

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN "OSCAR LUCERO MOYA"
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO**

**Simulación del proceso de
producción de yogourt de soya en la
UEB Combinado Lácteo de Santiago
de Cuba mediante Redes de Petri
Coloreadas**

**Tesis en Opción al Título de Ingeniero
Industrial**

Dulce Elena Leyva Sierra

Holguín, 2015

**UNIVERSIDAD DE HOLGUÍN "OSCAR LUCERO MOYA"
FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y TURISMO**

**Simulación del proceso de producción de yogourt de
soya en la UEB Combinado Lácteo de Santiago de
Cuba mediante Redes de Petri Coloreadas**

Tesis en Opción al Título de Ingeniero Industrial

Autor: Dulce Elena Leyva Sierra

Tutor: Ing. Franger Rodolfo Cuevas Beltrán

Holguín, 2015

DEDICATORIA

A ti...por hacer de mi la persona que soy

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que de una forma u otra han llegado a mi vida, porque gracias a ellas he aprendido todo lo que sé...

A mi mamá que tiene todo el mérito de mis triunfos, porque ha sabido educarme y apoyarme tanto a mi lado como lejos de mí, porque es la persona que más amor me ha dado y a la que más amo en el mundo...

A Dios por allanar el camino que me ha conducido hasta aquí...

A Robert por ayudarme a madurar y por haberme hecho conocer el amor...

A mis abuelos, mis primas, mis tíos, en general a toda la familia que siempre ha estado ahí cuando la necesito...

A mi tita Marlen que ha ocupado el lugar de mi mami en su ausencia y ha logrado que sienta que estoy en mi "hogar"...

A mi mami Loly y mi mami Carmen que han estado conmigo en los momentos difíciles y me han acogido como solo una madre verdadera puede hacerlo...

A mis amigas Julita, Grethel, Lula y Betty, que han estado conmigo tanto en las fiestas como en las noches sin dormir...

A mi papi que ha aparecido tarde pero me ha hecho saber que puedo contar con su apoyo y su cariño...

A mi familia de ositos que han llenado mi vida de alegría y me han acompañado en estos tiempos tan difíciles...

Y un agradecimiento especial a mi tutor Franger Cuevas Beltrán, por haber confiado en mí y por haber hecho esta tesis a mi lado, sin límite de horas y esfuerzos, de no ser por él esto no hubiera sido posible.

RESUMEN

El proceso de toma de decisiones en los sistemas productivos debe sustentarse en métodos científicos que aumenten su efectividad. Es cada vez más aceptado que la simulación es una poderosa herramienta de apoyo a las decisiones, que permite mejorar la eficiencia operacional y organizacional. La presente investigación tiene como objetivo diseñar y aplicar un procedimiento para la modelación, simulación y análisis del proceso de producción de yogourt de soya en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba que les permita a los directivos tomar decisiones sobre dicho proceso. Se evaluaron dos estrategias frente a cinco escenarios probables, lo que permitió concluir que las restricciones del sistema son la principal causa del incumplimiento del plan de producción, por lo que las decisiones están enfocadas a la erradicación de las mismas.

ABSTRACT

The process of decision making in production systems must be based on scientific methods to increase their effectiveness. It is increasingly accepted that simulation is a powerful tool for decision support, which improves the operational and organizational efficiency. The current investigation aims to design and implement a procedure for modeling, simulation and analysis of the production process of soy yogourt in the UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba. Two strategy will be evaluated against five probable scenarios.

Índice de contenidos

Introducción	1
I Marco teórico - referencial de la investigación	6
1.1. El proceso de toma de decisiones	7
1.1.1. Investigación de Operaciones. Evolución y definiciones	9
1.2. Modelos y Simulación	10
1.3. Redes de Petri Coloreadas	12
1.3.1. CPN Tools. Herramienta para trabajar con Redes de Petri Coloreadas	18
1.4. Análisis de las metodologías para la modelación y simulación de sistemas	22
II Procedimiento para la simulación de procesos productivos	28
2.1. Fase I. Planificación	28
2.1.1. Etapa I. Definición del sistema	28
2.1.2. Etapa 2. Diseño del modelo	34
2.2. Fase II. Ejecución	35
2.2.1. Etapa 3. Implementación del modelo	36
2.3. Fase III: Verificación	36
2.3.1. Etapa 4. Validación del modelo	36
2.4. Fase IV: Mejora	38

2.4.1. Etapa 5. Ajuste y mejora modelo	38
--	----

III Aplicación del procedimiento propuesto en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba	39
---	-----------

3.1. Fase I. Planificación	39
3.1.1. Etapa 1. Definición del sistema	39
3.1.2. Etapa 2. Diseño del modelo	45
3.2. Fase II. Ejecución	49
3.2.1. Etapa 3. Implementación del modelo	49
3.3. Fase III: Verificación	50
3.3.1. Etapa 4. Validación del modelo	50

Conclusiones	53
---------------------	-----------

Recomendaciones	54
------------------------	-----------

Bibliografía	I
---------------------	----------

I

Anexos	IV
---------------	-----------

Índice de figuras

1.	Cumplimiento del plan de producción en el año 2014	3
2.	Estrategia seguida para la construcción del marco teórico referencial de la investigación	6
3.	Procedimiento para el proceso de toma de decisiones	8
4.	Formas de estudiar un sistema	11
5.	Interfaz de usuario del softwar CPN Tools	19
6.	Herramientas para editar CP-nets	20
7.	CP-net exportada en formato EPS	21
8.	Herramientas para analizar CP-nets	21
9.	Procedimiento para la simulación de procesos productivos	29
10.	Etapa 1. Definición del sistema	30
11.	Gráfico para el análisis de los aspectos más importantes del problema	33
12.	Procedimiento de inspección autocorrelacionada	37
13.	Gráfico de comparación con el valor de T	44
14.	Gráfico de Paretto	44
15.	Modelo codificado	50
16.	Modelo jerarquizado del sistema de producción	VII

17.	Modelo del proceso Molienda	VIII
18.	Modelo del subproceso Producción de Sirope	IX
19.	Modelo del subproceso Producción de Cultivo	X
20.	Modelo del proceso Fermentación	XI
21.	Modelo del proceso Fermentación del Tanque 1	XII
22.	Modelo del proceso Fermentación del Tanque 6	XIII
23.	Modelo del proceso Envasado	XIV
24.	Modelo jerarquizado del proceso de Molienda	XVIII
25.	Modelo del proceso de Sirope	XIX
26.	Modelo del proceso de Fermentación	XX
27.	Modelo del proceso de Fermentación del Tanque 1	XXI
28.	Modelo del proceso de Fermentación del Tanque 6	XXII
29.	Modelo del proceso de Cultivo	XXIII

Índice de tablas

1.	Cumplimiento del plan de producción en el año 2014	3
2.	Metodologías para desarrollar estudios de simulación	23
3.	Metodologías para desarrollar estudios de simulación. Continuación	24
4.	Metodologías para desarrollar estudios de simulación. Continuación	25
5.	Valores de la constante K. Fuente: Conzález Almaguer(2003)	31
6.	Información recopilada del criterio de los expertos	32
7.	Procesamiento del Kendall	43
8.	Plan de experimentación	49

Introducción

La actividad empresarial se encuentra inmersa en un proceso de profundas transformaciones, causadas principalmente por la globalización de la economía. Los efectos de las crisis capitalistas, y el avance acelerado de la ciencia y la tecnología propician un cambio radical en las actividades productivas y de servicios. Por consiguiente, las empresas deben definir estrategias encaminadas a mejorar su competitividad ¹. Esto se traduce en una búsqueda incesante de las mejores prácticas que garanticen un desempeño superior.

Cuba no se encuentra ajena a esta dinámica de cambios. El país se enfoca en la búsqueda de nuevas formas de gestión de la producción y los servicios, con las perspectivas de nuestras particularidades nacionales. Este empeño tiene sólidas bases en la Resolución Económica del V Congreso del Partido Comunista de Cuba: *El empleo de técnicas modernas de dirección empresarial, adecuadas a nuestras características y basadas en las mejores y avanzadas prácticas contemporáneas,...., deben constituir prioridad del país a los fines de garantizar la mayor eficacia en la gestión y los procesos productivos de bienes y servicios,...., la ciencia, la innovación, y la asimilación de tecnologías son elementos esenciales en la elevación de la eficiencia económica y condición primordial para el desarrollo*

La actividad y el sector de la industria alimentaria son políticas priorizadas en el país. El Ministerio de la Industria Alimentaria y la Pesca (MINAL)² es el organismo rector de la actividad agroindustrial en Cuba. Actualmente, se encuentra inmerso en un proceso de perfeccionamiento que le permita responder de forma adecuada a la demanda del entorno.

Evidencia de ello, constituyen las palabras de la ex-ministra María del Carmen Concepción al afirmar: *“Hay que saber predecir las necesidades de insumos, materias primas y mercados, para*

¹Relacionado con el desarrollo de un enfoque estratégico que garantice la estabilidad y supervivencia de la empresa en el mercado

²Creado el 3 de marzo de 2009 por el Decreto Ley 264. En consecuencia se extinguieron el Ministerio de la Industria Alimentaria y el Ministerio de la Industria Pesquera

que los productos lleguen a su destino en los plazos planificados”.

La División de Producción Agroalimentaria tiene como objeto la transformación de:

- La leche de origen bovino y frijol de soya en: leche pasteurizada, leche condensada, leche esterilizada, quesos blandos, quesos semiduros, quesos duros, helados, yogourt, mantequilla, entre otros.
- La carne bovina y de cerdo en: carne de res, embutidos y dentro de ellos las salchichas y perros calientes, conformados entre ellos las hamburguesas, croquetas y albóndigas, carnes saladas, productos ahumados.
- El grano de café en café torrefaccionado.
- Los vegetales y frutas en: pulpas, jugos, néctares, dulces en almíbar, vegetales esterilizados, vegetales encurtidos.

En la investigación de Benítez Riech y Cruz González (2002) al realizar un análisis de la actividad económica del MINAL desde 1989 hasta 2000, se evidencia en la mayoría de las producciones de la industria una disminución de forma continuada y en magnitudes considerables desde 1989 hasta 1993 y 1994, comportamiento que se prolongó en algunos casos hasta 1995, teniendo después una discreta recuperación.

En el caso del yogourt, su producción disminuyó de 59 700 toneladas en 1989 a 19.200 t en 1992 que fue la producción más baja. En 1994, con el inicio de la nueva producción de yogourt elaborado a partir de leche de soya, la producción total de yogourt crece de forma notable y sostenida alcanzando las 107 000 t en el 2000³.

La UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba ha venido presentando deficiencias en la producción de este surtido. Al realizar una revisión del plan de producción de la entidad en el pasado año 2014, se detectaron desviaciones considerables en este indicador. En la Tabla 1 se muestra el comportamiento de los planes de producción en el año analizado.

³ De esta última cifra el 81 % corresponde a yogourt de soya.

Tabla 1: Cumplimiento del plan de producción en el año 2014

Mes	E	F	M	A	Ma	J	Ju	Ag	S	O	N	D	Total
Plan(t)	995,7	900	520,25	1010	1020	1020	508,5	540	1025	1010	1005	995	11 039,7
Real(t)	835,1	563,64	364,67	830,17	788,64	704,69	426,08	581,22	624,82	845,97	670,53	662,47	8389,2

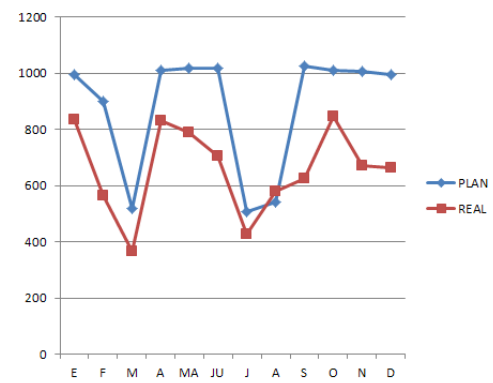


Figura 1: Cumplimiento del plan de producción en el año 2014

En estos incumplimientos incidieron decisivamente los factores siguientes:

1. interrupciones en el suministro de agua y electricidad
2. falta de aseguramiento (combustible) para la transportación
3. rotura de la caldera
4. rotura del panel de control
5. rotura de los cañones de la máquina de envasado
6. rotura de los estera transportadora

Basado en la diferencia entre la producción real y la planificada, se puede determinar que se dejaron de producir 2 650,5 toneladas de yogourt de soya. Al considerar que una bolsa de yogourt pesa aproximadamente 0,916 kg, entonces el incumplimiento fue de 2 893 558 bolsas de yogourt, quedando clara la ineficiencia de este proceso.

Este problema, incluye además la necesidad de un enfoque logístico en el proceso de producción. También resulta indiscutible señalar que el proceso de toma de decisiones constituye un aspecto de primer orden a resolver, no sólo para propiciar el logro de una mejor utilización de las capacidades productivas instaladas en la entidad, sino también para evitar la pérdida de

producciones en proceso. En la práctica, el proceso decisional en esta área, se realiza basándose fundamentalmente, en las experiencias y habilidades del personal encargado de estas tareas, sin tomar en consideración modelos lógicos. Esta situación en apretada síntesis constituye la situación problemática que dio origen a la presente investigación.

Para alcanzar altos niveles de efectividad, en este proceso se precisan estudios que deben ir desde lo conceptual - estratégico hasta lo práctico - operativo. Esto evidencia la necesidad de desarrollar instrumentos metodológicos, que contribuyan a elevar la efectividad del proceso de producción de yogourt de soya y favorezcan la toma de decisiones asociadas a este, lo cual constituye un **problema científico** a resolver.

En la presente investigación se definió la **idea a defender** siguiente: Mediante el diseño y aplicación de un procedimiento que posibilite la modelación, simulación y análisis en apoyo a la toma de decisiones, se puede elevar la efectividad del proceso de producción de yogourt de soya, bajo las condiciones restrictivas que impone el entorno empresarial.

El **objeto de estudio teórico** se centró en el proceso de toma de decisiones. Fue tomado como **objeto de estudio práctico** la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba.

En correspondencia con la idea a defender planteada, el objetivo general de la investigación consistió en diseñar y aplicar un procedimiento para la modelación, simulación y análisis del proceso de producción de yogourt de soya en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba.

El objetivo general fue desglosado en los objetivos específicos siguientes:

1. Construir el marco - teórico referencial de la investigación a partir de las tendencias actuales sobre el paradigma decisional basado en las técnicas de la Investigación de Operaciones, el papel de la simulación en el análisis de sistemas, las redes de petri coloreadas como herramienta para la modelación de sistemas logísticos o de manufactura, y las metodologías actuales para realizar la simulación de sistemas.
2. Desarrollar un estudio diagnóstico sobre la forma actual en la que se realiza el proceso de producción de yogourt de soya.
3. Diseñar y aplicar un procedimiento para la modelación, simulación y análisis del sistema

productivo.

Se define como **campo de investigación** la toma de decisiones basada en la simulación del proceso de producción mediante Redes de Petri Coloreadas en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba.

Para el desarrollo de la investigación se emplearon métodos y técnicas de prueba y error, análisis y síntesis, dinámica de grupos, análisis comparativos, herramientas matemáticas, entrevistas, y el enfoque de sistemas; así como el procesamiento computacional de los resultados. Se emplearon además, el análisis lógico, la analogía, la reflexión y otros procesos mentales inherentes a toda actividad de investigación científica.

Para su presentación, este Trabajo de Diploma se estructuró de la forma siguiente, una Introducción donde se fundamenta el tema desarrollado; un Capítulo 1, que contiene en lo fundamental el marco teórico - referencial de la investigación efectuada; un Capítulo II, en el que se resume y explica el procedimiento diseñado; un Capítulo III, donde se muestra la aplicación del procedimiento en el objeto de estudio práctico; un conjunto de Conclusiones y Recomendaciones derivadas de la investigación realizada; la Bibliografía consultada y, finalmente, un grupo de Anexos de necesaria inclusión, como complemento de los resultados expuestos.

Marco teórico - referencial de la investigación

Marco teórico - referencial de la investigación

Para realizar un análisis del estado del arte y la práctica del objeto de estudio a tratar, es necesario considerar críticamente varios elementos. El presente capítulo tiene como objetivos:

1. exponer los elementos que caracterizan el proceso de toma de decisiones y su vinculación con las técnicas de la investigación de operaciones.
2. definir los elementos que caracterizan la simulación y las Redes de Petri Coloreadas como herramienta para la modelación de sistemas logísticos y de manufactura.
3. analizar de forma crítica las metodologías para realizar estudios de simulación.

En la Figura 2 se muestra el hilo conductor seguido para la elaboración del marco teórico - referencial de la investigación.

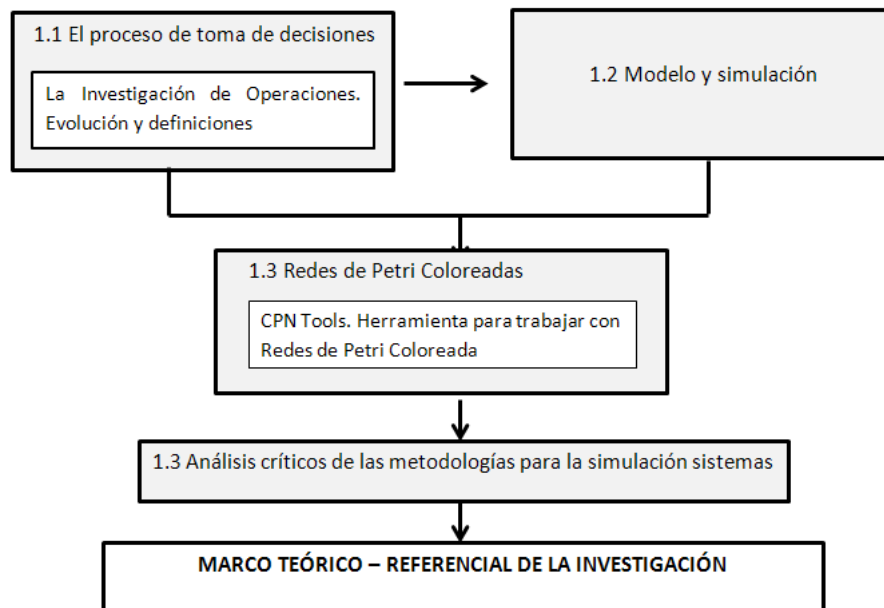


Figura 2: Estrategia seguida para la construcción del marco teórico referencial de la investigación

1.1. El proceso de toma de decisiones

Para iniciar la comprensión del proceso de toma de decisiones, es necesario considerar el concepto de decisión. Entiéndase, como la elección que se hace entre medidas optativas siempre que estas se conozcan. En este proceso interviene un conjunto de subdecisiones tales como: (1) la decisión de buscar medidas optativas; (2) la decisión de determinar las posibilidades de éxito; (3) la elección real de las medidas optativas para satisfacer plenamente las posibilidades (Marrero Delgado, 2001).

La toma de decisiones en las organizaciones según Romero (1993), Barbara Romero y Pomerol (1997) es un proceso continuo en el que se pueden identificar al menos cuatro fases: recogida de información (obtención de datos de criterios y alternativas), diseño (determinación precisa de criterios y sus escalas de medida, así como la construcción del conjunto de elección), selección (elección de la alternativa) y revisión (revisión de las decisiones).

Al consultar la literatura científica, se evidencia un grupo considerable de autores que han abordado sistemas de procedimientos a seguir para la toma de decisiones. Sobresalen los trabajos de Hampton (1991), Bueno et al. (1991), Monks (1991), Hillier & Lieberman (1993)⁴, Asencio y Kalifa (1994), Render y Heizer (1996), Taha (2007). De forma general, existe coincidencia en la necesidad de acometer el procedimiento mostrado en la Figura 3.

La complejidad del proceso de toma de decisiones (influenciado por un ambiente dinámico) y la forma de elección de la mejor alternativa, constituyen elementos esenciales en el alcance de una solución efectiva. Influyen además factores tales como la presencia de metas incompatibles, la responsabilidad y la autoridad para la toma de decisiones.

⁴citados por Marrero Delgado (2001)

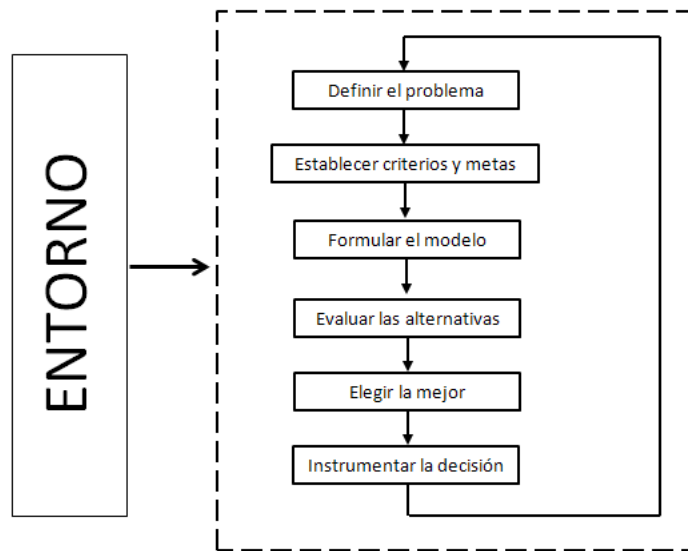


Figura 3: Procedimiento para el proceso de toma de decisiones

Las empresas según Hicks (1993), Domínguez Manchuca (1994), Krajewski y Ritzman (2000), Gaither y Frazier (2000), deberán identificar las opciones disponibles que garanticen valorar adecuadamente sus fortalezas y debilidades, así como las oportunidades y amenazas del entorno. Entonces, la empresa se posicionará en el mercado de acuerdo a la calidad de sus decisiones, pues este es un factor determinante en el éxito o fracaso frente a la competencia.

Render y Heizer (1996) plantean que la diferencia entre una mala y una buena decisión, radica en que esta última utiliza criterios científicos y analíticos, se basa en la lógica, considera todos los datos disponibles y las posibles alternativas. Dentro de los modelos para la toma de decisiones consultados (Render y Heizer, 1996; Krajewski y Ritzman, 2000; Gaither y Frazier, 2000), se incluyen como los más empleados: los modelos esquemáticos, los algebraicos, los de pronósticos, los de control de calidad, de teoría de decisiones, de colas, de inventario, de redes y de simulaciones.

No obstante, muchas de las decisiones empresariales se toman basándose en la experiencia y la intuición de los trabajadores. Aunque este método puede ser útil en determinadas ocasiones, frente a escenarios complejos se demanda el empleo de métodos científicos. Por método

científico, se entiende la acumulación de información, el análisis de esta información por técnicas adecuadas, la síntesis y toma de decisiones, todo ello utilizando una base matemática (Himmelblau y Bischoff, 2003). Tomando en cuenta el planteamiento anterior, cabe destacar el papel e impacto de la investigación de operaciones en el desarrollo de las ciencias empresariales.

1.1.1. Investigación de Operaciones. Evolución y definiciones

Según evoluciona la humanidad surgen nuevos paradigmas y enfoques en la ciencia, con el objetivo de darle solución a determinadas situaciones de la sociedad. Desde el advenimiento de la revolución industrial se ha producido un remarcable crecimiento en el tamaño y complejidad de las organizaciones. Tomando en cuenta esta situación, se vuelve más difícil asignar los recursos disponibles a varias actividades en la forma que sea más efectiva para la organización como un todo (Hillier y Lieberman, 1997). Este tipo de problema y la necesidad de encontrar una mejor forma de solucionarlos, provee un entorno donde emerge la investigación de operaciones.

La investigación de operaciones (IO) tiene sus orígenes en la Gran Bretaña de 1939 precedidos por los trabajos realizados por Kantorovich en la URSS y George Dantzing en los EE.UU, en un intento por usar una aproximación científica a la gestión de las organizaciones. Las técnicas de IO fueron muy utilizadas durante la II Guerra Mundial para dar solución a los problemas logísticos militares (abastecimiento del armamento, almacenamiento y distribución).

En la década de los 50', ya terminada la guerra se comenzaron a extender las técnicas de la IO al sector industrial. Sin embargo, no fue hasta la década de los 60', con el desarrollo de la tecnología computacional cuando la *Operations Research & Management Science* (OR/MS, de sus siglas en inglés) se afianza en el mundo industrializado. Como su nombre lo indica, investigación de operaciones, implica "investigación en las operaciones". Así, la investigación de operaciones se aplica a los problemas que tienen que ver con cómo conducir y coordinar las operaciones en la organización

Múltiples son los investigadores que han definido conceptualmente la IO (Anexo 1), citando entre ellos Ackoff y Sasieni (1994), Shamblin y Stevens (1991), Hillier y Lieberman (1997), Taha (2007), Ramos, Sánchez, Ferrer, Barquín, y Linares (2010), Chávez Saldaña (2012). La IO

se define en términos generales por el carácter mensurable de sus objetos, así como por la forma matemática y lógica de sus razonamientos (Moore, 1993). Por su parte Pérez López (2004) la define como la aplicación de las matemáticas, la lógica y del método científico para la solución de problemas multidisciplinarios relacionados con la optimización de los procesos operativos en general. Si bien se evidencian diferencias a partir de las perspectivas teóricas particulares de cada investigador, todos señalan en cierta forma los elementos siguientes: carácter científico de la IO, apoyo a la toma de decisiones, enfoque sistémico, equipos interdisciplinarios, empleo de modelos matemáticos.

A consideración de la autora de la presente investigación la IO es una poderosa herramienta utilizada por equipos interdisciplinarios, con el objetivo de buscar bajo un enfoque sistémico una solución óptima a las metas fijadas por la organización a través de la aplicación del método científico, favoreciendo la toma de decisiones.

Dentro de las técnicas de la IO, se encuentran: la programación lineal, el método simplex y análisis de sensibilidad, dualidad y análisis posóptimo, el modelo del transporte y sus variantes, redes, programación por metas, programación lineal entera, programación dinámica, modelo de inventario, teoría de juegos, teoría de colas, simulación, cadenas de Markov, etc. Aunque todas ellas, han sido aplicadas con éxito en la actividad práctica, es menester señalar el empleo cada vez mayor de la simulación como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

1.2. Modelos y Simulación

Durante muchos años los investigadores se han preocupado por estudiar, comprender y analizar el funcionamiento de diferentes sistemas con la finalidad de tomar decisiones en determinado momento (Law y Kelton, 2000). Para ello se han auxiliado en la construcción de modelos. Un modelo es como una maqueta que representa una representación aproximada, simplificada, del sistema real, de su estructura y su comportamiento.

En la Figura 4 se muestran las diferentes formas en las que puede ser estudiado un sistema.

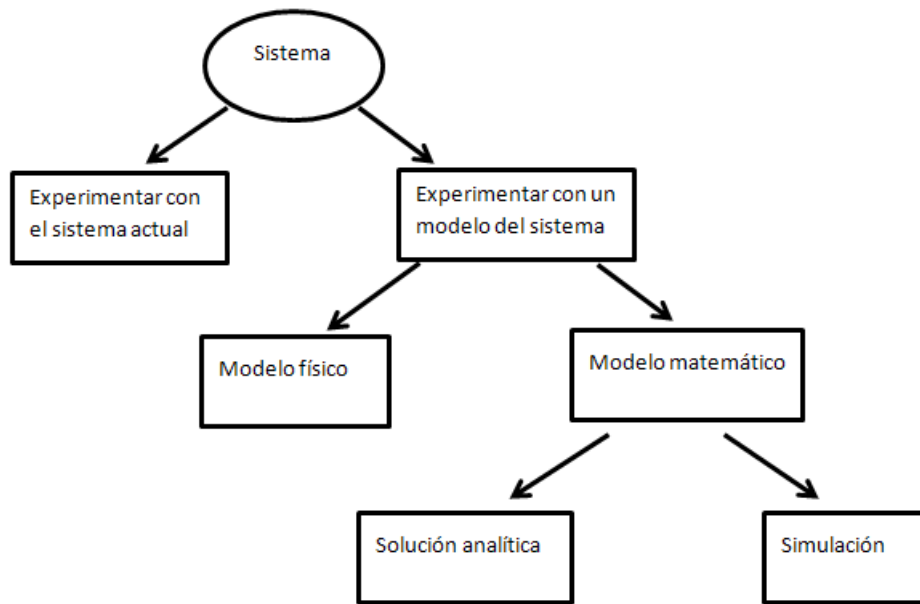


Figura 4: Formas de estudiar un sistema

Tarifa (2002) define el modelado⁵ y simulación como un método que consiste en obtener un modelo matemático de un sistema o fenómeno mediante un conjunto de simplificaciones y abstracciones que puede ser implementado en una computadora a través de un lenguaje y que a su vez imite su comportamiento, con la finalidad de realizar experimentos y conseguir resultados que permitan el análisis y evaluación de diferentes alternativas para el funcionamiento del mismo.

El empleo de la simulación ha crecido exponencialmente en los últimos años. Es una de las técnicas más usadas en la IO y las ciencias de la administración (Law y Kelton, 2000). Una indicación de esto es la *Winter Simulation Conferences*, que atrae a más de 700 personas cada año. Lane, Mansour & Harpell (1993) reportan en un estudio longitudinal desde 1973 hasta 1988 que la simulación fue consistentemente rankeada como una de las técnicas más importantes de la IO. Las otras dos fueron la programación matemática (programación lineal, programación no lineal, etc) y la estadística (que no es una técnica de la IO *per se*).

Según Law y Kelton (2000) dentro de las áreas en las que la simulación ha demostrado ser

⁵En la investigación se emplearán indistintamente los términos modelado y modelización

una poderosa herramienta se encuentran: (1) diseño y análisis de sistemas de manufactura, (2) evaluación de sistemas militares y sus requerimientos, (3) determinación de requerimientos de hardware o protocolos de comunicación, (4) diseño y operación de sistemas de transporte, (5) evaluación del diseño de sistemas de servicio, (6) reingeniería de procesos de negocio, (7) determinación de políticas para sistemas de inventario y (8) el análisis de sistemas económicos y financieros.

Dentro de las herramientas para la modelación de sistemas logísticos o de manufacturas, han ganado una gran popularidad las Redes de Petri Coloreadas (CPN o CP-nets, de sus siglas en inglés). Esto se debe a su capacidad de contener tanto la estructura estática como dinámica de un sistema, disponibilidad de técnicas de análisis matemático y su naturaleza gráfica (Jensen, Kurt, 1997). Además, las CPN son adecuadas para modelar y visualizar patrones de comportamiento que muestran concurrencia, sincronización y recursos compartidos, los cuales son factores claves cuando se trata de optimizar el rendimiento de sistemas logísticos o de manufactura (Narciso Farias, Piera i Eroles, y Guash Petit, 2004).

1.3. Redes de Petri Coloreadas

Las Redes de Petri (RdP) fueron propuestas en 1962 por el alemán Carl Adam Petri . Su tesis de doctorado "*Kommunikation mit automaten*" (Comunicación con autómatas) fue presentada en la Facultad de Matemáticas y Física de la Universidad Técnica de Darmstadt, Alemania, donde desarrolló los conceptos básicos de Redes de Petri.

Las RdP están tradicionalmente divididas en Redes de Petri de bajo nivel y Redes de Petri de alto nivel. En este último grupo se encuentran las Redes de Petri Coloreadas. Este tipo de red surge debido a las limitaciones siguientes de las RdP:

- incapacidad para modelar procesos similares (pero no idénticos) en una sola red
- todos los *tokens* son idénticos
- no hay forma de representar propiedades adicionales - no se pueden asociar datos adicionales con los *tokens*.

Las Redes de Petri Coloreadas (CP-redes o CPN, de sus siglas en inglés) (Jensen, Kurt, 1992, 1994, 1997) constituyen un lenguaje gráfico para la construcción de modelos de sistemas concurrentes y analizar sus propiedades. CP-nets es un lenguaje de modelado de eventos discretos que combina las capacidades de las RdP (Petri, 1962; Reisig, 1985) con las capacidades de un lenguaje de programación de alto nivel.

Las RdP proporcionan la fundación de la notación gráfica y los elementos básicos para el modelado de concurrencia, comunicación y sincronización. El lenguaje de programación CPN ML, que se basa en el lenguaje de programación funcional Standard ML (Milner, Tofte, Harper, y MacQuenn, 1997; Ullman, 1998), proporciona los elementos para la definición de tipos de datos, para la descripción de la manipulación de datos y para la creación de modelos compactos y parametrizables. El lenguaje de modelado CPN es un lenguaje de modelado de propósito general, es decir, no está dirigido a modelar una clase específica de sistemas, pero se dirige hacia una muy amplia clase de sistemas que se pueden caracterizar como sistemas concurrentes.

Redes de Petri Coloreadas no jerárquicas. Definición formal

Las Redes de Petri Coloreadas no jerárquicas no son más que una representación simple del modelo CPN que se desea simular. El modelo CPN está compuesto por: lugares (dibujados como círculos), transiciones (dibujadas como cajas rectangulares), arcos dirigidos conectando lugares y transiciones e inscripciones seguidas de los lugares, transiciones y arcos escritas en el lenguaje de programación CPN ML (Jensen, 1991, 1994). A continuación se muestra la definición formal de las Redes de Petri Coloreadas no jerárquicas brindada por su creador Jensen, Kurt.

Definición 1.1 Sea $S = \{s_1, s_2, s_3, \dots\}$ un arreglo no vacío. Un multiset sobre S es una función $m : S \rightarrow \mathbb{N}$ que asocia cada elemento $s \in S$ a un entero no negativo $m(s) \in \mathbb{N}$ llamado el número de apariciones (coeficiente) de s en m . Un multiset m puede además ser escrito como una suma:

$$\sum_{s \in S} m(s)'s = m(s_1)'s_1 + +m(s_2)'s_2 + +m(s_3)'s_3 + + \dots$$

Membresía, adición, multiplicación escalar, comparación y tamaño son definidos de la forma

siguiente, donde m_1, m_2 y m son multisets, y $n \in \mathbb{N}$:

1. $\forall s \in S : s \in m \Leftrightarrow m(s) > 0$
2. $\forall s \in S : (m_1 + m_2)(s) = m_1(s) + m_2(s)$
3. $\forall s \in S : (n * m)(s) = n * m(s)$
4. $m_1 \ll m_2 \Leftrightarrow \forall s \in S : m_1(s) \leq m_2(s)$
5. $|m| = \sum_{s \in S} m(s)$

Un multiset m es infinito si $|m| = \infty$. De otra forma m es finito. Cuando $m_1 \ll m_2$, la sustracción se define como:

6. $\forall s \in S : (m_2 - m_1)(s) = m_2(s) - m_1(s)$

A continuación se define la sintaxis de las CP-nets, y los elementos que constituyen el modelo CPN. La estructura de la red consiste en un conjunto finito de lugares, P , un conjunto finito de transiciones T , y un conjunto finito de arcos dirigidos, A . Se requiere que P y T sean disjuntos de modo que $P \cap T = \emptyset$. El conjunto de arcos dirigidos A , conectando transiciones y lugares, es definido como un conjunto de pares donde el primer componente especifica el origen del arco, y el segundo componente especifica el destino del arco. Para asegurarse que un arco tampoco conecta con una transición o una transición con un lugar, se requiere que A sea un subconjunto de $(P \times T) \cup (T \times P)$, esto significa que no se incluyen directamente arcos con doble sentido en la definición formal.

Definición 1.2 Una Red de Petri Coloreada no jerárquica es una 9-tupla

$CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$ donde:

1. P es un conjunto finito de lugares
2. T es un conjunto finito de transiciones T de modo que $P \cap T = \emptyset$
3. $A \subseteq P \times T \cup T \times P$ es un conjunto de arcos orientados
4. Σ es un conjunto finito de colores no vacíos
5. V es un conjunto finito de variables de forma tal que $Type[v] \in \Sigma$ para todas las variables $v \in V$
6. $C : P \rightarrow \Sigma$ es una función que asigna un color a cada lugar

7. $G : T \rightarrow EXPR_V$ es una función que asigna un *guard*⁶ a cada transición t de modo que $Type[G(t)] = Bool$
8. $E : A \rightarrow EXPR_V$ es una función que asigna una expresión a cada arco de modo que $Type[E(a)] = C(p)_{MS}$, donde p es un lugar conectado a un arco a
9. $I : P \rightarrow EXPR_\emptyset$ es una función que asigna una expresión de inicialización a cada lugar p de modo que $Type[I(p)] = C(p)_{MS}$

Definición 1.3 Para una $CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$ se definen los conceptos siguientes:

1. Una *marca* es una función M que asocia cada lugar $p \in P$ en un multiset de tokens $M(p) \in C(p)_{MS}$
2. Un *marcado inicial* M_0 es definido por $M_0(p) = I_p \langle \rangle$ para todo $p \in P$
3. Las variables de una transición t se denotan $Var(t) \subseteq V$ y no son más que las variables disponibles por el *guard* en t y la expresiones de los arcos conectados a t
4. Una *liga* a una transición t es una función b que asocia cada variable $v \in Var(t)$ dentro de un valor $b(v) \in Type[v]$. El conjunto de todas las ligas para una transición t es denotada como $B(t)$
5. Un *elemento ligado* es un par (t, b) de modo que $t \in T$ y $b \in B(t)$. El conjunto de todos los elementos ligados $BE(t)$ a una transición t es definido por $BE(t) = (t, b) | b \in B(t)$
6. Un *paso* $Y \in BE_{MS}$, es un multiset finito, no vacío de elementos ligados

Definición 1.4 Un elemento ligado $(t, b) \in BE$ está *habilitado* en una marca M si y sólo si las dos propiedades siguientes se satisfacen:

1. $G(t) \langle b \rangle$
2. $\forall p \in P : E(p, t) \langle b \rangle \ll = M(p)$

Cuando (t, b) está *habilitado* en M , puede ocurrir, conduciendo al *marcado* M' , definido por:

3. $\forall p \in P : M'(p) = (M(p) - -E(p, t) \langle b \rangle) + +E(t, p) \langle b \rangle$ para todo $p \in P$

⁶Un *guard* es una expresión booleana. Cuando un *guard*, debe ser evaluado a verdadero para que la transición pueda ocurrir

Al verificar la propiedad en el ítem 2, se puede constatar que los lugares de entrada de t desde $E(p, t)\langle b \rangle$ se evalúan a \emptyset_{MS} si no existen arcos desde p hasta t . De forma similar, al computar el nuevo marcado M' en el ítem 3, se puede verificar que los lugares conectados a t , desde $E(p, t)\langle b \rangle$ y $E(t, p)\langle b \rangle$, ambos evalúan a \emptyset_{MS} para todos los lugares p no conectados a t .

Cada elemento ligado (t, b) incluido en el paso Y debe satisfacer el *guard* de t . Además, todos los elementos ligados en el paso Y deben permitir remover sus propios *tokens* sin compartir estos *tokens* con otros elementos ligados incluidos en el paso. Por ello, cada lugar p debe estar marcado por un *multiset* de *tokens* $M(p)$ que es mayor o igual que la suma de los *tokens* que fueron removidos de p por los elementos ligados individuales del paso Y .

Definición 1.5 Un paso $Y \in BE_{MS}$ está habilitado en el mercado M si y solo si las dos propiedades siguientes se satisfacen:

1. $\forall (t, b) \in Y : G(t)\langle b \rangle$
2. $\forall p \in P : \sum_{(t, b) \in Y} E(p, t)\langle b \rangle \leq M(p)$

Cuando Y está habilitado en M , debe ocurrir, conduciendo al mercado M' , definido por:

3. $\forall p \in P : M'(p) = (M(p) - \sum_{(t, b) \in Y} E(p, t)\langle b \rangle) + \sum_{(t, b) \in Y} E(p, t)\langle b \rangle$

Cuando un paso Y ocurre en el mercado M_1 , produciendo un nuevo mercado M_2 como se especifica en la definición, ítem 3, se puede decir que el mercado M_2 es directamente accesible a partir de M_1 por el paso Y . Esto puede ser escrito como:

$$M_1 \xrightarrow{Y} M_2 \quad \text{or} \quad M_1 \longrightarrow M_2$$

Definición 1.6 Una ocurrencia finita de tamaño $n \geq 0$ es una secuencia alternativa de mercados y pasos, escritos como:

$$M_1 \xrightarrow{Y_1} M_2 \xrightarrow{Y_2} M_3 \cdots M_n \xrightarrow{Y_n} M_{n+1}$$

tal que $M_i \xrightarrow{Y_i} M_{i+1}$ para todo $1 \geq i \geq n$. De forma análoga, una secuencia de ocurrencia infinita es una secuencia de marcas y pasos

$$M_1 \xrightarrow{Y_1} M_2 \xrightarrow{Y_2} M_3 \xrightarrow{Y_3} \cdots$$

tal que $M_i \xrightarrow{Y_i} M_{i+1}$ para todo $i \geq 1$. El conjunto de los mercados accesibles desde un mercado M se denotan $\mathcal{R}(M)$

El siguiente teorema formaliza la propiedad que un marcado accesible mediante la ocurrencia de una paso Y , puede ser también accesible mediante una división de Y , en dos pequeños pasos Y_1 y Y_2 y luego dejando que Y_1 ocurra seguido por Y_2 . Cuando se aplica recursivamente, el teorema implica que el marcado accesible por la ocurrencia del paso Y , puede también ser accesible permitiendo que el elemento ligado en Y ocurra en un orden arbitrario.

Teorema 1.1 *Sea Y un paso y M y M' marcados tal que $M \xrightarrow{Y} M'$. Sean Y_1 y Y_2 pasos tal que:*

$$Y = Y_1 + Y_2$$

Entonces ahí existe una marca M'' tal que:

$$M \xrightarrow{Y_1} M'' \xrightarrow{Y_2} M'$$

Redes de Petri Coloreadas Jerarquizadas. Definición formal

El modelo CPN puede ser organizado en módulos. El principal motivo para usarlos se debe a que es prácticamente imposible dibujar un modelo CPN de un largo sistema en una sola red. Además, el modelador humano necesita la abstracción que le hace posible concentrarse en una cantidad pequeña de detalles. Los módulos pueden ser vistos como cajas negras, donde los modeladores, cuando deseen pueden obviar los detalles específicos en los módulos. Esto hace posible trabajar en diferentes niveles de abstracción.

Definición 1.7 *Un módulo de la CPN es una 4-tupla $CPN_M = (CPN, T_{sub}, P_{port}, PT)$ donde:*

1. $CPN = (P, T, A, \Sigma, V, C, G, E, I)$ es una CPN no jerárquica
2. $T_{sub} \subseteq T$ es un conjunto de transiciones sustitutas
3. $P_{port} \subseteq P$ es un conjunto de lugares tipo puerto
4. $PT : P_{port} \longrightarrow \{IN, OUT, I/O\}$ es una función que asigna un tipo de puerto a cada lugar tipo puerto

Definición 1.8 *Una CPN Jerárquica es una 4-tupla $CPN_H = (S, SM, PS, FS)$ donde:*

1. S es un conjunto finito de módulos. Cada módulo de una Red de Petri Coloreada $s = ((P^s, T^s, A^s, \sum^s, V^s, C^s, G^s, E^s, I^s), T_{sub}^s, P_{sub}^s, PT^s)$. Se requiere que $(P^{s1} \cup T^{s1}) \cap (P^{s2} \cup T^{s2}) = \emptyset$ para todo $s1, s2 \in S$ tal que $s1 \neq s2$
2. $SM : T_{sub} \rightarrow S$ es una función que asigna un submódulo a cada transición sustituta
3. PS es una función que asigna una relación puerto-socket $PS(t) \subseteq P_{sock}(t) \times P_{port}^{SM(t)}$ a cada transición sustituta t . Se requiere que $ST(p) = PT(p')$, $C(p) = C(p')$ y $I(p)\langle \rangle = I(p')\langle \rangle$ para todo $(p, p') \in PS(t)$ y todo $t \in T_{sub}$

1.3.1. CPN Tools. Herramienta para trabajar con Redes de Petri Coloreadas

La aplicación práctica de la modelización y la validación se basa en gran medida de la existencia de herramientas informáticas de apoyo a la construcción y manipulación de modelos. CPN Tools es una herramienta para la edición, simulación, análisis de espacio de estado, y el análisis del rendimiento de los modelos de CPN.

CPN Tools fue diseñado para reemplazar a Design/CPN, el cual es un software ampliamente difundido para trabajar con las CP-nets. En adición a Design/CPN, CPN Tools puede ser comparado con otras herramientas de RdP como ExSpect, GreatSPN y Renew, los cuales están descritos en la Base de Datos de herramientas para RdP.

CPN Tools es el resultado de un proyecto de investigación, el proyecto CPN2000, en la Universidad de Aarhus, patrocinado por el *Danish National Centre for IT Research (CIT)*, *George Mason University*, *Hewlett-Packard*, *Nokia* y *Microsoft*. La interfaz no posee barras de menú, ni menús desplegables. En cambio, emplea una combinación de técnicas interactivas recientes y novedosas, las cuales se exponen a continuación:

- **Workspace:** Ocupa la pantalla completa y contiene objetos de tipo ventana llamados *binders*. Los *binders* contienen pestañas, donde cada pestaña es equivalente a una ventana en un ambiente tradicional. Una pestaña contiene una vista ya sea a una página de una CP-net, o declaraciones o a un conjunto de herramientas
- **Manipulación directa:** Es usada para operaciones frecuentes, tales como: mover objetos, panear el contenido de una vista y editar texto

- **Manipulación bi-manual:** Es una variante de la manipulación directa que implica el uso de ambas manos para una sola tarea. Es usada para redimensionar objetos (*binders*, lugares, transiciones, etc.)
- **Marking menus:** Son menús contextuales circulares, que aparecen cuando se presiona el click derecho del *mouse*. Ofrecen una selección más rápida que los menús tradicionales (Kurtenbach y Buxton, 1994). El principal motivo, es porque es más fácil mover el cursor en una determinada dirección, que tener que desplazarse por el menú lineal tradicional
- **Index:** Es posicionado en el lado izquierdo del *workspace* y contiene una lista de todas las herramientas disponibles en CPN Tools

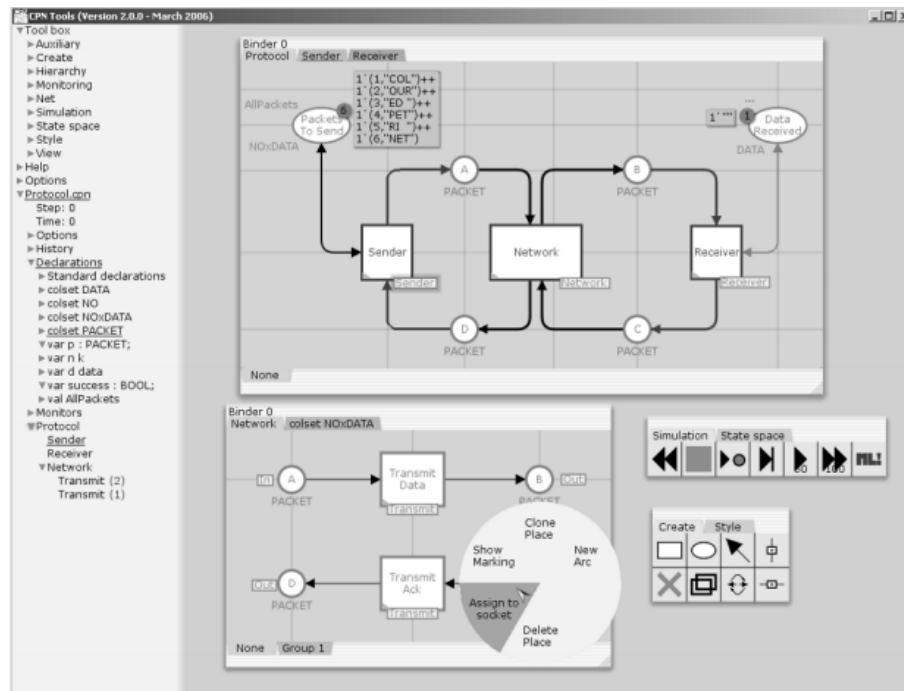


Figura 5: Interfaz de usuario del software CPN Tools

Herramientas para editar CP-nets

Todas las herramientas que se describen a continuación se encuentran en la entrada *Tool box* del *index* y se muestran en la Figura 6.

- **Create tools:** Es usada para crear los elementos de una CPN (lugares, transiciones y arcos). Además tiene la opción de eliminar y copiar un elemento, así como cambiar el sentido de un arco y colocar líneas guías horizontales y verticales para alinear los elementos. Para añadir una inscripción a un elemento, se debe hacer click sobre él. De todas formas, no es necesario emplear el *mouse* para editar la inscripción de un objeto particular, con la tecla TAB, se puede desplazar de una inscripción a otra para el objeto en cuestión.
- **Style tools:** Es usada para cambiar el estilo de cualquier elemento de la red.
- **View tools:** Se emplea para definir grupos y ajustar el zoom de la página.
- **Hierarchy tools:** Es usada para crear CP-nets jerárquicas. Soporta los dos métodos de modelado *top-down* y *bottom-up*. Se pueden mover transiciones a una subpágina, mover redes de una página superior, obtener una página para una transición sustituta, asignar puertos y fusionar lugares.

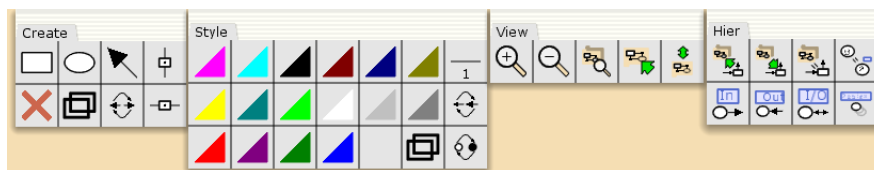


Figura 6: Herramientas para editar CP-nets

Herramientas adicionales

- **Net tools:** Empleada para abrir, salvar e imprimir CP-nets. En contraste con Design/CPN, múltiples CP-nets pueden ser abiertas, editadas y simuladas al mismo tiempo. Cada página de una CP-net puede ser salvada como archivo *Encapsulated Postscript(EPS)* usando la herramienta Print
- **History:** Provee un resumen de las operaciones que son ejecutadas durante la construcción de una CP-net

- **Help:** Provee acceso a páginas web relacionadas con CPN Tools. Esto incluye la página oficial de CPN Tools, y una página web para reportar *bugs* de la red

La Figura 7, muestra un ejemplo de una página salvada como archivo EPS.

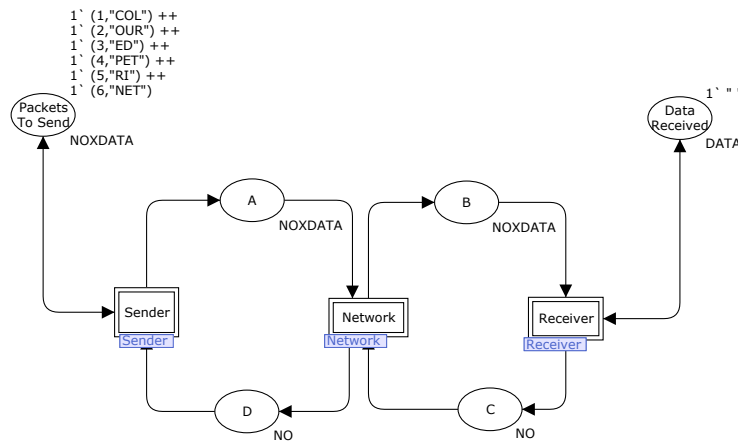


Figura 7: CP-net exportada en formato EPS

Herramientas para analizar CP-nets

CPN Tools soporta dos tipos de análisis para las CP-nets: simulación y *state space*, en la Figura 8 se muestran las herramientas empleadas para estos análisis.

- **Simulation Tools:** Empleada para simular la red. Las opciones que ofrece esta herramienta son: devolver la simulación a su estado inicial, detener la simulación, asignar valores manualmente para observar la simulación paso a paso, disparar una transición, disparar un número específico de transiciones y evaluar código ML
- **State Space Tools:** Permite calcular y mostrar los espacios de estado, generar reportes, así como mostrar los nodos predecesores y sucesores



Figura 8: Herramientas para analizar CP-nets

1.4. Análisis de las metodologías para la modelación y simulación de sistemas

Construir un modelo que estime la fiabilidad de los resultados es una tarea compleja. Por consiguiente, para que los modelos sean un instrumento eficaz de ayuda a la toma de decisiones deben poder ser construidos y analizados de manera poco costosa. Pero su uso está condicionado por la metodología que se utilice para la modelización. Existen diferentes metodologías para modelizar sistemas, que varían en cuanto a su alcance y efectividad.

Al consultar la bibliografía científica referente al campo de la modelación y simulación de sistemas ((Schmidt y Taylor, 1970), (Caselles, 1993a), (Law y Kelton, 2000), (Ruiz-Usano, Framiñán, Crespo, y Muñoz, 2001), (Tarifa, 2002), (Himmelblau y Bischoff, 2003), (Narciso Farias y cols., 2004), (Azarang y García, 2006), (Taha, 2007), (Jiménez, Pérez, y Sanz, 2010)), se identifican como limitantes principales: primero, la no existencia de un procedimiento estructurado (con fases, etapas, pasos, tareas) que sirva de guía al investigador y segundo, la no homogeneidad en los pasos a seguir.

A consideración de la autora esto puede obedecer al hecho de que la aplicación de la simulación combinada con las diferentes clases de estudio que se pueden realizar conduce a una gran cantidad de variantes en cuanto a la forma en que se puede realizar un estudio de esta naturaleza. Tomando en cuenta lo anterior, se procedió a analizar las propuestas de los autores anteriormente citados. Se conformó una tabla comparativa de los enfoques, estableciendo como criterios de análisis las características siguientes:

- Pasos definidos en cada una de las metodologías analizadas
- Descripción de cada uno de los pasos

La matriz conformada se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Metodologías para desarrollar estudios de simulación

Pasos	Contenido de los pasos por cada uno de los autores				
	Caselles (1993a)	Azarang y García (2006)	Taha (2007)	Barceló (1996)	Tarifa (2002)
Definición del problema	Identificar objetivos, restricciones, datos a manipular y resultados		Definir alcance del problema, alternativas de decisión, objetivo del estudio y limitaciones del sistema		Definir: objeto de la simulación, resultados esperados, desarrollar el plan de experimentación y determinar las variables de interés y las perturbaciones a estudiar
Definición del sistema		Identificar objetivos, variables de decisión, las restricciones, la medida de efectividad y variables no controlables			Determinar las restricciones del sistema, las interrelaciones de las variables que interactúan en él y los resultados esperados
Análisis del sistema		Describir interacciones lógicas entre variables de decisión y las restricciones del sistema		Estudiar el contexto del problema, establecer los objetivos específicos del modelamiento y definir el sistema que se va a modelar	
Construcción del modelo	Elegir de los elementos que tienen relación con los objetivos propuestos, identificar relaciones causa-efecto entre los elementos seleccionados, representar funcionalmente las relaciones detectadas				
Formulación del modelo		Generar código lógico-matemático que defina interacciones entre las variables	Establecer relaciones matemáticas a partir de la problemática	Definir las variables que forman parte de sistema y sus relaciones lógicas. Describir el modelo gráficamente utilizando los diagramas de flujo	Desarrollar un modelo simple que capture los aspectos relevantes del sistema real y definir las relaciones de las variables que conforman el sistema

Tabla 3: Metodologías para desarrollar estudios de simulación. Continuación

		Contenido de los pasos por cada uno de los autores			
Pasos	Caselles (1993a)	Azarang y García (2006)	Taha (2007)	Barceló (1996)	Tarifa (2002)
Solución del modelo			Observar el comportamiento del modelo cuando experimenta algunos cambios de parámetro		
Colección de datos				Definir con claridad los datos que requerirá el modelo	Colectar los datos que se procesarán
Selección del lenguaje	Se selecciona el lenguaje que mejor se adecue a las necesidades de simulación que se requieren			Definir el lenguaje para procesar el modelo en la computadora y obtener los resultados deseados	
Programación del modelo	Programar el modelo	Programar el modelo			
Verificación				Comprobar si el modelo simulado se comporta de acuerdo a su diseño	
Validación del modelo	Determinar grado de ajuste entre sistema real y el modelo	Comparar resultados entre modelo simulado y sistema real	Se compara la salida del modelo simulado con datos históricos de salida del modelo real	Valorar las diferencias entre el funcionamiento del simulador y el sistema real que se está tratando de simular	
Diseño de experimentos	Diseñar los experimentos que se realizarán sobre el modelo				Decidir las características de los experimentos a realizar, el tiempo de simulación y el número de simulaciones a realizar
Realización de experimentos	Correr los experimentos en el modelo	Determinar alternativas a ser evaluadas, seleccionando las variables de entrada		Comprobar los datos generados con los deseados y realizar un análisis de sensibilidad de los índices requeridos	Realizar las simulaciones de acuerdo al diseño previo

Tabla 4: Metodologías para desarrollar estudios de simulación. Continuación

Pasos	Contenido de los pasos por cada uno de los autores				
	Caselles (1993a)	Azarang y García (2006)	Taha (2007)	Barceló (1996)	Tarifa (2002)
Interpretación				Interpretar los resultados obtenidos y tomar una decisión	Analizar la sensibilidad del modelo respecto a los parámetros que tienen asociados la mayor incertidumbre
Monitoreo y control		Actualizar periódicamente el modelo			
Presentación de resultados	Elaboración de gráficas, tablas				
Implantar solución		Llevar a la práctica la mejor alternativa			
Toma de decisiones	Tomar una decisión				

Basado en la matriz conformada, la autora de la presente investigación considera que es posible realizar una analogía entre los pasos definidos por los autores y las cuatro fases básicas del ciclo Deming: Planificar, Hacer(Ejecutar), Verificar(Controlar) y Actuar(Mejorar). A continuación se detallan como quedarían ubicados los pasos en cada una de las fases.

Los tareas definidas en los pasos: Definición del problema, Definición del sistema, Análisis del sistema, Construcción del modelo, están enfocadas principalmente en el proceso de planificación. Se realizan las tareas siguientes:

- Definir objeto de la simulación (sistema que se va a simular)
- Definir los objetivos, restricciones, variables de interés, datos a manipular, resultados esperados
- Definir elementos que serán incluidos en el modelo
- Desarrollar plan de experimentación

Las tareas contenidas en el pasos Formulación del Modelo y Programación del Modelo están enfocadas en el proceso de ejecución. Se realizan las tareas siguientes:

- Desarrollar el modelo basado en las variables identificadas
- Programar el modelo empleando un lenguaje de simulación

Las tareas contenidas en los pasos Verificación y Validación del Modelo están enfocadas en el proceso de Control o Verificación, valga la redundancia. Se realizan las tareas siguientes:

- Comprobar el nivel de ajuste entre el sistema real y el simulado
- Realizar experimentos

Por último las tareas del paso Monitoreo y Control, están enfocadas al proceso de mejora, pues realizando ajustes periódicos al modelo se garantiza que el mismo sea una aproximación cada vez mejor del sistema real.

Aunque no se han asociado los pasos de Interpretación, Presentación de los Resultados y Toma de decisión, la autora considera que estos son tres pasos imprescindibles en el proceso de análisis que hace el investigador con respecto al sistema simulado y que han de ser realizados una vez

que se ha validado el modelo y se han realizado los experimentos. Mientras que Caselles (1993a) señala que la simulación es un proceso secuencial, la autora considera que es un proceso iterativo donde el investigador se verá obligado a retroceder y avanzar en función del comportamiento del sistema simulado.

Procedimiento para la simulación de procesos productivos

Procedimiento para la simulación de procesos productivos

Como resultado de los análisis realizados en el capítulo anterior y las carencias detectadas, se propone un procedimiento para la modelación, simulación y análisis de sistemas productivos. El procedimiento consta de 4 fases, y en cada una de ellas se definen los pasos y tareas correspondientes. Se incluyen además las técnicas y herramientas a emplear según corresponda y se definen procedimientos específicos. En la Figura 9 se muestra una representación gráfica del procedimiento propuesto. A continuación, se realiza la descripción del mismo.

2.1. Fase I. Planificación

Objetivo: El propósito de esta fase es crear las condiciones para el desarrollo de la modelación, simulación y análisis del sistema. Se define qué se va a hacer, cómo se va a hacer, con qué se va a hacer y qué se espera obtener.

2.1.1. Etapa I. Definición del sistema

Objetivo: Definir objetivos del estudio y los elementos del sistema que serán considerados en el mismo.

Técnicas y herramientas a emplear: Revisión documental, trabajo en grupo.

La realización de esta etapa se sustenta en el procedimiento específico que se muestra en la Figura 10

2.1.1.1 Paso 1. Definir objeto y objetivos de la simulación

Descripción: Debe quedar claramente especificados los objetivos de la simulación y los resultados que se esperan obtener.

Tarea 1. Caracterizar la empresa

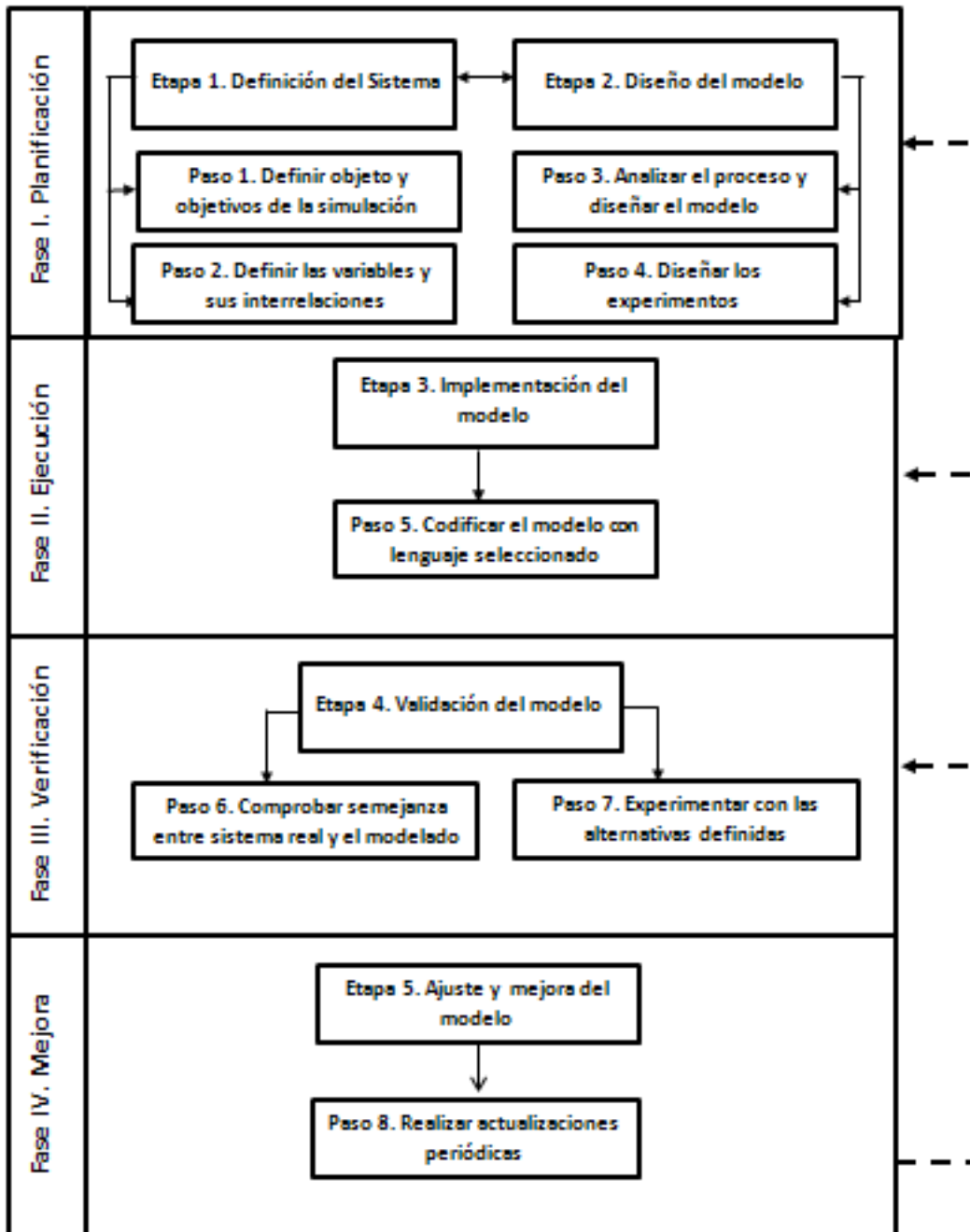


Figura 9: Procedimiento para la simulación de procesos productivos

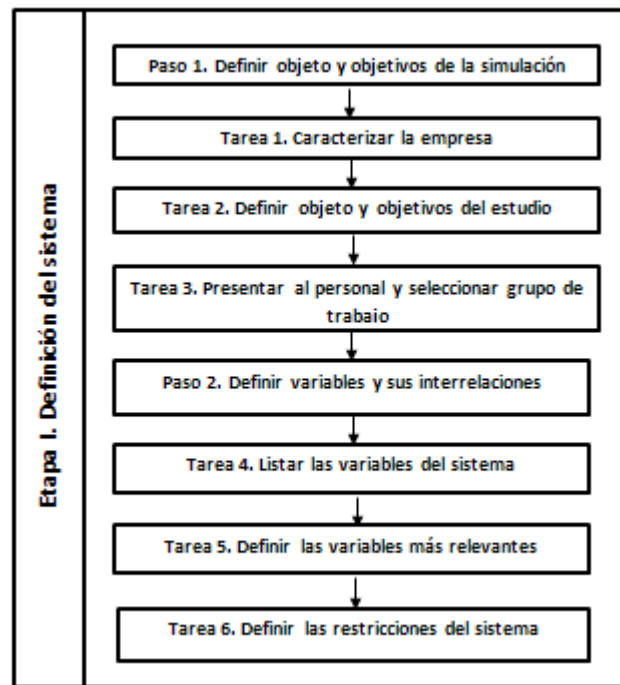


Figura 10: Etapa 1. Definición del sistema

Se realiza una caracterización de la entidad, que brinde una idea general acerca de la organización y su función como sistema.

Tarea 2. Definir objeto y objetivos del estudio

Los investigadores junto al grupo de trabajo, deberán decidir cual es el sistema o proceso que se desea analizar y cuales son los objetivos específicos del estudio. Los objetivos se definirán en base a los resultados que se esperan obtener, deben ser precisos, medibles y alcanzables.

Tarea 3. Presentar al personal y seleccionar grupo de trabajo

Se comunica a los trabajadores el estudio que se realizará en la entidad y la importancia del mismo. Con esta tarea se logra comprometer al personal con la investigación. Se seleccionará el grupo de trabajo para la realización del resto de las tareas.

2.1.1.2 Paso 2. Definir variables y sus interrelaciones

Descripción: Se definen los elementos del sistema real que se considerarán en el estudio.

Tarea 4. Listar las variables del sistema

Durante las sesiones de grupo, se identificarán las variables que intervienen en el sistema y se conformará una lista. Se debe extraer la mayor cantidad de variables posibles, garantizando que se considere la mayor cantidad de información.

Tarea 5. Definir las variables más relevantes

Luego de listadas las variables, se aplicará un instrumento para la búsqueda de consenso, lo cual asegurará que todas las variables a considerar en el modelo son las necesarias y relevantes para el estudio en cuestión.

Para aplicar el instrumento se debe hacer una selección de expertos. La selección partirá de la definición de las posibles personas a las cuales se les aplicará la encuesta (anexo 3). La cantidad de expertos debe oscilar entre 7 y 14 para mantener un nivel de confianza y calificación elevado (INC 49: 1981 "Control de la Calidad. Método de expertos"). Para la determinación de la cantidad de expertos se emplean métodos probabilísticos asumiendo una distribución binomial. Con este fin se emplea la expresión siguiente:

$$M = \frac{P(1 - P)K}{i^2}$$

donde:

M : cantidad de expertos

i : nivel de precisión deseado

P : proporción estimada de error de los expertos

K : constante cuyo valor está asociado al nivel de confianza elegido.

Los valores de K se relacionan en la Tabla 5 a continuación:

Tabla 5: Valores de la constante K. Fuente: Conzález Almaguer(2003)

Nivel de confianza (%)	Valores de K
99	6,6564
95	3,8416
90	2,6869

De igual forma se deben establecer los requisitos que deben cumplir los expertos, entre los que

se encuentran:

- disposición de la persona a participar en la encuesta: esto determina si la persona formará parte de los posibles expertos
- creatividad del experto: capacidad de resolver problemas originales
- capacidad de análisis y pensamiento: sobre todo, para la solución de problemas complejos
- propiedad de colectivismo: su ética en la discusión abierta influye en la creación de un clima psicológico positivo y en el éxito de la solución de problemas
- espíritu auto crítico: se observa en la valoración de su grado de competencia, en el análisis de problemas
- competencia: nivel de calificación en la rama del conocimiento objeto de indagación; lo cual no está totalmente en línea con su grado científico y labor o responsabilidad que desempeña. Se recurre a la autovaloración del propio experto y la valoración de otros.

Se propone emplear el método de concordancia de Kendall. En este caso se le solicitará a cada experto seleccionado, su criterio acerca de cada variable (ítem) analizada. El criterio puede ser ascendente (si se le otorga 1, al elemento más importante) o descendente (si se le otorga el mayor valor, al elemento más importante). Con la información obtenida sobre el criterio de cada experto, se confecciona la Tabla 6 que se expone a continuación:

Tabla 6: Información recopilada del criterio de los expertos

Ítems $i= 1 \dots, k$	Expertos $j=1 \dots m$					$\sum A_{ij}$	Δi	Δi^2
	1	2	3	4	5			
1								
2								
k								
						$\sum \sum A_{ij}$		

donde:

K : número de ítems analizados

m : número de expertos

A_{ij} : criterio sobre el ítem i del experto j

Luego de confeccionada la tabla se realizará el procedimiento de cálculo siguiente:

1. Cálculo del factor de comparación (T)

$$T = \frac{1}{k} \left\langle \sum_{i=1}^k A_i + \sum_{j=1}^m A_j \right\rangle$$

2. Cálculo de Δi y Δi^2

$$\Delta i = \sum_{i=1}^m A_{ij} - T$$

3. Cálculo del factor de concordancia

$$W = \frac{12 \sum_{i=1}^k \Delta i^2}{m^2(k^3 - k)}$$

Si $W \geq 0,5$ la opinión de los expertos concuerda y es confiable. Si $W < 0,5$ la opinión de los expertos no concuerda y no es confiable.

Seguidamente se construye el gráfico de la Figura 11. En dependencia del criterio elegido por los expertos, se seleccionarán los ítems más importantes. Si el criterio fue ascendente, los más significativos estarán por debajo de T y viceversa en caso contrario.

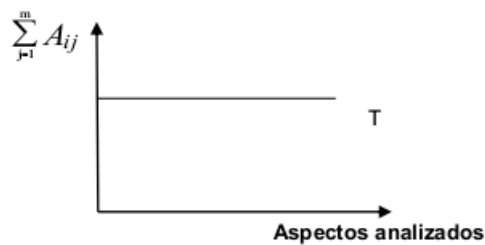


Figura 11: Gráfico para el análisis de los aspectos más importantes del problema

Tarea 6. Definir las restricciones del sistema

De acuerdo con Larousse, restricción es: "... Acción o resultado de restringir o reducir una cosa. Limitación o reducción en el uso o gasto de una cosa...". En el contexto de la presente investigación, se consideran restricciones aquellos elementos que pueden impedir o restringir el adecuado funcionamiento del sistema. La identificación de estas variables restrictivas, permitirá identificar los aspectos limitantes a considerar en el diseño del modelo.

2.1.2. Etapa 2. Diseño del modelo

Objetivo: Diseñar el modelo, definir los datos que se introducirán en el modelo y diseñar el plan de experimentos.

Técnicas y herramientas a emplear: Revisión documental, trabajo en grupo

2.1.2.1 Paso 3. Analizar el proceso y diseñar del modelo

Descripción: La finalidad de este paso es recopilar los datos que se introducirán en el modelo, para ello se tendrá en cuenta su estructura a partir de los aspectos relevantes del sistema.

Tarea 7. Describir el proceso a modelar

Se realizará la descripción del proceso que se desea modelar con el fin de conocer las entradas, transformaciones y salidas del mismo. De esta forma, el investigador tendrá una mayor comprensión del proceso y el modelo se ajustará más a la realidad.

Tarea 8. Diseñar el modelo basado en las características del sistema

Basado en las variables identificadas previamente, la forma en la que se realiza el proceso y las consideraciones del grupo de trabajo, se realizará un diseño del modelo. Este es un modelo simple, que recoge los elementos esenciales del sistema y será el punto de partida para su posterior codificación. Se diseñará usando la herramienta CPN Tools, estableciendo los lugares, transiciones y arcos de la CP-net. En caso de que se vaya a realizar una CPN jerárquica, se definirán los módulos correspondientes.

Tarea 9. Definir los datos que se introducirán en el modelo

A través del trabajo en grupo y entrevistas se identificarán los datos que se introducirán al modelo. Estos datos están asociados a las entradas, transformaciones y salidas del proceso, tales como: materias primas y cantidades específicas que entran al proceso, duración las actividades, etc. Los datos pueden ser de dos tipos:

- **datos determinísticos:** son datos que entrarán al modelo con su valor correspondiente en el sistema real

- datos probabilísticos: cuando el sistema tiene variables estocásticas. En este caso se empleará la generación de números aleatorios uniformes entre 0 y 1.

2.1.2.2 Paso 4. Diseñar plan de experimentos

Descripción: Se detallan las características del sistema que serán sujetas a la experimentación y el número de simulaciones a realizar.

Tarea 10. Establecer las variables objeto de experimentación

En relación con los objetivos definidos, el grupo de trabajo identificará a partir de las variables listadas cuáles responden a dichos objetivos. Estas variables, son las que pueden variar el comportamiento (salidas) del sistema. Hay dos clases de variables que deben ser tenidas en cuenta: las variables de escenario y las variables de control. Son variables de escenario o exógenas las que son determinadas por factores desconocidos o imprevisibles, y sobre ellas sólo se pueden hacer hipótesis sobre sus posibles valores o conjunto de valores. A las combinaciones de hipótesis sobre diferentes variables se les llamarán escenarios.

Las variables de control son aquellas cuyos valores pueden ser determinados por el usuario del modelo. Con la experimentación buscaremos aquellos valores óptimos o permisibles para las variables de control en cada uno de los escenarios más probables para las variables exógenas.

Tarea 11. Diseñar plan de experimentos

Una vez identificadas las variables objeto de experimentación, se elaborará el plan de experimentos. En dicho plan, se especifican el número de simulaciones (réplicas) que se realizarán y el tiempo de las simulaciones

2.2. Fase II. Ejecución

Objetivo: Esta fase consiste en el desarrollo de las actividades que fueron planificadas anteriormente. Es una fase de vital importancia pues a partir de ella es que se realizarán los análisis correspondientes.

2.2.1. Etapa 3. Implementación del modelo

Objetivo: El objetivo de esta etapa es agregarle funcionalidad del sistema. Esto consiste en la programación de la CP-net, para poder realizar la simulación.

Técnicas y herramientas a emplear: Trabajo en grupo, CPN Tools, CPN ML.

2.2.1.1 Paso 5. Codificar modelo

Descripción: La codificación del modelo se realizará empleado el lenguaje CPN ML. Se especificarán los elementos esenciales de la CP-net: colores, variables, nodos, arcos, *guards* y las expresiones de los arcos.

2.3. Fase III: Verificación

Objetivo: Esta fase tiene como objetivo verificar que el modelo simulado es una aproximación aceptable del sistema real. Si el sistema es válido, se podrán hacer experimentos y tomar decisiones basadas en los resultados del modelo, de lo contrario se deberá volver a la Fase II.

2.3.1. Etapa 4. Validación del modelo

Objetivo: El objetivo de esta etapa es validar el modelo desarrollado en la etapa anterior para poder tomar decisiones basadas en los resultados obtenidos con el mismo.

3.1.1 Paso 6. Comprobar semejanza entre el sistema real y el modelado

Descripción: La comprobación del modelo se realizará mediante el análisis de los resultados obtenidos con la simulación y los datos existentes en registros históricos.

Tarea 12. Comparar datos reales con datos simulados

La comparación entre los datos reales y los simulados no es un proceso sencillo. Law y Kelton (2000) proponen dos alternativas de inspección, análisis de intervalos de confianza basados en datos independientes, y análisis de series cronológicas.

Suponiendo que $\{R_1, R_2, \dots, R_n\}$ son las observaciones del sistema real y $\{M_1, M_2, \dots, M_n\}$ las procedentes del modelo de simulación, la primera idea a la hora de determinar si el mo-

delo es una representación lo suficientemente aproximada al sistema real es utilizar uno de los test estadísticos clásicos (Mann-Whitney, Chi-cuadrado, Kolmogorov- Smirnov, etc.) para determinar si se puede considerar que las dos muestras proceden de la misma distribución.

Según Barceló (1996) los resultados de una simulación y del sistema real, están autocorrelacionados y no son estacionarios, lo que impide la aplicación directa de cualquiera de los test antes mencionados. En su lugar, la práctica de la simulación propone comparaciones directas de las medias, variancias, funciones de correlación, etc., sin recurrir a ningún procedimiento estadístico formal. Law y Kelton (2000), proporcionan una alternativa a esta situación, la que denominan inspección correlacionada. Esta alternativa permite apreciar mejor la adecuación entre el modelo de simulación y el sistema modelizado. El procedimiento se muestra en la Figura 12

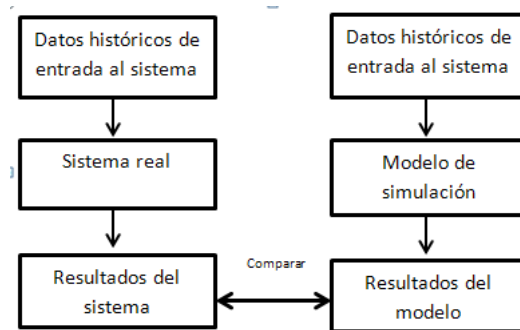


Figura 12: Procedimiento de inspección autocorrelacionada

3.1.2 Paso 7. Experimentar con las alternativas definidas

Descripción: La experimentación del modelo se realizará empleado el lenguaje CPN ML. Para ello se modificarán diferentes variables del modelo para observar el comportamiento del sistema frente a las desviaciones.

Tarea 13. Experimentar con las alternativas definidas

Una vez que el sistema ha sido validado, se procederá a experimentar con las alternativas definidas, modificando las variables existentes en el modelo. Dichas experimentaciones, indicarán el comportamiento del sistema frente a las variaciones. En general las respuestas generadas

mediante los experimentos servirán de soporte a una decisión racional sobre el sistema, por lo que las respuestas deben estar expresadas numéricamente, en términos de los valores de las variables de respuesta que representen las medidas de la utilidad, o del rendimiento esperado.

2.4. Fase IV: Mejora

Objetivo: Esta fase tiene como objetivo realizar ajustes periódicos al modelo, garantizando que exista mayor similitud entre el sistema real y modelo desarrollado.

2.4.1. Etapa 5. Ajuste y mejora modelo

Objetivo: El objetivo de esta etapa es ajustar y mejorar el modelo realizado. Dada la naturaleza cambiante de los sistemas, se debe ajustar continuamente el modelo para que siga siendo una aproximación del sistema real.

3.1.1 Paso 8. Realizar actualizaciones periódicas

Descripción: Este es un paso que solo se realizará cuando sea necesario. No está contemplado para realizarse recién concluido el estudio, sino para que en casos de realizarse cambios en el sistema real, entonces se deberán realizar ajustes al modelo.

Es menester señalar que aunque no se ha contemplado en el procedimiento una etapa dedicada al proceso de análisis y toma de decisiones, este es un proceso inherente al estudio realizado. Luego de realizadas las experimentaciones, basado en los resultados obtenidos, el grupo de trabajo elaborará un plan de acción, con las alternativas de decisión.

Aplicación del procedimiento
propuesto en la UEB Combinado
Lácteo Santiago de Cuba

Aplicación del procedimiento propuesto en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba

En las investigaciones científicas resulta necesaria la aplicación experimental en objetos de estudio práctico que permitan comprobar la factibilidad y efectividad de las soluciones propuestas al problema científico planteado. En este capítulo se exponen los resultados de la aplicación general del procedimiento propuesto, en la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba.

3.1. Fase I. Planificación

3.1.1. Etapa 1. Definición del sistema

Paso 1. Definir objeto y objetivos de la simulación

Tarea 1. Caracterización de la empresa

A través de la revisión documental se pudieron establecer las características de la organización. La UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba, ubicada en el poblado El Caney del Municipio Santiago de Cuba con dirección actual: Carretera del Caney Km $2^{1/2}$ Ducureaux, se subordina a la Empresa de Productos Lácteos Santiago de Cuba (LACSA) y pertenece al Ministerio de Industria Alimentaria (MINAL). Surgió en 1973 por la necesidad de cubrir la demanda del Municipio, ya que todo el peso de la producción láctea en ese momento había recaído en la antigua Fábrica de Hicacos la que producía hasta 60 000 L de leche pasteurizada al día, cantidad insuficiente teniendo en cuenta que su distribución era diaria y abarcaba todo el municipio.

Al inicio se dedicaba a la producción y comercialización de leche pasteurizada, yogourt y leche para terneros, luego se comenzó a ampliar con la fábrica de mantequilla y la de queso crema y así sucesivamente llegó a la amplia gama de productos que se producen y comercializan en la actualidad.

Objeto social:

- Producir y comercializar de forma mayorista yogourt natural de diversos sabores en moneda nacional y divisas, según nomenclatura aprobada por el Ministerio de Comercio Interior.
- Producir y comercializar de forma mayoristas masa de queso, queso blanco, queso crema, queso fundido y crema untable en moneda nacional y divisas, según nomenclatura aprobada por el Ministerio de Comercio Interior.
- Producir y comercializar de forma mayorista chocolé, dulce de leche, natilla y mantequilla según nomenclatura aprobada por el Ministerio de Comercio Interior.
- Producir y comercializar de forma mayorista mezcla para helado, mezcla para batido y suero saborizado según nomenclatura aprobada por el ministerio de comercio interior.
- Producir y comercializar leche en bolsa y leche fortificada, para su distribución en la canasta básica, según nomenclatura aprobada por el ministerio de comercio interior.
- Producir y comercializar yogourt de diversos sabores para su distribución en las escuelas primarias y secundarias básicas según nomenclatura aprobada por el Ministerio de Comercio Interior.
- Prestar servicios de postventa en moneda nacional y divisas.
- Prestar servicios de transportación y distribución de los productos en las diferentes áreas de consumo.

Estrategia empresarial

En la UEB durante el proceso de planificación estratégica se formularon la misión y la visión, las cuales se muestran a continuación:

Misión:

Satisfacer la demanda del territorio mediante la producción y comercialización de productos elaborados a partir del procesamiento de la leche o la soya, para su distribución en la canasta básica, hospitales, escuelas, hogares de ancianos, empresas de gastronomía, turismo y otras organizaciones priorizadas de acuerdo a los planes establecidos por el gobierno, con la calidad

requerida y teniendo en cuenta los niveles de competitividad, partiendo de la disponibilidad de un capital humano calificado, capaz y con alto sentido de pertenencia.

Visión:

Somos una organización con una cultura empresarial establecida, producciones cada vez más limpias y una imagen corporativa que favorece la presencia y competitividad de nuestros productos en el mercado nacional partiendo del establecimiento de estructuras dinámicas y flexibles y de un capital humano calificado y comprometido.

Principales clientes

- MINAL
- Canasta Básica
- MINFAR
- MININT
- MINED
- MINSAP
- Cadena de tiendas (Empresa de Gastronomía Especializada)
- Poder Popular (Baconao / Villa Trópico)

Proveedores

- Cereales Santiago La Molinera
- Tecnoazúcar
- GEIA (Grupo Empresarial de la Industria Alimenticia)
- Mayorista de Alimentos Salinera Santiago

Competidores

- Combinado Lácteo Palma
- Combinado Lácteo Guamá

Tarea 2. Definir objeto y objetivos del estudio

La producción de yogurt de soya es uno de los procesos claves de la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba por lo que influye determinadamente en el cumplimiento de los objetivos de la misma. En el pasado año 2014 se reportó un incumplimiento del plan de producción de 2650,5 toneladas de yogurt de soya. Esta situación demuestra la ineficiencia de este proceso. La máxima dirección de la entidad, sugirió que se tomara como objeto de estudio, con el objetivo de evaluar el rendimiento del proceso, determinando si las capacidades productivas instaladas posibilitan el cumplimiento del plan de producción fijado y de no ser así, fijar uno nuevo, así como dotar a la empresa de alternativas de solución para los problemas que puedan surgir en el desarrollo del proceso.

Tarea 3. Presentación y selección del grupo de trabajo

Se realizó una reunión con los trabajadores de la Planta de Yogourt de Soya de la UEB Combinado Lácteo Santiago de Cuba, donde se les dio a conocer el estudio que se realizaría en la entidad, los objetivos del mismo y su importancia para los resultados futuros de la empresa. Este hecho permitió que los trabajadores se comprometieran con la investigación.

Mediante la revisión de documentos y entrevistas se evaluaron las características del potencial de personas y se seleccionaron los que poseían un alto compromiso con la organización, elevado dominio de los procesos de la entidad y una aceptable capacidad para el trabajo en grupo. El grupo quedó constituido por 7 personas (director, jefe de producción del primer turno, jefe de producción del segundo turno, cuatro obreros de amplia experiencia en la el proceso analizado).

Paso 2. Definir variables y sus interrelaciones

Tarea 4. Listar las variables del sistema

Durante las sesiones de trabajo se listaron todas las variables que inciden en el sistema. Quedaron en total recogidas 7 variables: número de equipos, número de trabajadores, cantidad de materiales e insumos que entran al proceso, duración de las actividades, capacidad de los equipos, estado técnico de los equipos y unidades producidas.

Tarea 5. Definir las variables más relevantes

Con el listado de las variables, se aplicó el método de Kendall siguiendo un criterio descendente, para detectar las variables relevantes del sistema. El procesamiento de los datos se muestra en la Tabla 7.

Tabla 7: Procesamiento del Kendall

Items	Experto 1	Experto 2	Experto 3	Experto 4	Experto 5	Experto 6	Experto 7	$\sum A_{ij}$	Δi	Δi^2
número de equipos	3	3	3	2	1	2	3	17	-11,142	124,163
número de trabajadores	2	1	1	3	3	3	1	14	-14,142	200,020
materiales e insumos	6	7	6	5	6	5	7	42	13,8571	192,020
duración de las actividades	7	5	5	6	4	7	4	38	9,857	97,163
capacidades productivas	5	6	4	7	7	6	5	40	11,857	140,591
estado técnico de los equipos	4	4	7	4	5	4	6	34	5,857	34,306
cantidad de unidades producidas	1	2	2	1	3	1	2	12	-16,142	260,591
								197		1048,857

Se procesó la información obtenida con el software SPSS versión 19, arrojando un coeficiente de Kendall (W) = 0.789. Como este valor es mayor que el patrón de comparación (0.5), se puede concluir que existe concordancia entre los expertos y por tanto es confiable.

El valor de T correspondiente es de 28,142. Al analizar la información obtenida, mostrada en las Figuras 13, 14 se identificaron como variables relevantes para el sistema: materiales e insumos, capacidades productivas, duración de las actividades y estado técnico de los equipos.

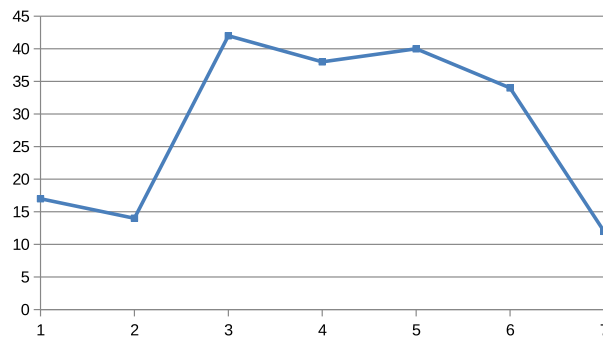


Figura 13: Gráfico de comparación con el valor de T

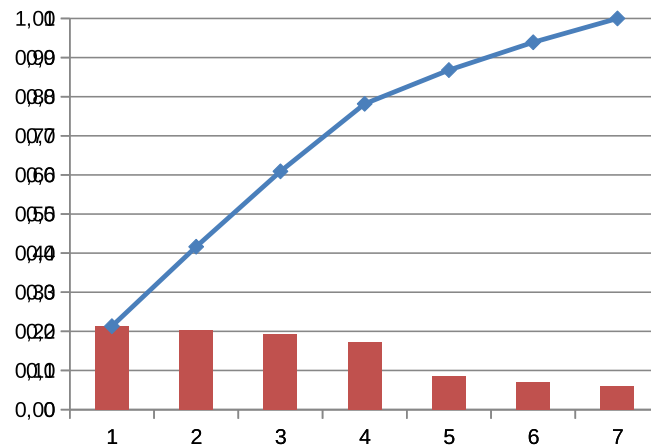


Figura 14: Gráfico de Pareto

Tarea 6. Definir las restricciones del sistema

Se definieron las restricciones del sistema, las cuales se exponen a continuación:

- Rotura del panel de control: pues imposibilita el control de la temperatura durante todo el proceso
- Deficiencias en el suministro de agua: se detiene el proceso completo, pues el agua forma parte del producto e incide directamente en el mismo
- Suministro de electricidad: el proceso está completamente automatizado
- Suministro de materias primas

3.1.2. Etapa 2. Diseño del modelo

2.1.2.1 Paso 3. Analizar el proceso y diseñar del modelo

Tarea 7. Describir el proceso a modelar

El proceso productivo de yogourt de soya está constituido por tres etapas fundamentales: Molienda, Fermentación y Envasado; además de dos subprocesos: Confección del Sirope y Confección del Cultivo.

Para darle inicio a la primera etapa (Molienda), es necesario que el Tanque de Abastecimiento de Agua con capacidad de almacenamiento de 5000 L (Tanque de H_2O 1), tenga un volumen de no menos de 4600 L, es por ello que esta etapa comienza con la verificación de este requisito, acción que realiza el jefe de Turno. Cuando se comprueba que este requisito se cumple, el Jefe de Turno, autoriza el llenado del Tanque de Bicarbonato de Sodio ($NaHCO_3$) y el Tanque Dosificador (TD), acciones que realizan 2 operarios en calidad de estibadores.

Una vez llenados los tanques, el Jefe de Turno indica al operador de la pizarra de control que puede comenzar el proceso. El operador de la máquina de control le da inicio al proceso abriendo la llave de paso del Tanque de Abastecimiento de Agua (Tanque H_2O 1) y encendiendo el Tornillo Sin Fin (TSF); una vez realizada esta acción, el agua se transporta a través de la tubería 1 hasta el TSF encendido.

El TSF está equipado con una doble capa de acero inoxidable por la que fluye vapor de agua lo que permite que el agua que se encuentra en su interior se caliente; para que esto ocurra en las calderas debe haber una presión de 7 atm. La temperatura del agua se comprueba en la pizarra de control y, cuando llega a $50^{\circ}C$, el operador de la pizarra de control, indica a un operario que suba al TD.

Cuando el agua se encuentra a $850^{\circ}C$, se abre automáticamente la válvula del tanque de $NaHCO_3$ al 0,5 %, este pasa por una tubería y cae en el TSF con agua a $850^{\circ}C$, disolviéndose, lo que convierte el agua en una disolución de $NaHCO_3$ al 0,01 %, cuando esto ocurre, el agua toma un color blanquecino, que es lo que indica al operario que se encuentra en el TD que debe abrir la llave del mismo. Una vez abierto el TD, este comienza a dosificar los granos de

soya al TSF. El TSF esté equipado con unas aspas estilo barrenos, que transportan el grano de soya hasta el Molino 1, en este proceso el grano pierde la cáscara, aumenta hasta tres veces su tamaño y adquiere un color blanquecino, convirtiéndose así en grano de cotiledón.

Por el diseño en pendiente del TSF, la solución de $NaHCO_3$ al 0,01 % y la cáscara de la soya caen por gravedad, en la Recolectora de Cáscara, se filtra el agua y que se dirige hasta el desagüe y se recolectan las cáscaras que son posteriormente recogidas y llevadas al contenedor de basura. Cuando el operador de la pizarra de control observa los primeros granos caer desde el TSF, enciende el resto del proceso, logrando así que el agua que cae por la tubería 1A al Molino 1 hidrate el proceso, y que este muele los granos. El agua y el grano molidos se convierten en una leche de soya gruesa, todavía con impurezas; en este proceso el grano molido aumenta el nivel del producto en 500 L.

Esa leche gruesa pasa por el Califactor que está equipado con una doble capa de acero inoxidable como la del TSF, donde se eleva la temperatura de la misma, para que este funcione correctamente es necesario que en la caldera haya una presión de 7atm. La leche de soya gruesa calentada, pasa a las Bombas de Pistón y estas la impulsan al Tubo de Retención (TDR). El TDR es un tubo en forma de resistencia eléctrica con un recubrimiento que impide la pérdida de calor de la leche gruesa impulsada por las Bombas de Pistón, en este recorrido, la leche tiene el tiempo necesario para eliminar tres enzimas existentes en la soya que son perjudiciales para la salud, este tiempo se regula por medio de un selector que se encuentra en la pizarra de control.

En la tubería de salida del TDR, se encuentra un Termómetro y una Válvula Diversora, si la leche gruesa no sale del TDR con $1500^{\circ}C$, la Válvula se cierra y devuelve el producto al Califactor a través de un tubería; si la temperatura es de $1500^{\circ}C$, la Válvula se abre e impulsa la leche al Tanque Desodorizador (TDe) en el que se eliminan los malos olores de la soya. Una vez desodorizada la leche de soya gruesa, cae por gravedad en el Molino 2 donde se muele nuevamente convirtiéndose en una leche de soya fina, homogénea y con cierto grado de arenosidad. Esta leche de soya fina pasa a través de la tubería 2 al Tanque Fermentador (TF).

Subproceso Producción del Sirope

Este proceso comienza con la transportación de agua y azúcar al Tanque de Pasteurización (TP). El TP está equipado con una doble capa de acero inoxidable por donde fluye vapor de agua, además cuenta con una paleta que agita la mezcla evitando que esta crezca a causa de la ebullición y se desborde. Cuando la mezcla de agua y azúcar adquiere una temperatura de 95°C, se le da un tiempo de retención a esa temperatura. Transcurrido ese tiempo se le agrega Sal Fina, $CaCO_3$ y Saborizante y Colorante que dependen del sabor del yogourt que se desea comercializar. El resultado de este subproceso es el Sirope que se adiciona al TF por la tubería 4 una vez que este se encuentra lleno hasta 4550 L.

Subproceso Producción del Cultivo

Este subproceso comienza cuando se transportan hacia la Cuba H_2O proveniente del (Tanque de H_2O 1) y Leche proveniente del (Tanque de Leche) que se encuentra situado encima del laboratorio del Cultivo. La Cuba está equipada con una doble capa de acero inoxidable por donde fluye, en dependencia de la operación que se desea realizar: vapor de H_2O , H_2O al tiempo o H_2O helada.

El subproceso continúa con la pasteurización de esta mezcla en la Cuba, operación para la cual es necesario abrir la llave de vapor de H_2O . Cuando la mezcla adquiere una temperatura de 95°C, marcada por el termómetro, se le da un tiempo de retención a esa temperatura, esto se regula por un cronómetro y cuando ha pasado el tiempo cronometrado, se cierra la válvula del suministro de vapor de H_2O y se abre la de H_2O al tiempo para refrescar la mezcla. Cuando el termómetro marca una temperatura de 45°C, se enciende el agitador para la inoculación del cultivo. Luego de este tiempo, se apaga el agitador y se deja en reposo la mezcla (coagulación).

Pasado el tiempo de coagulación, el tecnólogo y el técnico de laboratorio, toman una muestra del producto y la analizan, si el resultado de la prueba de acidez no se encuentra entre el 1-1.3 %, se deja en reposo nuevamente la mezcla (recoagulación) pasado el tiempo de recoagulación, se vuelve a tomar la muestra, si en esta ocasión se encuentra entre los parámetros de acidez requeridos, se procede al enfriamiento del cultivo, operación que realiza un operario cerrando la válvula de H_2O al tiempo y abriendo la válvula de H_2O helada, cuando el cultivo se ha enfriado se abre la llave de paso al TF lo que permite la transportación del cultivo por

la tubería 8 hasta dicho tanque.

La segunda y tercera etapas del proceso (Fermentación y Envasado) comienzan con la entrada de agua potable proveniente del Tanque de H_2O 2 y leche de soya proveniente del proceso de Molienda, al Tanque Fermentador (TF) de 5000 L, como este tanque está aforado, es posible controlar el proceso de llenado del mismo. Cuando el tanque tiene un volumen de 4550 L, se cierra la llave de paso que lo abastece de H_2O y leche de soya y se da la orden de abrir la tubería del Sirope que aumenta el volumen del producto en 200 L. Una vez el TF se encuentra lleno hasta 4750 L se procede al refrescamiento del producto, operación que se realiza mediante el flujo de H_2O al tiempo proveniente del Tanque de H_2O 1, cuando la temperatura del producto se encuentra a 45°C , se procede a la inoculación, que consiste en completar los 5000 L del tanque con el Cultivo y con el agitador homogenizar la mezcla para convertirla en yogourt.

Pasado el tiempo de inoculación se apaga el agitador y se coagula el yogourt, una vez coagulado, se toma una muestra y el tecnólogo y el técnico de laboratorio le realizan el test de acidez. Cuando la acidez no se encuentra entre el 0,4 y 0,52 % se recoagula nuevamente. Si se encuentra entre los parámetros se transporta a las Bombas de Pistón 2 las que lo impulsan a la Cortina de Enfriamiento (CdE) que lo enfría y transporta al Tanque Elevado (Televado) que lo distribuye uniformemente entre los cañones de envasado y se envasan en bolsas de yogourt de 916 g cada una. Los operarios de la máquina de envasado las ubican en la estera transportadora (ET) y esta las transporta hasta las neveras donde son almacenadas.

Tarea 8. Diseñar el modelo basado en las características del sistema

Se diseñó el modelo jerarquizado del sistema de producción (Anexo 3) y los modelos de los módulos correspondientes (Anexos 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10).

Tarea 9. Definir los datos que se introducirán en el modelo

En las sesiones de trabajo, a partir de las variables relevantes del sistema se definieron los datos que se debían introducir en el modelo (Anexo 11, 12). Se tuvieron en cuenta las operaciones, el consumo de materiales y el tiempo de cada operación.

2.1.2.2 Paso 4. Diseñar plan de experimentos

Tarea 10. Establecer las variables objeto de experimentación

Se establecieron como variables de experimentación: estado técnico de los equipos y duración de las actividades.

Tarea 11. Diseñar plan de experimentos

Se diseñó el plan de experimentación, el cual se muestra en la Tabla 8. Para su confección, se tuvieron en cuenta los datos históricos proporcionados por los jefes de producción. Se definieron como variables exógenas: rotura de la caldera (1h, 3h, 6h), fallos en la prueba de acidez, rotura de la estera transportadora y como variable de control la duración del ciclo productivo. Se definieron dos estrategias:

Estrategia 1: Introducir un nuevo cañón de envase

Estrategia 2: Eliminación de los tiempos de espera

Tabla 8: Plan de experimentación

Nombre del experimento	Número de simulaciones	Variable a observar
Rotura de la caldera (1h)	5	Duración del proceso hasta Tanque elevado
Rotura de la caldera (3h)	5	Duración del proceso hasta Tanque elevado
Rotura de la caldera (6h)	5	Duración del proceso hasta Tanque elevado
Fallo en la prueba de acidez	5	Duración del proceso hasta Tanque elevado
Rotura de la estera	5	Duración total del proceso

3.2. Fase II. Ejecución

3.2.1. Etapa 3. Implementación del modelo

2.2.1.1 Paso 5. Codificar modelo

A partir del diseño del modelo se realizó su codificación. En el Anexo 13 se muestran las definiciones de los colores, variables, lugares, transiciones, arcos, *guards* y las expresiones de los arcos. En la Figura 15 se muestra el modelo codificado. El resto de los modelos codificados se muestran en los Anexos 14, 15, 16, 17, 18, 19.

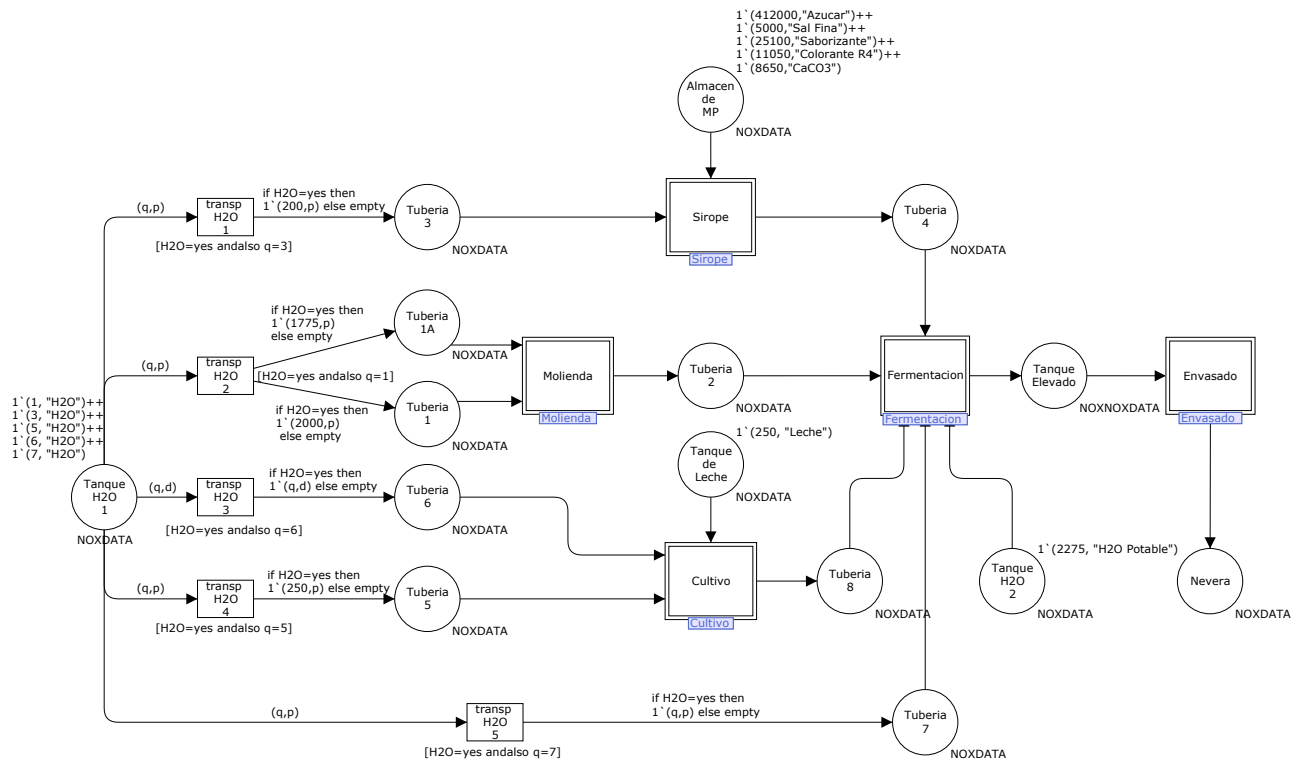


Figura 15: Modelo codificado

3.3. Fase III: Verificación

3.3.1. Etapa 4. Validación del modelo

3.1.1 Paso 6. Comprobar semejanza entre el sistema real y el modelado

Tarea 12. Comparar datos reales con datos simulados

Para la validación del modelo se empleó la inspección autocorrelacionada, realizando comparaciones entre las mediciones del sistema real y los datos arrojados por el simulador. Se validaron los valores de los parámetros de entrada, las distribuciones y los valores de salida tomando en consideración el sistema ideal. Se obtuvo una producción total de 30 t en un tiempo de 537 min para un turno de trabajo. Esto coincide con los datos consultados del sistema. Basado en estos resultados se puede afirmar que el sistema simulado es válido.

3.1.2 Paso 7. Experimentar con las alternativas definidas

Tarea 13. Experimentar con las alternativas definidas

Para establecer un rango de producción se establecieron un valor máximo, un valor mínimo y un valor medio. Como valor máximo, se tomó el volumen de producción obtenido con el sistema ideal, es decir, con el sistema funcionando sin desviaciones, obteniéndose un volumen de producción de 1 440 t al mes. Posteriormente, se realizaron modificaciones a los *guards* que condicionan las variables restrictivas del sistema. De esta forma se dio al sistema cierta aleatoriedad en su comportamiento, posibilitando la ocurrencia de fallos en el mismo. Se realizaron 48 réplicas del sistema bajo estas condiciones, obteniéndose un volumen de producción de 539 t, fijándose este como el valor mínimo. El valor promedio se obtuvo a partir de los valores máximo y mínimo fijados, obteniéndose un volumen de producción de 989,5 t al mes.

Posteriormente se realizó un análisis de estos valores, comparados con los datos del cumplimiento real mostrados en el gráfico 1. Se confeccionó el gráfico ?? y se verificó que en el año 2014 el volumen de producción fluctuó entre el valor mínimo y el valor promedio, exceptuando los meses de marzo y julio en los que ni siquiera se alcanzó el valor mínimo. Al realizar el análisis con los jefes de producción nos informaron que fueron en estos meses donde más afectaciones hubieron con el suministro agua, la entrega oportuna de las materias primas y el estado técnico de los equipos.

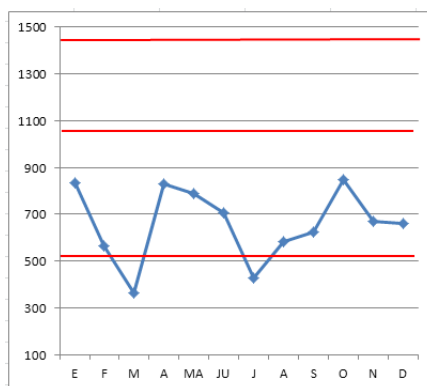


Figura 16: Comportamiento del plan de producción atendiendo a los límites definidos

Se evaluaron las estrategias definidas lo que posibilitó arribar a las siguientes conclusiones. Al agregar un cañón de envasado solo se reduce el tiempo de producción en 20 min y la reducción de los tiempos de espera del proceso de cultivo y el TF1 bajo las condiciones actuales del sistema solo reduce el tiempo de salida del yogurt del TF1, lo que no incide en el tiempo total de la producción. Por estas razones se consideran que las estrategias definidas no son factibles. Luego de este análisis se llega a la conclusión de que el incumplimiento del plan de producción no está provocado por el diseño del sistema, sino por las restricciones físicas. Para lograr un aumento del volumen de producción sería necesario acometer las medidas siguientes:

1. Valorar la posibilidad de conectar el suministro de agua
2. Realizar un análisis y selección de los proveedores de la entidad con el fin de garantizar la entrega oportuna de los suministros
3. Adquirir una nueva caldera y una nueva estera transportadora

Conclusiones

1. La revisión bibliográfica para la elaboración del marco teórico referencial de la investigación permitió demostrar que la simulación constituye una poderosa herramienta de apoyo a las decisiones, pero se evidencian carencias en las metodologías para llevar a cabo estudios de esta naturaleza
2. El software CPN Tools demostró ser una valiosa herramienta para la modelación y simulación de procesos productivos mediante Redes de Petri Coloreadas
3. El procedimiento general desarrollado posibilita realizar de manera efectiva la modelación y simulación de procesos productivos, constituyendo una herramienta de apoyo al proceso de toma de decisiones
4. La comparación entre los datos históricos de la entidad y los datos arrojados por el simulador corroboraron la validez del modelo desarrollado
5. El incumplimiento del plan de producción no está asociado al diseño del sistema, sino a las restricciones que en el mismo se presentan

Recomendaciones

1. Presentar los resultados de la investigación en sesiones científicas y en el Fórum de ciencia y técnica.
2. Continuar trabajando en el perfeccionamiento del modelo desarrollado en aras de lograr una similitud mayor entre el sistema real y el simulado.
3. Valorar la posibilidad de incluir algoritmos de optimización en el modelo desarrollado.

Bibliografía

- Ackoff, y Sasieni. (1994). *Fundamentos de la investigación de operaciones*. México: Limusa.
- Asencio, J., y Kalifa, K. (1994). *Metodología para la toma de decisiones en un entorno competitivo en los modelos de producción - transporte* (Tesis Doctoral no publicada).
- Azarang, M., y García, E. (2006). *Simulación y análisis de procesos estocásticos* (M. G. Hill, Ed.). México.
- Barbara Romero, S., y Pomerol, J. (1997). *Decisiones multicriterio. fundamentos teóricos y utilización práctica. colección de economía*. Universidad de Alcalá, Madrid.
- Barceló, J. (1996). *Simulación de sistemas discretos*. Madrid.
- Benítez Riech, G., y Cruz González, V. (2002). Cuba: un análisis de la actividad económica de la industria alimentaria. *AGROALIMENTARIA*.
- Caselles, A. (1993a). Systems decomposition and coupling. cybernetics and systems. *International journal*.
- Chávez Saldaña, O. (2012). *La importancia de la investigación de operaciones en la toma de decisiones*.
- Domínguez Manchuca, J. A. (1994). *Dirección de operaciones. aspectos tácticos y operativos* (S. A. Editorial Ariel, Ed.). Barcelona, España.
- Gaither, N., y Frazier, G. (2000). *Administración de producción y operaciones* (E. I. Thomson, Ed.). México.
- Hicks, J. (1993). *Management information system: A user perspective*. London: West Publishing.
- Hillier, F. S., y Lieberman, G. J. (1997). *Introducción a la investigación de operaciones* (4ta ed.; M. H. I. E. S.A, Ed.). México.
- Himmelblau, D. M., y Bischoff, K. B. (2003). *Análisis y simulación de procesos* (Reverte, Ed.).
- Jensen, K. (1991). *Coloured Petri nets: A high level language for system design and analysis*. Springer. Descargado 2015-05-08, de http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-53863-1_31
- Jensen, K. (1994). *An introduction to the theoretical aspects of coloured petri nets*. Springer. Descargado 2015-05-08, de http://link.springer.com/chapter/10.1007/3-540-58043-3_21
- Jensen, Kurt. (1992). *Coloured petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use* (Vol. 1). Springer.
- Jensen, Kurt. (1994). *Coloured petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use* (Vol. 2). Springer.
- Jensen, Kurt. (1997). *Coloured petri nets: Basic concepts, analysis methods and practical use* (Vol. 3). Springer.

- Jiménez, E., Pérez, M., y Sanz, F. (2010). Modelado y simulación de sistemas logísticos y de producción mediante redes de petri. *RIAI*, 2(4), 39–53. Descargado 2015-05-19, de <http://recyt.fecyt.es/index.php/RIAI/article/viewArticle/10449>
- Krajewski, L. J., y Ritzman, L. P. (2000). *Administración de operaciones. estrategia y análisis* (5ta ed. ed.; P. Education, Ed.). México.
- Kurtenbach, G., y Buxton, W. (1994). User learning and performance with marking menus. *Proceedings of Human Factors in Computing Systems*.
- Law, A. M., y Kelton, W. D. (2000). *Simulation modeling and analysis* (3ra ed.; M. Hill, Ed.).
- Marrero Delgado, F. (2001). *Procedimientos para la toma de decisiones logísticas con enfoque multicriterio en la cadena de corte, alza y transporte de la caña de azúcar. aplicaciones en cai de la provincia villa clara* (Tesis en Opción al Título de Doctor en Ciencias Técnicas). Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas.
- Milner, R., Tofte, M., Harper, R., y MacQuenn, D. (1997). *The definition of standard ml*. MIT Press.
- Moore, L. (1993). *Management science* (4ta ed.).
- Narciso Farias, M., Piera i Eroles, M. A., y Guash Petit, A. (2004). Optimización de sistemas logísticos mediante simulación: una metodología basada en redes de petri coloreadas. *XXV Jornadas de Automática*.
- Petri, C. A. (1962). *Kommunikation mit automaten* (Tesis Doctoral no publicada). Bonn: Institut fur Instrumentelle Mathematik, Schriften des IIM.
- Pérez López, J. F. (2004). *Aplicación de un algoritmo genético generacional para un problema de logística de ruteo con entrega y recolección del producto y con ventanas de horario negociales*.
- Ramos, A., Sánchez, P., Ferrer, J. M., Barquín, J., y Linares, P. (2010). *Modelos matemáticos de optimización*. Madrid, España.
- Reisig, W. (1985). Petri nets: An introduction. *EATCS Monographs on Theoretical Computer Science*, 4.
- Render, B., y Heizer, J. (1996). *Principios de administración de operaciones*. México: Prentice Hall Hispanoamericana S. A.
- Romero, C. (1993). *Teoría de la decisión multicriterio: concepto, técnicas y aplicaciones* (A. Editorial, Ed.). Madrid.
- Ruiz-Usano, R., Framiñán, J. M., Crespo, A., y Muñoz, M. A. (2001). SIMULACIÓN CONTINUA Y DISCRETA DE UN SISTEMA DE PRODUCCIÓN CON INVENTARIO EN PROCESO CONSTANTE. En *IV Congreso de Ingeniería de Organización*. Descargado 2015-05-15, de <http://www.adingor.es/congresos/web/articulo/detalle/a/1584>
- Schmidt, J., y Taylor, R. (1970). *Simulation and analysis of industrial systems*. Richard D. Irwin.
- Shamblin, y Stevens. (1991). *Investigación de operaciones: un enfoque fundamental* (M. Hill, Ed.). México.

Taha, H. A. (2007). *Operations research: an introduction* (8va ed. ed.). Pearson Prentice Hall.

Tarifa, E. (2002). *Teoría de modelos y simulación. introducción a la simulación* (Inf. Téc.). México: Universidad Nacional de Jujuy.

Ullman, J. D. (1998). *Elements of ml programming*. Prentice Hall.

Anexo . Definiciones de la Investigación de Operaciones

Autores	Conceptos
Ackoff& Sasieni(1968)	La aplicación por grupos interdisciplinarios del método cuantitativo a problemas relacionados con el control de las organizaciones o sistemas a fin de que se produzcan soluciones que mejor sirvan a los objetivos de toda organización
Thierauf& Grosse(1997)	La utilización del método científico y un grupo interdisciplinario, a fin de representar las complicadas relaciones funcionales en modelos matemáticos para suministrar una base cuantitativa para la toma de decisiones, y descubrir nuevos problemas para su análisis cuantitativo
Moskowitz& Wright(1979)	Método científico aplicado a problemas y la toma de decisiones por la gerencia
Shamblin y Stevens(1991)	Es un enfoque científico de la toma de decisiones
Winston(1994)	Planteamiento científico a la toma de decisiones, que busca determinar como diseñar y operar mejor un sistema, normalmente bajo condiciones que requieren la asignación de numerosos recursos
Robbinson(1999)	La aplicación de métodos científicos en las decisiones y la gestión
Serra de la Figuera (2003)	Una forma científica de abordar los procesos de decisión
López Pérez(2004)	Un conjunto de conocimientos y técnicas que se utilizan para llevar a un organismo al logro de sus objetivos mediante la racionalización de sus recursos de operación
Guillermo Durán(2006)	La ciencia de la toma de decisiones
Guerra García(2007)	Procedimiento científico para tomar decisiones que comprenden en forma sistemática las diversas operaciones de los sistemas en las organizaciones
Andrés Ramos(2010)	La aplicación de métodos científicos analíticos avanzados en mejora de la efectividad en las operaciones, decisiones y gestión de una empresa
Chávez Saldaña(2012)	La aplicación del método científico en la solución de problemas en la empresa, cuyo enfoque es la modelación, es decir, crear modelos para representar los problemas y utilizar diferentes técnicas, como la programación lineal y el análisis de decisiones, para establecer la solución del mismo
García López(2012)	Uso de las matemáticas y los ordenadores para tomar decisiones racionales en la resolución de problemas
Salazar López(2013)	Un método científico para la resolución de problemas, la cual brinda las herramientas suficientes para que con base en abstracciones de la realidad se pueden generar y resolver modelos matemáticos con el objetivo de elaborar un análisis y concluir de los mismos para así poder sustentar cuantitativamente las decisiones que se toman respecto a la situación problema

2. Realice una autovaloración sobre el grado de incidencia que ha tenido en su conocimiento cada una de las fuentes de información que se relacionan seguidamente. Marque con una X, según corresponda en Alto (A), Medio (M) o Bajo (B).

Fuente de conocimiento	Grado de influencia de las variables		
	Alto (A)	Medio (M)	Bajo (B)
Análisis teóricos realizados por usted			
Experiencia de trabajo en la actividad			
Trabajo de autores nacionales consultados			
Trabajo de autores extranjeros consultados			
Su propio conocimiento del estado del problema en el territorio y el país			
Su intuición			

Anexo 3. Modelos simples del sistema de producción de yogurt de soya

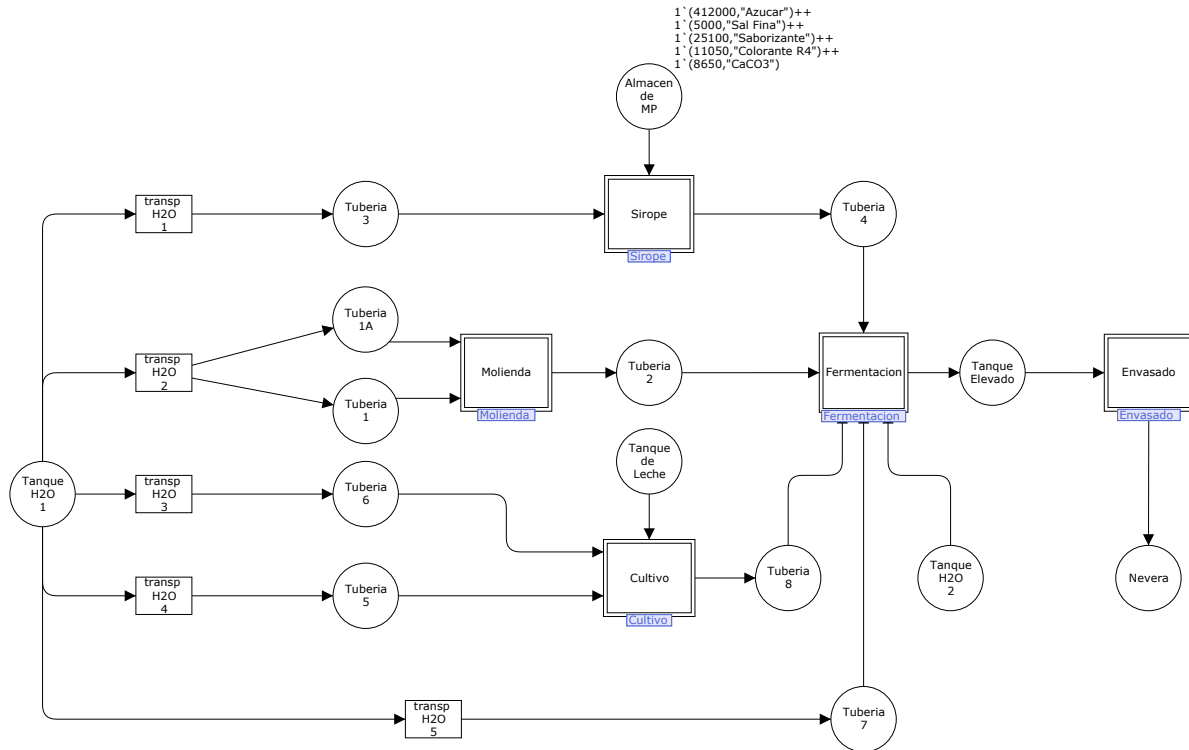


Figura 17: Modelo jerarquizado del sistema de producción

Anexo 5. Modelo simple del subproceso Producción de Sirope

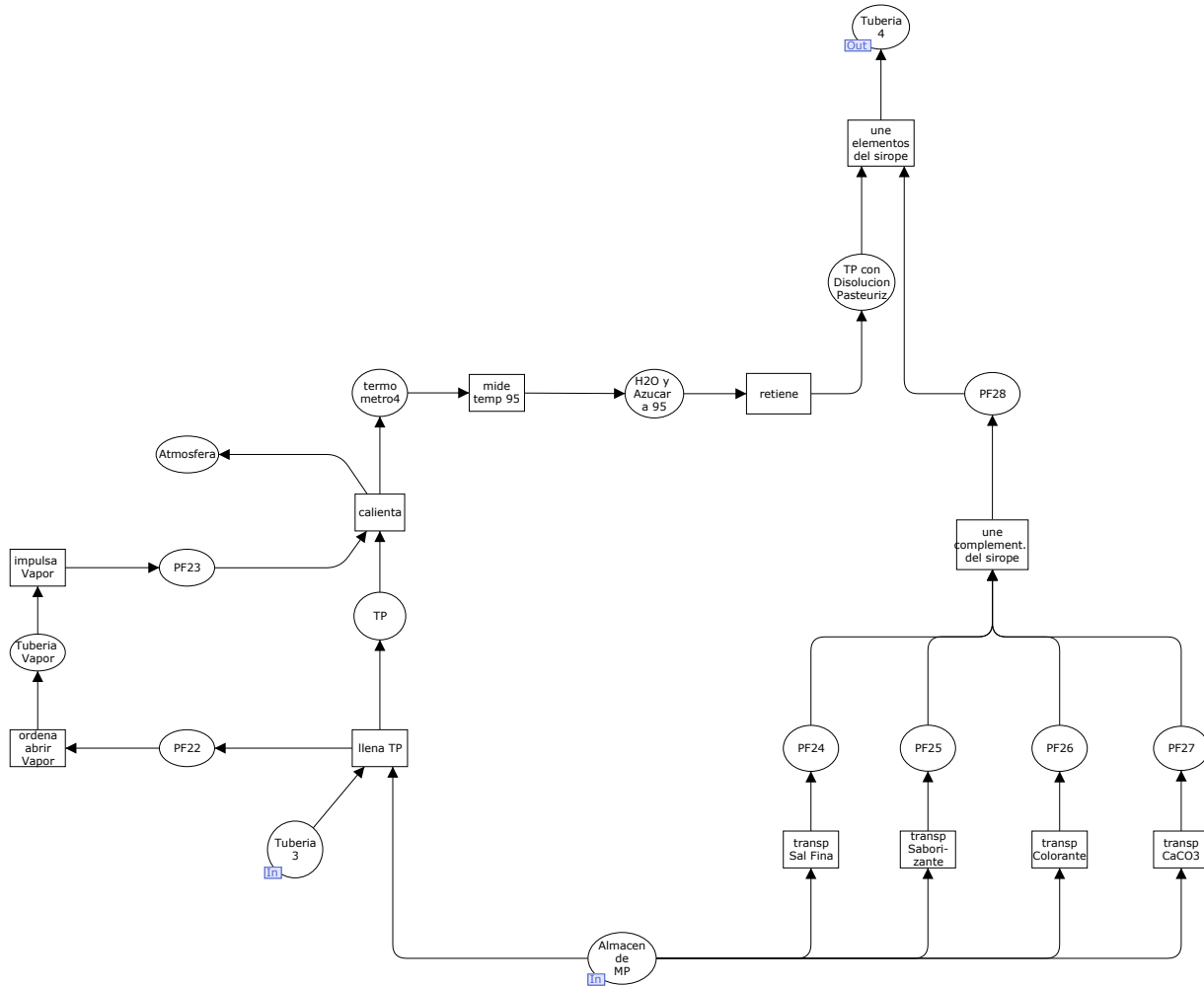


Figura 19: Modelo del subproceso Producción de Sirope

Anexo 6. Modelo simple del subproceso Producción de Cultivo

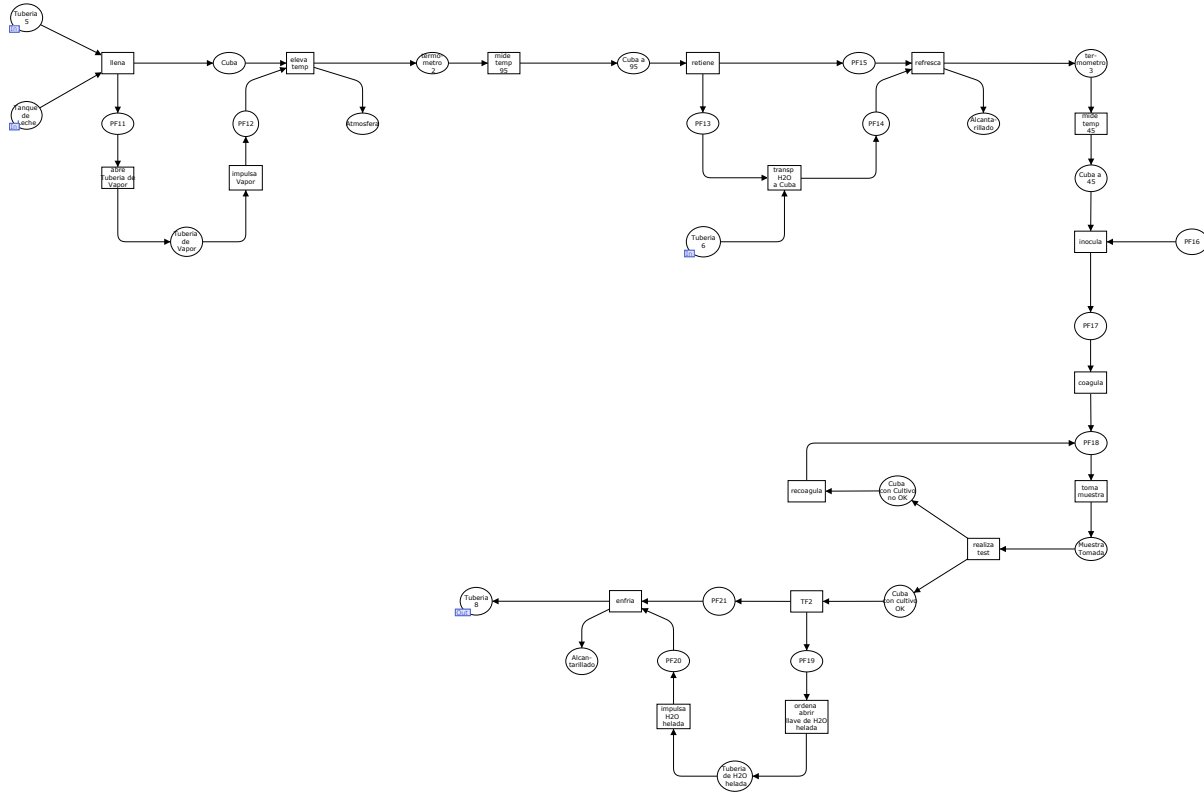


Figura 20: Modelo del subproceso Producción de Cultivo

Anexo 7. Modelo jerarquizado simple del proceso de Fermentación

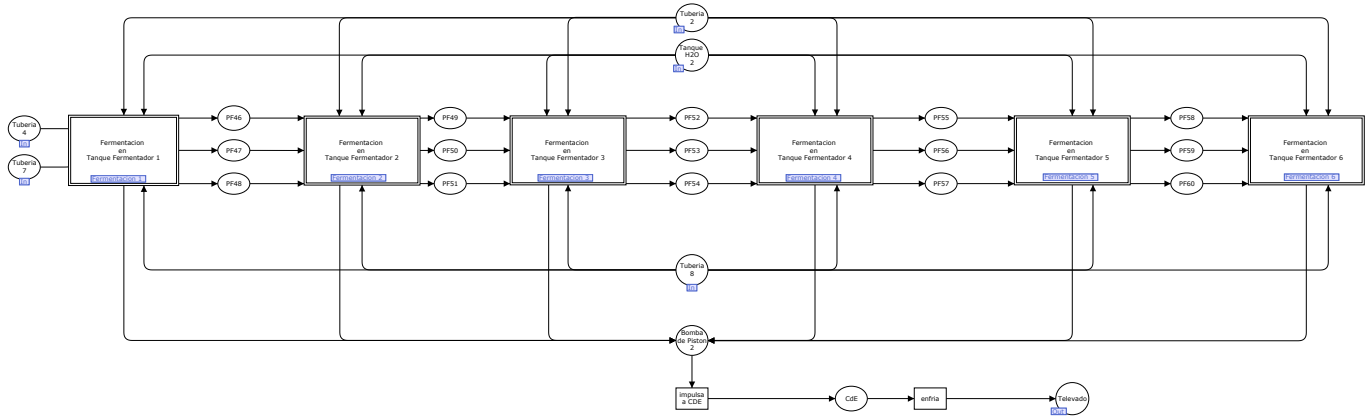


Figura 21: Modelo del proceso Fermentación

Anexo 8. Modelo simple del proceso de Fermentación del Tanque 1

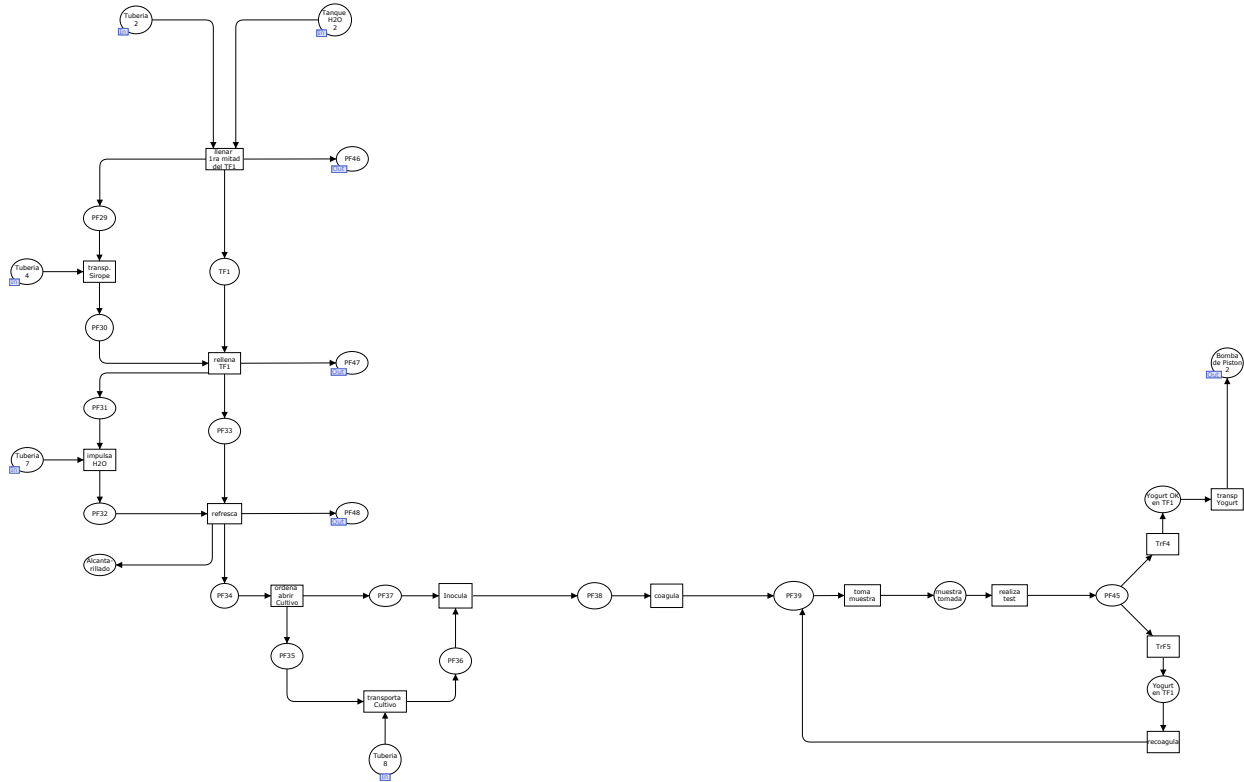


Figura 22: Modelo del proceso Fermentación del Tanque 1

Anexo 9. Modelo simple del proceso de Fermentación del Tanque 6

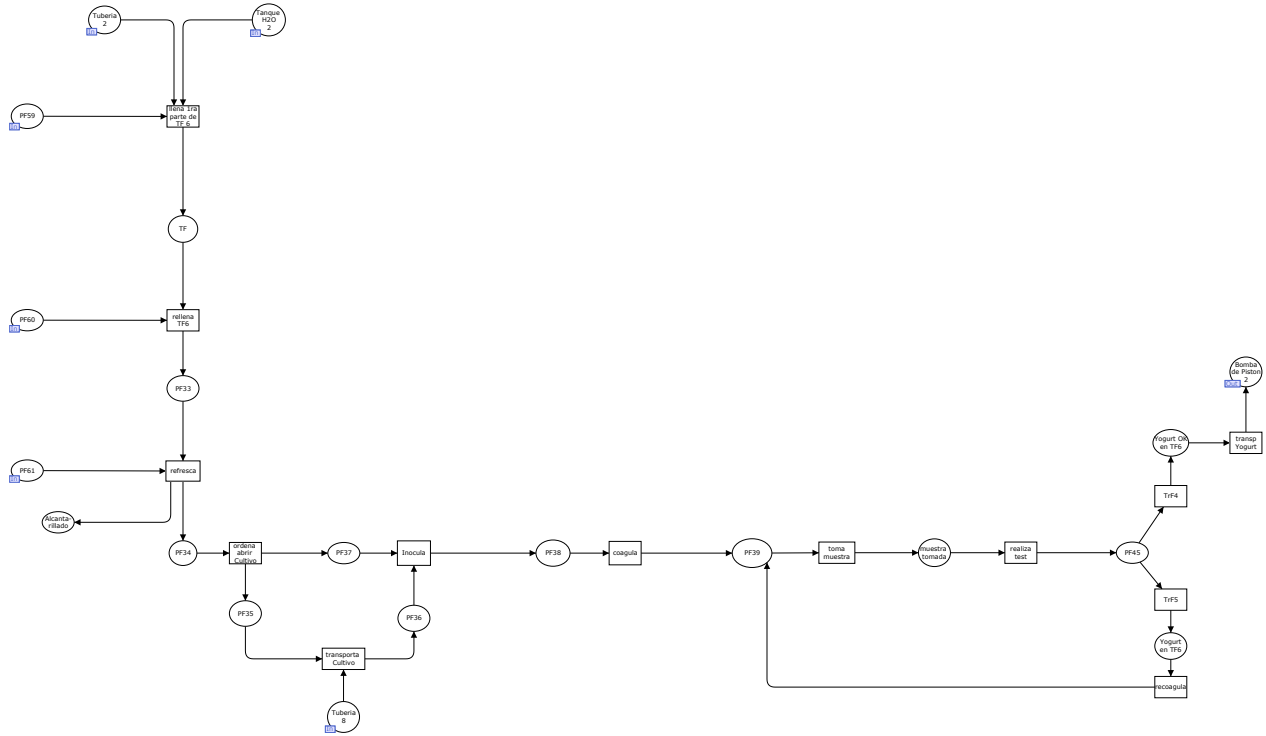


Figura 23: Modelo del proceso Fermentación del Tanque 6

Anexo 10. Modelo simple del proceso de Envasado

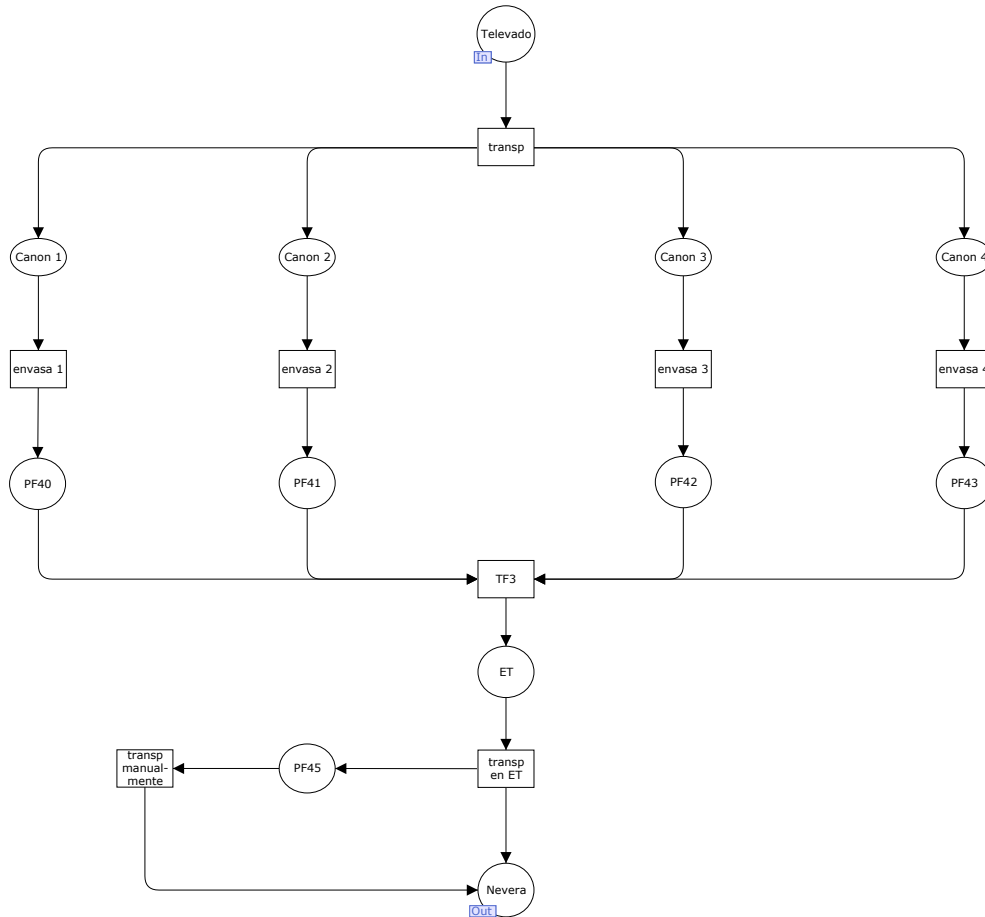


Figura 24: Modelo del proceso Envasado

Anexo 11. Consumo de materiales

Operación	Material	Cantidad
Molienda		
llenado del Tanque de NaHCO ₃	NaHCO ₃	13 830 g
llenado del TD	Soya	65 sacos de 50 000 g
llenado del TSF	H ₂ O	12 000 L
molienda 1	H ₂ O	10 650 L
Sirope		
llenado del TP	H ₂ O	200 L
llenado del TP	Azúcar	4 944 000 g
confección del Sirope	Sal Fina	60 000 g
confección del Sirope	CaCO ₃	103 800 g
confección del Sirope	Colorante	301 200 g
confección del Sirope	Saborizante	150 600 g
Cultivo		
llenado de la Cuba	Leche	425 L
llenado de la Cuba	H ₂ O	1 000 L
inoculación	Yogurt	75 L
Fermentación		
llenado de 1ra parte del TF	Leche de Soya	13 650 L
llenado de 1ra parte del TF	H ₂ O	13 650 L
rellenado del TF con Sirope	Sirope	1 200 L
inoculación	Cultivo	1 500 L

Anexo 12. Consumo de tiempo por operación

Operación	Tiempo
Molienda	
calentamiento a 85°C del H ₂ O en TSF	5 min
incorporación de NaHCO ₃	18 min
dosificación	1 028 377 g/6 min
extracción del cotiledón	10 min
molienda 1	10 min
elevación de la temperatura en Califactor	3 min/L
impulso de LdS por BdP	1 min/L
TdR	6 min/L
desodorización	5 min
molienda 2	10 min
Sirope	
llenado del TP	5 min
llenado del TP	5 min
retención	30 min
unir elementos	3 min
Envasado	
envasado	60 min
embalado	10 min
transportación a nevera	20 min
transportación a nevera (manual)	60 min
Cultivo	
llenado de la Cuba	5 min
elevación de la temperatura a 95°C	5 min
retención	30 min
refrescamiento hasta 45°C	10 min
transporta el cultivo	5 min
inoculación	20 min
coagulación	150 min
recoagulación	30 min
realización del test	5 min
enfriamiento	10 min
Fermentación	
llenado de 1ra parte del TF	30 min
rellenar TF con Sirope	5 min
refrescar hasta llevar a 45°C	5 min
inoculación	5 min
coagulación	150 min
realizar test	5 min
recoagulación	30 min
BdP impulsa yogurt a CdE	5 min
enfriamiento en CdE	10 min

Anexo 13. Codificación de algunos colores, variables y lugares

Colección de Colores	$\Sigma =$	{colset NO = int; colset DATA = string; colset NOXDATA = product NO*DATA timed; colset NOR= int with 0..10; colset BOOL = with success failure; colset NOXDATAXNOXDATA=product NO*DATA*NO*DATA timed; colset NOXNOXDATA= product NO*NO*DATA timed; colset DECISION=with yes no }
variables	Var=	var q: NOR; var n,k,x,v: NO; var p,d,y,z:DATA; var H2O: DECISION; var caldera: BOOL; var agita: BOOL; var test: BOOL; var PdC: BOOL; var transp: BOOL;
Lugares	P=	{Tanque de H2O 1; Tubería 3; Tubería 1A; Tubería 1; Tubería 6; Tubería 5; Tubería 7; Tubería 8; Tubería 2; Tubería 4; Tanque de Leche; Tanque de (H2O) 2; Almacén de MP; Televado; Nevera; PF1; Tubería de Vapor; PF2; TSF; Atmósfera; Termómetro 1; PF3; PF4; Tanque de NaHCO3; Tubería de NaHCO3; PF5; PF6; TD; PF7; PF8; PF9; Recolectora de Cáscara; Alcantarillado; Contenedor de Basura; Molino 1; Califactor; Bombas de Pistón; TdR; Válvula Diversora; TDe; Molino 2; PF11; Tubería Vapor; PF12; Cuba; Termómetro 2; Cuba a 95; PF13; PF14; PF15; Termómetro 3; Cuba a 45; PF16; PF17; PF18; Muestra tomada; Cuba Cultivo no OK; Cuba Cultivo OK; PF19; Tubería de H2O helada; PF20; PF21; PF22; Tubería Vapor; PF23; TP; Termómetro 4; H2O y Azúcar a 95; TP con disolución pasteurizada; PF24; PF25; PF26; PF27; PF28; PF29; PF30; Tanque Fermentador(TF); PF31; PF32; PF33; PF34; PF35; PF36; PF37; PF38; PF39; Muestra tomada; Yogurt en TF; Yogurt OK en TF; Bombas de Pistón 2; CdE; Televado; cañón 1; cañón 2; cañón 3; cañón 4; PF40; PF41; PF42; PF43; ET; Nevera; PF44}

Anexo 15. Modelo codificado del proceso de Sirope

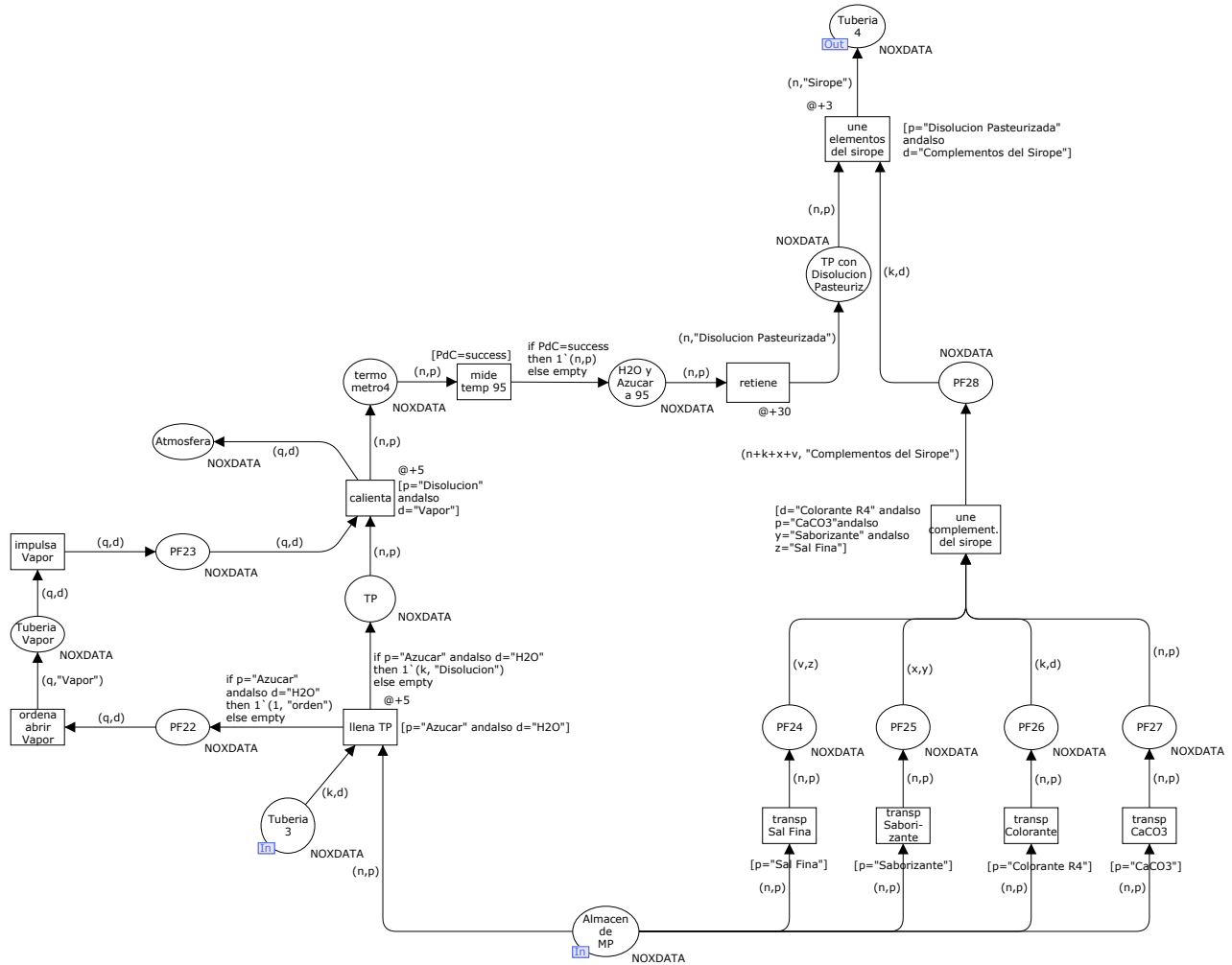


Figura 26: Modelo del proceso de Sirope

Anexo 16. Modelo jerarquizado codificado del proceso de Fermentación

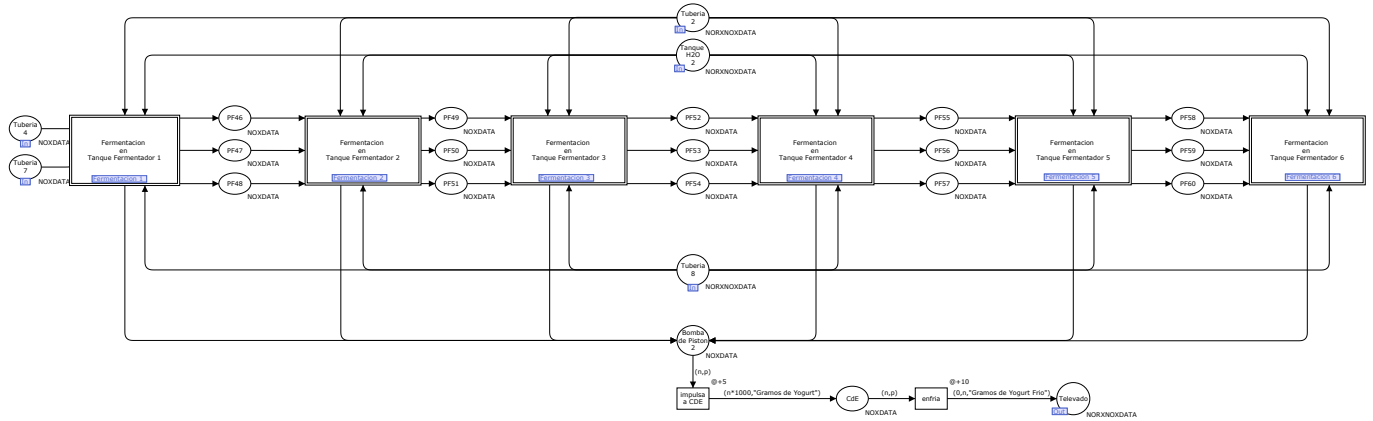


Figura 27: Modelo del proceso de Fermentación

