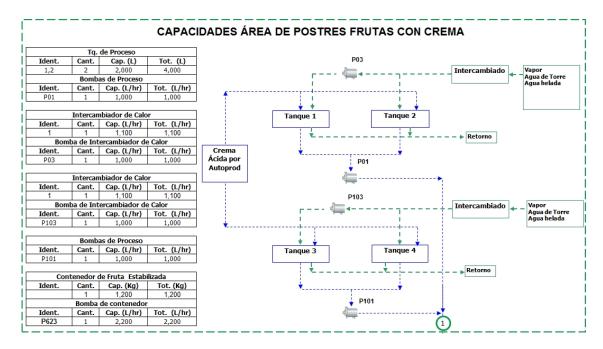


Figura 3.34: Diagrama postres frutas con crema (Recibo).

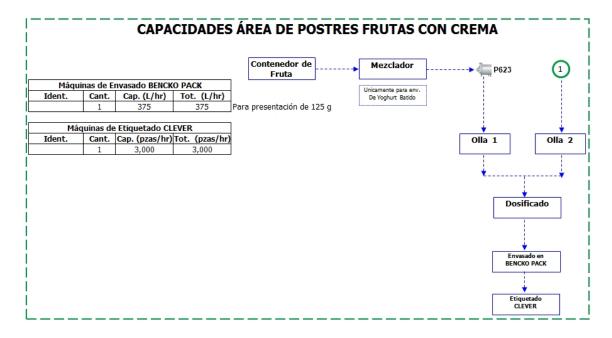


Figura 3.35: Diagrama postres frutas con crema (Dosificado y Envasado).

Una vez analizado el proceso de la empresa en cada una de sus líneas, mediante la descripción detallada de las actividades y flujo del proceso, se identifican las distribuciones de probabilidad.

# 3.3. Distribuciones empíricas y pruebas de bondad de ajuste para las tasas de llegada y salida de la Empresa.

La simulación está atrayendo a clientes porque minimiza lo que pasa en un sistema real o lo que se percibe para un sistema que está en la fase de planeación. Los datos de entrada del rendimiento de una simulación deben corresponder directamente a los rendimientos que podrían grabarse del sistema real. Adicionalmente, es posible desarrollar un modelo de simulación de un sistema sin las asunciones dudosas (como la misma distribución estadística para cada variable al azar) de soluciones a modelos matemáticos [Banks et. al., 2001].

Por tanto, uno de los pasos bastante claros en la planeación de este proyecto de simulación deberá ser identificar qué datos son necesarios para apoyar el modelo. Los modelos anteriormente descritos y los que ahora se describen contienen información histórica que incluye demoras en el tiempo: tiempos entre llegadas, tiempos de proceso, tiempos de recorrido, programas de trabajo de equipos operando, cantidades de entradas y salidas e interacciones en las distintas etapas por las que la leche es procesada, etc. En algunos casos también se hace uso de estimación de probabilidades, tales como porcentaje producido de una operación, las proporciones de cada tipo de producto y los parámetros de operación.

Para esta sección, al igual que en la anterior, se tomaron fuentes de información desde bases de datos electrónicas, entrevistas a personas que trabajan en el sistema y observaciones propias.

Se obtuvo una completa comprensión del sistema, así como un conocimiento pleno acerca del funcionamiento de los procesos involucrados.

# 3.3.1. Modelación del proceso

Para iniciar el estudio del proceso, se evaluó el arribo de transportes a la planta, su carga real, y los tiempos necesarios para determinar el sistema de muestreo. El anexo 1 contiene la información proporcionada por el Departamento de Métodos y Sistemas. Ésta fue recabada, depurada, y posteriormente, procesada estadísticamente a fin de obtener los modelos probabilísticos (distribuciones de probabilidad) asociados al comportamiento aleatorio del fenómeno estudiado. Por requerimiento de la empresa, el análisis se hizo a nivel de turno por día, semanal, mensual y anual a fin de obtener valores comparativos. Los modelos incluidos en el simulador van hasta el detalle semanal y mensual. Con lo anterior se obtuvieron las estadísticas mostradas a continuación<sup>7</sup>.

1. Análisis de tiempos de interarribo de camiones cisterna

La tabla 3.1, muestra las distribuciones de probabilidad asociadas a la variable aleatoria tiempo de interarribos (en minutos) para camiones cisterna simples y dolly's, los tamaños de muestra usados para calcular los estimadores insesgados del valor promedio de tiempo, y los propios estimadores del tiempo esperado en cada operación. Aquí, el número uno representa al mes de enero, el dos a febrero, y así sucesivamente.

2. Funciones de densidad usadas en el modelo de simulación para evaluar el volumen de leche recibido en planta.

La cantidad de leche recibida durante los años 2006 y 2007 fueron muestras históricas tomadas para obtener estimadores estadísticos de la serie de tiempo asociada al fenómeno. Para el año 2006 se tuvo información completa para doce meses de trabajo, en el año 2007, sólo se contabilizó información para once meses. Los valores comparativos de los estadísticos básicos se muestran en la Figura 3.36.

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>La nomenclatura usada en esta tabla es como sigue:  $E \sim (\lambda)$  Exponencial con parámetro  $\lambda$ ;  $IG \sim Inversa Gausiana con parámetros <math>(\mu, \gamma)$ ;  $LN \sim Logarítmico Normal con parámetros <math>(\mu, \sigma)$ ;  $N(\mu, \sigma)$  Normal con parámetros  $(\mu, \sigma)$ ;  $N_j$ , j=1,2 Tamaños muestrales para pipas simples y dolly's respectivamente;  $t_j$ , j=1,2, estimador estadístico insesgado del tiempo esperado de interarribo (en minutos) para pipas simples y dolly's respectivamente.

Tabla 3.1: Estadísticos básicos asociados a las densidades usadas por mes para modelar los tiempos (en minutos) de inter-arribo en pipas.

Mes	Simple	Dolly	$N_1$	$N_2$	$ar{t}_1$	$\bar{t}_2$
1	E (18.4805)	LN (135, 303)	862	585	92.88	134.83
2	E (18.4600)	LN (141.9600, 290)	1009	677	87.39	130.58
3	E (18.4804)	LN(140, 320)	906	563	92.84	151.78
4	E (19.3900)	IG(52, 146)	958	634	92.39	151.28
5	E (18.700)	IG(44.1300, 141.5000)	920	604	92.98	138.27
6	E (18.1500)	IG (46.3800, 142.37)	1015	693	85.36	125.22
7	E (18.4900)	IG (45.5000, 120)	986	682	262.98	128.48
8	E (18.4900)	IG (48.7000, 125)	753	624	122.94	137.00
9	E (18.4000)	IG(52.1600, 137)	621	423	140.90	186.8
10	E (18.2000)	IG(59, 190)	800	607	106.63	134.44
11	E (18.5200)	IG(45, 125)	499	316	93.51	153.83
12	E (19.4760)	IG(48.5000, 140)	499	316	93.51	153.83

#### **Statistics**

		Año2006	Año2007
N	Valid	365	334
	Missing	0	31
Mean		2005967	1899200
Std. Error of Mean		7774.180	6832.273
Median	2004162	1902967	
Mode		1476523 <sup>a</sup>	1458286 <sup>a</sup>
Std. Deviation		148525.5	124864.3
Variance		2.2E+10	1.6E+10
Range		1083255	820004.0
Minimum		1476523	1458286
Maximum		2559778	2278290
Sum		7.3E+08	6.3E+08

a. Multiple modes exist. The smallest value is shown

Figura 3.36: Estadísticas comparativas de los volúmenes diarios de leche entregados en el área de recepción.

Las cifras indican que el año 2006 recibió en promedio mayor volumen de leche por día, el resto de los indicadores favorecen también al año 2006 sobre el 2007, al menos hasta el mes de septiembre de 2007 donde se observa un repunte en el volumen de producto recibido en planta. Los estadísticos obtenidos sugieren una mayor actividad en la producción y/o recepción láctea para el año 2006; un sencillo cálculo muestra que el año 2007 estuvo por debajo del año 2006 en un 6.16 por ciento.

La Figura 3.37., muestra las trayectorias de las series de tiempo obtenidas del muestreo de ambos años. Claramente, las cifras del año 2006, son mejores a las del año 2007 hasta el mes de septiembre, punto donde el año 2007 presenta una leve mejoría en sus indicadores.

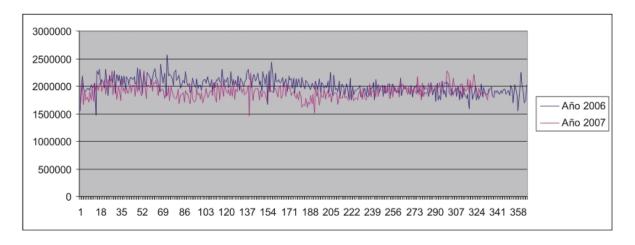


Figura 3.37: Volúmenes de leche recibidos en planta, años 2006 y 2007.

Una vez obtenidos los estadísticos básicos del universo muestral, se procede ahora a calcular las densidades de probabilidad asociadas con las muestras en periodos de un mes. Se define a la variable aleatoria  $v_j$ , j = 1, ..., 23 como el volúmen de leche (en miles de litros) que arriba en el mes j a la zona de recibo.

El objetivo ahora es obtener las densidades de probabilidad asociadas con las muestras obtenidas mes a mes. Aquí, se usa la hipótesis de que el mes j-ésimo correspondiente a un año cualquiera k tiene una densidad similar al siguiente año afectada por una constante de crecimiento (o decrecimiento)  $\rho$ ; esto es:

$$f_{V_k}(v) = \rho f_{V_{k+1}}(v), \quad \rho > 0, \quad k = 1, \dots,$$
 (3.1)

Aquí, el valor de  $\rho$  para los meses de enero a noviembre del año 2007, fue de 0.9384, cantidad resultante de evaluar las cifras mensuales para ambos años. En 2007 se tuvo un porcentaje de 6.16 menor al año 2006 respecto a recepción de producto. Así, la cantidad mencionada se obtiene como: 0.9384 = (1- 0.0616). La tabla 3.2, muestra las densidades obtenidas para las muestras dadas en forma mensual.

Tabla 3.2: Densidades usadas para modelar mensualmente los volúmenes de leche recibidos.

3.6	D: + 11 - 1/
Mes	Distribución usada
Enero	N(28.7500, 5.0000)
Febrero	N(28.2500, 4.6800)
Marzo	N(28.2500, 4.5000)
Abril	N(28.5710, 4.5000)
Mayo	N(28.1140, 4.5000)
Junio	N(28.6630, 4.7000)
Julio	N(28.3120, 5.3000)
Agosto	N(28.9000, 5.2500)
Septiembre	N(28.7500, 4.8000)
Octubre	N(28.3500, 4.7990)
Noviembre	N(28.4190, 4.9250)
Diciembre	N(28.7500, 5.4000)

# 3.3.2. Descripción general del flujo de operaciones

A continuación se detalla el flujo de operaciones analizado en este proyecto. El orden de presentación corresponde a la secuencia natural del producto dentro del proceso. Cada actividad descrita aquí fue supervisada y avalada por el Departamento de Métodos y Proyectos.

#### Proceso de operaciones para la leche

1. Llegada de transportes cisterna (pipa) a la planta.

El proceso de producción comienza con la llegada de las pipas a la planta. Dichas llegadas se dan en forma aleatoria variando en forma diaria, pero más significativamente en forma mensual.

La distribución real usada para modelar este proceso es una normal con media  $\mu=25.8399$ , miles de litros y desviación estándar  $\sigma=4.8628$  miles de litros. Esta función fue obtenida a través de la convolución de las funciones mostradas en la tabla 1., a valores extremos. La tabla 3.3, muestra las distribuciones de probabilidad usadas para simular los inter-arribos de pipas cisterna para el proceso, y respecto a las llegadas de cargas de crema se emplea una función E(1193.7).

Tabla 3.3: Densidades usadas en el modelo para simular interarribos de pipas cisterna de leche fluída.

año $(i)$	Mes	Función	año $(i+1)$	Mes	Función
1	Enero	E(18.4805)	1	Enero	0.9384  E(18.4805)
2	Febrero	E(18.46)	2	Febrero	0.9384  E(18.46)
3	Marzo	E(18.4804)	3	Marzo	$0.9384 \ E(18.4804)$
4	Abril	E(19.39)	4	Abril	0.9384  E(19.39)
5	Mayo	E(18.7)	5	Mayo	0.9384 E(18.7)
6	Junio	E(18.15)	6	Junio	0.9384  E(18.15)
7	Julio	E(18.49)	7	Julio	$0.9384 \ E(18.49)$
8	Agosto	E(18.49)	8	Agosto	0.9384~E(18.49)
9	Septiembre	E(18.4)	9	Septiembre	$0.9384 \ E(18.4)$
10	Octubre	E(18.2)	10	Octubre	0.9384~E(18.2)
11	Noviembre	E(18.52)	11	Noviembre	0.9384~E(18.52)
12	Diciembre	E(19.476)	12	Diciembre	$0.9384\ E(19.476)$

#### 2. Admisión de leche al área de recibo

El caudal de leche ingresa al proceso a través de 6 líneas de admisión para leche fluida y una más para descarga de crema. Cada línea cuenta con una capacidad nominal de 40, 000 lts/hr, es decir, 6, 720,000 lts/sem. Considerando un tiempo promedio de mantenimiento preventivo y limpieza de líneas de 5 hrs/sem, esto equivale a una producción perdida de 200,000 litros/sem. A lo anterior se debe sumar el tiempo perdido por concepto de control de calidad que equivale a 23.33 horas por semana. La producción perdida por este concepto equivale a 933,333.33 litros/semana.

Por lo anterior, el volumen efectivo promedio de leche que se tiene por línea a la semana es de [6,720,000-(200,000+933,333.33)]=5,586,666.67 litros/línea-semana. Las cantidades reales que se obtienen de leche por línea-semana están dadas en la tabla 3.4. Los cálculos del factor de utilización y eficiciencia también se muestran. La Figura 3.38., muestra esquemáticamente el área considerada en este cálculo.

Línea	Capacidad	Capacidad	Capacidad	Factor de	Factor de
(leche)	de diseño	efectiva	real	utilización	eficiencia
	(lts/sem)	(lts/sem)	(lts/sem)		
(1)	6, 720,000	5, 586,666.67	1,803,440	28.33%	34.07%
(2)	6, 720,000	5, 586,666.67	2,195,760	32.68%	39.30%
(3)	6, 720,000	5, 586,666.67	4,777,920	71.10%	85.52%
(4)	6, 720,000	5, 586,666.67	2,027,760	30.18%	36.30%
(5)	6, 720,000	5, 586,666.67	1,874,880	27.90%	33.56%
(6)	6, 720,000	5, 586,666.67	1,384,320	20.60%	24.78%
Tot.	40, 320,000	33, 520,000	14,164,080	35.13%	42.26%

Tabla 3.4: Medición de la capacidad del área de recibo.

 $<sup>^8</sup>$ Esta cifra se obtiene de la siguiente forma: En promedio arriban a la planta 80 pipas por día distribuidas entre las 6 líneas de descarga. El tiempo de muestreo es una distribución uniforme [13,17] con esperanza de 15 minutos/pipa. Así,  $15\times80\approx20$  horas de tiempo perdido en las 6 líneas, o equivalentemente 3,33 hrs/línea-día. Por lo anterior, semanalmente se tiene una pérdida de tiempo de 23.33 hrs/línea-semana.

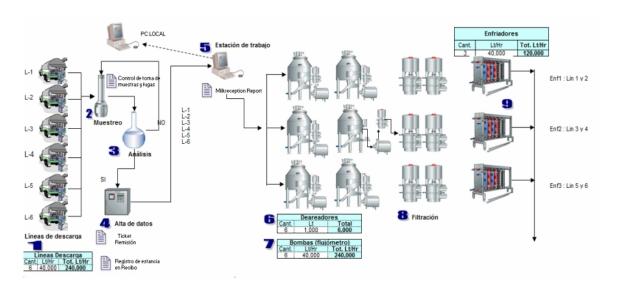


Figura 3.38: Área de recibo.

3. Función y modo de compatibilidad pora los diferentes productos que son elaborados

La planta actualmente mantiene la elaboración de 131 productos distintos (Leche clásica 1 lt., YOGURT P/BEBER 250 g., FRUTAL UHT 250 ml., YOGURT C-REAL 150 g., CREMA 200 ml., YOGURT 150 g., etc.) los cuales fueron empleados para su modelado, la tabla 3.5, muestra las distribuciones de probabilidad correspondientes de algunos productos tomados como ejemplo.

El análisis de resultados de las densidades para los ejemplos de los productos de la tabla 3.5 y todas las distribuciones antes mencionadas, fueron obtenidos con la ayuda de la herramienta **BestFit 4.5** la cual permite concluir, a través de una prueba de bondad de ajuste las probabilidades observadas. Todas las distribuciones para los productos tomados como ejemplo son ilustradas mediante un histograma desde la Figura 3.39., hasta la 3.51.

Las probabilidades de que, para este caso, un producto sea requerido para su fabricación siguen las siguientes distribuciones, para dejar esto con más claridad describimos la primera de ellas mostrada en la Figura 3.39., la cual representa una distribución Lognormal con estos parámetros: media 229,537.93 y desviación estándar 69,776.62, a un costado del lado derecho del histograma podemos observar los estadísticos que muestran

Tabla 3.5: Densidades usadas para modelar la elaboración de productos.

No.	Nombre del producto	Distribución usada (Miles de litros)
1	Leche Clásica 1 lt.	L(229537.93, 69776.62)
2	Leche Light 1 lt.	W(10.119, 36666.36)
3	Leche Sabor Fresa 1 lt.	N(63342.21, 16008)
4	YOG. P/BEBER 250 g. Fresa Coco	T(25967.76, 40661.22, 221153)
5	YOG. P/BEBER 250 g. Piña Coco	L(130621.49, 47559.78)
6	FRUTAL UHT 250 ml Fresa	T(0.65235, 0.65235, 35401.05)
7	FRUTAL UHT 250 ml Mango	T(0.00276, 0.00276, 24286.53)
8	YOGURT C-REAL 150 g. Fresa Nuez	U(1775.45, 3791.46)
9	YOGURT C-REAL 150 g. Durazno Nuez	T(0.02711, 0.02717, 11662.38278)
10	CREMA $200 \text{ g}.$	W(32.022, 1467150.23)
11	CREMA $450 \text{ g}.$	W(7.0071, 858032.40)
12	YOGURT $150 \text{ g. } Fresa$	W(9.9070, 2013340)
13	YOGURT 150 g. Durazno	N(831686, 182164.92)

los datos colectados.

La herramienta BestFit 4.5 se utilizó para analizar y determinar el tipo de distribución de probabilidad de nuestro conjunto de datos. Esta utilería permite comparar los resultados entre varias distribuciones analizadas mediante una calificación. Entre sus procedimientos emplea las pruebas Chi-cuadrada, de Kolmogorov-Smirnov y de Andersosn-Darling. Además calcula los parámetros apropiados para cada tipo de distribución, e incluye información estadística adicional como media, moda, valor mínimo, valor máximo y varianza, entre otros datos.

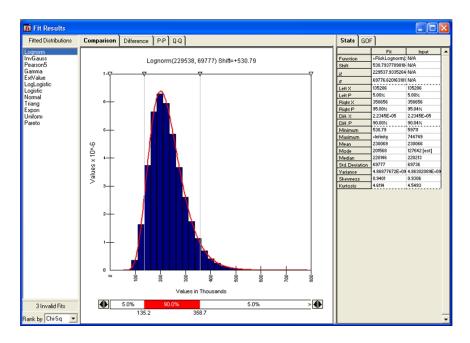


Figura 3.39: Distribución (BestFit 4.5) Leche Clásica 1 lt.

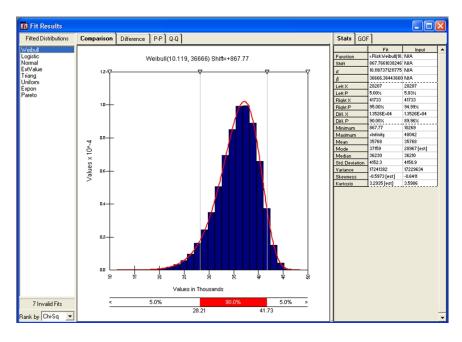


Figura 3.40: Distribución (BestFit 4.5) Leche Light 1 lt.

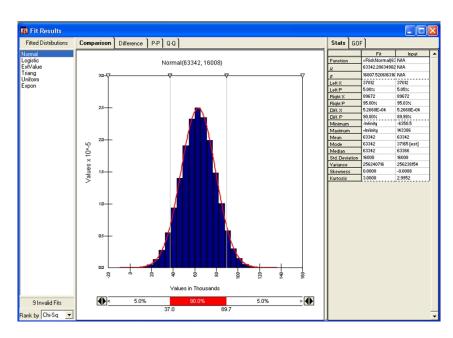


Figura 3.41: Distribución (BestFit 4.5) Leche Sabor Fresa 1 lt.

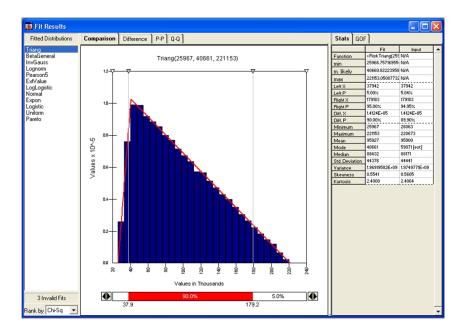


Figura 3.42: Distribución (BestFit 4.5) YOG. P/BEBER 250 g. Fresa Coco.

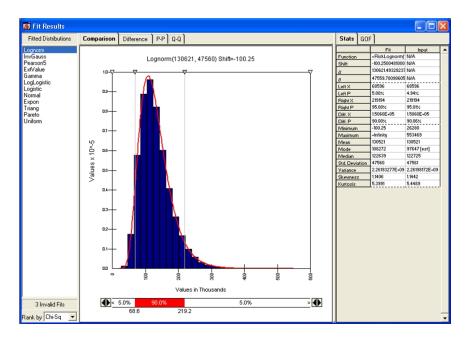


Figura 3.43: Distribución (BestFit 4.5) YOG. P/BEBER 250 g. Piña Coco.

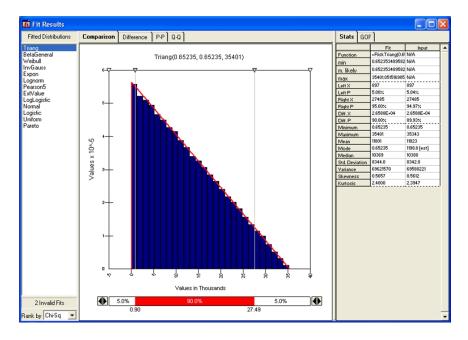


Figura 3.44: Distribución (Best Fi<br/>t4.5)FRUTAL UHT 250 ml ${\it Fresa}$  .

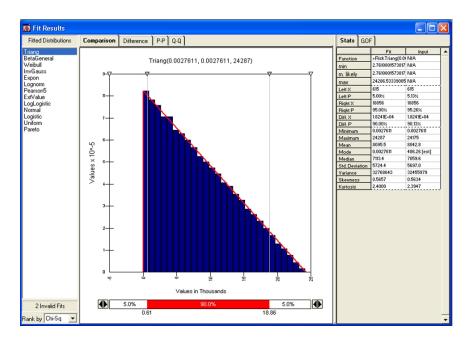


Figura 3.45: Distribución (BestFit 4.5) FRUTAL UHT 250 ml Mango.

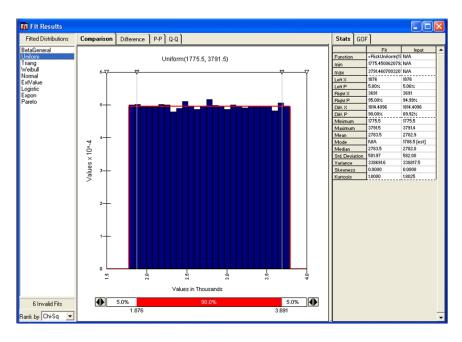


Figura 3.46: Distribución (BestFit 4.5) YOGURT C-REAL 150 g. Fresa Nuez.

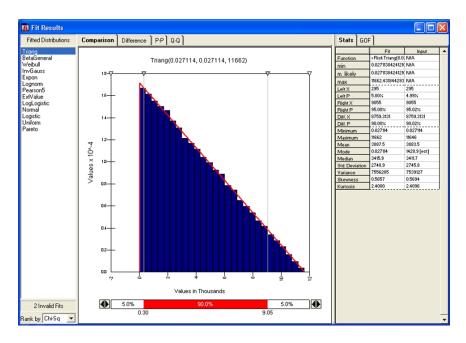


Figura 3.47: Distribución (BestFit 4.5) YOGURT C-REAL 150 g. Durazno Nuez.

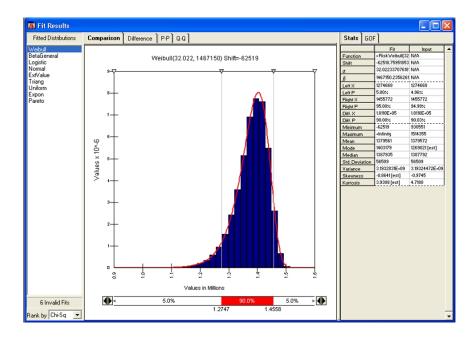


Figura 3.48: Distribución (BestFit 4.5) CREMA 200 g.

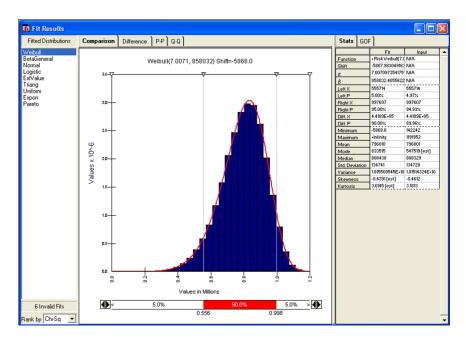


Figura 3.49: Distribución (BestFit 4.5) CREMA 450 g.

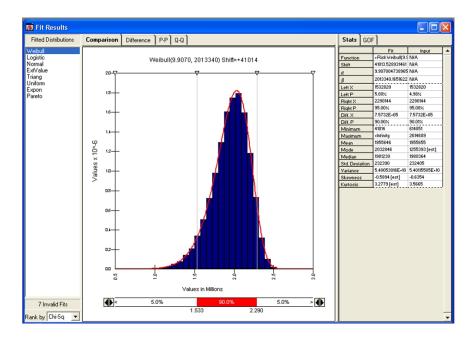


Figura 3.50: Distribución (BestFit 4.5) YOGURT 150 g. Fresa.

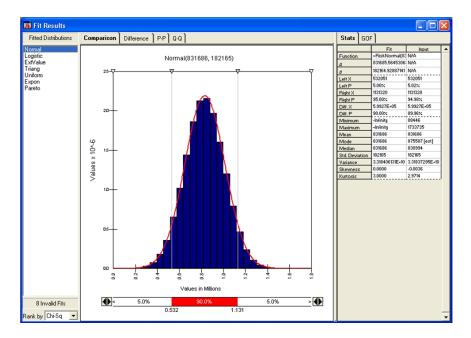


Figura 3.51: Distribución (BestFit 4.5) YOGURT 150 g. Durazno.

# 3.4. Comentarios finales.

Antes de proceder, se resume en donde nos encontramos en el proceso y hacia dónde se quiere ir. Ya se formuló el problema y se definieron los objetivos de estudio. Se decidió usar la simulación como medio para solucionar el problema y ahora se esta en condiciones para definir los detalles de estudio de simulación que sigue.

A lo largo de los capítulos anteriores se mencionó que un modelo de simulación permite lograr un mejor entendimiento de prácticamente cualquier sistema. Por ello, en este capítulo resultó indispensable obtener la mejor aproximación de la realidad para entender lo que está sucediendo y por qué está ocurriendo, lo cual se consiguió componiendo el modelo a base de variables aleatorias que interactúan entre sí. Se observó el comportamiento de las operaciones de arribo y los procesos de producción para la empresa dando una descripción general del flujo de operaciones e información estadística unitaria que forman al proceso de producción de lácteos y derivados mediante información y bosquejos físicos del sistema.

Una vez comprendido el comportamiento del sistema, se debe que pensar en términos de cómo serán modeladas estas actividades. A fin de tener una comprensión integral acerca del uso del programa empleado para modelar el sistema, en el capítulo siguiente se describe el programa a emplear para realizar el modelado, se muestra el desarrollo del modelado y se valida y verifica el modelo. Sin embargo, el siguiente capítulo no pretende cubrir de manera exhaustiva todos y cada uno de los elementos que componen el sistema pues esto sería demasiado extenso, pero sí se pretende describir de forma general el análisis de las instrucciones de programación del software empleado.

# Capítulo 4

# Desarrollo del modelo en un programa de computadora, validación y verificación.

En este apartado, se establece el programa de cómputo que será utilizado, se formula el modelo mediante un diagrama de flujo y se procede después a la etapa de codificación. También aquí se realizan pruebas piloto y por último se lleva a cabo la validación y verificación del modelo.

# 4.1. Selección del programa de simulación.

Una de las decisiones más importantes que debe preocupar a un modelador o un analista debe ser el estudio de la opción del software a emplear. Si la selección del software no es lo suficientemente flexible o es demasiado difícil para usar, entonces el proyecto de simulación puede producir resultados erróneos o ni siquiera podrá completarse.

Un paquete de simulación muestra resultados con un significativo decremento de tiempo y una reducción en el costo del proyecto global. El lenguaje básico de programación que emplean es C. El costo de un software es generalmente bajo, pero el costo total del proyecto quizá no lo sea.

#### 4.1.1. Simuladores de alto nivel

La gran mayoría de los simuladores surgidos por lo general operan mediante interfaces del usuario, gráficas, menús y diálogos. Se seleccionan a partir de las construcciones disponibles de modelación de simulación, se conectan y se ejecuta el modelo junto con una animación gráfica dinámica y de los componentes del sistema conforme se muestran alrededor y cambian.

Un paquete de simulación de propósito general puede usarse para cualquier aplicación, pero podría tener los rasgos especiales con toda seguridad en algunos otros, de esta manera la aplicación orientada de un paquete se simulación es designada por una cierta clase de aplicaciones tal como manufactura o procesos de reingeniería, el cuidado de salud o centros de contacto (servicios), etcétera. Se muestra una lista de aplicaciones orientadas a paquetes de simulación que están actualmente disponibles:

- Manufactura. AutoMod [Banks (2004) and Broks (2005)], Enterprise Dynamics [Incontrol (2005)], Flexsim [Flexsim (2005)], ProModel [Harrell et al. (2004) and PROMODEL (2005b)], QUEST [Delmia (2005)], and WITNESS [Lanner (2006)].
- Redes de Comunicación. OPNET Modeler [OPNET (2005)] and QualNet [Scalable (2005)].
- Procesos de Reingeniería y Servicios. ProcessModel [ProcessModel (2005)], Service-Model [PROMODEL (2005c)], and SIMPROCESS [CACI (2005)].
- Cuidado de la Salud. MedModel [PROMODEL (2005a)].
- Centros de Contacto. Arena Contact Center Edition [Rockwell (2005b)].
- Cadena de Suministros, Suplí Chain Builder [Simulatión Dynamics (2005)].
- Animación (auto-suficiente). Proof. Animation [Wolverine (2006)] and Systemflow 3D Animador [Systemflow (2005)].

#### 4.1.2. ProModel

ProModel es uno de los paquetes de software comerciales para simulación más usados en el mercado. Cuenta con herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten al analista conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar [García et. al., 2006].

Está basado en Windows, y es usado como herramienta para simular y analizar sistemas de la producción de todos los tipos y tamaños. ProModel proporciona la combinación perfecta de facilidad de uso y completa flexibilidad, se puede modelar casi cualquier situación.

ProModel proporciona a ingenieros y gerentes la oportunidad de probar las nuevas ideas para la planeación o mejora del sistema antes de comprometer el tiempo y recursos necesarios al construir o alterar el sistema real. ProModel se enfoca en los problemas como la utilización del recurso, la capacidad de la producción, la productividad, y niveles del inventario. Modelando los elementos importantes de un sistema de la producción como la utilización del recurso, capacidad del sistema, y producción.

Como un simulador de evento discreto, ProModel toma en cuenta principalmente el modelar la parte discreta de los sistemas industriales, aunque las industrias de procesos pueden planearse convirtiendo el material a granel en unidades discretas como galones o barriles, que para nuestro caso en particular las unidades discretas son los litros de leche que arriban a la planta. Además, ProModel fue diseñado para modelar sistemas dónde los eventos del sistema ocurren principalmente en tiempo sobre los puntos definidos. La resolución de Tiempo es controlable en rangos de .01 horas a .00001 segundos.

Básicamente, este producto se enfoca a procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros. La misma compañía de desarrollo ofrece otros paquetes, como MedModel y ServiceModel, diseñados para simulación de sistemas médicos, y de servicios, respectivamente. Sin embargo, aunque no es su especialidad, podemos realizar buenas simulaciones de operaciones de servicio usando ProModel.

Características por las cuales se eligió el software de ProModel como herramienta de trabajo para este proyecto de tesis:

- 1. Capacidad General (flexibilidad del modelo y facilidad de uso).
- 2. Consideraciones del hardware y software.
- 3. Animación.
- 4. Rasgos estadísticos.
- 5. Apoyo del cliente y documentación.
- 6. Informe del rendimiento y sus argumentos.

### 4.2. Construcción del modelo de simulación.

## 4.2.1. Partes que componen el modelo de simulación.

A fin de ayudarle a lograr una comprensión integral acerca del uso de ProModel y el empleo que se le da en esta tesis, en esta sección se describe de manera general las partes que componen el modelo de simulación para posteriormente describir el modelado para cada una de las áreas que integran la planta productora de lácteos.

#### **4.2.1.1** Eventos

Un sistema es modelado identificando las características de sus *eventos* (event) y escribiendo un juego de rutinas de eventos que dan una descripción detallada del lugar. La simulación evoluciona con el tiempo ejecutando los eventos en orden creciente del tiempo de ocurrencia. Un *evento* es algo que sucede en un instante de tiempo (simulado) que puede cambiar atributos, variables o acumuladores estadísticos:

- Llegada: Una nueva parte (entidad) entra en el sistema.
- Salida: Una parte termina una operación realizada en los silos proceso y continua o deja el sistema.
- Fin: La simulación se detiene a los n minutos de tiempo.
- El tiempo de descarga de las válvulas recibo.

En un modelo de eventos discretos las variables que describen el sistema no cambian entre los eventos sucesivos. La mayor parte del trabajo en la simulación dirigida por eventos incluye obtener el derecho lógico de lo que sucede con cada tipo de evento.

#### 4.2.1.2 Locaciones

Las locaciones (locations) son todos aquellos lugares en los que las piezas pueden detenerse para ser transformadas o esperar a serlo. Dentro de estas locaciones tenemos almacenes, tanques, bombas, maquinas, líneas conductoras, etcétera.

#### **4.2.1.3** Proceso

Por otro lado, la mayoría de paquetes de simulación contemporáneos usan el *proceso* (process) para el modelo de simulación. Un proceso es un tiempo-pedido, la sucesión de eventos interrelacionados separada por intervalos de tiempo.

Nuestro sistema o modelo de simulación tiene varios tipos diferentes de procesos dependiendo el seguimiento de cada área. Una rutina del proceso contiene el pasaje de tiempo simulado explícitamente y generalmente tiene los puntos de entrada múltiples.

#### **4.2.1.4** Entidades

La mayoría de las simulaciones incluyen "jugadores" llamados entidades (entities) en este caso la leche, la crema, el contenedor, etc., que se mueven alrededor, cambian de estatus, afectan y son afectadas por otras entidades y el estado del sistema, y afectan las medidas de desempeño de los resultados. Las entidades son objetos dinámicos en la simulación (representa el flujo a través de un sistema), por lo general son creados, se mueven alrededor durante un tiempo y después son desechados conforme salen del sistema. Sin embargo, es posible tener entidades que nunca salgan del sistema sino que se mantienen circulando en él.

Por ejemplo, se podrían tener varios *tipos* diferentes de partes, que quizá requieran diferentes procedimientos y asignaciones de ruta y que tengan diferentes prioridades; más aún, podría haber diversas realizaciones de cada tipo de partes flotando en el modelo en un momento dado.

#### **4.2.1.5** Recursos

Los recursos (resources) son mecanismos que requieren las entidades para completar una operación, y se caracterizan principalmente por tener una capacidad limitada. ProModel maneja dos tipos de recursos:

a) Recursos estáticos: Son aquellos sin una ruta de movimiento y que, por lo tanto permanecen inmóviles. Se utilizan principalmente para modelar recursos

necesarios para llevar a cabo una tarea dentro de una localización (por ejemplo el operador de una maquina).

b) Recursos dinámicos: son aquellos que se mueven a través de una red de rutas (Path Networks). Estos recursos permiten trasladar entidades entre locaciones, para modelar, por ejemplo una pipa que mueve unidades de leche de un lugar a otro, el tiempo de traslado entre un lugar y otro impacta los resultados del modelo.

#### **4.2.1.6** Atributos

Para individualizar las entidades, hay que añadir *atributos* (attributes). Un atributo es una característica común de todas las entidades, pero con un valor específico que puede diferenciar a las entidades.

Un atributo puede estar añadido a una entidad como una etiqueta, lo cual puede definir características de la entidad de manera individual y específica. Por lo general el mismo atributo tendrá diferentes valores para diferentes entidades.

#### **4.2.1.7** Variables (globales)

Una variable (o variable global) es información que refleja alguna característica del sistema, sin importar cuántos o qué tipo de entidades haya alrededor. Se pueden tener muchas variables diferentes en un modelo, pero cada una es única. Existen dos tipos de variables: las incorporadas y las definidas por el usuario. Al contrario de los atributos no están unidas a ninguna entidad específica, sino más bien pertenecen al sistema en conjunto. Pueden representar algo que cambia durante la simulación, como el número de partes en cierta área de subensamble en un modelo más grande que se incrementa en una unidad cuando una entidad entra en el área y que disminuye una unidad cuando deja a la misma.

#### **4.2.1.8** Colas

Cuando una entidad no puede seguir adelante, quizá por que necesite aprovechar una unidad de un recurso que está inmovilizada por otra entidad, requiere un lugar

para esperar, que son las colas (Queuing).

#### 4.2.1.9 Acumuladores estadísticos

Para obtener las medidas de desempeño en los resultados, se debe mantener la pista de una variable intermedia de acumuladores estadísticos:

- El número de partes producidas en un periodo de tiempo.
- El total de los tiempos de espera en la cola.
- El mayor tiempo gastado en la cola.
- El total del tiempo gastado en el sistema.

#### 4.2.2. Sobre la modelación

Antes de iniciar la codificación en el ambiente de simulación ProModel, fue necesario representar, mediante diagramas de flujo (capítulo 3), las redes que describen los movimientos de las operaciones de la fabrica productora de lácteos. Para ello, tomando como guía los modelos conceptuales establecido en la parte inicial del capítulo 3, titulado *Comportamiento general de las operaciones en la Empresa* (véase la Figura 3.1.), se construyeron los diagramas en ProModel para las distintas áreas de la empresa.

Como ya sabemos, los subsistemas o submódulos son representados por tres grupos; área recibo, área de producción de lácteos y área de producción de derivados. Todos estos submódulos son descritos por separado antes de observarlos de forma integral.

#### 4.2.2.1 Área de recibo

Tomando como base lo descrito anteriormente en el área recibo y observando el modelado conceptual establecido en la Figura 3.2., se construyó el diagrama mostrado en la Figura 4.1., la simbología utilizada en esta figura es la establecida por el ambiente de simulación ProModel.

A continuación se indican algunos significados relevantes de los arribos de pipas contenedoras de leche y crema, y la descarga de su producto en las distintas llaves establecidas, que se observan en la Figura 4.1. En la parte central de esta figura se muestra un conjunto de siete llaves de las cuales las seis primeras conducen leche alimentando a los silos recibo

29, 30, 31 y 40, y una séptima llave, la cual conduce crema a los tanques de almacén 46 y 47, estas llaves representan siete fuentes distintas, que tienen la característica de crear transacciones, en este caso generan descargas de leche o crema según corresponda. En el siguiente párrafo se describe este proceso:

Al sistema llegan dos tipos distintos de pipas de los ranchos proveedores de leche o crema, estas pueden ser Pipas Sencillas y Pipas Dobles, y una tercera unidad llamada Tractor (todos estos denominados como resourses), los tres recursos con diferentes tiempos de inter-arribo son correspondientes a las distribuciones observadas en la tabla 3, que se encuentra en el Capítulo 3. Estos recursos que van de los ranchos hacia las llaves 1, 2, 3, 4, 5, 6 y 7 (locations) receptoras transportan leche o crema definida como cuatro distintos tipos de entidades, Carga Sencilla, Carga Doble, Carga Crema y Carga Adicional (entities), estas entidades corresponden a las densidades determinadas en la tabla 2., donde se observa el volumen de leche recibida mensualmente. La Figura 4.2. muestra en el lado inferior izquierdo la lógica para cumplir con las rutinas necesarias, dichas entidades una vez que pasan las pruebas de calidad son descargadas en las llaves según corresponda para posteriormente ser asignados a los distintos tanques recibo y de almacenamiento (crema) según su disponibilidad.

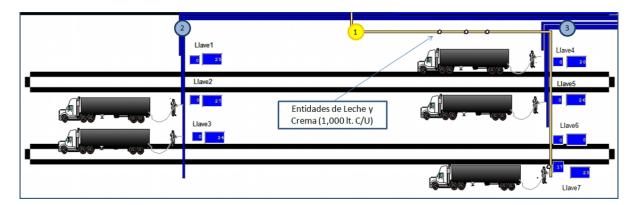


Figura 4.1: Líneas recibo o llaves recibo (Leche y Crema)

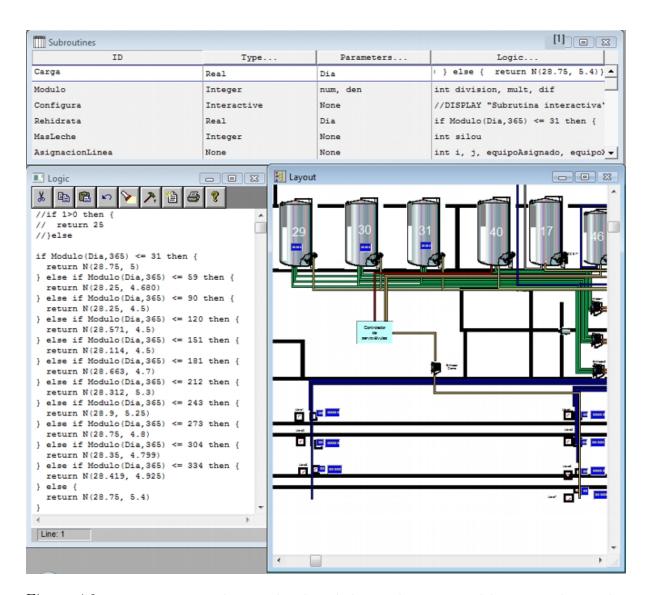


Figura 4.2: Rutina correspondiente a las densidades usadas para modelar mensualmente los volúmenes de leche recibidos (véase tabla 2.).

Una vez descargadas las entidades de leche o crema (Carga Sencilla, Carga Doble, Carga Crema y Carga Adicional) en las llaves se realiza un cambio de entidades transformando las entidades Carga a las nuevas entidades Leche y Crema las cuales representan 1,000 lts c/u. de leche o crema según corresponda. A continuación se observa a manera de ejemplo y de forma ilustrada el recorrido de una entidad Leche por las distintas líneas conduc-

toras que la guían de la Llave 1 hacia la Deareación, Filtración, y Enfriamiento, para posteriormente ser enviada a los silos recibo correspondientes, para este ejemplo, al Silo 1 hasta finalizar en las Clarificadoras. El flujo de la entidad Leche dentro de ProModel se describe a continuación.

La entidad Leche sale de la localidad Llave 1 utilizando la línea conducto (localidad TuboLlD1) hacia la deorización en la localidad Deareador1, una vez concluida la deareación la entidad es filtrada en la localidad Filtro1, ya terminada la actividad el producto es conducido mediante la línea TuboFE1 hacia localidad Enfriador1 donde permanece durante un tiempo de proceso igual a 1.5 min. (WAIT 1.5 MIN), para modelar que la velocidad del enfriador es de 90,000 lts/hr. Después del enfriamiento del producto se hace uso de la localidad Bomba para enviar las entidades de producto (Leche) hacia las distintas líneas conductoras, las cuales desbocan en los tanques recibo, para este ejemplo, la Bomba toma la localidad línea TuboE1S29 y manda el producto hacia la localidad Silo29. La entidad Leche permanece en el Silo 29 almacenada y cuando es requerida en producción esta es enviada hacia las clarificadoras (localidad Clarificadora1) mediante localidades de líneas conductoras, el proceso de clarificación tarda un tiempo de 2.4 min. (WAIT 2.4 MIN) por cada 1,000 litros.

Con esto se finaliza el modelado respecto al Área recibo, la Figura 4.3. muestra el recorrido de la entidad Leche por los distintos procesos mencionados, las flechas rojas y amarillas indican la dirección del recorrido.

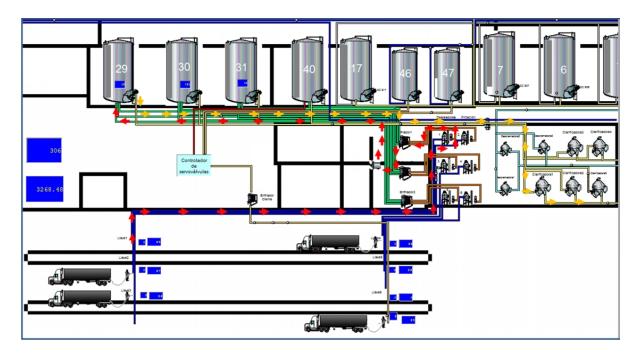


Figura 4.3: Recorrido de las entidades Leche por el Área recibo.

# 4.2.2.2 Área de producción de lácteos

Como se describió previamente, el área recibo concluye la entrega de las entidades *Leche* hasta las clarificadoras que son alimentadas de los silos recibo (29, 30 y 31), es aquí donde el área de producción de lácteos tomo el producto para dar continuidad con el flujo del mismo, y como se mencionó en el capítulo 3 cuando la leche fluida no es suficiente para cubrir los programas de producción, se procesa leche rehidratada.

Para explicar el flujo en ProModel se tomo una línea de flujo como base, cuyo flujo se describe a continuación.

Se toman entidades Leche de la localidad Silo29 bajo condiciones de operación (véase Figura 4.4.) y son enviadas hacia las localidades (Clarificadoras1, Clarificadoras2, Clarificadoras3 y Clarificadoras4) para el ejemplo de recorrido se toma la Clarificadora1 la cual tarda un tiempo de operación de 2.4 minutos por cada 1000 lts. (WAIT 2.4 MIN), cuando se concluye la operación, la leche es enviada por la líneas localidad TuboC1Ss hacia un distribuidor (localidad PasoC3y4-Silos) el cual sigue una regla de distribución para enviar la leche hacia los distintos silos (silos 1, 2, 3, 4, 6, 7, 8, 11, 12, 13, 14, 15,

16 y 17). Suponiendo que lo que se quiere es descremar la leche entera, entonces desde las clarificadoras, se envía leche hacia el silo 1 (localidad Silo01); del silo 1 se envía hacia las descremadoras 1, 2 y 3 mediante una asignación por turnos, para nuestro caso se envía a la localidad Descremadora1 mediante las líneas localidades Silo1aDescs y aDesc1. La descremadora 1 toma un tiempo de operación de 1.2 min. por cada entidad de leche procesada (WAIT 1.2 MIN), es decir que la descremadora 1 trabaja a una velocidad de 50,000 lts/hr. Posteriormente el producto es guiado mediante las líneas localidades Desc1aS05 y aS05 hacia el silo 5 (localidad Silo05), nuevamente se usa la línea Silo05-a-Silos para mandar el producto hacia el distribuidor (localidad PasoC3y4-Silos) pero ahora se elige otro recorrido para llegar hasta los silos proceso (los silos que se utilizan para estandarizar la leche son el 2 y 3. Asimismo, se usan los silos 4, 6, 7, 8, 12, 13, 14, 15, 16 y 17 para el mismo fin. El silo 11 solo se utiliza para el proceso de crema UHT).

Hasta aquí se ha descrito una sección común del área de producción de lácteos que alimentan a las distintas líneas de leche pasteurizada, leche ultrapasteurizada, leche rehidratada y áreas de producción de derivados (ver Figura 4.5.).

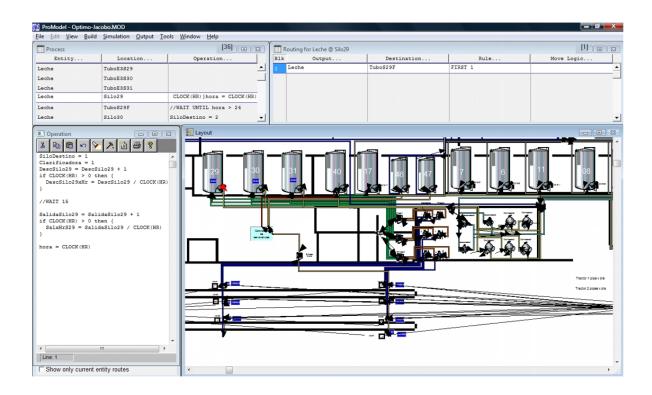


Figura 4.4: Condiciones de operación de salida para el Silo 29.

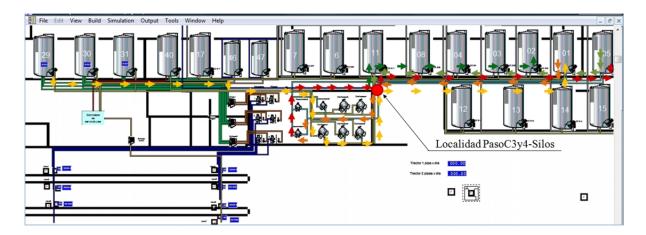


Figura 4.5: Recorrido de las entidades Leche por el Área recibo.

#### a) Línea de leche pasteurizada

La línea de leche pasteurizada que es obtenida de los silos proceso, y en ocasiones de la línea de leche rehidratados, se ejemplifica e ilustra en ProModel como se describe a continuación.

El ejemplo sigue la línea de pasteurizado con el equipo número I (ver Figuras 4.6. y 4.7.).

Dado por entendido que control de calidad acepta la leche que va a ser pasteurizada, entonces se toman entidades Leche del silo número 3 (localidad Silo03) y se envían hacia el proceso de homogeneización (localidad Homogeneización) mediante las localidades líneas CC-S03 Silo03aHom. Aquí, se distribuye hacia los pasteurizadores I y II, para nuestro caso tomamos la línea localidad Homog-PasterI para enviar el producto hacia el pasteurizado (localidad Pasteurizador-I) el cual toma un tiempo de proceso de 3.3 minutos (WAIT 3.3 MIN) y que a su vez, alimenta al tanque 13 (localidad Tanque-13); el tanque 13 cuenta con una capacidad de 18,000 litros. A partir de aquí la leche se envía hacia su envasado en las máquinas (TR8-1, TR8-2, y TR8-3 con capacidades de envasado de 12,000 litros por hora cada una, y la máquina llamada Ttop con una capacidad de envasado de 9,000 litros por hora) mediante distintas localidades líneas que conducen a las entidades Leche. El flujo que se observa manda las entidades mediante una asignación por turnos a los equipos mencionados, pero para este ejemplo se sigue la línea del equipo TR8-1 donde, una vez terminado el envasado de lácteos, el producto se envía a la cámara 1 (áreas de transferencia y almacenamiento) mediante las líneas entidades TR8-1-a-Cámara1 y a-Cámara1.

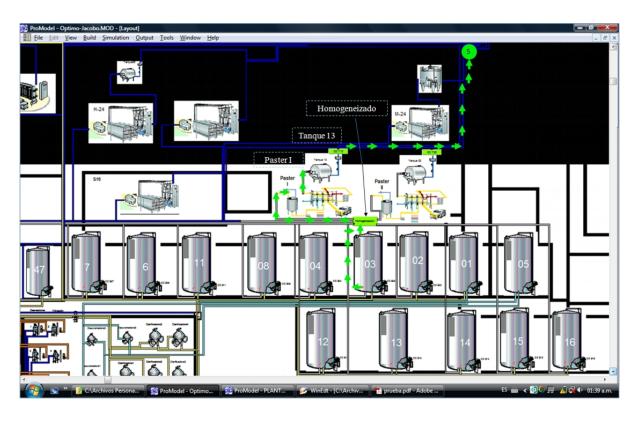


Figura 4.6: Figura 4.2.3. Línea de leche pasteurizada (etapa 1)

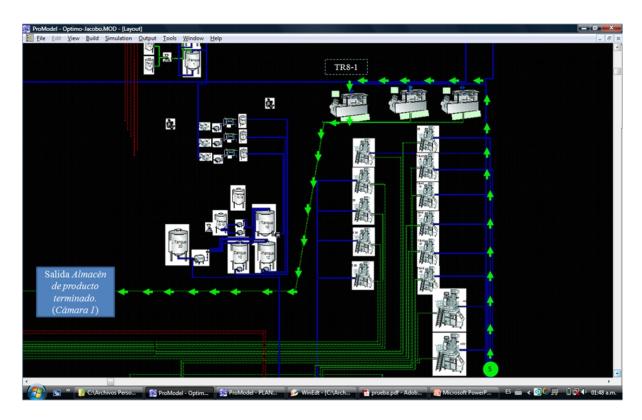


Figura 4.7: Figura 4.2.4. Línea de leche pasteurizada (etapa 2)

#### b) Línea de leche ultrapasteurizada

Como ya se mencionó anteriormente, el proceso que se sigue en la línea de ultrapasteurizado es muy variado y extenso, entre estos flujos se encuentran las líneas que siguen su recorrido por los equipos M24, H24, B24, Flex 30, B7, Flex 10-1, Flex 10-2 y algunas otras que se encuentran inactivas. Para ilustrar el modelado en ProModel solo se observa el recorrido de las entidades Leche por la línea que sigue el equipo M24.

El equipo M24, procesa leche deslactosada, deslactosada light, 40 y tantos y sin colesterol, así como leches especiales.

El seguimiento es el siguiente: Primero, se estandariza la leche, posteriormente, se libera por control de calidad, se homogeniza, se ultrapasteuriza y finalmente, se le envasa y empaqueta. Las Figuras 4.8. y 4.9., muestran todo el proceso aquí descrito.

Para este ejemplo de recorrido se supone que se elige tomar entidades Leche del silo proceso número 02 localidad (Silo02), para enviarlas hacia la localidad Homogeneización, mediante las localidades líneas conductoras CC-S02 y Silo02aHom. Concluida la homogeneización de las entidades Leche, mediante la línea entidad Homog-a-UHT se manda el producto hacia una localidad distribuidor llamada UHT el cual puede enviar leche a distintos equipos como son: M24, H24, B24, Flex30, B7, Flex10-1 entre otros. De todas las mencionadas se envía el producto hacia el equipo M24, el cual tarda un tiempo de proceso de 2.5 minutos por cada 1000 litros (WAIT 2.5 MIN), este equipo envía leche hacia el tanque 25 mediante la línea localidad M24-a-Tanque 25, y posteriormente se envía la leche hacia las máquinas A03-04 y A03-03, las cuales cuentan con una capacidad de envasado de 12,000 litros por hora cada una, se elige la máquina A03-04 para enviar el producto primero hacia el Helix (localidad HelixA3-04) con capacidad de 12,000 litros por hora, es importante mencionar que las entidades Leche que entraron al equipo Helix son transformadas por nuevas entidades llamadas LecheUHT, a esta nueva entidad se le coloca el abre fácil en la máquina Caper (localidad Caper2) con capacidad de procesamiento de 12,000 litros por hora. Finalmente, el producto llega a la máquina A+F (localidad AF-A03-03) con una capacidad nominal de 12,000 litros por hora para su empaque, y para concluir el producto es enviado hacia la localidad TarimaM24 donde son almacenados los productos terminados.

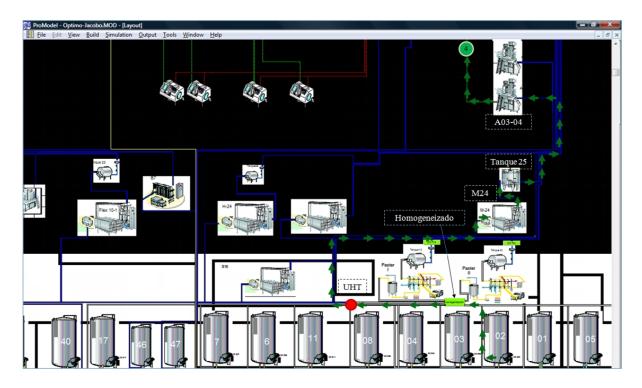


Figura 4.8: Línea de leche ultrapasteurizada (etapa 1).

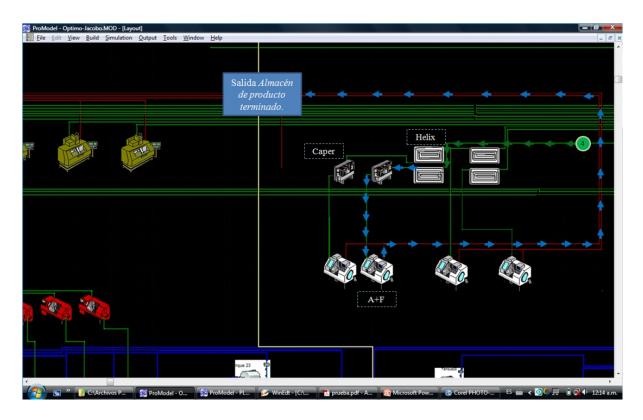


Figura 4.9: Línea de leche ultrapasteurizada (etapa 2).

#### c) Línea de rehidratado

A continuación se detalla el recorrido que realizan las aguas blancas por el tanque localidad RHTq\_3205.

La recuperación de leche ó las aguas blancas que se obtienen del lavado de los equipos ultrapasteurizadores (equipos cluster: M24, H24, B24, Flex 30, B7, Flex 10-1, Flex 10-2 y algunos otros inactivos), es enviada hacia los tanques 32-03 y 32-05 (localidades RHTq\_3203 y RHTq\_3205), con capacidades de 22,000 litros y 15,000 litros respectivamente. Para ejemplificar el modelo de proceso en ProModel se ilustra solo el recorrido que toman las aguas blancas por el tanque localidad RHTq\_3205.

El producto aguas blancas (entidad AguasBlancas) ya contenido en el tanque 32-05 es enviado a las Plantas de rehidratado I y II, donde es depositado en sus distintos tanques contenedores por medio de una asignación por turnos (vea figira 4.10).

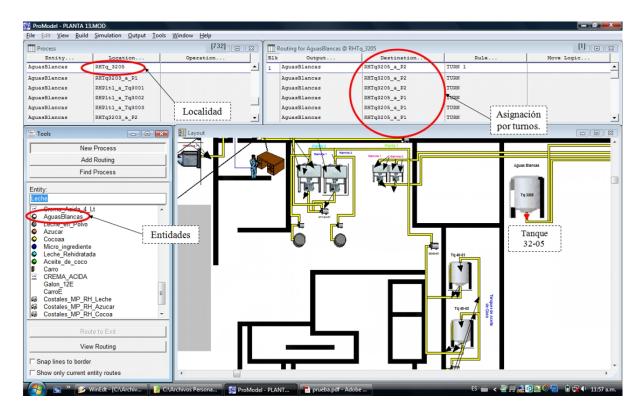


Figura 4.10: Línea de rehidratado (asignación de aguas blancas).

#### Planta II

El agua que es recibida del tanque 32-05 es depositada mediante distintas líneas conductoras en los tanques de agitación 31-01, 31-02 y 31-03 (localidades RHTq\_3101, RHTq\_3102 y RHTq\_3103), para el mismo proceso estos mismos tanques reciben aceite de coco de cualquiera de los siguientes tanques: 40-01, 40-02, 41-01 y 41-02 (localidades RHTqAceiCoco\_4001, RHTqAceiCoco\_4001 y RHTqAceiCoco\_4001), leche en polvo del Bredo leche 2 (localidad RHLechePolvo1P2), azúcar de Bredo de azúcar 2 (localidad RHAzucarP2), cocoa del Bredo cocoa 2 (localidad RHCocoa\_P2) y finalmente microingredientes del Bredo de microingredientes (localidad RHMicro\_ingredientesLACTA).

Una vez adicionados y mezclados los ingredientes (entidades AguasBlancas, Aceite de coco, Leche\_en\_Polvo, Azúcar, Cocoaa y Micro\_ingrediente) mencionados anteriormente

en los tanques de agitación, mediante el comando COMBINE de ProModel se genera una nueva entidad a partir del producto compuesto llamada ALL. Dicho producto compuesto mediante distintas líneas localidades de flujo sigue el siguiente proceso: pasa a la deodorización (localidad RHDeorización) donde la entidad ALL ahora es sustituida por la entidad Leche\_Rehidratada, posteriormente la entidad Leche\_Rehidratada sigue hacia las marmitas 1 y 2 (localidades RHMarmita1P2 y RHMarmita2P2), para luego enviar el compuesto hacia el homogeneizador (localidad RHHomagenizaciónP2) y finalmente el compuesto pasa a pasteurizado en el equipo APV (localidad RHPasteurizaciónP2).

Ya concluido el pasteurizado, las entidades Leche\_Rehidratado son enviadas a los silos de proceso (localidad línea conductora RH\_PasterP2\_a\_SiloProceso) después de ser enfriadas (ver Figura 4.11.).

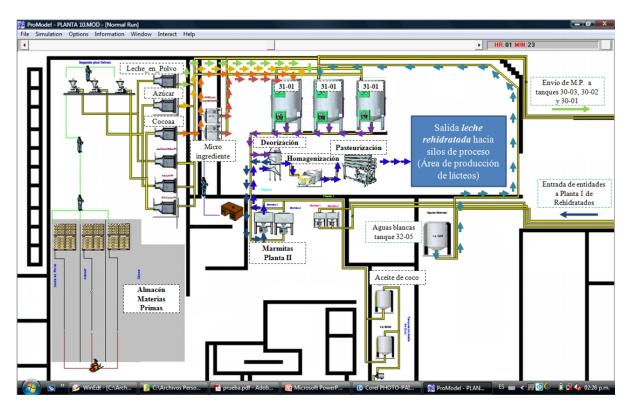


Figura 4.11: Línea de rehidratado (proceso de rehidratado).

# 4.2.2.3 Área de producción de derivados

#### c) Línea de cremas

Como se mencionó en el capítulo 3, la producción de derivados se genera a partir de cuatro líneas; la línea de crema, Mantequillas, yogurt y la de postres. Todas y cada una de ellas se modelaron en ProModel por separado y de forma modular para observar y validar su comportamiento individual antes de integrar dichos módulos a los submódulos del área recibo y área de producción de lácteos.

Antes de observar de forma integral el submódulo área de producción de derivados en ProModel, se describen cada una de las líneas en módulos por separado (Ver de la Figura 3.10. a la 3.31.), con la finalidad de poder comprender el flujo del producto por cada una de ellas, pero ahora modelado en ProModel.

#### Crema ácida

Para la producción de crema, se toma como entrada del proceso la crema (entidad crema) almacenada en los tanques 46 y 47 (localidades TQ\_46\_40000\_Lt\_Hr. y TQ\_47\_40000 Lt\_Hr.) que se encuentran en la zona de recibo. Además de los tanques mencionados, se encuentra el tanque 15:12 (localidad TQ\_15\_12), donde se recibe el producto proveniente de Tizayuca, del tanque 15:12, el producto se bombea por medio de la bomba P15-12-03-002 (localidad P15\_12\_03\_002), hacia el tanque 20 (localidad TQ\_20\_20000\_Lt\_Hr), donde se aloja la crema que se genera en el proceso de descremado del área de vogurt y la proveniente de Tizayuca. La bomba P01-45-03-001 (localidad P01\_45\_03\_001\_15000\_Lt\_Hr) a una velocidad de 4 minutos por casa 1.000 litros o lo que es lo mismo por cada entidad crema, manda el producto desde los tanques 46 y 47 hacia los tanques 10, 12 y 18 (localidades TQ\_10\_9000\_Lt\_Hr, TQ\_12\_9000\_Lt\_Hr v TQ\_18\_14000\_Lt\_Hr). Análogamente, desde la bomba P10-17-03-001 (localidad P10\_17\_03\_001\_15000\_Lt\_Hr) se envía crema del tanque 20 a una velocidad de 4 minutos (WAIT 4 MIN) a los mismos tanques 10, 12 y 18. La crema que se obtiene por el proceso de descremado en el área de lácteos silos 1 y 5, se almacena en el tanque 10:10 (localidad TQ\_10\_10\_5000\_Lt), en el cual se le adicionan los ingredientes necesarios; se utilizará la bomba P10-10-03-001 (P10\_10\_03\_001\_20000\_Lt\_Hr) cuando el porcentaje de grasa de la crema esté entre 15 y 30 por ciento. Si el porcentaje de grasa fuese de 35 por ciento se utilizará la bomba P10-10-03-002 (localidad  $P10_10_203_2002_17000_{Lt_Hr}$ ). En ambos casos, el producto se dirige ahora hacia los tanques 10, 12 y 18, terminando con esto el proceso de estandarizado (ver

# Figura 4.2.9.).

Posteriormente, el producto se envía hacia el área de pasteurizado, mediante las bombas P10-09-03-003, P10-09-03-002 y P10-09-03-001 (localidades P10\_09\_03\_003\_7000\_Lt\_ Hr, P10\_09\_03\_002\_4000\_Lt\_Hr v P10\_09\_03\_001\_7000\_Lt\_Hr), a los tanques de balance 1, 2 y 3 (localidades TQ\_1\_150\_Lt, TQ\_2\_150\_Lt y TQ\_3\_150\_Lt); es importante mencionar que la bomba P10-09-03-003 se corresponde con el tanque de balance 1, la bomba P10-09-03-002 con el tanque 2 y la bomba P10-09-03-001 con el tanque 3, los tanques 1 y 3 son alimentados de igual forma por los equipos EQUIPO\_FOOS\_1 y EQUIPO\_FOOS\_2 quienes toman entidades Leche del tanque 10:18 (localidad TQ\_10\_18\_5000\_Lt) a velocidad de 12 min. por entidad (WAIT 12 MIN) y el tanque número 2 también es alimentado por los tanques 58 y 59 de recuperación de crema, todo esto según los requerimientos de producción. El pasteurizado da inicio cuando la bomba P10-13-03-001 (localidad P10\_13\_03\_001\_7000\_Lt\_Hr) toma al producto del tanque de balance 1 y lo envía al pasteurizador 1 (localidad PASTER\_1\_7000\_Lt\_Hr), la bomba P10-12-03-001 (localidad P10\_12\_03\_001\_ 4000\_Lt\_Hr) toma al producto del tanque de balance 2 y lo envía al paster 2 (localidad PASTER\_2\_4000\_Lt\_Hr). Finalmente, la bomba P10-11-03-001 (localidad P10\_11\_03\_001\_7000\_Lt\_Hr) toma al producto del tanque de balance 3 y lo envía al paster 3 (localidad PASTER\_3\_7000\_Lt\_Hr). Los tiempos de pasteurizado son de 8. 57 min, 15 min, y 8.57 min respectivamente (WAIT 8.57 MIN, WAIT 15 MIN y WAIT 8.57 MIN), ver Figura 4.2.10.

De aquí, se envía la crema pasteurizada hacia el proceso de homogeneización; el pasteurizador 1 tiene dos alternativas, enviar crema hacia el homogeneizador 1 (localidad HOMOG\_1\_7000\_Lt\_Hr) o hacia el tanque 4 cuando se requiera la materia prima para la elaboración de crema para batir, el pasteurizador 2 tiene dos alternativas, enviar crema hacia el homogenizador 2 (localidad HOMOG\_2\_7000\_Lt\_Hr) o hacia la línea de mantequilla (localidad Mantequilla) cuando se requiera la materia prima para la elaboración de mantequilla, y el pasteurizador 3 tiene igualmente dos alternativas, enviar crema hacia el homogeneizador 3 (localidad HOMOG\_3\_7000\_Lt\_Hr) o hacia el tanque 4 (localidad TQ\_4\_5000\_Lt) cuando se requiera la materia prima para la elaboración de crema para batir. Cualquier homogeneizador es capaz de alimentar a cualquiera de los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4 (localidades TQ\_1\_5000\_Lt, TQ\_2\_5000\_Lt, TQ\_3\_5000\_Lt y TQ\_4\_5000\_Lt) con capacidades de 5,000 litros cada uno (Nota: cuando el producto es enviado directamente de los pasteurizadores 1 y 3 hacia el tanque 4 no se le agrega ácido a la crema). El proceso de acidificado se realiza como sigue; En los tanques 14 y 15 (localidades TQ\_14\_1000\_Lt\_Hr y TQ\_15\_1000\_Lt\_Hr), se deposita agua y ácido cítrico, agitando la mezcla a través de las bombas P10-16-03-001 (localidad P10\_16\_03\_001\_13000\_Lt\_Hr) y P10-15-03-001 (localidad P10\_15\_03\_001\_13000\_Lt\_Hr) respectivamente. De estos contenedores se toman manualmente las cantidades necesarias de la mezcla para ajustar el proceso y se depositan en los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4 (ver Figura 4.2.11.).

Las bombas P10-05-03-004, P10-05-03-002 y P10-05-03-003 (localidades P10\_05\_03\_004\_10000\_Lt\_Hr, P10\_05\_03\_003\_10000\_Lt\_Hr y P10\_05\_03\_003\_10000\_Lt\_Hr), toman al producto indistintamente de los tanques de acidificación 1, 2, 3 y 4. La bomba P10-05-03-004 alimenta a las envasadoras HOLMATIC 1 L. (localidad Holmatic\_1) y HOLMATIC 2 M.(localidad Holmatic\_2); ambas a una velocidad de envase de 22.22 min. (WAIT 22.22 MIN). La bomba P10-05-03-002 envía el producto hacia la envasadora AUTOPROD 1 I. (localidad Autoprod\_1) la cual tiene una velocidad de envase de 13.89 min (WAIT 13.89 MIN). La bomba P10-05-03-003 actualmente solo envía el producto hacia la envasadora GASTIC 4-A J (localidad a\_Gastic\_4A) a una velocidad de 42. 86 min. (WAIT 42.86 MIN); esta misma bomba enviará el producto hacia la envasadora AUTOPROD cuando sea instalada a futuro (ver Figura 4.2.12.).

# Crema para batir

La crema acidificada en su presentacián de 4 litros, se envasa directamente y de forma manual del tanque 3 a una velocidad de 600 litros por hora<sup>9</sup>. En el caso de la crema para batir en su presentación de 17 litros, también se envasa directamente y de forma manual del tanque 4 a una velocidad de 2,550 litros por hora (ver parte inferior derecha de la Figura 4.12.).

Todos los productos de cremas son enviados a la jaula de almacenamiento temporal para posteriormente ser colocados en la zona de transferencia. Las Figuras 4.13. - 4.14., representan el diagrama de flujo que compete a la línea de crema, la Figura 4.15., muestra lo anterior en conjunto.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup>Velocidad estimada.

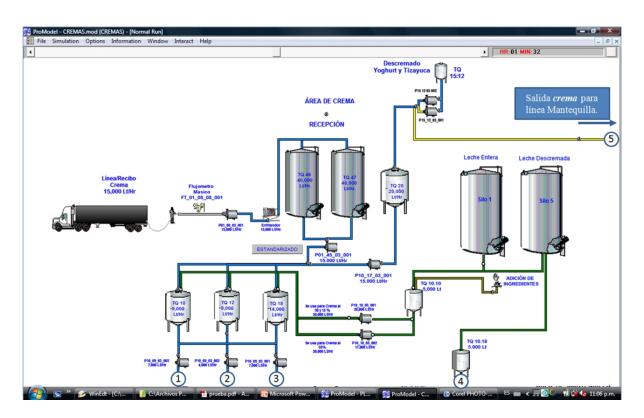


Figura 4.12: Línea de cremas (estandarizado).

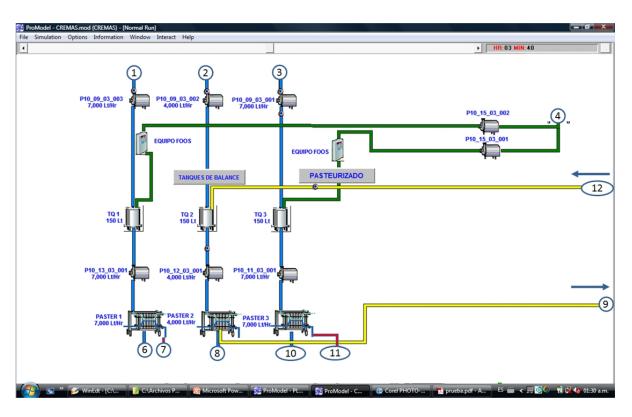


Figura 4.13: Línea de cremas (pasteurizado).

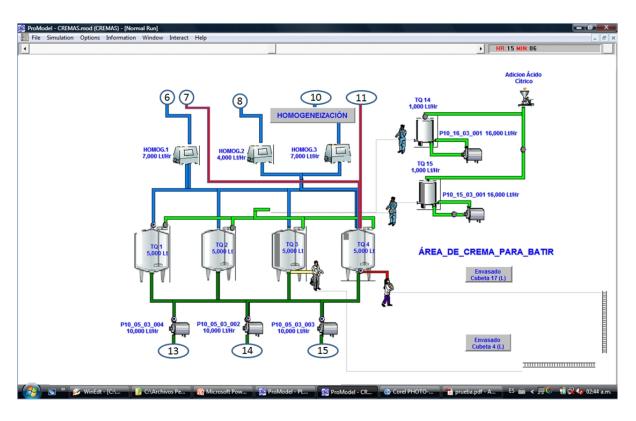


Figura 4.14: Línea de cremas (homogeneización).

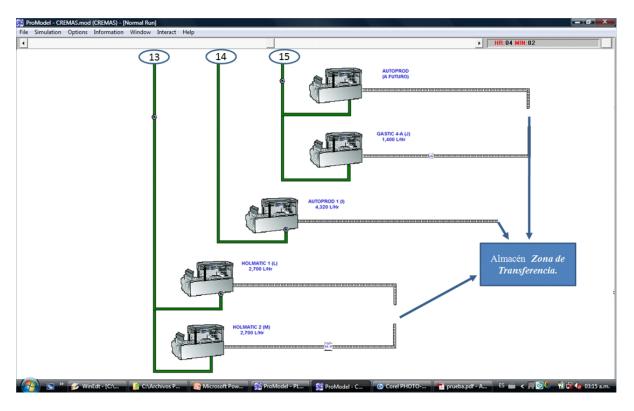


Figura 4.15: Línea de cremas (envasado).

#### b) Mantequilla

El proceso de mantequilla da inicio desde la recepción de cremas (entidad Crema) en el tanque 15:12 (localidad TQ\_15\_12). En caso de ser crema de *Tizayuca*, el producto se envía usando la bomba P15-12-03-002 (localidad P15\_12\_03\_002) hacia el tanque 20 (localidad TQ\_20\_20000\_Lt\_Hr) a una velocidad de dos minutos por cada entidad enviada (WAIT 2 MIN), desde donde lo toma la bomba P10-17-03-001 (localidad P10\_17\_03\_001\_15000\_Lt\_Hr) a una velocidad de 4 minutos (WAIT 4 MIN) y lo manda a los tanques de estandarizado 10, 12 y 18 (localidades TQ\_10\_9000\_Lt\_Hr, TQ\_12\_9000\_Lt\_Hr y TQ\_18\_14000\_Lt\_Hr). Posteriormente, la bomba P10-09-03-002 (localidad P10\_09\_03\_002\_4000\_Lt\_Hr) conduce el producto hacia el tanque de balance 2 (localidad TQ\_2\_150\_Lt) a velocidad de 15 minutos por entidad procesada (WAIT 15 MIN) de donde es bombeado por la bomba P10-12-03-001 (localidad P10\_12\_03\_001\_4000\_Lt\_Hr) hacia el pasteurizador 2 (PASTER\_2\_4000\_Lt\_Hr) y luego, el producto es enviado al equipo de batido (localidad Batido).

Una vez concluido el proceso de batido la entidad Crema ahora se transforma en una nueva entidad llamada Moldes\_de\_Mantequilla. En el área vaciado de moldes, (localidad Vaciado\_en\_Moldes), un operario vierte el producto manualmente en moldes (movimiento lógico programado mediante un recurso a través de un Path Networt llamado Net1 esta acción se configura como; MOVE WITH V\_de\_Molde\_a\_Enfriamiento FOR 1 THEN FREE); el mismo operario traslada los moldes, uno por uno, hacia la cámara fría (localidad Enfriamiento\_en\_Moldes), lugar donde permanece un tiempo aproximado de 480 minutos (WAIT 480 MIN) para lograr la consistencia adecuada. Subsecuentemente, el producto es enviado al área de corte donde se prepara de acuerdo a su presentación. Si la presentación fuese de 5 kilogramos, el corte de piezas se hace manualmente (localidad A\_Corte\_Manual) a una velocidad de 30 piezas por hora, ya terminado el proceso, la entidad Moldes\_de\_Mantequilla se renombra como Mantequilla\_de\_5\_Kg mediante una equivalencia; en el caso de las presentaciones de 90 y 250 gramos, el corte se hace utilizando el equipo Ben Hill (localidad Ben\_Hill) a una velocidad de 4,500 y 3,000 piezas por hora respectivamente, la entidad Moldes\_de\_Mantequilla ahora toma el nombre de Mantequilla\_de\_225\_g. o Mantequilla\_de\_90\_g. dependiendo de su presentación<sup>10</sup>.

Cuando se trata de la crema reprocesada, el circuito es el siguiente. El producto se extrae del tanque 15:12 por medio de las bombas P15-12-03-002 (localidad P15\_12\_03\_002) y P15-12-03-001 (localidad P15\_12\_03\_001) a una velocidad de dos minutos por cada entidad enviada (WAIT 2 MIN), y se dirige hacia los tanques 58 y 59 (localidades Tanque\_58 y Tanque\_59) mediate una asignación por turnos, a continuación, la crema sigue su recorrido hacia el tanque de balance 2 impulsado por la bomba P12-58-03-001 (localidad P12\_58\_03\_001). A partir de este punto, el proceso se desarrolla de la misma manera que el descrito para la crema proveniente de Tizayuca, cabe mencionar que la crema procesada de esta forma sólo se prepara en presentación de 5 kilogramos.

Los productos terminados que se encuentran al final de las líneas de envasado se procesan para ser acomodados en los contenedores, y de ahí, son llevados al área de cámara fría

<sup>&</sup>lt;sup>10</sup>Nota: dependiendo de la presentación requerida del producto, se asigna un recurso distinto y una ruta o Path Network diferente para el envío de las entidades Moldes\_de\_Mantequilla a las distintas áreas de corte:

<sup>■</sup> Si es A\_Corte\_Manual, la lógica es "MOVE WITH Operator\_de\_Enf\_a\_Cont\_com\_Maq FOR 1 THEN FREE", Path empleado; E\_M\_a\_C\_Manual.

<sup>■</sup> Si es a Ben\_HillMOVE, la lógica es "WITH Operator\_de\_Enf\_a\_Cor\_Manual FOR 1 THEN FREE", Path empleado; E\_M\_a\_C\_Maquina.

en la sección de derivados. Las Figuras 4.16., 4.17., 4.18. y 4.19. muestran el flujo de recorrido (Flechas azules "Crema Tizayuca", Flechas amarillas "Crema reprocesada") y la lógica de operaciones descritas, finalmente la Figura 4.20., muestra el diagrama general que contempla tanto cremas como mantequillas.

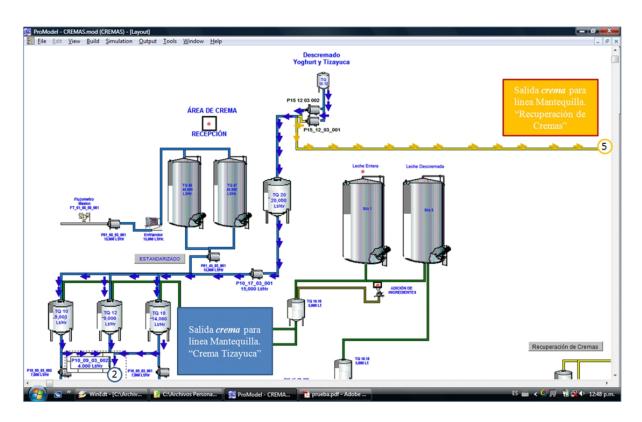


Figura 4.16: Línea de mantequilla (arribo crema).

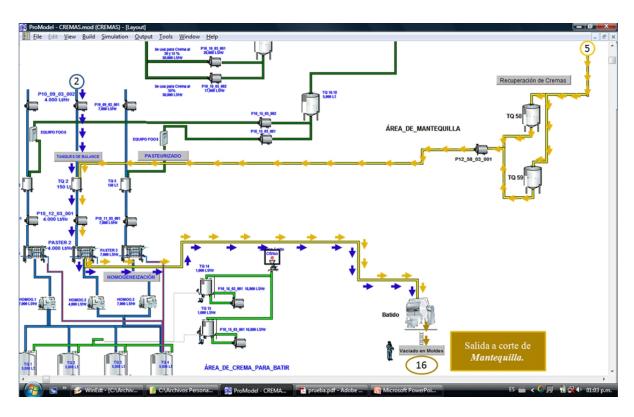


Figura 4.17: Línea de mantequilla (batido).

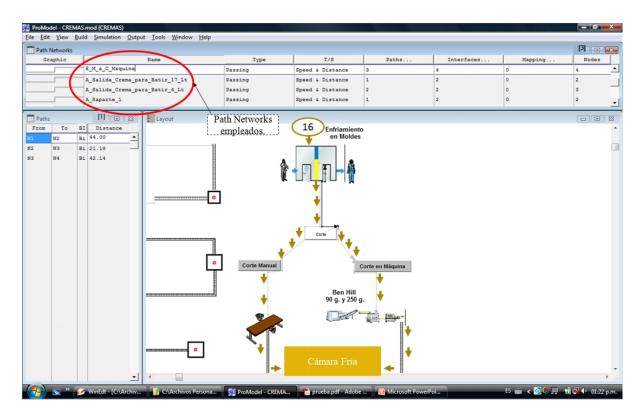


Figura 4.18: Línea de mantequilla (corte).

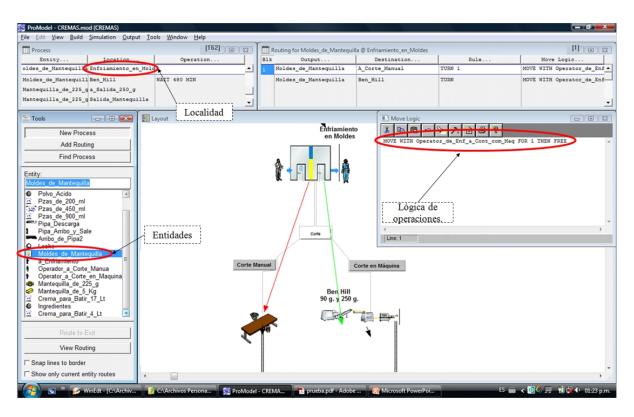


Figura 4.19: Línea de mantequilla (lógica de operaciones).

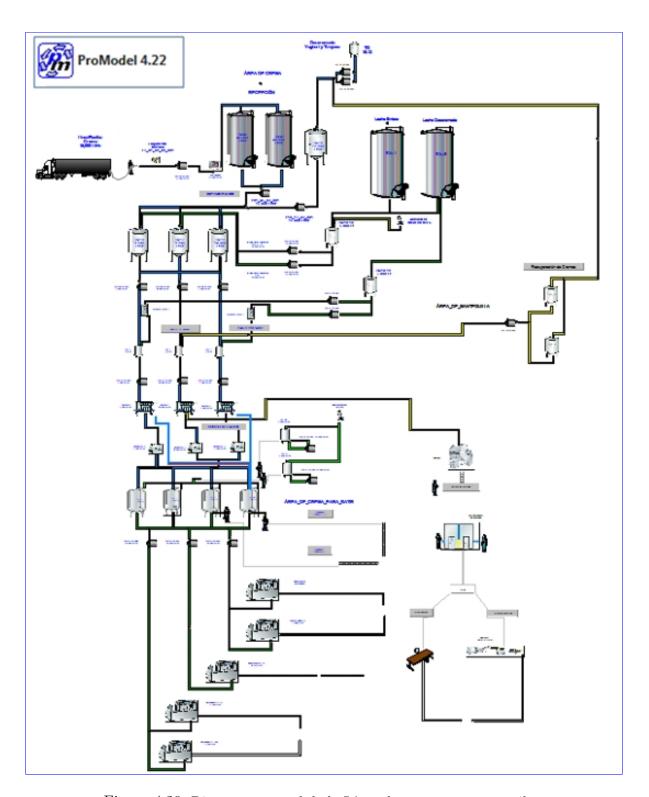


Figura 4.20: Diagrama general de la Línea de cremas y mantequilas.

# c) Línea de yogurt

Como se mencionó en el capítulo 3, las plantas pertenecientes a líneas de yogurt comparten desde el equipo de recibo hasta los tanques de estandarizado.

## Equipo compartido

El proceso para la línea de yogurt comienza en el silo recibo número 40 (localidad Silo40) donde se tienen almacenadas entidades Leche. Después de almacenar la leche en el silo 40, ésta pasa por un proceso de clarificado (localidad Clarificadora5) a una velocidad de 2 minutos por entidad procesada (WAIT 2 MIN). La leche clarificada se almacena en el silo 15:01 (localidad Silo\_15\_01). Por medio de la bomba P15-01-03-002 con capacidad de 18,000 litros por hora, se envía la leche entera hacia la descremadora 1 (localidad Descremadora1\_TqSurge2) misma que trabaja a una velocidad de 5 litros por hora, almacenando la leche descremada en el tanque surge 2 (localidad Tanque\_Surge\_2). Por otro lado, la bomba P15-01-03-001 con capacidad de 27,000 litros por hora, envía la leche entera desde el Silo 15:01 hacia el tanque surge 4 (Tanque\_Surge\_4); en este contenedor la leche debe nivelarse a un porcentaje de grasa del 3.6, para lograrlo, se agrega leche en polvo a través de la tolva 15:08, y usando la bomba P15-04-03-001 con capacidad de 16,000 litros por hora, el producto se mezcla por medio de un proceso de recirculación. La capacidad del tanque de almacenamiento surge 4 es de 15,000 litros.

Los tanques de estandarizado 5, 6 y 7 (localidades Tanque\_Est\_5, Tanque\_Est\_6 y Tanque\_Est\_7), con capacidad de 50,000 litros cada uno, son llenados a partir de los tanques surge 2 y 4, y del silo 15:01 y, dependiendo de los niveles de grasa requeridos, se envían ciertas cantidades de leche entera y de leche descremada para obtener el porcentaje de grasa deseado (ver Figuras 4.21. y 4.22.).

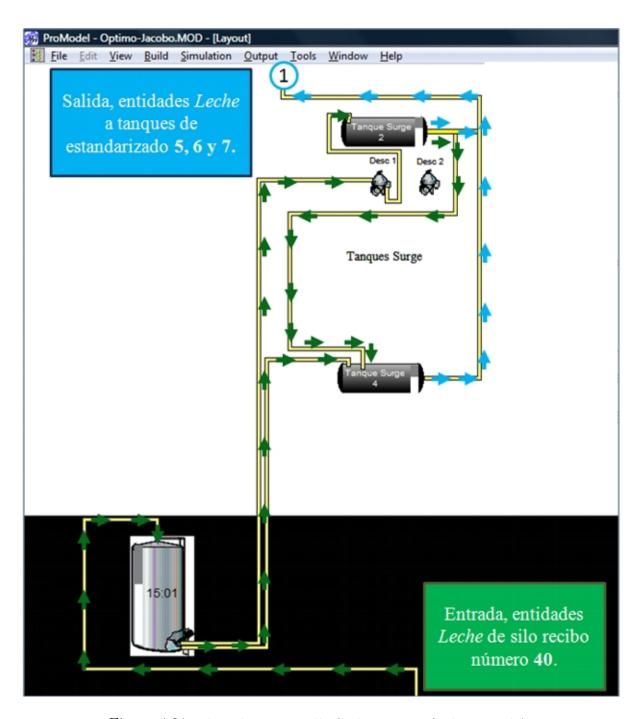


Figura 4.21: Línea de mantequilla (leche entera y/o descremada).

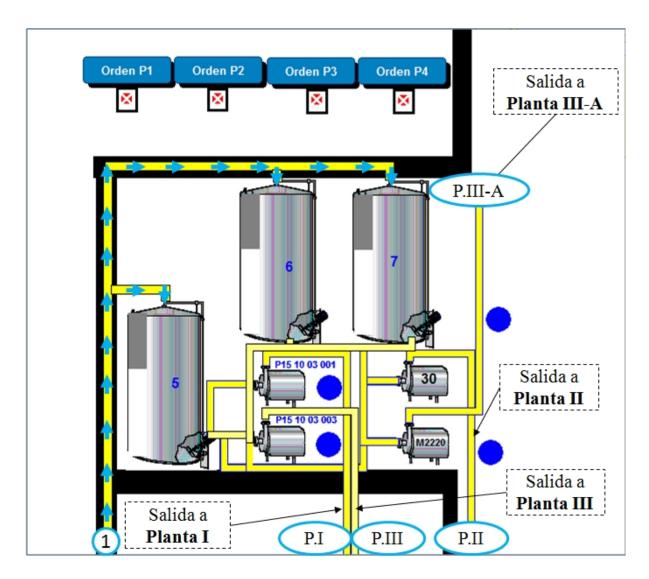


Figura 4.22: Línea de mantequilla (tanques de estandarizado).

Los tanques de estandarizado 5, 6 y 7 son los que proporcionan la leche hacia las plantas I, II, III y III-A. Mediante distintas bombas se toma el producto por ser enviado, es decir, la planta I utiliza la bomba P15-10-03-001 (localidad P1P15\_10\_03\_001), la planta II la bomba B30 (localidad P2Bomba\_30), la planta III la bomba P15-10-03-003 (localidad P3\_P15\_10\_03\_003) y la planta III-A la bomba M2220 (localidad P3ABomba\_M2220), cabe mencionar que aunque cada una de estas bombas es empleada para distintas plantas, todas toman producto de cualquiera de los tanques de estandarizado como se ilustra

en la Figura 4.22.

Ahora bien el recorrido de las entidades Leche por las distintas plantas se va transformando hasta formar parte de un producto como tal (entidades Yogurt, Frutal o cualquier otra dependiendo de la planta observada). Debido a su similitud con otras plantas solo se describe la planta I.

#### Planta I

A continuación se describe el flujo de producto por la Planta I modelado en ProModel.

La Planta I toma entidades Leche de los tanques de estandarizado 5, 6 y 7 (Equipo compartido Figura 4.22.), utilizando la bomba P15-10-03-001. Posteriormente, el producto es enviado hacia su tanque de balance (localidad P1Tanque\_de\_Balance), y luego, por medio de la bomba 2 (localidad Bomba\_2) a una velocidad de 12 min por entidad procesada (WAIT 12 MIN), se manda la leche hacia el pasteurizador M5 (localidad Pasteurizado\_PT1\_01). El proceso de pasteurizado contempla el ciclo como sigue; se pasa primero por el evaporador (localidad Evaporado\_PT1), a continuación, la bomba 3 (localidad Bomba\_3), envía el producto al homogeneizador (localidad Homogeneizado\_PT1), después del proceso de homogeneización, se regresa la leche al pasteurizador M5, para, posteriormente, ser enviado al serpentín de sostenimiento (localidad Tanque\_de\_Sostenimiento\_PT1\_01) y Finalmente, el producto se regresa nuevamente al pasteurizador M5, de donde es enviado a alguno de los tanques de maduración que se encuentre disponible (la asignación es bajo condición de disponibilidad), todo el proceso de pasteurizado tarda 12 minutos por entidad procesada (WAIT 12 MIN), véase la Figura 4.23.

En los tanques de maduración correspondientes a la Planta I, son los tanques 1, 2, 3 y 4 (localidades TqMad01, TqMad02, TqMad03 y TqMad04), donde una vez llenados con leche se le agrega el inóculo para fermentar al producto o las entidades Leche, este proceso tarda un tiempo de 15 horas. Aquí las entidades Leche toman el nombre de entidades Yoghurt\_Base una vez terminado el fermentado.

Para simular la lógica de operación del proceso de fermentación y poder liberar las entidades Yoghurt\_Base de los tanques de maduración, se construyó una expresión usando los comandos "CONTENTS" (Contenido: Regreso del número total de entidades a una localidad) y "WAIT UNTIL" (ESPERE HASTA: Retrasa el proceso de la lógica actual hasta que una condición es verdadera). Observe la Figura 4.24., la cual ilustra en Pro-

Model el proceso (Proces) de liberación para las nuevas entidades.

Al finalizar el proceso de fermentado, se obtiene la base blanca utilizada en la elaboración del yoqurt para beber. Este producto es bombeado por medio de la bomba 12 (localidad Bomba<sub>12</sub>) a una velocidad de 10 minutos (WAIT 10 MIN), pasando por un filtro para eliminar grumos y partículas grandes. El caudal es medido por medio de un flujómetro y se mezcla en línea con la fruta (entidades Frutal) proveniente de los contenedores 1 y 2 (localidades ContFrutPl1\_1 y ContFrutPl1\_2) con capacidades de 1,874 kilogramos respectivamente, estos envían el producto por medio de la bomba P15-20-03-001 (localidad Frutall\_a\_P15\_20\_03\_001) a una velocidad de 0.06667 entidades por minuto (o bien 4 entidades por hora). Después del mezclado en línea (localidad Mezclado\_en\_Línea) se tiene una nueva entidad llamada Yoghurt\_Liquido, puesto que se combinan las entidades Yoghurt\_Base con las entidades Frutal. El producto obtenido realiza un circuito pasando primero por el esterilizador (localidad Esterilizado), luego al homogeneizador (localidad Homogeneizado\_PT1\_9), para regresar nuevamente al esterilizador. Al salir, el producto se dirige hacia el enfriador (localidad Enfriador PT1); de aquí se reparte a los buffers 1 y 2 (localidades Buffer1 y Buffer2). La bomba 19 (localidad Bomba\_19), impulsa al producto desde los buffers 1 y 2 (localidades Mezcladora\_FM1 y Mezcladora\_FM2), hasta las máquinas de envasado Federal 1 (localidad FM1) y Federal 2 (localidad FM2)<sup>11</sup>; análogamente, la empacadora Federal 1 procesa entidades Yoghurt\_Liquido de los tanques 13 y 14 ubicados en la Planta II, esto se hace a una velocidad de 0.0625 entidades por minuto (o bien 3.75 entidades por hora), que equivale a 15,000 piezas por hora de 0.25 litros (Ver Figuras 4.25. y 4.26.).

Para el procesamiento de frutal, se inicia con la base blanca (entidades Yoghurt\_Base) originada en la Planta III o Planta I. Al igual que en el proceso de fermentado del yogurt para beber, las entidades Yoghurt\_Base pasan por un flujómetro y, posteriormente, se mezcla en línea con las entidades Frutal, enviando la mezcla (nuevas entidades entidades Yoghurt\_o\_Frutalya) hacia el tanque de balance (localidad Tanque\_de\_Balance\_PT1\_02). La bomba M2 (localidad Bomba\_M2), se encarga de enviar el producto hacia el pasteurizador M8 (localidad Pasteurizador\_M8). Nuevamente se inicia un circuito, al enviar el producto hacia el homogeneizador M8 (Homogeneizado\_PT1\_M8), regresando de nueva cuenta al pasteurizador M8, después se envía el producto hacia el serpentín de sostenimiento (localidad Tanque\_de\_Sostenimiento\_PT1\_02), regresando luego al pasteurizador

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup>**Nota:** actualmente para este circuito solo se emplea la Mezcladora \_FM2 y la máquina FM2 la cual trabaja a una velocidad de 0.0833 entidades por minuto (o bien 5 entidades por hora), lo que equivale a 20,000 piezas por hora de 0.25 litros cada una.

M8, y finalmente el producto es enviado hacia el tanque 22 (localidad Bomba\_Tq\_22). Desde el tanque 22, la leche frutal es bombeada hacia las máquinas envasadoras de Brick UHT 1/4 B7 (localidad Envasado\_Brick\_UHT\_B7) y Tetratop (localidad Envasado\_Tetratop), con capacidades de 7,000 y 9,000 litros por hora respectivamente. El proceso termina al empacar respectivamente los productos de la envasadora Brick a tarimas y de Tetratop a canastillas (ver Figura 4.27.).

La Figura 4.28., muestra el diagrama completo de la Plata I que contempla de la Figura 4.23. a la Figura 4.27. Las Figuras 4.28., 4.29. y 4.30., ilustran los diagramas generales de las Plantas II, III y III-A respectivamente.

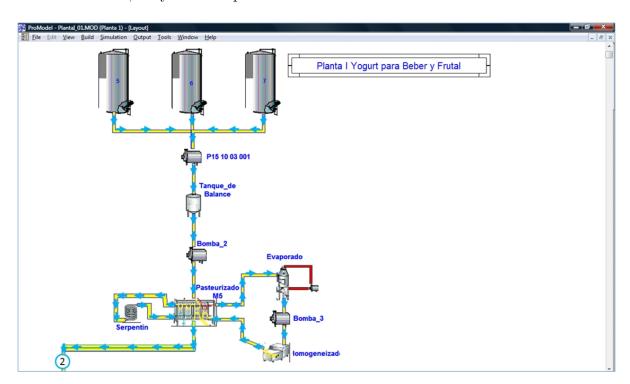


Figura 4.23: Línea yogurt (Planta I, pasteurizador).

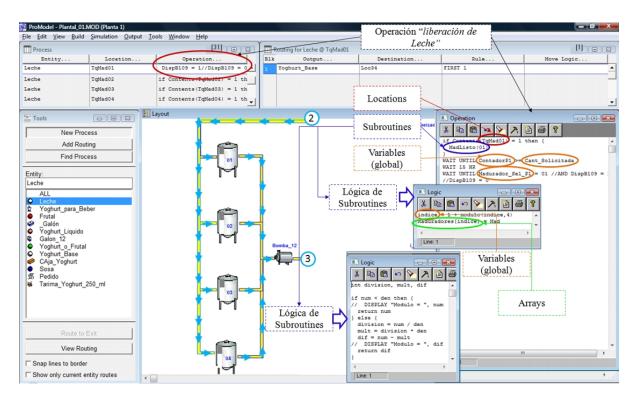


Figura 4.24: Línea yogurt (Planta I, fermentación).

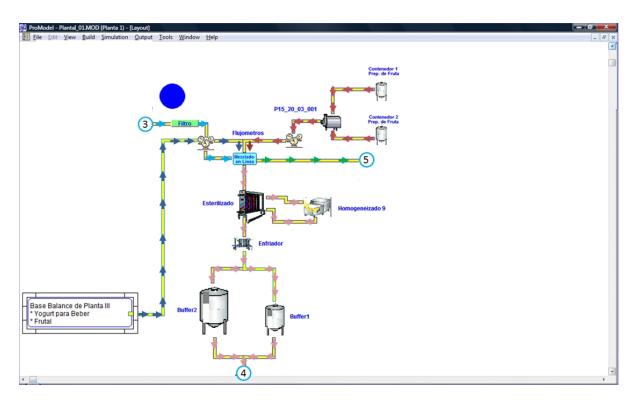


Figura 4.25: Línea yogurt (Planta I, mezclado y estandarizado).

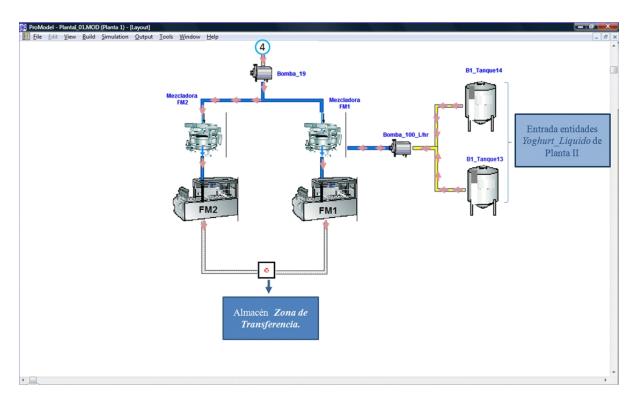


Figura 4.26: Línea yogurt (Planta I, envasado).

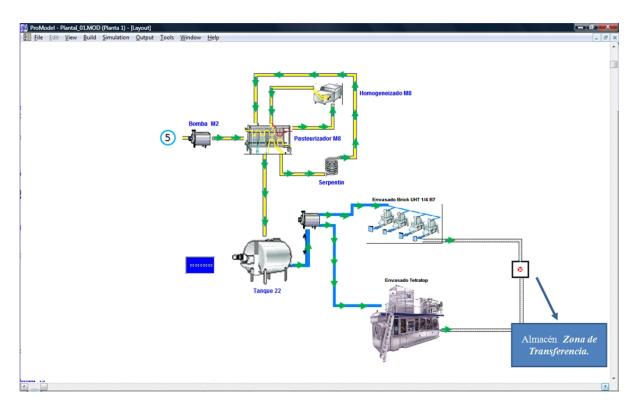


Figura 4.27: Línea yogurt (Planta I, pasteurizado y envasado).

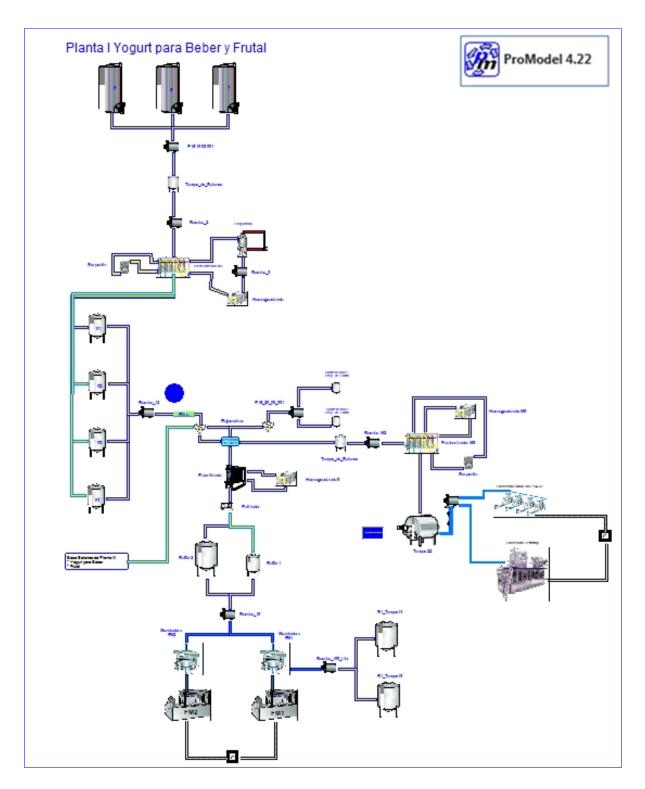


Figura 4.28: Diagrama general de Línea yogurt (planta I).

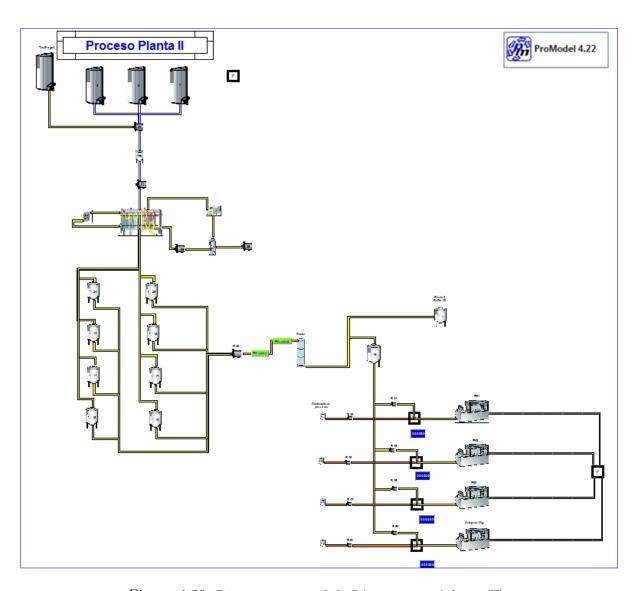


Figura 4.29: Diagrama general de Línea yogurt (planta II).

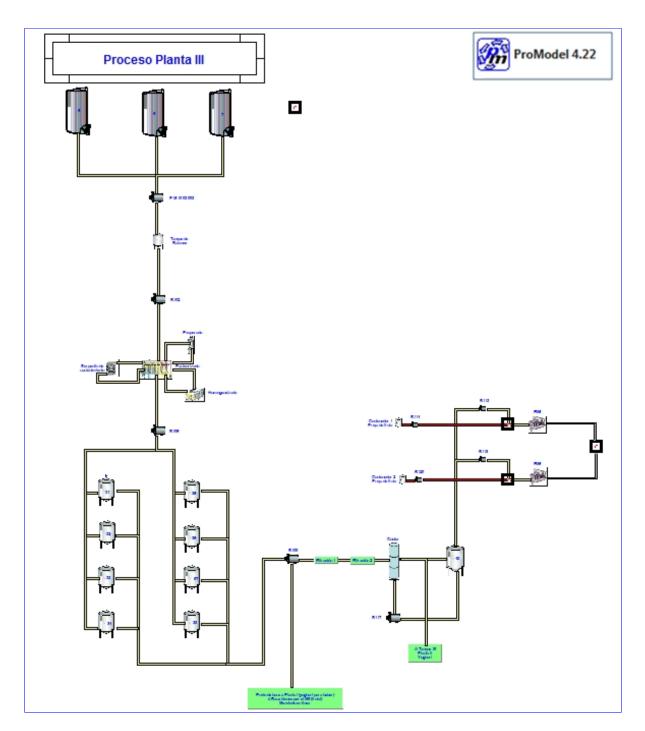


Figura 4.30: Diagrama general de Línea yogurt (planta III).

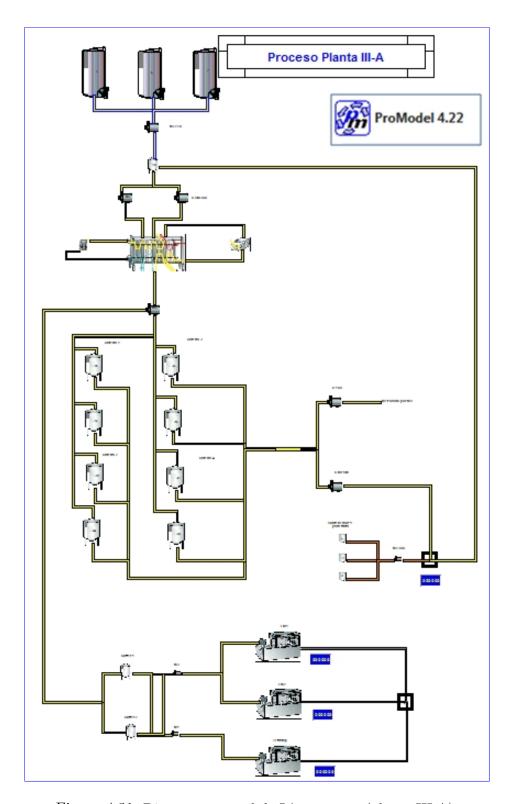


Figura 4.31: Diagrama general de Línea yogurt (planta III-A).

## d) Línea de postres

La línea de postres comprende la elaboración de los siguientes productos: espumas, arroz con leche (Figuras 3.32. y 3.33.) y frutas con crema (Figuras 3.32. y 3.34.). A continuación se describe el flujo del proceso para la elaboración de los productos catalogados como postres.

# 1) Espumas

El área de postres espumas, toma leche (entidades Leche) pasteurizada de las Planta I o II de la línea yogurt, de donde es enviada a los tanques de proceso 1 y 2 (localidades LePasteu\_a\_TP1 y LePasteu\_a\_TP2). De aquí la leche pasteurizada es enviada al shiller (localidad Shiller), usando para este fin la bomba P01 (localidad BombaProceso\_P01) a una velocidad de 0.01667 entidades por minuto (o bien 1 entidades por hora) y con base en una lógica de operación de disponibilidad. Posteriormente, la leche pasteurizada es enviada a la trefa (localidad Trefa), mediante la bomba P04 (localidad Bomba\_Shiller\_P04), las entidades que salen de la trefa ahora son denominadas como Espuma. Finalmente, las nuevas entidades son vertidas a las ollas 1 y 2 que se encuentran contenidas dentro de la máquina de envasado Gastic Dogaseptic (localidad Dogaseptic). De aquí, el producto es envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos (ver Figuras 4.2.29. y 4.2.30.).

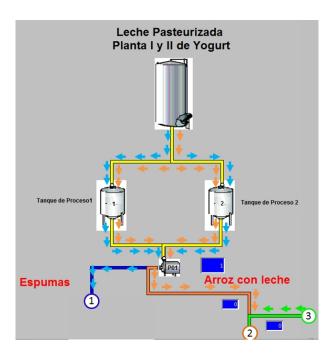


Figura 4.32: Línea postres (espumas y arroz con leche).

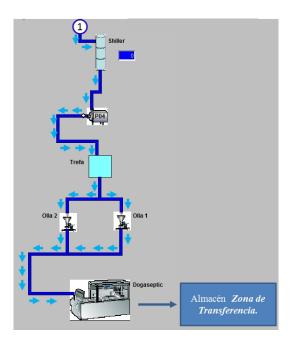


Figura 4.33: Línea postres (espumas, envasado).

# 2) Arroz con leche

La preparación de postres toma como entrada a dos insumos: por un lado utiliza leche pasteurizada, y por otro lado, toma el preparado de fruta estabilizada. La leche pasteurizada (entidades Leche) es tomada de las Plantas I o II, de la línea vogurt, donde es enviada a los mismos tanques de proceso 1 y 2 del área de espumas, de aquí, la leche pasteurizada es enviada mediante la bomba P01 a la olla 2, que se encuentra contenida dentro de la máquina de envasado Bencko Pack (localidad BENCKO\_PACK). El preparado de fruta estabilizada enviado hacia la máquina Bencko Pack es tomado del contenedor 1 (localidad CPF), con capacidad de 1,200 kilogramos, mediante la bomba P069-02-04 (localidad P069\_02\_04) a una velocidad de 0.01667 entidades por minuto (o bien 1 entidades por hora), y es enviado hacia la olla 1. Ya que se tiene en las ollas 1 y 2 de la máquina Bencko Pack tanto leche pasteurizada como el preparado de fruta, el producto es mezclado y envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos, las entidades salientes de esta máquina ahora son llamadas Arroz con leche. Las cuales son enviadas a la máquina de etiquetado Clever (localidad Etiquetado CLEVER), cuya capacidad es de 3,000 piezas por hora a estas nuevas piezas se les nombra entidades EnvaseFC (ver Figuras 4.2.29. y 4.2.31.).

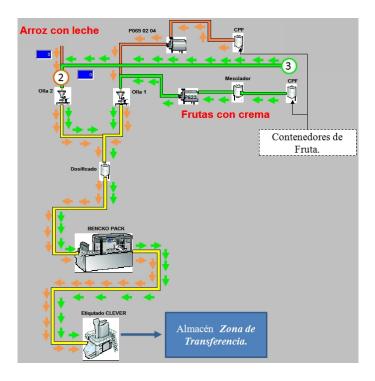


Figura 4.34: Línea postres (arroz con leche y frutas con crema, envasado).

#### 3) Frutas con crema

El área de postres para frutas con crema, toma la crema ácida (entidades CremaAcida) de la línea que alimenta a la máquina Autoprod 1(I) "Productos derivados, línea cremas", donde es enviada a los tanques de proceso 1, 2, 3 y 4 (localidades TqProceso1, TqProceso2, Tanque\_3 y Tanque\_4) del área de espumas y frutas con crema. Es importante hacer mención de que en la actualidad el área de de frutas con crema sólo trabaja con los tanques 3 y 4. De aquí, la crema ácida es enviada mediante la bomba P101 (localidad P101), a una velocidad de 0.01667 entidades por minuto (o bien una entidad por hora), a la olla 2, la cual se encuentra contenida dentro de la máquina de envasado Bencko Pack, misma que se utiliza para el postre de arroz con leche. Por otro lado, la fruta estabilizada utilizada en el proceso de frutas con crema, es tomada del contenedor 2 (localidad CPF2), y es enviada a la olla 1 mediante la bomba P623 (localidad P623) a una velocidad de 0.03667 entidades por minuto (o bien 2.20 entidades por hora); este preparado de fruta es enviado directamente a la olla 1 si la presentación requerida a envasar es de 0.125 kilogramos, pero en caso de que se requiera envasar una presentación de 0.040 kilogramos, entre la olla 1 y la bomba P623 se realizará un mezclado para obtener la consistencia

#### adecuada.

Ya que se tiene en las ollas 1 y 2 de la máquina Bencko Pack tanto crema ácida como fruta preparada, se realiza el proceso de envasado. Si el producto es envasado en presentaciones de 0.125 kilogramos. Las cuales son enviadas a la máquina de etiquetado Clever. En caso de que la presentación fuese de 0.040 kilogramos las unidades producidas se envasan por la máquina Bencko Pack, para luego ser enviadas a la máquina de etiquetado Clever (ver Figuras 4.34. y 4.35.). La Figura 4.36., muestra el diagrama por completo de la línea de postres que contempla de la Figura 4.32. a la Figura 4.35.



Figura 4.35: Línea postres (frutas con crema).

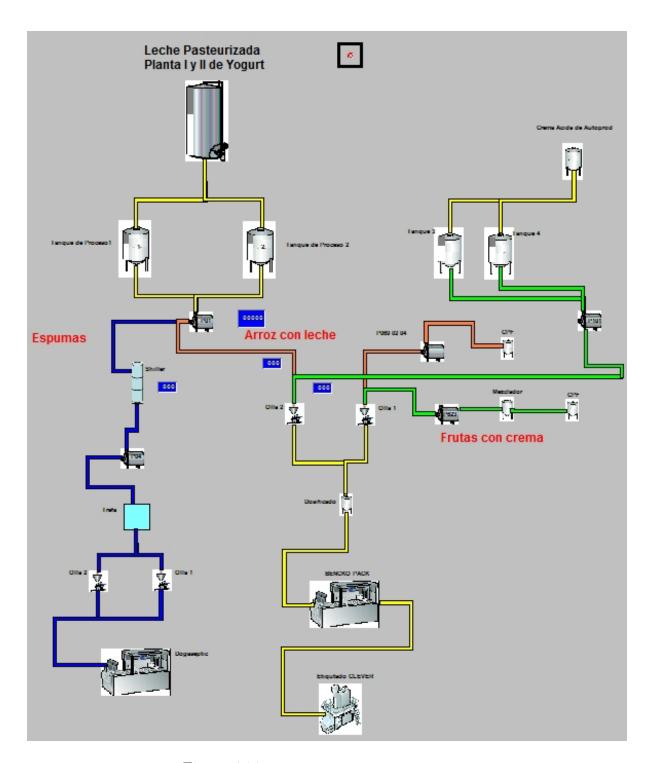


Figura 4.36: Diagrama general línea postres.

La figuras correspondientes al área de cremas, mantequillas, yogurt y postres, muestran el flujo las distintas entidades de forma vertical como se mencionó en el capítulo 3 en las mismas áreas correspondientes con los diagramas de Excel, con la finalidad de solo ilustrar de manera clara cómo funciona e interactúa el proceso en forma modular. En anexos se muestra un plano general (layout en ProModel) de la planta donde se observa la correlación e integración de todas y cada una de las áreas o módulos antes descritos.

# 4.3. Verificación y Validación del modelo de simulación.

Como se mencionó en un inicio, la complejidad y responsabilidad asociada a los modelos de simulación como herramienta de análisis para predecir el comportamiento, determinan la gravedad de una decisión errónea o una exitosa. Por esta razón el modelador está obligado a establecer ordenamientos estructurados y sistemáticos que permitan ejecutar niveles apropiados de calidad y fiabilidad de las actividades, y procesos a lo largo de este tipo de proyectos que como resultado reflejen las características operativas del sistema real.

Recordando las definiciones que se abordaron en el primer capítulo (sección, Planeación para la elaboración del modelo de simulación y su experimentación), y para ayudarnos a centrar el tema, es importante distinguir entre ambos procesos: se valida que el modelo conceptual se ajuste a nuestras necesidades y podrá responder a nuestras preguntas, y se verifica que el proceso de construcción de las herramientas con las que se pretende experimentar, sigue determinadas reglas y condiciones que nos garantizan que nuestro modelo computacional hace exactamente aquello que se supone debe hacer en función de las especificaciones validadas del modelo conceptual.

A lo largo de los procesos de verificación y validación se somete al modelo a una serie de pruebas sobre los datos, o mediante casos de prueba, a fin de evaluar la precisión en el comportamiento del mismo.

El modelo de simulación se construye según los objetivos deseados para el proyecto. Su credibilidad se juzga de forma coherente respecto a esos mismos objetivos. Dependiendo de la importancia de cada uno de ellos, se debe exigir un grado de precisión o fiabilidad mayor o menor cuando se realice una evaluación del modelo en detalle. En definitiva, la credibilidad para la cual el modelo es verificado y validado sólo se considera en las

condiciones prescritas.

El objetivo es prevenir o detectar los distintos tipos de errores que habitualmente se presentan, especialmente el error de tercer tipo que es muy próximo a la problemática de los proyectos de simulación:

- 1. Error de tipo I riesgo de constructor del modelo, cuando los resultados de la simulación sean rechazados pese a ser, de hecho, suficientemente creíbles.
- 2. Error de tipo II o riesgo del usuario del modelo: resultados de la simulación que no pueden ser considerados válidos son aceptados como *suficientemente* validos.
- 3. Error de tipo III: se resuelve el problema equivocado debido a que la formulación del problema, establecida en la fase previa o inicial del proyecto, no contiene adecuadamente "el problema real" [Kelton et. al., 2008].

Por lo antes mencionado, ahora se describe la comprobación y la aprobación escalonada en el desarrollo y análisis del modelo de simulación, se pone atención en las siguientes fases:

- Relación con el usuario (cotejar las características del sistema real con el modelo respecto a los puntos de vista de la empresa).
- Aspectos funcionales (lógica de ProModel, elemento esencial y las opciones).
- Los datos colectados (comparar los resultados de la simulación con datos observados directamente del propio sistema real).

### VERIFICACIÓN, VALIDACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### Verificación

En esta etapa se determina que el modelo se encuentre bien construido, teniendo en cuenta la lógica del proceso, y la metodología que utiliza el software ProModel.

Para esta etapa se hizo necesaria la colaboración de los ingenieros del departamento de Organización y Métodos, apoyo temático del proyecto en la planta, y del Jefe de producción de lácteos y derivados.

### Validación

En esta fase se examinó que el modelo estuviera ejecutándose conforme al proceso real, es decir, se realiza una prueba piloto con la primera aproximación de cada uno de los submódulos de la empresa desarrollados en ProModel, comparando la estructura de las actividades y resultados o reportes de salida en todos los casos. Este análisis fue realizado en primera instancia por el grupo de apoyo a esta tesis, el cual después de haber estudiado a fondo el proceso para poder ser modelado, se identificaron todos los detalles que debían ser tomados en cuenta para garantizar la exactitud del modelo. Una vez realizado el primer filtro del modelo, fue presentado al Jefe de Producción, quien lo revisó nuevamente y sugirió ciertos detalles que no habían sido tomados en cuenta y que se consideraban necesarios para garantizar una mayor aproximación al sistema real. La parte final de la validación se llevo a cabo a través de las corridas previas, distintas a las que se debían tener en cuenta para el análisis de resultados. Estas corridas se realizaron con el propósito de verificar y validar la construcción del modelo.

#### Resultados

Para cada uno de los modelos se realizó el respectivo análisis de resultados, evaluando los indicadores sugeridos por la empresa, enfocado al análisis de capacidades, cambios en el modelo por agregar, eliminar recursos o locaciones, etcétera. Posteriormente se efectuó la comparación entre ambos modelos, el corregido y el que se tenía en un principio, con el propósito de poder dar respuesta a la inquietud de la empresa.

### 4.4. Comentarios finales.

Como se observa en este cuarto capítulo en un inicio se mostró el programa el cual se emplearía para modelar el sistema real, posteriormente se describieron a maneara de submódulos las distintas línea de producción y el área recibo descritas en en ProModel, y finalmente se verificó y validó cada uno de estos modelos intentando crear una amplia variedad de situaciones diferentes en donde la lógica del modelo se pone a prueba, para predecir el desempeño del nuevo sistema en puntos extremos. Se toman opiniones y el

mejor juicio de los individuos que se encuentran más familiarizados con la capacidad del sistema, y se hacen pruebas con el modelo como; el disminuir la tasa entre llegadas de las entidades y observar lo que sucede conforme se sobrecarga el sistema. Se cambian las mezclas de las partes, los tiempos de proceso, las tasas de falla, etcétera, intentando hacer una amplia variedad de situaciones para poder observar problemas y corregirlos.

Una vez logrado un razonamiento adecuado respecto a que si los resultados obtenidos tienen sentido, y que se tiene un grado de certidumbre aceptable de que el modelo funciona de acuerdo a las especificaciones acordes al sistema real. Ahora se está listo para usar el modelo y responder algunas preguntas.

Probar con éxito cada uno de los submódulos componentes no significa que el modelo completo adquiera automáticamente credibilidad, el modelo en su conjunto debe ser analizado. El siguiente capítulo describe la realización de corridas del modelo completo, bajo diferentes condiciones a fin de analizar las posibles situaciones experimentadas que permitan identificar los puntos críticos del modelo, y en consecuencia posibles soluciones.

## Capítulo 5

# Diseño de experimentos y pruebas de simulación con el modelo.

En esta sección se plantean los experimentos a realizar con el modelo de simulación y se efectúan las corridas necesarias para los experimentos propuestos, con el objeto de obtener los valores de interés y finalmente se analizan los resultados.

### 5.1. Consideraciones generales

Existen varias implicaciones prácticas antes de comenzar cualquier análisis, idealmente se tiene que diseñar un conjunto completo de experimentos para identificar distintas discrepancias de las cuales se debe estar consiente. Por lo que aquí se considera una estructura en la experimentación con base en el tipo de análisis comparativo, el cual busca, bajo un conjunto finito de diseños, la comparación para identificar soluciones que aborden los objetivos planteados. Este tipo de análisis requiere la observación de los modelos predispuestos donde la preocupación es la comparación de un sistema con otro. Por ejemplo para, este tipo de estudio en el sistema, puede haber un aumento en el valor de los tiempos de inter-arribo de las entidades Leche a la planta, la incorporación de paros por mantenimiento programados, etcétera, todo esto encaminado a estimular la confianza al momento de tomar una decisión y poder hacer sugerencias a la empresa sobre las acciones que deberá seguir.

En este capítulo se realizan cuatro tipos de experimentos<sup>12</sup>, en el primero se busca observar el comportamiento general del sistema con el fin interesado de estimar el desempeño real del modelo, en el segundo experimento se evalúa el efecto del incremento de las

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup>**Nota:** En este documento de tesis solo se ilustran los experimentos para el área de producción de lácteos, específicamente en las líneas de leche pasteurizada y ultrapasteurizada.

entidades que arriban en la planta o a las distintas líneas de producción, como una consecuencia natural del aumento de la demanda de este tipo de productos. El tercer experimento, se considera una disminución de la capacidad de la planta o líneas de producción debido a labores de mantenimiento en sus equipos. En el cuarto experimento se evalúa el efecto del aumento de la capacidad de la planta o líneas de producción, lo anterior se basa en la intención de su administración, de aumentar la eficiencia de su infraestructura a fin de evaluar los efectos producidos por cambios de equipos actuales, por otros de mayor capacidad (tanques, bombas, etcétera). En todos los casos se estiman, mediante el modelo de simulación, los siguientes valores de interés: el tamaño promedio del número de productos terminados durante la prueba expresado en porcentaje; las localidades que provoquen la generación de cuellos de botella; y por último, también se obtiene la utilización promedio de los equipos durante el tiempo simulado.

Desde luego los experimentos mencionados antes son ilustrativos y no limitativos de la aplicación que se puede dar al modelo de simulación. Existe, por ejemplo, la posibilidad de realizar simulaciones en donde se consideren varios cambios simultáneamente (un aumento de la capacidad de la planta y al mismo tiempo una disminución de la actividad de producción) o experimentos distintos, donde se desea saber la respuesta del modelo ante el cambio de ciertos factores. Por otro lado, se debe recordar que las estimaciones que proporciona el modelo de simulación, asumen la operación de la planta productora de lácteos de la Ciudad de México, la información que toma el modelo para sus corridas es exactamente igual en cada una de ellas, debido a que los arribos de la materia prima están definidos por los mismos tipos de distribuciones, los cuales se definen en un archivo externo que es leído por el modelo, esto hace que la variación entre corridas sea mínima.

## 5.2. Efectos de las operaciones de la Empresa, comportamiento general del sistema con el fin interesado de estimar el desempeño real del modelo.

Es importante conocer cómo es el comportamiento de la fabrica de la Ciudad de México, conforme se mantiene el número de operaciones en sus líneas, con el objeto de estimar el desempeño real del modelo.

Si se formulara la pregunta ¿cuál es la magnitud de la cantidad de productos elaborados?

Mediante el modelo de simulación establecido, se pueden estimar en forma cuantitativa estos valores.

En la siguiente prueba, se asume que la capacidad de los equipos de la empresa es fija, de acuerdo a sus valores correspondientes de operaciones por hora determinados en el capítulo 3, y la demanda empleada para la entrada de leche a las instalaciones es permanente durante todo el modelo (véase Tabla 3.3, Capítulo 3).

Cabe señalar que con cada uno de los niveles de la demanda, fue realizada una corrida de simulación, con la finalidad de obtener estimaciones representativas del comportamiento de la empresa (se considera una operación de 24 horas diarias), así también es importante puntualizar que cada corrida recorre un periodo de tiempo de 10,000 horas, lo que es aproximado a 1.14 años de producción. Lo anterior tiene propósitos exploratorios.

La Figura 5.1. muestra los resultados obtenidos en ProModel, los datos de mayor interés para este análisis corresponden a los datos de la columna **Current Value** o el valor actual de los distintos productos elaborados por las diferentes máquinas endosadoras. Cada entidad o unidad obtenida por los distintos equipos corresponde a 1,000 unidades de producto; es decir, la cantidad obtenida de producto por el equipo FLEX 30 al termino de la corrida de simulación corresponde a 9,156 mil unidades de producto procesado. Los primeros nueve equipos (FLEX 30, M24, B24, H24, TBA8 42, S16, B7, Flex10 1 36 y Flex10 1 34.) corresponden a la línea de leche ultra pasteurizada, mientras que los siguientes cuatro equipos (TR8 1, TR8 2, TR8 3 y Ttop) pertenecen a la línea de leche pasteurizada.

Por tanto el desempeño real de este modelo se muestra en la tabla 5.1, el cual describe el valor actual del total de entidades procesadas, así también se observa un valor porcentual para cada equipo. Notese que aquí el valor porcentual es equivalente al  $100\,\%$  para todos los equipos puesto que este valor será tomado como base para hacer comparaciones entre los diferentes experimentos abajo descritos.

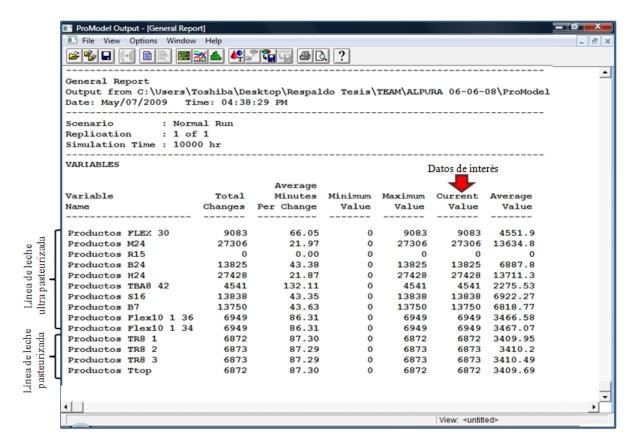


Figura 5.1: Corrida 1.

# 5.3. Efectos del incremento de las operaciones de la Empresa, como una consecuencia natural del aumento de la demanda de los diferentes tipos de productos.

Es importante conocer cómo es el comportamiento de la empresa, conforme aumenta la cantidad de leche que entra al sistema, con el objeto de tomar las acciones necesarias para evitar o reducir sus consecuencias negativas, como son, entre otras, las saturaciones en las líneas y las capacidades de los equipos.

Descripción Total Porcentaje del unidades equivalente equipo procesadas Productos FLEX 30 9083  $100\,\%$  $100 \,\%$ Productos M24 27306 100 % Productos B24 13825 Productos H24 27428 100% $100 \,\%$ Productos TBA8 42 4541 100 % Productos S16 13838 Productos B7  $100\,\%$ 13750 100 %Productos Flex10 1 36 6949 Productos Flex10 1 34 100 % 6949 Productos TR8\_1 6872  $100\,\%$ Productos TR8\_2  $100 \,\%$ 6873 Productos TR8\_3 6873 100%Productos Ttop 6872  $100 \,\%$ 

Tabla 5.1: Desempeño real del modelo (Corrida normal).

Se supone que al aumentar el número de entidades (leche) que entran a la fábrica, también aumenta el número de productos terminados y la utilización de los equipos, pero ¿cuál es la magnitud de estos incrementos? Mediante el modelo de simulación establecido, se pueden estimar en forma cuantitativa estos valores.

Los datos facilitados por la empresa muestran que la demanda de leche está aumentando debido al incremento de la población (ver capítulo 3). En las siguientes pruebas se estudia el patrón de rendimiento atencional con alta demanda, para lo cual aquí se evalúa el efecto del incremento de las entidades que arriban a la planta o a las distintas líneas de producción como una consecuencia natural del aumento de la demanda de este tipo de productos.

Esto se hace de forma constante, se ingresan entidades al sistema sin permitir que durante el ciclo total de la corrida se tenga una falta de abastecimiento en los silos recibo (silos 29, 30 y 31), los cuales alimentan con entidades "Leche" al área de producción de lácteos misma que contempla a las líneas de pasteurizados y ultrapasteurizados, siendo estas dos líneas las secciones a evaluar.

La tabla 5.2, muestra los estadísticos colectados después de simular el sistema.

Tabla	5.2: Desem	peño real	del m	odelo (	Corrida	aumento	de la	demanda).
-------	------------	-----------	-------	---------	---------	---------	-------	-----------

Descripción	Total	Porcentaje
del	unidades	equivalente
equipo	procesadas	
Productos FLEX 30	9119	100.4%
Productos M24	27201	99.6%
Productos B24	13798	99.8%
Productos H24	27428	100 %
Productos TBA8 42	4549	100.4%
Productos S16	13766	99.5%
Productos B7	13857	100.8%
Productos Flex10 1 36	6910	99.4%
Productos Flex10 1 34	6911	99.5%
Productos TR8_1	6841	99.5%
Productos TR8_2	6842	99.5%
Productos TR8_3	6842	99.5%
Productos Ttop	6841	99.5%

Los resultados muestran que solo algunos equipos (FLEX 30, TBA8 42 y B7) incrementan su rendimiento, a pesar de que la producción en la planta no se detiene por falta de producto. Comparando los rendimientos obtenidos en la tabla 5.1 y los de la tabla 5.2, se observa cómo los porcentajes de eficiencia en su mayoría disminuyeron.

Aquí surge una pregunta importante, ¿Cómo se explica que la mayoría de los equipos bajo su nivel de producción si nunca se paro ningún elemento por falta de producto? La respuesta a esta pregunta es simple y se describe así:

Los equipos no se pararon por falta de producto sino todo lo contrario, debido a que se tenía flujo de producto constante los equipos con mayor tiempo de procesamiento o los de menor capacidad de conducción, fueron los que determinaron el ritmo de toda la cadena o línea de producción es decir el eslabón mas débil marcó el ritmo del sistema, lo que ocasionó que muchos equipos detrás de este eslabón se bloquearan, y los equipos

delante de este eslabón se mantuvieron ociosos.

Considerando el siguiente ejemplo, ver Figura 5.2.: El equipo H24 que pertenece a la línea de producción de ultrapasteurizados se mantuvo en proceso normal de operación un aproximado al 12 % del total del tiempo simulado (franja verde), y el resto, es decir el 78 % del tiempo simulado permaneció bloqueado (franja rosa). Esto hace pensar que este equipo tiene problemas con la liberación de sus entidades procesadas, haciendo un análisis por toda esa cadena de producción se identificó que la línea localidad H24\_a\_Tanque28 la cual conduce las entidades procesadas del equipo H24 hacia el tanque aséptico número 28 es la causante de la saturación en el equipo H24.

La localidad H24\_a\_Tanque28 se mantiene en operación al 100 % del tiempo simulado, lo que indica que nunca descansa ya que no se da abasto con las entidades que se liberan por el equipo H24, véase Figura 5.3. A diferencia de la figura anterior puesto que la localidad H24\_a\_Tanque28 suministra producto de manera lenta a la localidad Tanque 28, este tanque no trabaja con respecto a su capacidad disponible. La Figura 5.4., muestra el estado de capacidad de la localidad (Tanque 28) el cual indica que durante todo el tiempo simulado la localidad siempre se encontró vacía y por tanto ociosa en algunos intervalos de tiempo.

Por lo que toda esta línea de producción trabaja en función de la velocidad a la que actúa la localidad H24\_a\_Tanque28. Lo que da como resultado que aunque la entrada de leche a la planta sea mayor no necesariamente significa que se tendrá mas producto terminado, dado que todas las líneas de producción trabajan al ritmo que indique su eslabón mas débil o a la velocidad de la localidad mas lenta.



Figura 5.2: Corrida 2 (Equipo H24).



Figura 5.3: Corrida 2 (Localidad H24\_a\_Tanque28).



Figura 5.4: Corrida 2 (Tanque 28).

# 5.4. Efectos de la reducción de la capacidad de planta, debido a labores de mantenimiento.

Un paro provoca que un recurso o locación quede inhabilitada para operar, o fuera de servicio. Desde el punto de vista de la simulación, un paro puede representar fallas, descansos, mantenimientos preventivos (en cuyo caso se necesitarán uno o más recursos), interrupciones programadas o cambios de turno.

Una locación puede quedar fuera de servicio en función del tiempo de simulación (Clock), por tiempo de uso (Usage), por número de entidades procesadas (Entity) o por un cambio de tipo de entidad a procesar (Setup). Los paros se procesan de manera independiente, por lo que diferentes paros pueden ocurrir simultáneamente en una misma locación (excepto aquellos que se deban a cambios de tiempo o de entidad). Otro método para definir paros por descansos o turnos consiste en utilizar el editor de turno (Shift Editor). Este procedimiento tiene la ventaja de permitir paros en todo un grupo de locaciones.

Regularmente todos los días y cada semana, de manera alternada, los equipos de la empresa fabricante de productos lácteos son sujetos a labores de mantenimiento, en consecuencia, durante esas horas la empresa detiene el trabajo de sus equipos. Esta situación

origina que la capacidad de la empresa disminuya en aproximadamente doce operaciones por día y cinco por semana en espacios predeterminados de tiempo, con respecto a su capacidad normal. Es decir, su capacidad se reduce de 24 a 23 hora/día y de 168 a 164 hora/semana respectivamente. Con esta información y utilizando el modelo de simulación establecido, se evalúan a continuación los efectos de esta reducción en la capacidad de las operaciones de la empresa.

Para definir los paros programados referentes al mantenimiento en el modelo, aquí se emplea el termino (Clock) el cual define paros en los equipos quedando fuera de servicio solamente en función del tiempo de simulación. La tabla 5.3, muestra un conjunto de columnas donde se especifican los valores de los siguientes parámetros en las locaciones de nuestro modelo:

Tabla 5.3: Labores de mantenimiento (Paros programados).

No. de Silo	Paros	Duración en		
	programados	horas		
Silo 1	1 por semana	4		
Silo 2	1 por día	1		
Silo 3	1 por día	1		
Silo 4	1 por día	1		
Silo 5	1 por semana	4		
Silo 6	1 por día	1		
Silo 7	1 por día	1		
Silo 8	1 por día	1		
Silo 12	1 por día	1		
Silo 13	1 por día	1		
Silo 14	1 por día	1		
Silo 15	1 por día	1		
Silo 16	1 por día	1		
Silo 17	1 por día	1		
Silo 29	1 por semana	4		
Silo 30	1 por semana	4		
Silo 31	1 por semana	4		

El resumen de los resultados estadísticos de estas pruebas se muestra en la tabla 5.4.

Tabla 5.4: Desempeño del modelo con labores de mantenimiento (Corrida paros programados).

Descripción	Total	Porcentaje
del	unidades	equivalente
equipo	procesadas	
Productos FLEX 30	9024	99.4%
Productos M24	27030	99.0%
Productos B24	13705	99.1%
Productos H24	27428	100 %
Productos TBA8 42	4512	99.4%
Productos S16	13740	99.3%
Productos B7	13667	99.4%
Productos Flex10 1 36	6794	97.8%
Productos Flex10 1 34	6794	97.8%
Productos TR8_1	6780	98.7%
Productos TR8_2	6780	98.6%
Productos TR8_3	6781	98.7%
Productos Ttop	6780	98.7%

Los resultados muestran que los rendimientos obtenidos mostrados en la tabla 5.4, están por debajo de la tabla 5.1, es decir, los porcentajes de eficiencia disminuyeron. Esto resulta obvio después de saber que los principales equipos (silos recibo y silos proceso) fueron programados para su mantenimiento a diferentes periodos de tiempo.

Aunque la reducción en la capacidad de los tanques aparentemente no es significativa, el modelo de simulación muestra que se presentarán ligeros impactos negativos durante la operación de la empresa, cuando se disminuye su capacidad, debido a las labores de mantenimiento en algunos de sus equipos. Una disminución de la capacidad de los equipos de 24 a 23 hora/día y de 168 a 164 hora/semana respectivamente, significa un decremento de la capacidad de producción en general del orden de 1.10%. Solo por mencionar algunos ejemplos, de acuerdo con las estimaciones del modelo de simulación, el decremento respecto a la producción para el equipo FLEX 30 fue de 0.65%. En el caso del equipo Flex10 1 34 el decremento en su producción es de 2.23%. También se estima un decremento importante en el equipo TR8\_1, ya que su valor promedio disminuyo un 1.34%. Un efecto menos acentuado de la disminución en la capacidad de producción, se observa en el rendimiento porcentual del producto obtenido por el dosificador H24, debido

a que el equipo H24 se mantiene bloqueado aún bajo estas condiciones de operación, por lo que este valor mantiene un decremento de 0%.

# 5.5. Efectos del aumento de la capacidad de planta, a fin de evaluar cambios observados en la Empresa productora de lácteos.

Lo anterior implica, además de un deterioro de la calidad del servicio, dado que se produce menor volumen de producto terminado, un mayor riesgo de perder alcance en el mercado, pues a un determinado periodo de tiempo (corto plazo) no se podrá producir más de lo que ahora se obtiene.

Puesto que es deseable un mejor nivel de producción y observando cómo el número de equipos bloqueados aumenta cuando incrementa la entrada de entidades leche al sistema. La administración de la empresa, tiene la intención de aumentar la eficiencia de su infraestructura, con el objeto de manejar un mejor nivel se servicio.

Como ya se mencionó anteriormente, la teoría de restricciones permite observar como un cuello de botella se asocia con una cadena de eventos, en la cual hay un componente que permite que ocurran menos eventos que el resto de los componentes. En otras palabras, La teoría de restricciones TOC (Theory of Constraints) puede verse como una filosofía construida alrededor de una guía y diseñada para crear un proceso de mejora continua.

La premisa básica de TOC menciona que la salida del sistema está determinada por sus restricciones. Para este caso las restricciones son los recursos internos. TOC sugiere una técnica específica para ayudar a su implementación. Ésta es tambor-amortiguador-cuerda, la cual propone que el cuello de botella controle al sistema (tambor), protegiéndolo de las fluctuaciones y variaciones en su tasa de alimentación (amortiguador), y conectándolo con el punto de despacho de la materia prima al principio de la línea de producción a través del ciclo de retroalimentación (cuerda).

Sabiendo que el cuello de botella controla al sistema, en el modelo de simulación se identifican los recursos causantes de estos hechos haciendo un análisis sistemático en cada línea de producción como se mencionó en la sección 5.3. Se identifican en las líneas de producción las localidades causantes de bloqueos y ociosidad en diferentes equipos liga-

dos a este flujo a fin de incrementar su capacidad y observar los resultados.

Para el caso del modelo respecto a la línea de leche ultrapasteurizada y línea de leche pasteurizada solo se hacen dos cambios. El primero se hace en la localidad H24\_a\_Tanque28 la cual incrementa su capacidad a dos unidades procesadas a la vez, en lugar de solo una, que es la cantidad utilizada en el modelo original (subtema 5.2) y el segundo corresponde al cambio de tiempo (Wait) en el clarificado para la localidad Clarificadora3 pasando de 2.4 a 1.2 minutos/entidad procesada.

Con la información anterior, se pueden realizar las simulaciones requeridas para poder evaluar los cambios que se presentarían bajo las nuevas condiciones. En la tercer columna de la tabla 5.5, se muestran los resultados de la corrida bajo las nuevas condiciones con una mayor capacidad en porcentajes que los valores obtenidos en la tabla 5.1 (Corrida normal, sección 5.2).

Tabla 5.5: Desempeño del modelo aumento de la capacidad de planta (Corrida incremento de capacidad).

Descripción	Total	Porcentaje	
del	unidades	equivalente	
equipo	procesadas		
Productos FLEX 30	18241	200.8 %	
Productos M24	54239	198.6%	
Productos B24	27453	198.6%	
Productos H24	54701	199.4%	
Productos TBA8 42	9120	200.8%	
Productos S16	27470	198.5%	
Productos B7	27459	199.7%	
Productos Flex10 1 36	13748	197.8%	
Productos Flex10 1 34	13748	197.8%	
Productos TR8_1	13685	199.1%	
Productos TR8_2	13686	199.1%	
Productos TR8_3	13686	199.1%	
Productos Ttop	13685	199.1%	

Un aumento de la capacidad de las localidades H24\_a\_Tanque28 y Clarificadora3, produce un incremento general de la capacidad del orden de 99.13 %. Solo por mencionar

algunos ejemplos, para el caso de la línea de leche ultrapasteurizada, de acuerdo con las estimaciones del modelo de simulación, este aumento de la capacidad de las unidades producidas se traduce específicamente para el equipo FLEX 30 en un aumento de mayor magnitud pasando de un 100 % (tabla 5.1., subtema 5.2) a un total de 200.8 % (tabla 5.5) por lo que se incremento en un 100.83 %, es decir la producción se elevó a más del doble, en el tamaño promedio del número de unidades producidas para el equipo M24, los incrementos pasan del 100 % al 198.6 % (incremento un 98.63 %). También hay un notable incremento en las unidades promedio de todos los equipos de la línea de leche pasteurizada (TR8\_1, TR8\_2, TR8\_3 y Ttop), por ejemplo, para el caso de los equipos TR8\_1 el porcentaje en unidades promedio pasó de un 100 % a un 199.1 % (incremento un 99.14 %). La producción promedio de los equipos Ttop pasaron de un 100 % a un 199.1 % (incremento un 99.14 %), debido a que se proporciona flujo más constante.

Con fines ilustrativos, en la Figura 5.5., se muestran gráficamente las comparaciones que se mencionaron antes. En particular, se muestran los resultados de las pruebas para el caso de los porcentajes observados en la tabla 6., (Corrida Normal) y los valores porcentuales referentes a la tabla 10., (Corrida Incremento de Capacidad).

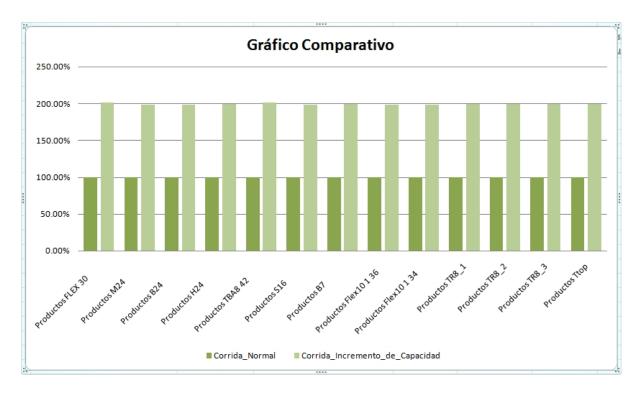


Figura 5.5: Corrida 4 (Efectos del aumento de la capacidad de planta).

Al comparar los valores porcentuales de las tablas  $5.1~\rm y~5.5$ , se observa que el principal beneficio del cambio del sistema, se manifiesta en un incremento de los tamaños promedio en unidades producidas, puesto que se incrementan en un 99.13% (pasa del 100% al 199.13% unidades); también se destaca una reducción importante en los cuellos de botella, tanto para la línea de leche ultrapasteurizada como para la línea de leche pasteurizada. Puesto que el flujo permanece más constante, la utilización de los equipos aumenta, el porcentaje de ociosidad disminuye y los bloqueos se observan en un ligero aumento.

La tabla 5.6. y la Figura 5.6. muestran los concentrados observados de las distintas corridas analizadas en este capítulo (Corrida normal, Corrida aumento de la demanda, Corrida paros programados y Corrida incremento de la capacidad).

Descripción	% Corrida	% Corrida	% Corrida	% Corrida
del	Normal	Aumento de la	Paros	Incremento de la
equipo		Demanda	Programados	Capacidad
Productos FLEX 30	100.00%	100.40 %	99.35%	200.83%
Productos M24	100.00%	99.62%	98.99 %	198.63%
Productos B24	100.00%	99.80%	99.13%	198.58%
Productos H24	100.00%	100.00%	100.00%	199.43%
Productos TBA8 42	100.00%	100.40 %	99.36%	200.84 %
Productos S16	100.00%	99.48%	99.29%	198.51%
Productos B7	100.00%	100.78%	99.40 %	199.70%
Productos Flex10 1 36	100.00%	99.44%	97.77 %	197.84 %
Productos Flex10 1 34	100.00%	99.45%	97.77 %	197.84 %
Productos TR8_1	100.00%	99.55%	98.66%	199.14 %
Productos TR8_2	100.00%	99.55%	98.65%	199.13%
Productos TR8_3	100.00%	99.55%	98.66%	199.13 %
Productos Ttop	100.00%	99.55%	98.66%	199.14 %

Tabla 5.6: Corridas observadas.

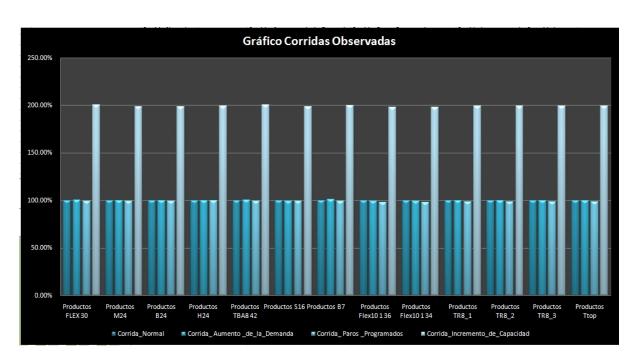


Figura 5.6: Corridas observadas.

# 5.6. Observaciones finales sobre los experimentos realizados.

Comentarios en relación con los experimentos anteriores.

En el primer experimento que se realizó, se observó el comportamiento del sistema conforme se mantenía el número de operaciones en sus líneas, para estimar el desempeño real del modelo; posteriormente, para cada uno de los equipos dosificadores de leche en sus distintas presentaciones (línea de leche pasteurizada y ultrapasteurizada) se hizo un conteo estadístico con el objetivo de determinar la magnitud de productos elaborados. Por lo que para elaborar la tabla 5.1, de este experimento, la cual sirvió de base para compararla con las tablas 5.2, 5.4 y 5.5, de los siguientes experimentos, se requirió de una corrida con periodo de tiempo de 10,000 horas, lo que es aproximado a 1.14 años de producción con cada uno de los niveles de la demanda de simulación. Por otra parte, en el segundo y tercer experimento, sólo fue necesario hacer una sustitución directa de valores en el modelo original para obtener las estimaciones del impacto esperado. En cambio, en el cuarto experimento se tuvo que trabajar con el modelo original, modificándolo varias veces hasta lograr los parámetros que mostraran el panorama que adquiriera cierto valor preestablecido; cuando se logró esto, el modelo modificado proporcionó las estimaciones requeridas.

En el experimento dos, el modelo de simulación estima un aumento poco significativo, tanto en las líneas de leche ultrapasturizada como en las líneas de leche pasteurizada. Desde luego, la mayoría de los equipos dosificadores presentaron reducciones en cuanto a unidades procesadas, a pesar de que nunca se detuvo la línea de producción por falta de producto. Para el caso del experimento tres, las operaciones de la empresa disminuyeron aun más pues aquí se programaron los paros en las líneas de producción a distintos equipos por razones de mantenimiento, todo esto en comparación con la situación actual (corrida normal). En contraparte, el incremento de capacidad de algunas localidades (equipos etiquetados como causantes de cuellos de botellas) en el cuarto experimento se logró una mejor utilización promedio de los diferentes equipos de todo el sistema drásticamente. Lo anterior afecta positivamente los ingresos que percibe la empresa por elevar la cantidad de unidades producidas por intervalo de tiempo, situación que en el mediano y largo plazo mejoraría, hasta que nuevamente la empresa esté cerca de su saturación.

Aunque en términos cualitativos los resultados de los experimentos anteriores son los

esperados, la ventaja de utilizar el modelo de simulación radica en que adicionalmente se obtienen valores cuantitativos de estos resultados.

Las estadísticas recopiladas brindan información importante, las cuales permiten inferir soluciones adecuadas al sistema.

Para cada uno de los modelos se realizó el respectivo análisis de resultados, evaluando los indicadores sugeridos por la empresa, como el enfocado al análisis de capacidades, la programación de mantenimientos y los modelos en cuanto a incrementar el número de locaciones o alterar sus capacidades. Posteriormente se realizó la comparación entre todos con el propósito de poder dar respuesta a la inquietud de la empresa sobre la implementación de un mejor sistema que sea capaz de satisfacer la demanda en un periodo de tiempo determinado.

La simulación de la línea de leche pasteurizada y línea de leche ultrapasteurizada presenta un buen desempeño en términos generales, no obstante a través de la metodología se pudo encontrar un escenario mejor. De acuerdo con los resultados aquí observados, la actividad de la empresa fabricante de productos lácteos de la Ciudad de México, tiene poco margen para incrementar sus operaciones industriales dentro de su espacio local. Aunque todavía se puede aumentar el número de operaciones diarias, el modelo de simulación estima que pronto se tendrá un deterioro significativo en el nivel de operación de la empresa, lo cual incrementará los riesgos de productos faltantes por falta de capacidad. Por otro lado, los resultados de las simulaciones indican que un pequeño aumento en la capacidad de algunos equipos (localidades), se traduce en un aumento importante en el tamaño promedio de unidades producidas, en un mayor desempeño de los equipos y también en la disminución de notables problemas de saturación. Por el contrario, el mantener las capacidades de sus equipos como actualmente funcionan, en un periodo de tiempo determinado generará enormes impactos negativos en su operación, esta situación se puede producir, por ejemplo, cuando deja de operar algún equipo debido a bloqueos o falta de abastecimientos generados pos cuellos de botella que restringen el flujo constante de la leche.

## Conclusiones y recomendaciones.

A lo largo de esta tesis se enfatizó en la motivación por la simulación de sistemas por computadora, las diferentes formas de aprovecharla y la interacción entre las características del modelo y la implementación estratégica. Inicialmente se discuten las características generales de simulación y los modelos de sistemas de computadora, posteriormente se define el problema a resolver y los objetivos que se persiguen, así como las características que describen la esencia de la empresa, más adelante se establece el programa de cómputo que fue utilizado y se realizan pruebas piloto, en seguida y como parte critica del documento se planean los experimentos a realizar con el modelo de simulación y se efectúan las corridas necesarias para los experimentos propuestos, con el objeto de obtener los valores de interés, y finalmente para poder aportar un valor significativo a este trabajo se analizan los resultados y se puntualizan las observaciones.

En cualquier organización y en cualquiera de los niveles de ésta es necesario medir el funcionamiento y el desempeño. Una forma de medir este funcionamiento es a través de indicadores de gestión. Los indicadores son necesarios para poder mejorar, partiendo de la premisa de que "lo que no se mide no se puede controlar y lo que no se controla no se puede gestionar", es decir, la evaluación cualitativa y cuantitativa del desempeño conlleva al compromiso de todos los involucrados en la generación del producto o servicio y permite identificar los problemas que se presenten en el cumplimiento de los objetivos principales de la empresa para generar mejoras teniendo en cuenta que la eficacia tiene que ver con hacer efectivo un intento o propósito. Los indicadores de eficacia están relacionados con los métodos que nos indican capacidad o acierto en la consecución de tareas y/o trabajos.

Uno de los objetivos principales del presente trabajo fue el diseño, prueba y aplicación de un modelo de simulación para las operaciones de fabricación de una empresa productora de lácteos. Aunque no se pudo describir en este documento el modelado completo del sistema debido a su complejidad y dimensiones, se desarrolló un ejemplo de modelo validado cualitativa y estadísticamente que reproduce de manera satisfactoria la operación

del área recibo, área de producción de lácteos y área de producción de derivados, siendo el área de producción de lácteos la médula ejemplar en el documento.

Aún con todo, el modelo obtenido sirve para realizar análisis sin grandes complicaciones matemáticas o requerimientos especiales de cómputo. También debe observarse que no se requieren largos tiempos para la ejecución de las simulaciones. Mediante el modelo de simulación establecido, es posible estimar en forma cuantitativa los efectos o impactos esperados de cambios en la operación de la fábrica. De esta manera, el modelo de simulación es una herramienta para evaluar el rendimiento de la actividad industrial, e incluso evalúa mejoras potenciales en su operación.

Mediante el procedimiento seguido aquí, es posible elaborar modelos de simulación para otras industrias o servicios. Sin embargo, puede ser de interés el desarrollo de modelos que incluyan otras etapas de la operación de la empresa, como es el movimiento de almacenamiento hasta las posiciones de embarque. Las ideas establecidas en el presente trabajo, representan un paso hacia el desarrollo de tales modelos.

La herramienta mostrada en este documento es de suma utilidad ya que permite la prueba, evaluación y comparación de diversos escenarios a un costo sustancialmente menor a lo hecho hasta ahora que es la experimentación sobre el sistema real. Asimismo se presentó una amplia variedad de contribuciones al desarrollo de una nueva teoría sobre la aproximación por eventos discretos haciendo ver que el análisis de un sistema complejo puede ser modelado mediante el software adecuado y los datos indicados.

Como hemos visto, a lo largo de este documento, la simulación y el modelado han demostrado ser una opción exitosa y popular, lo que da pauta al acercamiento favorable para quienes pretenden emplear la simulación como una herramienta de análisis y abordar un problema con características similares.

### Recomendaciones

De acuerdo con los resultados de una variante del modelo de simulación original, se estima que en el caso de que se cambiaran los equipos generadores de cuellos de botella por unos de mayor capacidad, el nivel de producción mejoraría significativamente; sin embargo, lo anterior implicaría costos por adquisición de nuevos equipos y cambios en la distribución de planta, considerando solo las líneas que aquí fueron analizadas. Es recomendable para este modelo hacer un análisis significativo de costo beneficio antes de

tomar una decisión, por ejemplo, supóngase que al comprar un equipo nuevo, la empresa reducirá, un 50 % el tiempo esperado de procesamiento, para un proceso en particular. El modelo servirá entonces para estimar el aumento esperado en el número total de órdenes, que es posible procesar completamente durante un período particular de planeación, para determinar si la empresa está justificada en la compra del nuevo equipo.

Parecería obvio que si se resuelve el problema o se satisfacen los objetivos se logrará el éxito; sin embargo, éste no siempre es el caso, por lo que, si lo que se quiere como analista en un estudio de simulación es tener más probabilidades al acertar en una decisión, se deberán tener en claro algunos factores como por ejemplo:

- El primer paso en cualquier tarea de resolución de problemas es definir y formular éste. Puesto que en el mundo real el problema inicial rara vez se encuentra claramente definido e incluso, puede no ser obvio que la simulación sea la herramienta apropiada. Por estas y algunas otras razones el primer punto es abrir un diálogo con quien solicita el estudio y hacerle una serie de preguntas que al final le permitirán definir el problema por completo. Con frecuencia, el problema final que se acaba tratando es muy diferente al que inicialmente se presentó.
- Para la ejecución de un proyecto de este tipo es necesario profundizar de manera detallada los conocimientos tanto teóricos como técnicos. Es decir, conocimientos teóricos sobre simulación, y técnicos como el funcionamiento y lógica interna del software ProModel.
- En la etapa de recopilación de información del proceso es muy importante estar atentos a todas las variables que interfieren en él, de esta manera se puede identificar cuál es la información relevante que se debe tener en cuenta en el desarrollo del modelo para garantizar su similitud con el sistema real. Para esto es fundamental trabajar en conjunto con la persona que conoce a fondo el proceso, y quien finalmente será el usuario del modelo.
- Para el diseño y construcción del modelo es muy importante tener claridad del funcionamiento del proceso, esto con el fin de lograr una adecuada traducción del sistema real hacia un modelo, y posteriormente hacia el programa de simulación y poder realizar todas las validaciones que se deban tener en cuenta. Si, se quiere entender lo que está sucediendo y por qué está ocurriendo, una buena estrategia para el desarrollo del modelo de simulación es que se debe observar, tocar y preguntar incluso aquello que parece insignificante.

- La validación del modelo se debe realizar de la manera adecuada para asegurar la veracidad de los resultados proporcionados por el modelo y tener seguridad sobre las inferencias que se hagan de ellos.
- Hasta el momento quizá se ha dado la impresión de que un estudio de simulación consiste en una serie de pasos bien definidos que hay que seguir en un orden específico, como la receta de un libro de cocina. Aunque la mayoría de los análisis en simulación experimentados están de acuerdo en que por lo general existen algunas actividades o pasos bien definidos, a menudo éstos se desempeñan en forma repetida de una manera interactiva. Puede encontrar que a medio camino del desarrollo de una simulación, las condiciones cambien de forma imprevista, hay nueva información disponible o se logra una pronta perspectiva que engendra nuevas ideas. Lo cual puede hacer que se vuelva a visitar la fase de la formulación del problema o alterar el diseño de su modelo de forma drástica. Esto no es del todo poco común, así que se debe estar preparado para retomar de nuevo las condiciones del problema, siempre y cuando éste cambie.
- Respecto a la fase de implementación del proyecto es responsabilidad de la empresa, dado que su alcance abarca solo una porción del sistema. Sin embargo, fueron presentados a la empresa los resultados de este proyecto con el fin de recibir una retroalimentación, y así finalizarlo adecuadamente.

Por último, y dejando a un lado las ventajas, desventajas y problemas no resueltos, la esencia de esta tesis es simplemente exponer una nueva forma de concebir la aproximación de la tecnología en el terreno de la simulación para la toma de decisiones, en la mejora y el diseño de procesos y productos al englobar un método de solución alternativo que conlleva partes teóricas basadas en razonamientos lógicos, ecuaciones matemáticas y estadísticas en diferentes eventos de un sistema complejo bajo estudio.

# Anexos.

Lo anexos contiene la información proporcionada por el Departamento de Métodos y Sistemas de la empresa, y se encuentran contenidos dentro del CD que acompaña a esta tesis.

## Referencias

- [Banks et. al., 2001] Banks Jerry, Carson John S., and Nelson Barry L., Nicol David M., [2001], Discrete-Event System Simulation, Third ed., Prentice-Hall, U.S.A.
- [Banks et. al., 2005] Banks Jerry, Carson John S., and Nelson Barry L., Nicol David M., [2005], Discrete-Event System Simulation, Fourth ed., Prentice-Hall, U.S.A.
- [Bernard, 1976] Bernard Zeigler., [1976], Theory of Modeling and Simulation, John Wiley & Sons, New York.
- [Bernard et. al., 2000] Bernard Zeigler, Tag Gon Kim, y Herbert Praehofer., [2000], Theory of Modeling and Simulation., Second ed., Academic Press, New York.
- [Bertalanffy, 1969] Bertalanffy, L. von [1969], General System Theory: Foundations, Development, Applications, New York: George Braziller. Editado en español (1976) Teoría General de los Sistemas, México Buenos Aires: Fondo de Cultura Económica.
- [Blackstone et. al., 1989] Blackstone, William H., Jr., [1989], Capacity Management., Cincinnati, OH: South-Western.
- [Chávez et al., 2005] Chávez Rebellón C. L., Delgado Palau V., Montes Ramírez S. L., [2005], Desarrollo de un modelo de simulación usando el software ProModel al proceso de pre-impresión y troquelado de etiquetas naranjo., Facultad de Ingeniería, Universidad ICESI. SANTIAGO DE CALI.
- [Craig, 2006] Craig W. A., [2006], Discrete event simulation for batch processing., Monsanto, Winter Simulation Conference., 1788 Lovers Lane, Augusta, GA 30901, U.S.A.

- [Machuca et. al., 1995] Domínguez Machuca José Antonio., [1995], Dirección de Operaciones, Aspectos Tácticos y Operativos en la Producción de los Servicios., McGRAW-Hill/INTERAMERICANA DE ESPAÑOL, S.A.U., Aravaca (Madrid).
- [Gaither et. al., 2003] Gaither Morman, Frazir Greg., [2003], Administración de Producción y Operaciones., Octava ed., Thomson Editores, México.
- [García et. al., 2006] García D.E., García R.H., Cárdenas B.L.E., [2006], Simulación y Análisis de Sistemas con ProModel, First ed., Prentice-Hall, México.
- [Gordon, 1978] Gordon, G. [1978], System Simulation, 2d ed., Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.
- [Hall, 1962] Hall, D.A., [1962], A Methodology for Systems Engineering, Princeton, NJ: Van Nostrand.
- [Henrisken, 1983] Henrisken, James O. [1983], *The Integrated Simulation Environment*, Operations Research, Vol. 31, No. 6, November-December 1983, U.S.A., pp. 1053-1073.
- [Hongfei, 2004] Hongfei Gong., [2004], Application of Discrete Event System to Insect Population Dynamic. LaSEEB-ISR, Instituto Superior Tecnico, Technical University of Lisbon Torre Norte, off.6.21, Av. Rovisco Pais 1, 1049-001, Lisbon, Portugal.
- [Kelton et. al., 2008] Kelton W. David, Sadowski Randall P., Sturrock David T., [2008], SIMULACÓN CON SOFTWARE ARENA, Cuarta ed., Mc Graw Hill, México.
- [Law et. al., 1991] Law Averill M. and Kelton W. David [1991], Simulation Modeling and Analysis, Second Edition, McRaw-Hill, Inc., U.S.A.
- [Morin, 1988] Morin R.L., [1988], Monte Carlo Simulation in the Radialogical Sciences, CRC Press.
- [Nahum, 1992] Nahum A.E., [1992], Monte-Carlo, What, Why, and How., Notes for an EFOMP course in Radiotherapy Physics, Spain.
- [Neumann, 1992] , Von Neumann [1992], John Von Neumann y los orígenes de la computación moderna, William Aspray Gedisa Editorial
- [Quintana, 2004] Quintana F. J. [2004], BOLETIN, Facultad de Ciencias Matemáticas.-U.C.M., MARZO 2004, Madrid (Ciudad Universitaria).

- [Rodriguez et. al., 1991] Rodríguez Torres Federico y Delgado Altamirano Ricardo [1991], *Técnicas y Modelos de Simulación de Sistemas*, Instituto Politécnico Nacional, septiembre de 1991, México.
- [Schriber, 1990] Schriber Thomas J. [1990], An Introduction to Simulation Using GPSS/H, John Wiley & Sons, U.S.A., pp. 1-14.
- [Shannon, 1975] Shannon, Robert E. [1975], Systems Simulation: The Art and Science, Prentice- Hall, U.S.A.
- [Taha, 1998] Taha Hamdy A. [1998], Investigación de Operaciones, una Introducción, sexta edición, Prentice-Hall, México.